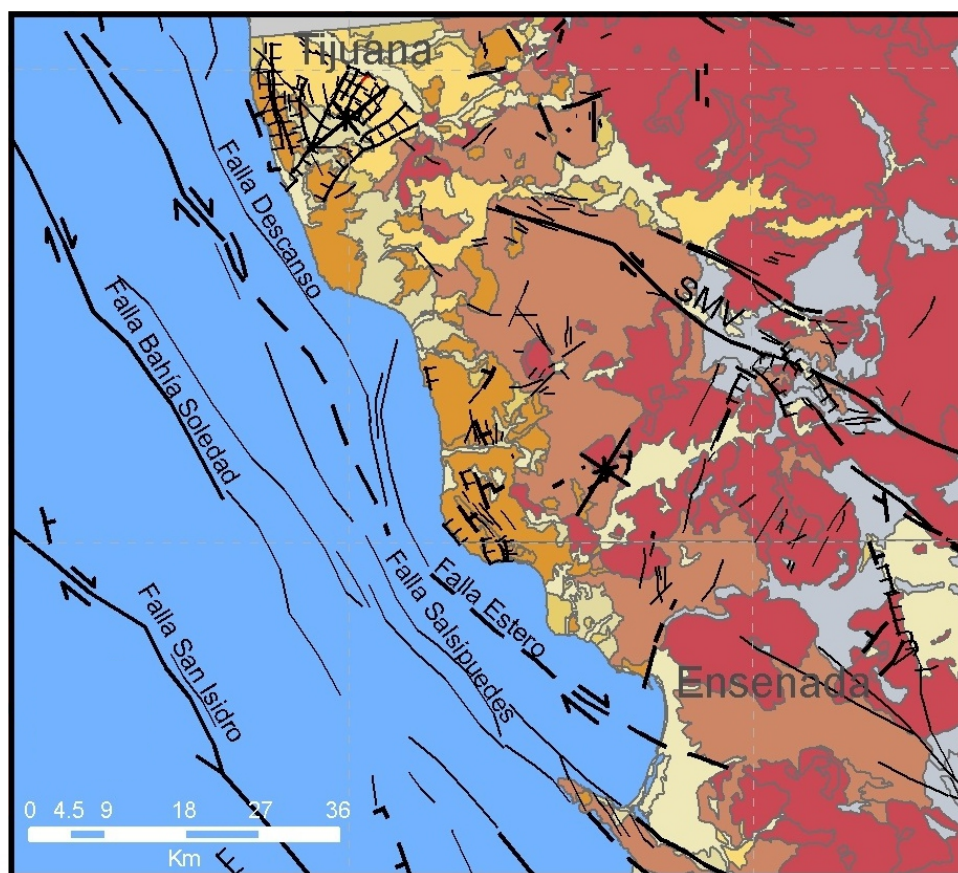


# Geofis



# 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 2012-2013

**Dr. Julián Adem Chain**  
Presidente Honorario

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

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

**Dr. Hector 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

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

**Dra. 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 Ledezma Vázquez, UABC  
Domitilo Pereyra, Universidad Veracruzana  
Francisco José Sánchez Sesma, UNAM  
Miguel Téllez, UABC  
Gustavo Tolson, UNAM  
Carlos Tolson, UNAM  
Carlos Suárez Plascencia, Universidad de Guadalajara

### Apoyo Técnico Editorial

Humberto S. Benítez Pérez  
Angel Daniel Peralta Castro  
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.

<b>EDITORIAL</b>	...220
<b>ARTÍCULOS DE INVESTIGACIÓN</b>	
<b>ESTIMACIÓN DEL PELIGRO SÍSMICO EN SITIOS CERCANOS A LA FUENTE SÍSMICA</b> Andrés Gama García, Alonso Gómez Bernal y Jorge Aguirre González	...221
<b>RASGOS GEOLÓGICOS Y MORFOLÓGICOS ASOCIADOS CON PELIGROS NATURALES EN LOS FRACCIONAMIENTOS EL VALLE Y HACIENDA ACUEDUCTO, TIJUANA, BAJA CALIFORNIA</b> Luis A. Delgado Argote, Gemma Gómez Castillo, Tomás A. Peña Alonso, Xóchitl G. Torres Carrillo y Porfirio Avilez Serrano	...244
<b>DIVULGACIÓN</b>	
<b>FACTORES QUE AFECTAN LA EDUCACIÓN EN GEOCIENCIAS EN MÉXICO Y COLOMBIA</b> John J. Sánchez, Rosa M. Chávez Dagostino, Francisco J. Núñez Cornú, Amilcar Cupul Magaña, Carlos Suárez Plascencia y Elizabeth Trejo Gómez	...260
<b>EXPERIMENTOS DIDÁCTICOS EN RESISTIVIDAD DE CORRIENTE DIRECTA: ARREGLOS TETRAPOLARES EN UN MEDIO ESTRATIFICADO</b> Marco Antonio Pérez Flores, José Serrano Ortiz, Armando Calderón Moctezuma y Yunuhen Muñiz Gallegos	...268
<b>REPORTE</b>	
<b>RAYOS Y CENTELLAS Y LA XV OLIMPIADA DE CIENCIA DE LA TIERRA</b> Enrique Gómez Treviño	...276
<b>NOTA</b>	
<b>Tsunami, EL ÚLTIMO DE LOS TITANES</b> Modesto Ortiz Figueroa	...286
<b>COMUNICACIONES</b>	
<b>POLÍTICA EDITORIAL</b>	...287





## La percepción de los riesgos geológicos

La percepción de la sociedad acerca de los riesgos naturales cambia con el tiempo. El reflejo de este cambio se puede medir en el número de trabajos sobre esos temas que se presentan en las reuniones especializadas en geociencias, en particular, en las de la Unión Geofísica Mexicana. De la misma forma, los trabajos relacionados con los riesgos cada vez se agrupan en temas más concretos y dependiendo de las amenazas. Por ejemplo, se analizan por separado los fenómenos de origen geodinámico externo (inestabilidad estratigráfica y estructural de taludes, inundaciones, dinámica litoral, expansividad del terreno, etc.) o interno (vulcanismo y sismicidad), así como los fenómenos de origen meteorológico (lluvia y nieve, huracanes, ciclones, etc.) volcánico, sismológico, hidrometeorológico, geológico (estratigráfico y estructural), y cómo los agentes antrópicos pueden jugar un papel importante en la delimitación de las zonas de riesgo.

Si partimos de la definición de riesgo como el producto de la probabilidad de ocurrencia de un peligro por el valor del daño (integrando los parámetros de amenaza, vulnerabilidad y exposición), observamos que este concepto, en principio económico, implica que aumentar la población en una zona dada, aumenta también el riesgo. Hace un par de décadas el riesgo en las zonas urbanas era bajo porque las modificaciones al medio natural se restringían a obras a pequeña escala (viviendas independientes). Ahora, los desarrollos inmobiliarios de varios kilómetros cuadrados requieren estudios geológicos más detallados y de mayor penetración en el subsuelo para poder hacer estimaciones de estabilidad (estructural y de comportamiento del subsuelo bajo diferentes condiciones de humedad y vibración) bajo escenarios donde la probabilidad de combinar las amenazas geológicas y meteorológicas sea particularmente alta (zonas sísmicas, con topografía acentuada y en periodos de lluvias). La mala planificación o el uso inadecuado del suelo pueden, además, inducir el riesgo. El análisis del riesgo es multifactorial y, en consecuencia, complejo. Zonas que durante décadas fueron estables ahora están amenazadas por hundimientos asociados al abatimiento del nivel freático por sobreexplotación, o a la alteración de los regímenes hidráulicos por la modificación de la morfología para preparar el terreno para edificar, o por la desestabilización de pendientes que provocan deslizamientos del terreno.

Es claro que existe una presión social fuerte que induce el desarrollo urbano en zonas que antes eran inconvenientes, pero también es claro que dichas zonas deben estudiarse con mayor detalle, de forma que puedan hacerse estimaciones del impacto que la nueva urbanización provocará, tanto en la zona de construcción, como en las aledañas. De los riesgos inducidos por los nuevos desarrollos deben estar conscientes los profesionales responsables de las obras, las autoridades responsables de la planificación urbana y los habitantes, pues la vulnerabilidad de la sociedad será menor al aumentar la percepción del riesgo.

# ESTIMACIÓN DEL PELIGRO SÍSMICO EN SITIOS CERCANOS A LA FUENTE SÍSMICA

Andrés Gama García<sup>1</sup>, Alonso Gómez Bernal<sup>2</sup>, Jorge Aguirre González<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Posgrado en Ingeniería Estructural, Universidad Autónoma Metropolitana. Av. San Pablo 180, Azcapotzalco, 02200, México, D.F.; Tel: 53189455, Fax: 53189480.

<sup>2</sup>Departamento de Materiales, Universidad Autónoma Metropolitana. Av. San Pablo 180, Azcapotzalco, 02200, México, D.F.; Tel-fax: (55)53189085.

<sup>3</sup>Coordinación de Ingeniería Sismológica, Instituto de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México. Torre de Ingeniería, 2° Nivel, Ala Sur, Cubículo 2; Tel. (5255) 56233500 Ext. 1262.

E-mail: [al206381854@alumnos.azc.uam.mx](mailto:al206381854@alumnos.azc.uam.mx)

E-mail: [agb@correo.azc.uam.mx](mailto:agb@correo.azc.uam.mx)

E-mail: [joagg@pumas.iingen.unam.mx](mailto:joagg@pumas.iingen.unam.mx)

## RESUMEN

Se presentan resultados de un estudio de peligro sísmico aplicado a la ciudad de Chilpancingo con un enfoque Neo-Determinista. La escasa información acelerométrica, principalmente de sismos de gran magnitud con epicentros a distancias relativamente cercanas al sitio (menos de 100 km), justificó la simulación de acelerogramas aplicando el método de las Funciones de Green Empíricas. Se encontró un fuerte efecto de la directividad con respecto al sitio. Como resultado del análisis espectral de los acelerogramas sintéticos producidos por la fuente sísmica Guerrero Central (GC), se observó que los sismos que se generen en esta fuente, con distancias epicentrales de alrededor de 70 km y con profundidades de alrededor de 25km, pueden provocar daño a las construcciones de la ciudad de Chilpancingo, que estén comprendidas en un intervalo de periodos estructurales de 0.30 a 2.5 s. Además, se calcularon las curvas de peligro sísmico con los acelerogramas sintéticos para las diferentes fuentes sísmicas, considerando la distribución de magnitudes propuesta en cada caso. Finalmente, se se compararon las relaciones de atenuación determinadas con acelerogramas sintéticos, contra las obtenidas con acelerogramas registrados, encontrándose una correlación aceptable. Al estudiar el peligro sísmico generado por las diferentes fuentes sísmicas de subducción, se observó que la fuente sísmica GC genera el mayor peligro sísmico para Chilpancingo.

Palabras clave: peligro sísmico, fuentes sísmicas, Neo-Determinista, acelerogramas, Chilpancingo.

## ABSTRACT

In this paper, we offer the results of a seismic hazard study for the city of Chilpancingo using a Neo-Deterministic approach. The lack of accelerographic data, mainly from large magnitude earthquakes having their epicenters with distances relatively close to the site (less than 100 km), justified the accelerograms simulation with the Empirical Green Functions Method. A strong effect of the directivity with respect to the site was found. From the spectral analysis of the synthetic accelerograms produced by the Guerrero Central (GC) seismic source, it was observed that the earthquakes generated in this source,

with epicentral distances close to 70 km and with depths around 25 km, might cause damage to the constructions in Chilpancingo city, within a structural period interval between 0.30 and 2.5 s. Furthermore, the seismic hazard curves were determined by the synthetic accelerograms for the different seismic sources, considering the Magnitude distribution proposed for each case. Finally, attenuation relationships determined by synthetic accelerograms were compared to those obtained by observed accelerograms, where an acceptable correlation was found. When studying the seismic hazard generated by the different subduction seismic sources it was determined that the GC seismic source represents the highest seismic hazard for Chilpancingo.

Key words: seismic hazard, seismic sources, Neo-Deterministic, accelerograms, Chilpancingo.

## INTRODUCCIÓN

La asignación del peligro sísmico, basada en el método tradicional de Análisis de Peligro Sísmico Probabilista (APSP) se basa en los catálogos sísmicos y de movimiento del terreno, en observaciones macrosísmicas y en registros instrumentales. Recientemente, los análisis de peligro sísmico probabilista han mostrado cierta limitación para proporcionar una estimación del peligro sísmico confiable, básicamente debido a la información insuficiente acerca de la sismicidad histórica, la cual puede introducir errores relevantes en el enfoque puramente estadístico, principalmente basado en la historia sísmica. Las mayores incertidumbres y fuentes de errores del método APSP han sido señaladas por varios especialistas recientemente. Ver, por ejemplo a Klügel *et al.* (2006; 2007a y 2007b). El error estándar de las ecuaciones de atenuación empíricas (o la diferencia entre observación y cálculo de un modelo físico predictivo) es una de las principales fuentes de error en el método APSP tradicional, interpretado como incertidumbre aleatoria y no entendido como un cálculo de la variabilidad total del proceso estocástico de la ecuación de atenuación (limitado por nuestro conocimiento).

Debido a que los datos sismológicos son limitados, parece más apropiado recurrir a un escenario basado en un enfoque determinista (Panza *et al.*, 2008). La principal ventaja del procedimiento Neo-Determinista (Panza *et al.*, 2008) es el tratamiento simultáneo de la contribución de

la fuente sísmica y la propagación de la onda sísmica para el movimiento fuerte objetivo sobre la región/sitio, utilizando los principios físicos básicos. Un breve análisis comparativo entre los dos enfoques de peligro sísmico tradicionalmente usados: APSP y APSD (Análisis de Peligro Sísmico Determinista), y el método de Peligro Sísmico Neo-Determinista (APSND), se presentan en la tabla 1, modificada de Panza *et al.* (2008). El método APSND presenta ventajas en comparación con el enfoque APSP, debido a que APSND debe considerar escenarios sísmicos realistas y altamente cuantitativos sobre niveles locales y regionales en la evaluación del peligro sísmico.

## LEY DE RECURRENCIA

La ley de Gutenberg-Richter fue desarrollada a partir de una serie de datos regionales que incluyeron muchas fuentes sísmicas diferentes. Los análisis de peligro sísmico probabilista son conducidos usualmente para sitios específicos, más que para grandes regiones, donde la generación de sismos característicos de fallas individuales es importante. En años recientes la capacidad de la ley de Gutenberg-Richter para representar el comportamiento de una sola fuente ha sido cuestionada (Schwartz y Coppersmith, 1984; Schwartz, 1988). Sus tasas históricas de recurrencia pueden ser estimadas por medio del registro de sismos característicos. Evidencias geológicas indican que el sismo característico ocurre más frecuentemente

que el obtenido por extrapolación de la ley Gutenberg-Richter de altas tasas de excedencia (baja magnitud) a bajas tasas de excedencia (alta magnitud). El resultado es una ley de recurrencia más compleja que es gobernada por datos de sismicidad a bajas magnitudes y datos geológicos sobre altas magnitudes.

Youngs y Coppersmith (1985) desarrollaron una función generalizada de densidad magnitud-frecuencia que combinó una distribución exponencial de la magnitud sobre las magnitudes más bajas con una distribución uniforme en la vecindad del sismo característico. Otras leyes de recurrencia han sido propuestas (Merz y Cornell, 1973a) usando una expresión cuadrática para describir la tasa media anual sobre la cual sismos de magnitud más grande que  $m_0$  y menor que  $m_{máx}$  son excedidos. Shah *et al.* (1975) usaron una ley de recurrencia bilineal en una evaluación del riesgo sísmico para Nicaragua. En otro enfoque, la ley de Gutenberg-Richter fue modificada sobre las bases del momento sísmico y deslizamiento de la falla (Lomnitz-Adler y Lomnitz, 1979). De los

criterios anteriores, por su sencillez y claridad, la ley de recurrencia que mejor funciona es la de Youngs y Coppersmith (1985).

El estudio de la sismicidad regional puede ser descrito como un procedimiento de cuatro pasos:

1. Determinar todas las fuentes sísmicas que puedan generar peligro sísmico para el sitio (Chilpancingo, en el presente caso). Las fuentes de terremotos deben de tener características sísmicas y tectónicas homogéneas.
2. Definir los catálogos sísmicos de cada una de las fuentes con el fin de deducir las leyes estadísticas de la actividad sísmica futura.
3. Determinar la relación de recurrencia para cada una de las fuentes sísmicas. El sismo mínimo puede ser definido con el criterio de la mínima magnitud capaz de producir daño a las construcciones en el sitio (Chilpancingo).

Tabla 1. Resumen comparativo de los procedimientos de evaluación del peligro sísmico, APSP, APSD y APSND (Según Panza et al., 2008)

Descripción del procedimiento	APSP	APSD	APSND
Paso 1	Fuentes sísmicas: Identificación de zonas sismogénicas y fallas activas Epicentros: Geometría y mecanismo focal		
Paso 2	Tasa de recurrencia puede ser representada por una relación lineal solamente si el tamaño del área de estudio es grande con respecto a las dimensiones lineales de las fuentes.	Magnitud fija. Distancia fija. Selección del sismo de control.	-Escenarios sísmicos- Magnitudes fijas, distancias y propiedades específicas de la fuente sísmica. Selección del sismo de Control.
Paso 3	-Relaciones de atenuación- Ellas representan la dependencia funcional de la aceleración espectral aleatoria sobre las variables aleatorias, magnitud, distancia y error de medición y por lo tanto son fuente de error sistemático en la evaluación del peligro sísmico.		Movimientos sintéticos del terreno. No necesita de relaciones de atenuación.
Paso 4	Evaluación del peligro sísmico en términos de probabilidades de excedencia de una medida del movimiento del terreno dada.	Valoración del peligro sísmico en términos de la medida fija del movimiento del terreno.	Evaluación del peligro sísmico con envolventes de PGA u otra medida del movimiento del terreno.

4. Seleccionar el sismo característico ó sismo máximo. La elección del terremoto máximo es más complicado, no solo interesa el máximo sino también su probabilidad de ocurrencia. Por ello, la consideración del máximo terremoto histórico conocido como el valor mínimo para el límite superior, debe ser realizada a la luz de la experiencia.

el sismo máximo que se puede esperar en la zona de estudio. Sin embargo, como se ha comentado, en la práctica este sismo máximo se estima a partir de las dimensiones de la falla, de características de la zona de subducción, de información paleosísmica, etc. Aunque existen excepciones (Reiter, 1990), muchas veces se elige como valor mínimo para este límite, el máximo terremoto histórico conocido. En la figura 1, se describe con un diagrama de flujo la manera en que puede evaluarse la sismicidad regional.

Por otro lado, la prolongación de la línea de ajuste de la ley de recurrencia informaría sobre

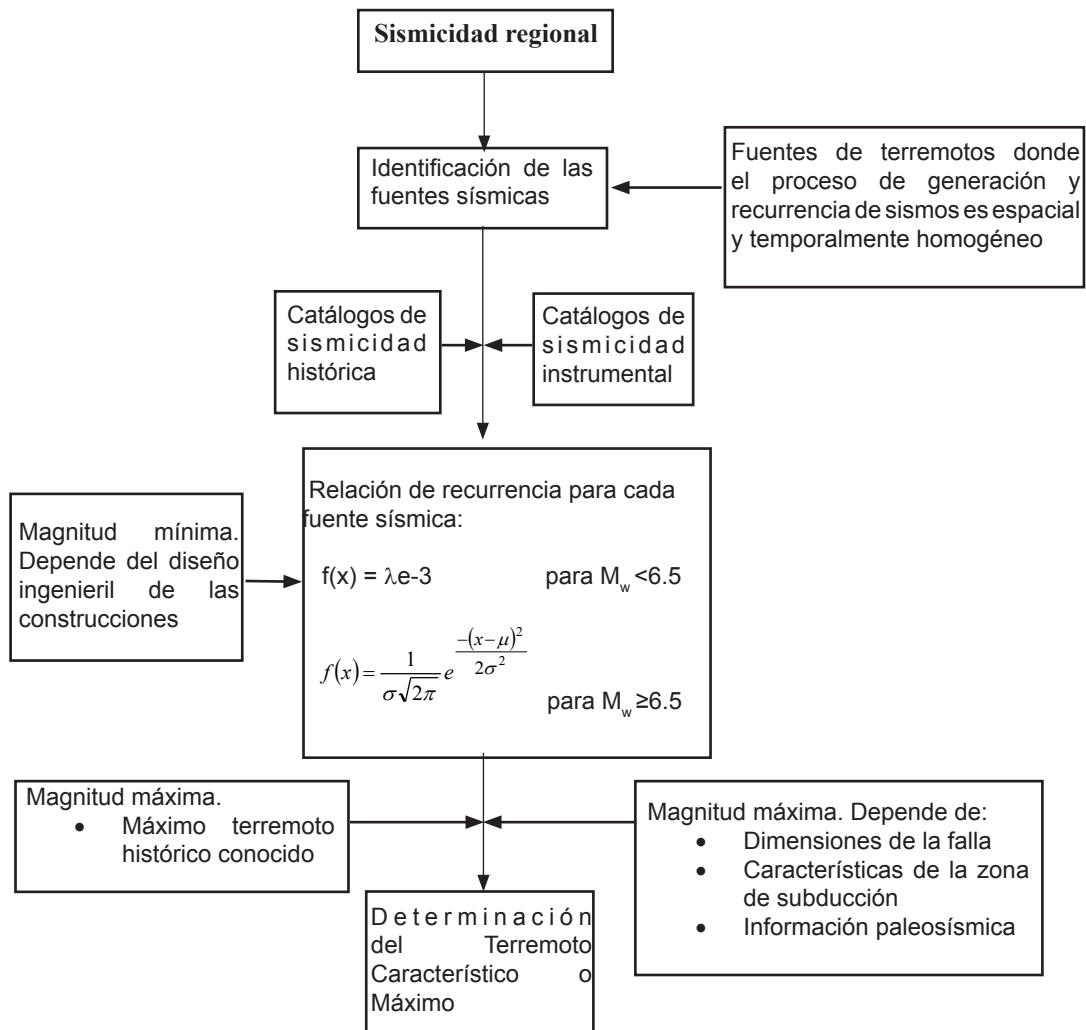


Figura 1. Diagrama de flujo para evaluar la sismicidad de la fuente sísmica.

## MÉTODO DE LAS FUNCIONES EMPÍRICAS DE GREEN

Con el propósito de desarrollar la metodología presentada en este trabajo, es necesario aplicar el método de las funciones de Green empíricas. A continuación se describe de manera general el procedimiento, incluyendo el modelo de sismicidad usado, así como sus características más importantes. Este método ha sido usado con frecuencia para simular exitosamente los registros de velocidad y aceleración en zonas cercanas a la fuente sísmica (Kamae e Irikura, 1998; Matsushima y Kawase, 2000; Miyake *et al.*, 2003; Asano *et al.*, 2005; Suzuki *et al.*, 2005; Asano e Iwata, 2006). Está basado en la superposición de registros de eventos pequeños considerados como una función empírica de Green y fue propuesto primeramente por Hartzell (1978); posteriormente lo continuaron desarrollando y/o complementando varios otros autores, entre los que destaca Irikura (1983; 1986). La superposición de los subeventos sobre el área de la falla del sismo objetivo se hace de tal forma que cubran las áreas que corresponden a las asperezas. Éstas equivalen a las áreas de generación de movimientos fuertes de donde se irradia casi el total de la energía observada en campo cercano. El método de Green simula registros acelerométricos a través del modelado de fuentes sísmicas finitas, utilizando el registro de un sismo pequeño (función de Green) para simular el sismo principal (objetivo). Utilizando el método sintético para el modelo espectral  $\omega^2$  propuesto por Aki (1967), se obtiene el número de subeventos necesarios  $N^3$  a partir de la relación entre los momentos sísmicos del sismo principal que será simulado y el sismo pequeño que se usa como función de Green.  $N^3$  es el número de subfallas en dirección del rumbo ( $N_x$ ), del echado ( $N_w$ ) y del número de eventos sumados en cada subfalla que generan el aumento de desplazamiento y duración ( $N_T$ ):

$$N^3 = N_x N_w N_T \quad (1)$$

Se debe entonces encontrar el parámetro  $N$  que sirve para estimar el área de la falla del sismo principal ya que se divide en  $N \times N$  subfallas, el cual se obtiene de la siguiente manera:

$$\frac{\overline{U}_0}{\overline{u}_0} = \frac{M_0}{m_0} = N^3 \quad (2)$$

Donde  $\overline{U}_0$  y  $\overline{u}_0$  corresponden al nivel plano de los espectros de Fourier de los registros de desplazamiento del sismo principal y del sismo pequeño, respectivamente. De igual manera  $M_0$  y  $m_0$  son los momentos sísmicos del movimiento principal y del sismo pequeño, respectivamente. La relación para las frecuencias altas está dada por (Somerville *et al.*, 2002):

$$\frac{\overline{A}_0}{\overline{a}_0} = \left( \frac{M_0}{m_0} \right)^{\frac{1}{3}} = N \quad (3)$$

donde  $\overline{A}_0$  y  $\overline{a}_0$  corresponden al nivel plano de los espectros de Fourier de los registros de aceleración del sismo principal y del sismo pequeño para frecuencias mayores a  $f_c$  y menores a  $f_{\max}$ . Entonces el movimiento sintético del sismo principal  $A(t)$ , estará dado por el movimiento observado del sismo pequeño  $a(t)$ , con base en las siguientes ecuaciones (Irikura, 1986).

$$A(t) = \sum_{i=1}^{N_x} \sum_{j=1}^{N_w} \left( \frac{r}{r_{ij}} \right) F_{ij}(t - t_{ij}) * a(t) \quad (4)$$

$$F_{ij}(t - t_{ij}) = \delta(t - t_{ij}) + \frac{1}{n'} \sum_{K=1}^{(N-1)n'} \delta \left[ t - t_{ij} - \frac{(K-1)r}{(N-1)n'} \right] \quad (5)$$

$$t_{ij} = \frac{\xi_{ij}}{V_r} + \frac{(r_{ij} - r_0)}{\beta} \quad (6)$$

Donde  $n'$  es un entero apropiado para eliminar periodicidad espuria,  $r_0$  es la distancia de la estación al punto donde inicia la ruptura,  $r$  es la distancia de la estación al hipocentro del



sismo pequeño,  $r_{ij}$  es la distancia de la estación al elemento (i,j) del área de generación del movimiento fuerte,  $t_{ij}$  es el tiempo de retraso para la ruptura del punto de salida del elemento (i,j) al sitio observado,  $\tau$  es el tiempo de ascenso (rise time) del sismo pequeño,  $F_{ij}$  es una función filtro para ajustar la diferencia entre el tiempo de dislocación del sismo principal y del sismo pequeño. Para usar el movimiento del sismo pequeño con caída de esfuerzos diferente a la del sismo principal, se modifica la función de Green empírica, introduciendo un valor constante que sirve para corregir la diferencia entre la caída de esfuerzos del sismo principal y del sismo pequeño, tal que:

$$C = \frac{\Delta\sigma_{SP}}{\Delta\sigma_R} \quad (7)$$

donde  $\Delta\sigma_{SP}$  es la caída de esfuerzos del sismo principal y  $\Delta\sigma_R$  es la caída de esfuerzos del sismo pequeño. El nivel espectral es afectado por el mismo factor de la ecuación anterior, por lo que queda de la siguiente manera:

$$\frac{\overline{U_0}}{u_0} = CN^3 \quad (8)$$

$$\frac{\overline{A_0}}{a_0} = CN' \quad (9)$$

La ecuación (4) se modifica reemplazando  $a(t)$  con  $Ca(t)$  y  $N$  con  $N'$  como sigue (Aguirre *et al.*, 1994):

$$A(t) = \sum_{i=1}^{N'x} \sum_{j=1}^{N'w} \left( \frac{r}{r_{ij}} \right) F_{ij}(t - t_{ij}) * Ca(t) \quad (10)$$

$$F_{ij}(t - t_{ij}) = \delta(t - t_{ij}) + \frac{1}{n'} \sum_{k=1}^{(N'-1)n'} \delta \left[ t - t_{ij} - \frac{(k-1)\tau}{(N'-1)n'} \right] \quad (11)$$

En la figura 2 se presenta en forma esquemática el modelo de fuente finita aplicando el concepto del método de las funciones de Green empíricas. Se indica el sismo pequeño usado como función la de Green (semilla) y la aspereza utilizada para generar los sismos sintéticos, así como las características físicas y geométricas. A distancias cercanas a la fuente sísmica, la influencia de las dimensiones de la falla (conocida como “falla finita”) es importante.

Las características de la fuente sísmica como son el mecanismo focal, la directividad, la velocidad de ruptura, la profundidad, la irregular distribución de los desplazamientos sobre el plano de falla, las asperezas y su localización, son importantes para un adecuado modelado de la fuente sísmica. Desde el punto de vista sismológico, todos estos factores influyen de manera crucial para generar los patrones irregulares de velocidades y aceleraciones observados en sitios cercanos a las fallas sísmicas que generaron el movimiento. En el método de las funciones empíricas de Green, se involucran implícitamente incertidumbres como la relación entre caída de esfuerzos, del modelo de fuente, de la localización de las asperezas, de la localización del inicio de la ruptura de la falla, del tipo de propagación de la ruptura y de la velocidad de la ruptura.

## FUENTES SÍSMICAS ESTUDIADAS

Con el objetivo de tener una idea clara del peligro sísmico en la ciudad de Chilpancingo, se estudiaron cuatro fuentes sísmicas de subducción. El criterio para seleccionar las fuentes sísmicas fue la distancia al sitio (las más cercanas). Las simulaciones se realizaron para la estación RICC que se encuentra ubicada en suelo sedimentario (17.54° latitud Norte y 99.50° longitud Oeste) en el valle de Chilpancingo. Para la simulación se usó el método de las funciones de Green empíricas (Irikura, 1986). En la tabla 2 se presentan las características de los sismos utilizados como funciones de Green en este trabajo. Se incluye en la última columna la componente horizontal



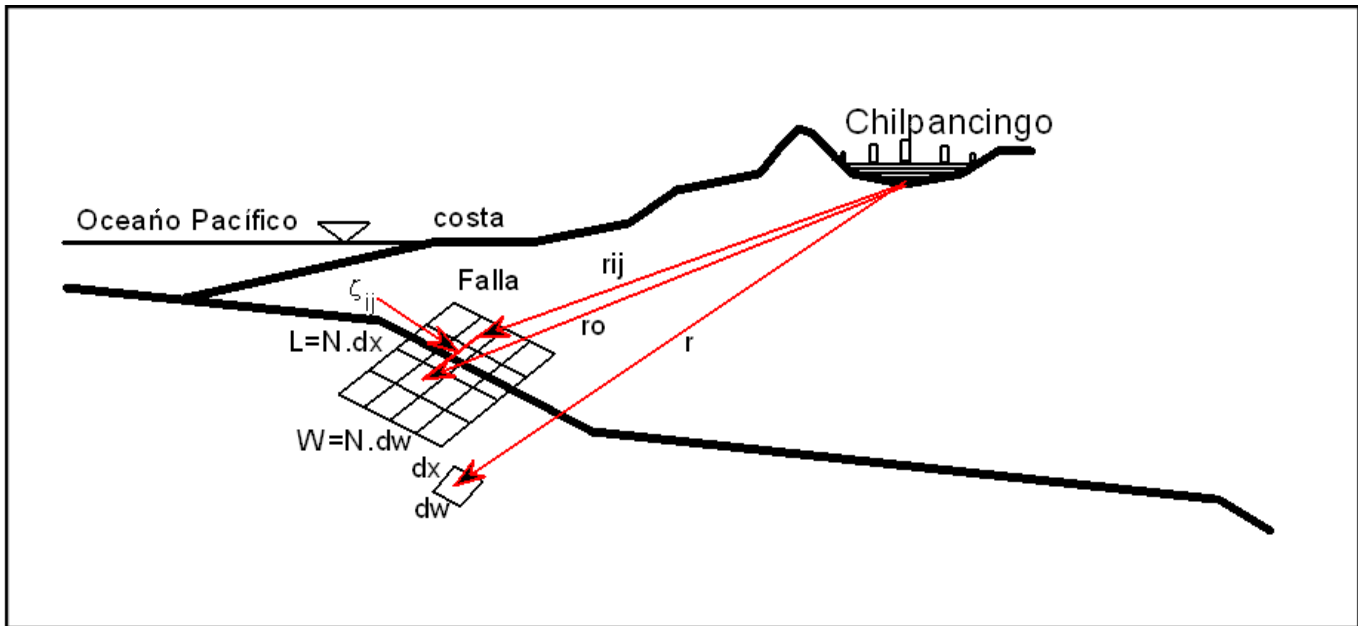


Figura 2. Modelo de falla finita usada en el método de las funciones de Green empíricas.

Tabla 2. Características de los sismos usados como función de Green (semilla) en las diferentes fuentes sísmicas para simular sismos sintéticos

Fecha d/m/a	Hora GMT	$M_w$	Lat N	Long O	Prof km	$M_0$ Dina-cm	Acim	Ech	Áng desliz	$CH_{m\acute{a}x}$
<b>Fuente sísmica Ometepec (OM):</b> Sismo pequeño utilizado como función de Green (Courboulex <i>et al.</i> 1997)										
16/00/1995	3:30:5.2	5.0	16.61°	98.54°	20.0	0.337x10 <sup>24</sup>	289°	15°	85°	EO
<b>Fuente sísmica Acapulco-San Marcos (ASM):</b> Sismo pequeño utilizado como función de Green (USGS)										
29/10/1994	16:44:6	5.1	17.01°	99.68°	49.0	0.56x10 <sup>24</sup>	296°	25°	90°	EO
<b>Fuente sísmica Guerrero Central (GC):</b> Sismo pequeño utilizado como función de Green (CMT:Harvard)										
13/04/2007	5:42:26.5	6.0	17.37°	100.14°	42.7	1.07x10 <sup>25</sup>	284°	73°	92°	NS
<b>Fuente sísmica Petatlán (PE):</b> Sismo pequeño utilizado como función de Green (CMT:Harvard)										
15/07/1996	21:23:42	6.6	17.50°	101.12°	22.4	9.95x10 <sup>25</sup>	297°	21°	93°	EO

usada en los sismos semilla para simular los sismos sintéticos, seleccionada de acuerdo al criterio de mayor aceleración.

Considerando la relación dada por Kanamori (1977) en la ecuación (12), se puede obtener el momento sísmico a partir de una magnitud dada. Dado que nos interesa obtener una simulación en un lugar (Chilpancingo) muy cercano a la fuente, la mayor contribución será de la aspereza más grande que ocurra en la falla.

Para obtener el área de la mayor aspereza se usa la relación de Somerville *et al.* (2002) para sismos de subducción reproducida en la ecuación (13)

$$M_w = \left(\frac{1}{1.5}\right) \log(M_0) - 10.73 \quad (12)$$

$$A_{asp} = 8.87 \times 10^{-16} (M_0)^{\frac{2}{3}} \quad (13)$$

donde el área de la aspereza  $A_{asp}$  estará dada en  $km^2$  y  $M_0$  en dina-cm.

El método original utiliza los registros de sismos pequeños como funciones de Green empíricas que, mediante una superposición que obedece las leyes de escalamiento entre sismos, hace posible simular el registro del sismo grande. El tiempo en el cual ocurre la dislocación, es decir desde que una partícula inicia su movimiento hasta que se detiene, conocido como “rise time”, se obtiene con base en la fórmula propuesta por Somerville *et al.* (2002), para sismos de subducción, expresado por la ecuación (14).

$$T_R = 1.79 \times 10^{-9} (M_0)^{\frac{1}{3}} \quad (14)$$

donde  $T_R$  es el “rise time” y  $M_0$  es el momento sísmico, en este caso del sismo pequeño. Se utilizó una velocidad de ruptura de  $V_r = 0.9 \times V_s$ . Observaciones recientes han mostrado que el lugar donde inicia la ruptura suele estar alejado de la posición de las asperezas. Somerville *et al.* (2002) proponen la ecuación (15) para estimar esa distancia.

$$R_A = 1.76 \times 10^{-8} (M_0)^{\frac{1}{5}} \quad (15)$$

En la figura 3 se presenta la ubicación de las asperezas estudiadas proyectadas sobre el plano horizontal. Las superficies corresponden a la probable ocurrencia de un sismo máximo de  $M_w = 7.5$  para la fuente sísmica de Ometepec, de  $M_w = 7.7$  para Acapulco-San Marcos, de  $M_w = 8.2$  para Guerrero Central y de  $M_w = 7.4$  para Petatlán. Las dimensiones de 30x45 km, 55x40 km, 100x70 km y 37x30 km están de acuerdo con las asperezas máximas estimadas en los segmentos correspondientes a Ometepec, Acapulco-San Marcos, Guerrero Central y Petatlán, respectivamente, con excepción de Guerrero Central donde nunca se ha registrado un sismo de magnitud  $M_w = 8.2$ . La ubicación y tamaño de la aspereza de la fuente sísmica de Ometepec se obtuvo considerando el sismo del 14 de septiembre de 1995 (Courboulex *et al.*, 1997), la de Acapulco-San Marcos tomando en cuenta el sismo del 28 de julio de 1957 (Ortiz *et al.*, 2000), la de Guerrero Central considerando los sismos del 11 y 19 de mayo de 1962 (Ortiz *et al.*, 2000; Singh *et al.*, 2007), con un sismo probable de mayor magnitud en función del área de ruptura y del tiempo de quietud sísmica y finalmente para

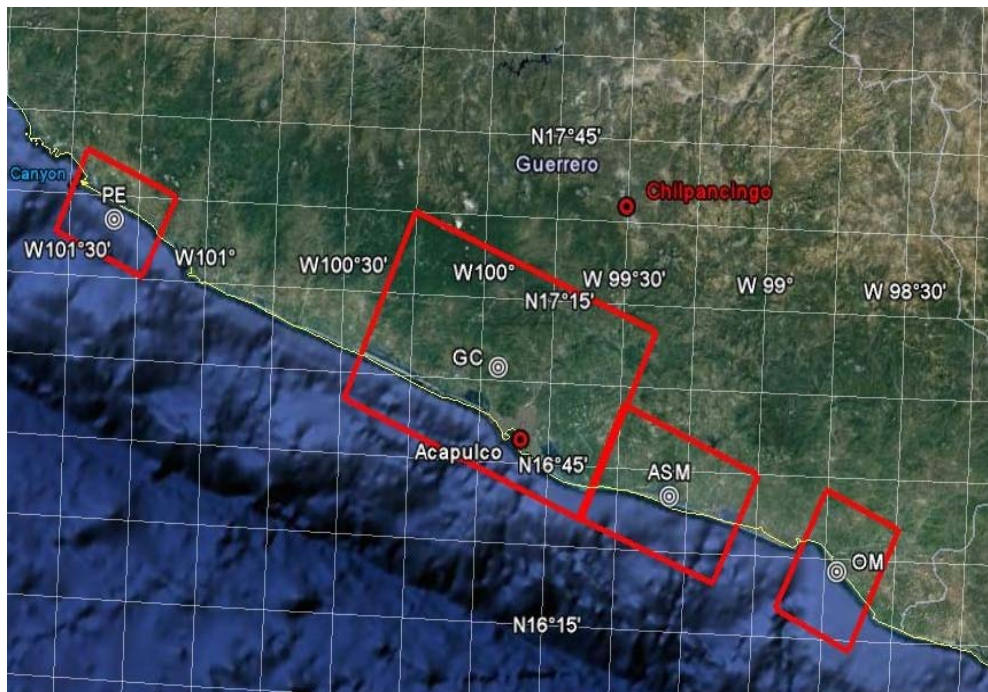


Figura 3. Asperezas utilizadas para simular acelerogramas sintéticos de las fuentes sísmicas Ometepec, Acapulco-San Marcos, Guerrero Central y Petatlán proyectadas sobre el plano horizontal.

Petatlán tomando en cuenta el sismo del 14 de marzo de 1979 (Anderson *et al.*, 1986).

En la figura 4 se presentan los modelos de falla finita de las asperezas de acuerdo al sismo máximo esperado en cada una de las fuentes sísmicas, para simular acelerogramas sintéticos. Los números o letras en las subfallas, indican los probables inicios de la ruptura en las diferentes fallas estudiadas, considerados en la simulación de sismos sintéticos.

Se propone una distribución exponencial para los sismos de magnitudes menores a  $M_w < 6.5$ , debido a que estos ocurren con mayor frecuencia, para los sismos de igual o mayor magnitud a  $M_w \geq 6.5$  su distribución está de acuerdo con el catálogo elaborado por Kostoglodov y Pacheco (1999), debido a que son menos frecuentes. La relación frecuencia-magnitud de los sismos de igual o mayor magnitud a  $M_w \geq 6.5$  se obtuvo

considerando los tiempos de recurrencia históricos ( $T_H$ ) presentados en la tabla 4, con excepción de la fuente sísmica Guerrero Central donde nunca se ha producido un sismo de  $M_w = 8.2$ . Una observación importante es que la mayoría de los catálogos son probablemente más completos para sismos de  $M_w \geq 6.5$  a partir de inicios del siglo anterior. Se aprecia en la figura 5, que los sismos de magnitudes grandes tienden a distribuirse como una curva normal, a medida que aumenta la cantidad de sismos registrados en la fuente y cuando disminuye la tendencia es a una distribución uniforme. Zúñiga y Wyss (2001) para el Oeste de Guerrero (entre longitudes  $100.5^\circ$ - $101.5^\circ$ ) encontraron valores altos de  $b$  y entre las longitudes  $100^\circ$ - $101^\circ$  así como al Oeste del segmento de Ometepec valores bajos de  $b$ . Ellos interpretan los valores bajos de  $b$  en los segmentos con regímenes de altos esfuerzos, que es como una aspereza, en la relación Gutenberg-Richter  $\log N = a - bM$ .

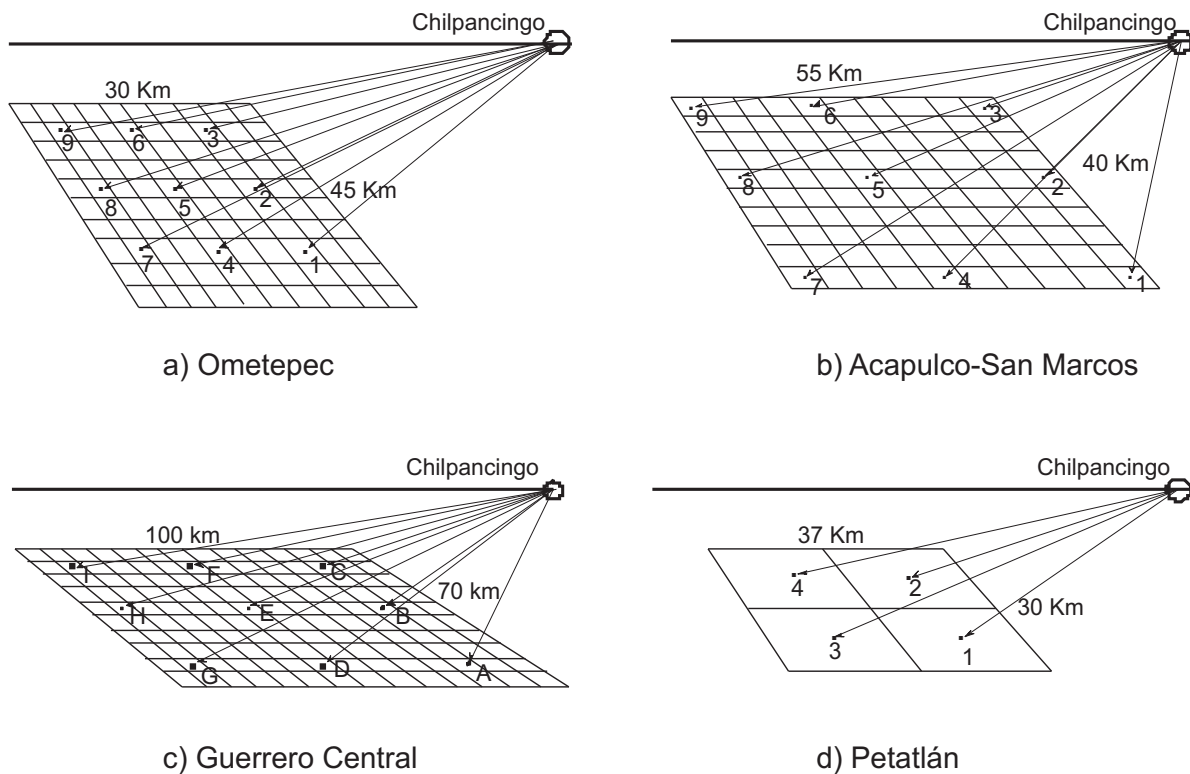


Figura 4. Modelos de falla finita para las diferentes fuentes sísmicas estudiadas de acuerdo al máximo sismo esperado en cada una de ellas. Los números o letras son probables inicios de ruptura.

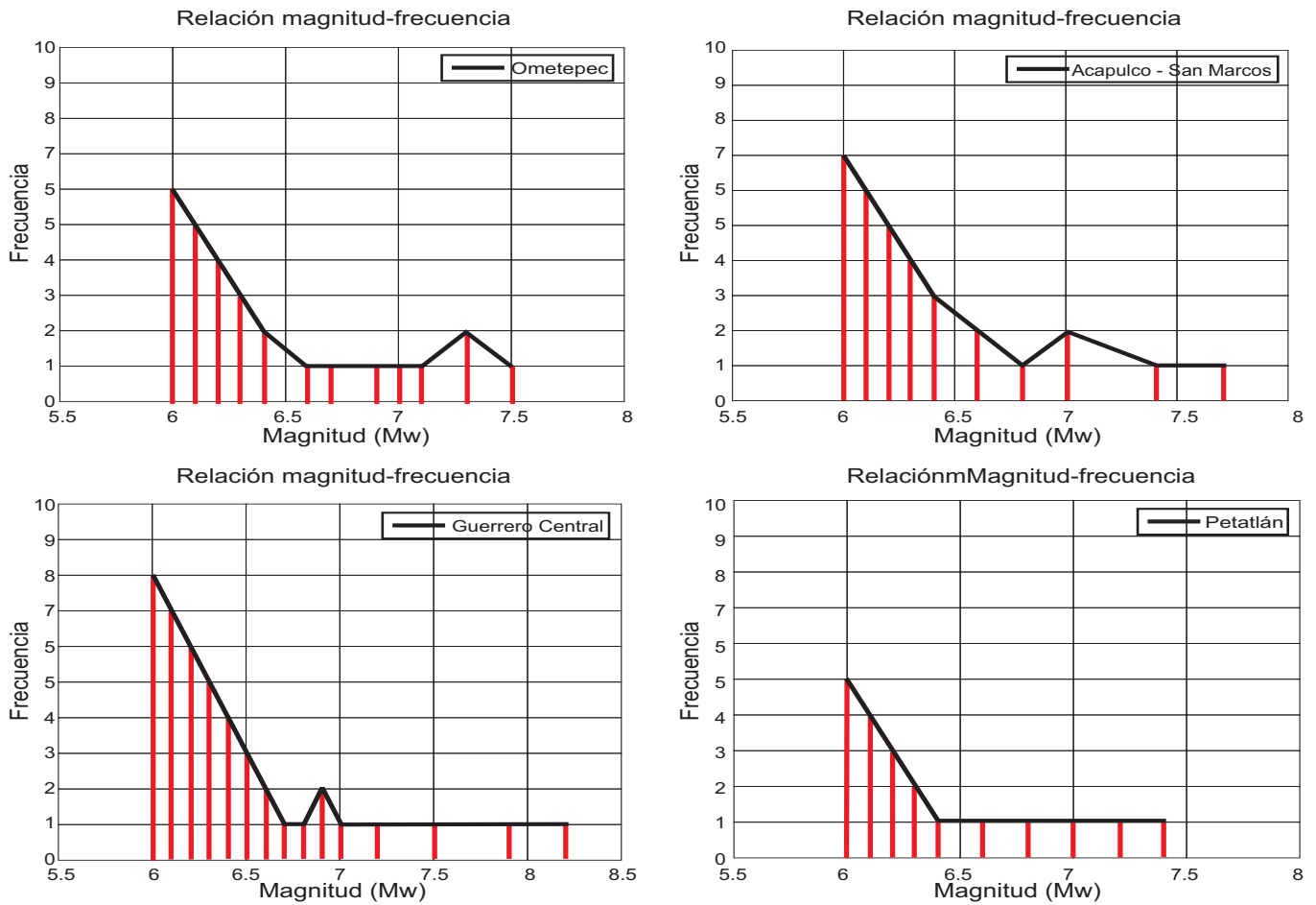


Figura 5. Relaciones magnitud-frecuencia consideradas para simular sismos sintéticos en las fuentes sísmicas Ometepec, Acapulco-San Marcos, Guerrero Central y Petatlán.

Para las costas de Guerrero el intervalo estimado de **b** se encontró entre 0.5 a 1.5, determinado con una base de datos obtenida del catalogo de sismicidad compilado por el SSN para el periodo de 1988 a 1998.

En la figura 6 se presenta la aceleración registrada con una PGA de 92.537 cm/s<sup>2</sup> componente NS y la sintética con una PGA de 96.246 cm/s<sup>2</sup> componente NS, del sismo del 13 de abril de 2007 con magnitud  $M_w=6.0$ , que como se puede observar tienen mucha similitud. En la misma figura 6 también se presentan los espectros de respuesta de Pseudo-Aceleración, en donde la única diferencia son las ordenadas espectrales

ligeramente mayores del espectro sintético. Para determinar los acelerogramas sintéticos se usó el programa de cómputo EGFMP, desarrollado por Irikura (1986), que también calcula la historia de velocidades y desplazamientos del sismo sintético, pero aquí solo se presentan las historias de aceleraciones. Es importante la calibración del método de acuerdo a las características de los sismos locales de subducción, ya que permite utilizarlo con más confianza. En este caso se presenta un sismo sintético simulado a una distancia epicentral de 80.0 km y a una profundidad de 23 km, que como ya se dijo anteriormente, tiene mucha similitud con el usado como semilla.

El objetivo principal es simular acelerogramas en la estación RICC (suelo sedimentario), debido a la ruptura de las diferentes asperezas estudiadas, con el propósito de determinar el peligro sísmico. Con este fin y de acuerdo a las relaciones magnitud-frecuencia de la figura 5, se simularon 28 sismos para la fuente sísmica de Ometepec, 32 para la de Acapulco-San Marcos, 44 para la de Guerrero Central y solo 5 para Petatlán, debido a la magnitud del sismo usado como semilla ( $M_w=6.6$ ), por lo que no fue posible simular sismos sintéticos en el intervalo de magnitudes de 6.0 a 6.5. Las principales características y PGA sintéticas, se presentan en la tabla 3. Como se puede observar de esta misma tabla 3, el criterio de selección en este caso de uno de los nueve sismos sintéticos simulados con magnitud  $M_w=8.2$  en la fuente sísmica Guerrero Central, consistió en considerar el valor promedio de PGA ( $1292.48 \text{ cm/s}^2$ ) de la falla y con inicio de ruptura en el punto E (centro de la aspereza) como se puede apreciar en la figura 7.

Como ejemplo en la figura 7, se presentan las aceleraciones sintéticas para un sismo con magnitud  $M_w=8.2$ , componente NS, obtenidas de la fuente sísmica Guerrero Central, para las nueve posiciones del inicio de la ruptura, ordenadas de acuerdo a la figura 4c, donde se puede apreciar el fuerte efecto de la directividad (ver figura 3) entre la fuente y el sitio (Chilpancingo). Se observa que las mayores PGA se presentaron para los inicios de ruptura G, I y H, con  $1754.546 \text{ cm/s}^2$ ,  $2154.549 \text{ cm/s}^2$  y  $2358.411 \text{ cm/s}^2$ , respectivamente.

## **ESPECTROS DE RESPUESTA SINTÉTICOS PARA SUELO SEDIMENTARIO (RICC)**

Con el propósito de observar la respuesta simulada en suelo sedimentario (estación RICC) de la ciudad de Chilpancingo, se seleccionaron 12 acelerogramas sintéticos de la fuente sísmica Ometepec, 11 de Acapulco-San Marcos, 15 de Guerrero Central y 5 de Petatlán de la tabla 3, considerando el criterio de usar el sismo

promedio de cada magnitud en cada una de las fuentes, con el objetivo de determinar sus espectros de respuesta de Seudo-Aceleración, correspondientes. Se incluyó el acelerograma registrado componente NS del sismo del 13/04/2007 con magnitud de  $M_w=6.0$ , en el caso de la fuente sísmica Guerrero Central. En la figura 8 se presentan los espectros sintéticos de Seudo-Aceleración de respuesta elástica con 5% de amortiguamiento crítico simulados de la fuente sísmica Ometepec, donde se observan amplificaciones importantes en alrededor de 0.50s de periodo, para esas magnitudes.

En la figura 9 se presentan los espectros sintéticos de Seudo-Aceleración de respuesta elástica con 5% de amortiguamiento crítico simulados de la fuente sísmica Acapulco-San Marcos, donde se observan amplificaciones importantes en una banda ancha de periodos en el intervalo de 0.12 hasta 3.0s, para esas magnitudes.

En el caso de la fuente sísmica Guerrero Central, se puede apreciar de los espectros sintéticos de Seudo-Aceleración de respuesta elástica con 5% de amortiguamiento crítico de la figura 10, amplificaciones significativas en alrededor de 0.32, 0.68 y 2.58 s de periodo, para esas magnitudes.

Finalmente, en la figura 11 se presentan los espectros sintéticos de Seudo-Aceleración de respuesta elástica con 5% de amortiguamiento crítico simulados de la fuente sísmica Petatlán, donde se observa que las mayores amplificaciones se presentan en alrededor de 0.40 y 0.82s de periodo, para esas magnitudes.

De acuerdo con los resultados anteriores, se puede concluir que, los sismos que se generen en Guerrero Central, con distancias epicentrales cercanas a 70 km y profundidades de alrededor de 25 km, pueden provocar algún tipo de daño a las construcciones de la ciudad de Chilpancingo, que estén comprendidas en un intervalo de periodos estructurales entre 0.30 y 2.5s.



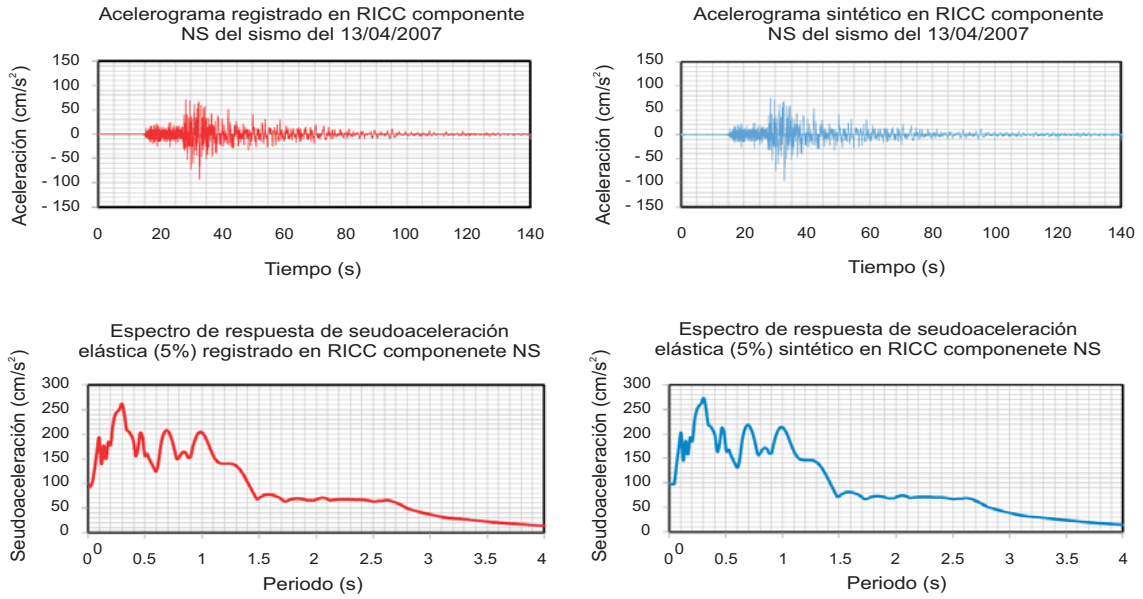


Figura 6. Arriba (izquierda) acelerograma registrado, arriba (derecha) acelerograma sintético, abajo (izquierda) espectro registrado y abajo (derecha) espectro sintético, para un sismo de  $M_w = 6.0$

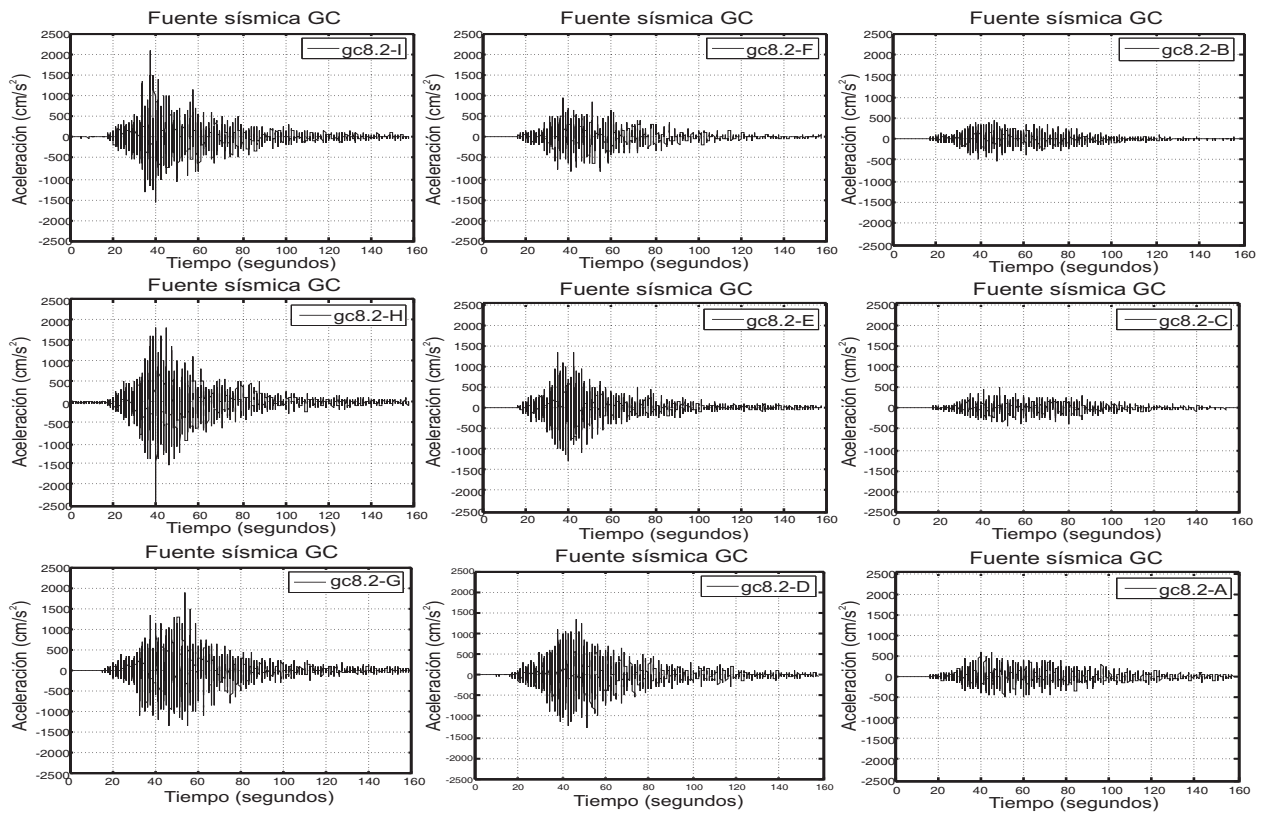


Figura 7. Aceleraciones sintéticas determinadas usando el método de las funciones de Green empíricas de la fuente sísmica Guerrero Central, para un sismo de magnitud  $M_w=8.2$  (ver figura 4c).

Tabla 3. Datos de sismos sintéticos de las diferentes fuentes sísmicas y PGA estimadas

<b>Fuente sísmica Ometepec</b>				
No.	Mag.	Dist.	Prof.	PGA <sub>H</sub>
	(M <sub>w</sub> )	(km)	(km)	(gals)
1	7.5	139.10	26	122.377
2	7.3	140.66	25	99.099
3	7.3	134.04	25	101.251
4	7.1	142.30	23.5	112.422
5	7.0	143.27	22	133.155
6	6.9	142.78	22.5	104.861
7	6.7	143.76	21.5	62.125
8	6.6	144.75	19	56.955
9	6.4	145.26	21	47.107
10	6.4	147.61	19	57.906
11	6.3	144.75	21	46.902
12	6.3	145.92	19	38.199
13	6.3	151.01	19	51.023
14	6.2	145.52	21	41.44
15	6.2	146.40	19	35.944
16	6.2	149.35	19	39.806
17	6.2	149.55	20	45.901
18	6.1	145.26	21	36.761
19	6.1	142.96	22	35.25
20	6.1	145.01	20	41.118
21	6.1	145.55	22	41.355
22	6.1	141.35	24	42.218
23	6.0	146.03	20	31.234
24	6.0	143.32	21	24.664
25	6.0	144.60	20	29.561
26	6.0	147.46	20	32.867
27	6.0	143.53	23	35.686
28	6.0	139.98	25	33.789

<b>Fuente sísmica Acapulco-San Marcos</b>				
No.	Mag.	Dist.	Prof.	PGA <sub>H</sub>
	(M <sub>w</sub> )	(km)	(km)	(gals)
29	7.7	97.44	18	160.152
30	7.4	97.44	18	113.439
31	7.2	97.44	18	90.113
32	7.0	97.44	18	79.905
33	6.8	97.44	18	69.717
34	6.6	97.44	18	54.521

<b>Fuente sísmica Acapulco-San Marcos</b>				
No.	Mag.	Dist.	Prof.	PGA <sub>H</sub>
	(M <sub>w</sub> )	(km)	(km)	(gals)
35	6.6	99.27	18	60.596
36	6.4	97.44	18	36.918
37	6.4	99.32	17	34.378
38	6.4	100.99	17	41.604
39	6.3	97.44	18	36.572
40	6.3	100.65	17	35.381
41	6.3	99.01	18	44.37
42	6.3	94.26	19	34.863
43	6.2	97.44	18	23.172
44	6.2	97.46	19	26.944
45	6.2	99.34	18	30.918
46	6.2	93.66	19	28.538
47	6.2	97.44	18	21.538
48	6.1	97.44	18	22.87
49	6.1	94.12	19	24.175
50	6.1	94.15	20	26.035
51	6.1	99.15	18	29.499
52	6.1	94.12	19	27.347
53	6.1	97.44	18	20.864
54	6.0	97.44	18	24.855
55	6.0	97.67	17	20.599
56	6.0	95.98	18	25.274
57	6.0	95.79	19	21.744
58	6.0	99.11	17	23.361
59	6.0	94.30	19	27.720
60	6.0	92.64	20	29.006

<b>Fuente sísmica Guerrero Central</b>				
No.	Mag.	Dist.	Prof.	PGA <sub>H</sub>
	(M <sub>w</sub> )	(km)	(km)	(gals)
61	8.2	72.00	24.0	1292.48
62	7.9	72.50	25.0	905.11
63	7.5	72.50	25.0	650.90
64	7.2	76.42	24.0	432.97
65	7.0	79.44	23.0	289.08
66	6.9	77.85	23.0	278.09



Fuente sísmica Guerrero Central				
No.	Mag.	Dist.	Prof.	PGA <sub>H</sub>
	(M <sub>w</sub> )	(km)	(km)	(gals)
67	6.9	67.90	27.0	300.43
68	6.8	69.82	27.0	289.69
69	6.7	73.06	25.0	211.63
70	6.6	72.50	25.0	203.06
71	6.6	67.50	27.5	186.14
72	6.5	72.84	25.0	184.79
73	6.5	67.86	27.5	200.83
74	6.5	72.50	25.0	209.18
75	6.4	67.78	27.5	201.76
76	6.4	72.75	25.0	219.81
77	6.4	67.50	27.5	204.73
78	6.4	72.50	25.0	168.90
79	6.3	76.00	24.5	100.33
80	6.3	68.50	27.5	108.54
81	6.3	61.50	30.0	117.08
82	6.3	53.50	32.5	127.98
83	6.3	46.50	35.5	136.95
84	6.2	78.00	24.0	98.17
85	6.2	71.50	26.5	105.07
86	6.2	65.00	28.5	112.88
87	6.2	58.50	31.0	121.01
88	6.2	52.00	33.5	129.52
89	6.2	45.00	36.0	139.02
90	6.1	80.50	23.0	95.69
91	6.1	74.50	25.0	101.95
92	6.1	69.50	27.0	107.45
93	6.1	64.00	29.0	114.02
94	6.1	59.00	31.0	120.21
95	6.1	53.50	33.0	127.45
96	6.1	47.50	35.0	135.48
97	6.0	84.00	21.0	92.53
98	6.0	80.00	23.0	96.25
99	6.0	75.00	25.0	101.34
100	6.0	70.00	27.0	106.78
101	6.0	65.50	28.0	112.47
102	6.0	61.50	30.0	117.08
103	6.0	56.50	32.0	123.38
104	6.0	51.50	34.0	129.82

Fuente sísmica Petatlán				
No.	Mag.	Dist.	Prof.	PGA <sub>H</sub>
	(M <sub>w</sub> )	(km)	(km)	(gals)
105	7.4	188.22	24	56.35
106	7.2	193.83	18	45.264
107	7.0	204.85	18	39.718
108	6.8	203.00	18	40.444
109	6.6	193.02	19	41.295

### CURVAS DE PELIGRO SÍSMICO PARA SUELO SEDIMENTARIO (RICC)

En la tabla 4 se presentan los tiempos de recurrencia local,  $T_L$ , obtenidos de Zúñiga y Wyss (2001) y los tiempos de recurrencia históricos estimados,  $T_H$ , para las diferentes fuentes sísmicas (Nishenko y Singh, 1987) para la ocurrencia de un sismo característico. Los tiempos de recurrencia históricos, fueron estimados con base en probabilidades condicionadas para la recurrencia de grande y gran sismo interplaca a lo largo de la zona de subducción de la costa del Pacífico Mexicano. Los tiempos de recurrencia local fueron estimados con base en las localizaciones más o menos probables de grande a gran sismo a lo largo de la costa del Pacífico Mexicano, estimados de tiempos de recurrencia local basados en valores-b. En todos los casos rigen los tiempos de recurrencia históricos.

Usando la relación de magnitud de momento sísmico,  $M_w$  y el momento sísmico,  $M_0$ , de Kanamori (1977) dada en la ecuación (12) y la relación empírica entre el periodo de retorno,  $T_r$  y el momento sísmico,  $M_0$ , de Astiz y Kanamori (1984) expresada en la ecuación (16), se pueden calcular los parámetros, como el momento sísmico, el periodo de retorno  $T_r$  y la tasa media de excedencia de la magnitud  $\lambda(M)$  que es igual al inverso del periodo de retorno. Se consideraron intervalos de magnitudes de  $6.0 \leq M_w \leq 7.5$ , de  $6.0 \leq M_w \leq 7.7$ ,  $6.0 \leq M_w \leq 8.2$  y de  $6.0 \leq M_w \leq 7.4$ , para

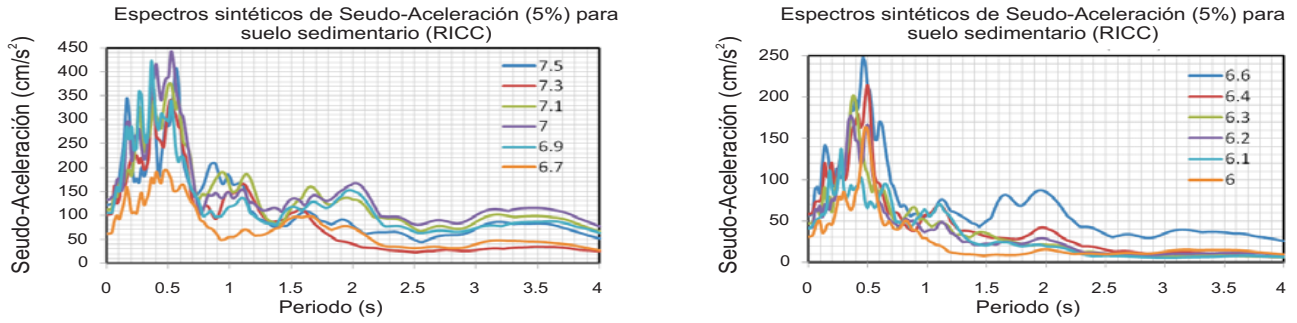


Figura 8. Espectros sintéticos de Seudo-Aceleración con 5% de amortiguamiento crítico para suelo sedimentario (RICC) para diferentes magnitudes simuladas de la fuente sísmica Ometepec.

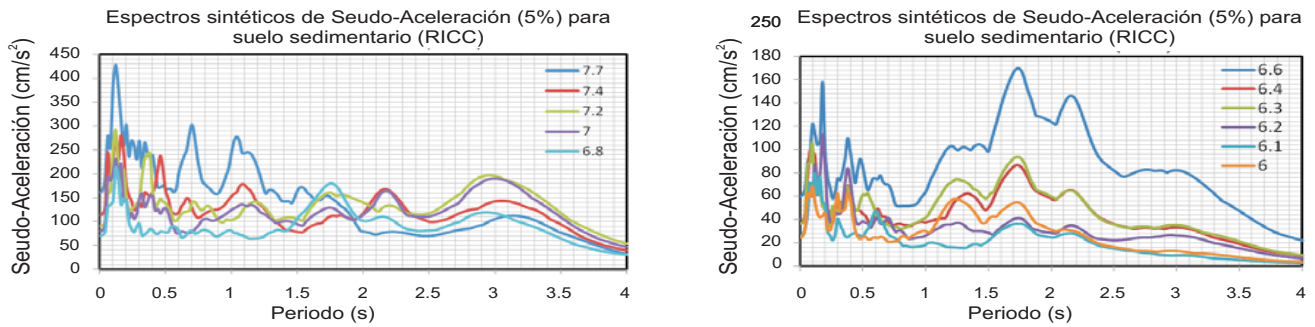


Figura 9. Espectros sintéticos de Seudo-Aceleración con 5% de amortiguamiento crítico para suelo sedimentario (RICC) para diferentes magnitudes simuladas de la fuente sísmica Acapulco-San Marcos.

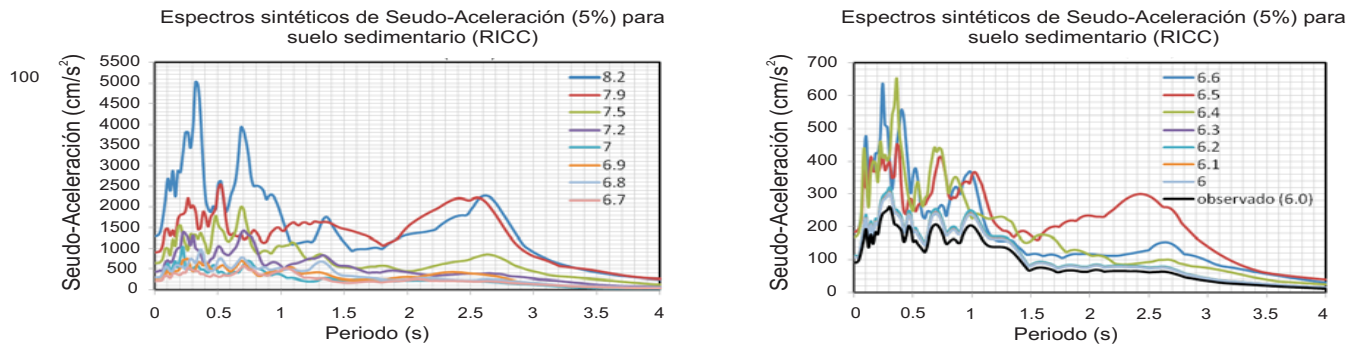


Figura 10. Espectros sintéticos de Seudo-Aceleración con 5% de amortiguamiento crítico para suelo sedimentario (RICC) para diferentes magnitudes simuladas de la fuente sísmica Guerrero Central.

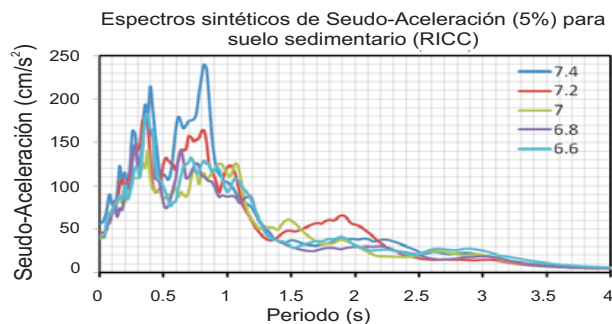


Figura 11. Espectros sintéticos de Seudo-Aceleración con 5% de amortiguamiento crítico para suelo sedimentario (RICC) para diferentes magnitudes simuladas de la fuente sísmica Petatlán.

Tabla 4. Tiempos de recurrencia local e históricos de las diferentes fuentes sísmicas

Fuente sísmica	Longitudes	T <sub>L</sub> (años)	T <sub>H</sub> (años)
Ometepec (OM)	98° a 99° O	30	<b>36</b>
Acapulco-San Marcos (ASM)	99° a 100° O	30	<b>56</b>
Guerrero Central (GC)	100° a 101.2° O	50	<b>98</b>
Petatlán (PE)	101° a 101.8° O	20	<b>36</b>

las fuentes sísmicas de Ometepec, Acapulco-San Marcos, Guerrero Central y Petatlán, respectivamente. En la figura 12, se presentan las relaciones M-λ(M) que caracterizan el potencial y actividad (sismicidad) de las fuentes sísmicas estudiadas. Se observa un comportamiento muy similar de la tasa media de excedencia de la magnitud para las diferentes fuentes sísmicas estudiadas. La diferencia más significativa es el tiempo de recurrencia de sus sismos característicos donde, el de Guerrero Central es el más grande y el de Petatlán el más corto.

$$\text{Log}T_r = \left(\frac{1}{3}\right)\log(M_0) - 7.5 \quad (16)$$

En la figura 13 se presentan las curvas de peligro sísmico para suelo sedimentario de Chilpancingo, obtenidas a través de acelerogramas (PGA) sintéticos de las fuentes, sísmicas Ometepec, Acapulco-San Marcos, Guerrero Central y Petatlán. Estas curvas expresan la tasa de excedencia de la aceleración horizontal máxima del terreno; el inverso de λ(PGA) indica el periodo de retorno para el cual puede excederse cierto nivel de PGA. Se observa que Guerrero Central, representa el más alto peligro sísmico para la ciudad de Chilpancingo, pues se observa que para un periodo de retorno de alrededor de 100 años, las aceleraciones horizontales máximas del terreno pueden exceder de 1000 cm/s<sup>2</sup>.

### COMPARACIÓN CON EL ENFOQUE CLÁSICO

Con el objetivo de tener una idea más completa del peligro sísmico en suelo sedimentario (RICC) de la ciudad de Chilpancingo, se determinó el

movimiento fuerte esperado del terreno con un modelo de atenuación, utilizando la base de datos de la tabla 3 (sismos sintéticos), con datos únicamente de la fuente sísmica Guerrero Central. Se realizó la regresión utilizando el funcional de la ecuación 17, el cual no incluye efecto de sitio y considera solamente el mecanismo de falla inversa (sismo de subducción). Con la ecuación 18 se obtuvo la relación de atenuación para un sismo de magnitud M<sub>w</sub>=8.2, la cual se presenta en la figura 14, donde se aprecia variación de la aceleración horizontal máxima (PGA) con la distancia hipocentral.

$$\ln(PGA) = C_1 + C_2 M_w + C_3 \ln(R) \quad (17)$$

$$\ln(PGA) = -0.322 + 1.198 M_w - 0.527 \ln(R) \quad (18)$$

Posteriormente, utilizando nuevamente el funcional de la ecuación 17 para la regresión, pero ahora considerando los datos de todas las fuentes sísmicas presentadas en la tabla 3, se obtuvo el funcional de la ecuación 19 con el que se determinó la relación de atenuación sintética para una magnitud de M<sub>w</sub>=8.2, la cual se presenta en la misma figura 14. La relación de atenuación con sismos observados se determinó con una base de datos de 22 sismos registrados en las estaciones CHI1 y RICC (suelo sedimentario), con magnitudes M<sub>w</sub> entre 5.0 y 8.1 y distancias epicentrales entre 47.0 y 653.3 km. En la ecuación 20 se presenta el funcional usado en la regresión correspondiente y en la ecuación 21 el obtenido para determinar la relación de atenuación para una magnitud de M<sub>w</sub>=8.2.

$$\ln(PGA) = 4.331 + 1.206 M_w - 1.692 \ln(R) \quad (19)$$

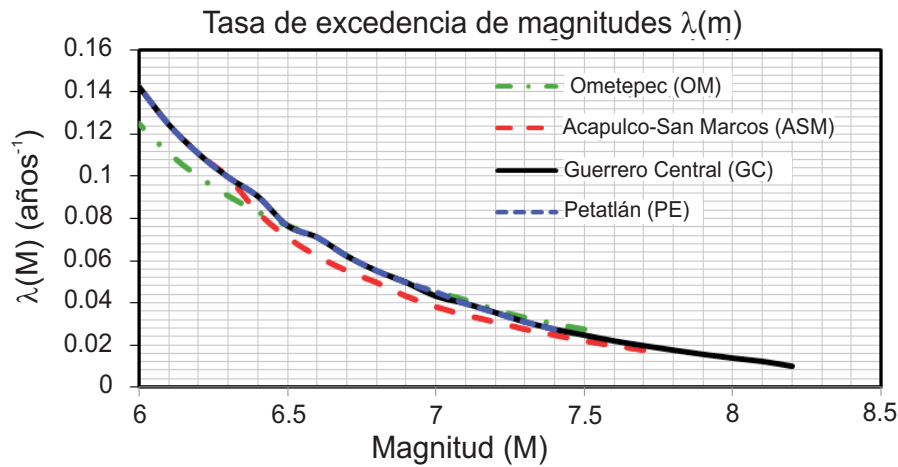


Figura 12. Tasa de excedencia de magnitudes  $\lambda(M)$  para las fuentes sísmicas Ometepec, Acapulco-San Marcos, Guerrero Central y Petatlán.

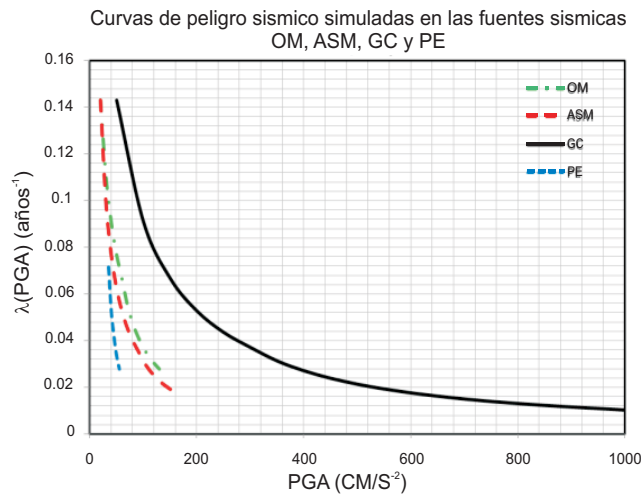


Figura 13. Curvas de peligro sísmico para suelo sedimentario de Chilpancingo, simuladas en las fuentes sísmicas Ometepec, Acapulco-San Marcos, Guerrero Central y Petatlán.

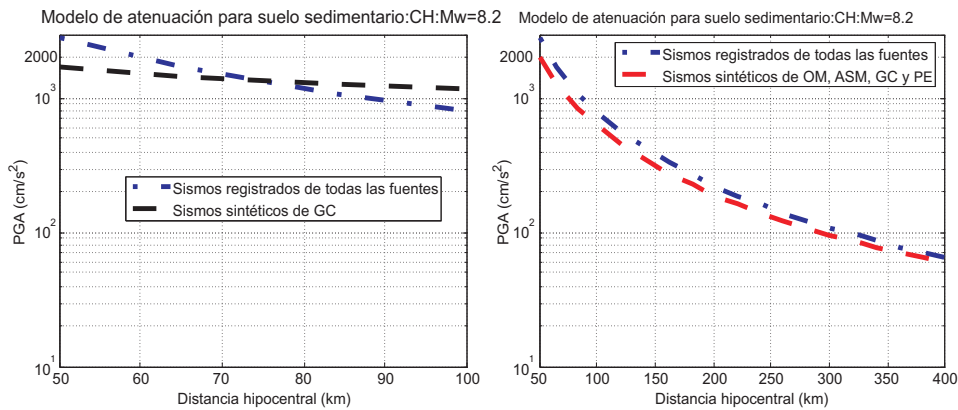


Figura 14. Comparativa entre relaciones de atenuación de sismos registrados de todas las fuentes con sintéticos de Guerrero Central (izquierda) y registrados de todas las fuentes con sintéticos de todas las fuentes (derecha).

$$\ln(PGA)=C_1+C_2M_w+C_3\ln(R)+C_4S_1 \quad (20)$$

$$\ln(PGA)=-1.56+1.45M_w-1.8\ln(R)-2.216 \quad (21)$$

Al comparar en la figura 14 la relación de atenuación obtenida con sismos sintéticos (enfoque Neo-Determinista) de la fuente Guerrero Central con la determinada con sismos registrados (enfoque Determinista) de todas las fuentes sísmicas, se observa que para una distancia hipocentral de 90 km la aceleración horizontal máxima del terreno para un sismo de magnitud  $M_w=8.2$  resulta de 1249.577 cm/s<sup>2</sup> y 957.528 cm/s<sup>2</sup>, respectivamente, lo cual representa una diferencia significativa. Lo más adecuado es determinar una relación de atenuación para cada fuente, pero en el caso Determinista no se contó con suficientes datos de cada fuente sísmica. Al comparar en la figura 14 la relación de atenuación obtenida con sismos sintéticos de todas las fuentes con la determinada con sismos registrados de todas las fuentes, se encontró que para una distancia hipocentral de 90 km la aceleración horizontal máxima del terreno para un sismo de magnitud  $M_w=8.2$  resulta de 744.23 cm/s<sup>2</sup> y 957.528 cm/s<sup>2</sup>, respectivamente.

En general se observan mayores aceleraciones máximas del terreno para la misma distancia hipocentral en la relación de atenuación determinada con sismos registrados (enfoque Determinista) de todas las fuentes que de la obtenida con sismos sintéticos (enfoque Neo-Determinista) de todas las fuentes. También se observa una diferencia muy significativa entre la relación de atenuación determinada con sismos sintéticos de la fuente Guerrero Central, comparada con la obtenida usando sismos sintéticos de todas las fuentes (OM, ASM, GC y PE), pero como ya se dijo lo más adecuado es considerar el estudio individual de cada fuente sísmica. Es importante recordar que el método de las funciones de Green empíricas considera una fuente finita, donde puede variar el inicio de

la ruptura dentro de la aspereza. Aun así, resulta muy interesante esta comparación.

## ESPECTRO SINTÉTICO DE SITIO (RICC)

Las ordenadas espectrales máximas de los sismos sintéticos de todas las fuentes sísmicas calculadas (figuras 8 a 11), con excepción de la fuente sísmica Guerrero Central, son cubiertas por el espectro de diseño sísmico del Reglamento de Construcción para los Municipios del Estado de Guerrero. Por tanto, la fuente sísmica Guerrero Central resultó ser el escenario de mayor peligro sísmico para el valle de Chilpancingo, y los sismos sintéticos de la tabla 3 correspondientes a esta fuente, son considerados para estimar espectros sintético de sitio (RICC).

En la figura 15 se presentan cuatro espectros sintéticos de sitio estimados considerando los sismos sintéticos en el intervalo de las magnitudes estudiadas de la fuente sísmica Guerrero Central (tabla 3). Cada espectro se definió de acuerdo al criterio de Newmark y Hall (1973), que considera que para una proporción de amortiguamiento estructural del 5%, el factor de amplificación para la aceleración máxima del terreno es 2.6, considerando dos periodos característicos según los espectros de respuesta. Se consideró conveniente proponer la aceleración máxima del terreno para cada uno de los cuatro espectros de acuerdo al promedio de las aceleraciones máximas de los sismos sintéticos con magnitud 7.9, 7.5, 7.0 y 6.5, respectivamente. Cada una de estas magnitudes representa la magnitud promedio al considerar cuatro niveles de ocurrencia. Estos niveles se definieron para representar los eventos "muy raro", "raro", "ocasional" y "frecuente". La nomenclatura adoptada en este trabajo para estos cuatro niveles es la usada por VISION 2000 (1996).

En la misma figura 15 se presenta una comparativa entre los espectros sintéticos de sitio y el

espectro de diseño para edificaciones clasificadas como del grupo B que exige el Reglamento de Construcción para los Municipios del Estado de Guerrero, para la zona sísmica D (ciudad de Chilpancingo), para terreno tipo II (Depósitos aluviales). En el primero de los espectros se observa que la zona plana propuesta del espectro no cubre totalmente la ordenada máxima de  $2548.99 \text{ cm/s}^2$  que se presenta para un periodo de 0.52 s del sismo sintético con magnitud 7.9, la cual puede cubrirse con la sobre-resistencia de las estructuras. Los periodos característicos del espectro sintético de sitio estimado, están perfectamente definidos entre 0.5 y 2.5 s. Aquí se observa que la zona plana del espectro sintético de sitio estimado del sismo considerado como muy raro, es mucho mayor comparada con lo que exige el Reglamento de Construcción vigente. Los límites de los periodos característicos del

espectro sintético de sitio estimado para el sismo muy raro cubren periodos más largos y por tanto, una zona plana del espectro mayor.

En la tabla 5 se presentan los principales parámetros que definen los espectros sintéticos de sitio estimado (RICC) y el que exige el Reglamento de Construcción en vigor.

Se puede concluir, que el enfoque Neo-Determinista tiene una gran ventaja sobre el enfoque probabilista por dos razones principalmente: la primera porque evalúa de manera más realista el peligro sísmico en una región (o sitio) y la segunda porque se pueden utilizar directamente los acelerogramas sintéticos para diseñar estructuras típicas o megaestructuras así como revisar la vulnerabilidad de las existentes, lo cual no es posible con el enfoque tradicional.

Tabla 5. Valores de los parámetros para calcular los espectros

Zona	c	$a_0$	$T_a$ (s)	$T_b$ (s)	r
Espectro sintético de sitio (RICC): Sismo muy Raro ( $M_w=7.9$ )					
II (Depósitos aluviales)	2.20	0.86	0.50	2.50	1.33
Espectro sintético de sitio (RICC): Sismo Raro ( $M_w=7.5$ )					
II (Depósitos aluviales)	1.72	0.66	0.50	1.50	1.33
Espectro sintético de sitio (RICC): Sismo Ocasional ( $M_w=7.0$ )					
II (Depósitos aluviales)	0.78	0.30	0.30	1.50	1.33
Espectro sintético de sitio (RICC): Sismo Frecuente ( $M_w=6.5$ )					
II (Depósitos aluviales)	0.47	0.18	0.30	1.50	1.33
Espectro para diseño del Reglamento de Construcción para los Municipios del Estado de Guerrero					
II (Depósitos aluviales)	0.86	-	-	1.2	0.66



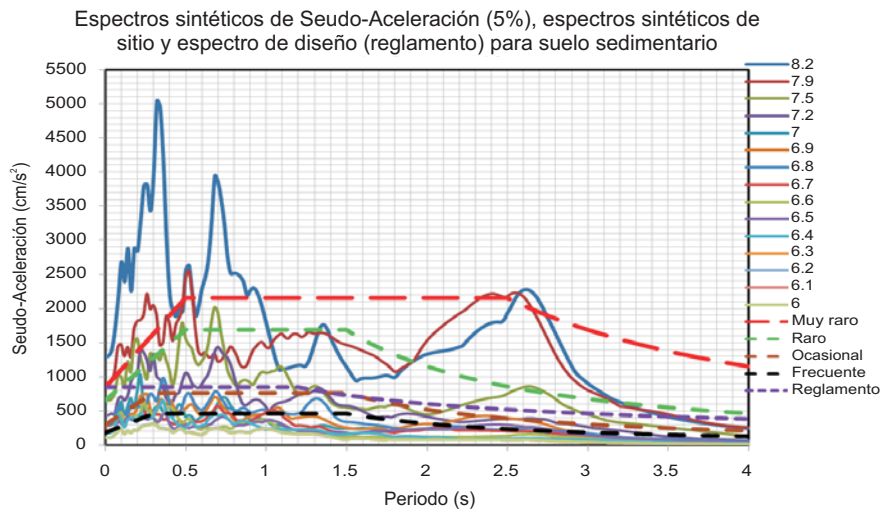


Figura 15. Espectros sintéticos de Seudo-Aceleración con 5% de amortiguamiento crítico, espectros sintéticos de sitio y espectro de diseño del Reglamento de Construcción, para suelo sedimentario.

## CONCLUSIONES

Al no contar con registros de sismos intensos de las fuentes sísmicas Guerrero Central y Acapulco San Marcos, es decir, las más cercanas al sitio (menos de 100 km de Chilpancingo), se decidió aplicar el método de las funciones de Green empíricas, con el objetivo de generar sismos sintéticos. Se encontró que la fuente sísmica de Guerrero Central produce el mayor peligro sísmico para Chilpancingo, de acuerdo a los resultados, debido a la magnitud de  $M_w=8.2$  considerada como sismo máximo probable para este segmento y también a la cercanía de la aspereza al sitio, así como también al fuerte efecto de la directividad. El escenario sísmico más crítico lo representa la fuente sísmica de Guerrero Central que incluye una aceleración horizontal máxima del terreno de  $2358 \text{ cm/s}^2$ .

Aunque el enfoque utilizado en este estudio no es muy frecuente para valorar el peligro sísmico en un sitio, es una herramienta útil, no sólo porque permite considerar el peor escenario sísmico, sino porque sus resultados son acelerogramas, con los que se puede analizar de manera directa el comportamiento estructural de las diferentes

construcciones ubicadas en el lugar. De los espectros sintéticos de Seudo-Aceleración de respuesta elástica con 5% de amortiguamiento crítico, se observa que los sismos que se pueden producir en Guerrero Central, con epicentros cercanos a 70 km y a profundidades alrededor de 25 km, pueden provocar daño a las construcciones de la ciudad de Chilpancingo con periodos estructurales comprendidos en el intervalo de 0.30 a 2.5s.

Las curvas de peligro sísmico obtenidas para el suelo sedimentario (RICC) de Chilpancingo, que expresan la tasa de excedencia de la PGA horizontal y su inverso, el periodo de retorno para el cual se excede cierto nivel de PGA, son muy importantes para decidir el nivel de aceleración con el que se debe diseñar una estructura. Para fines de diseño estructural destaca la curva de peligro sísmico obtenida a través de la fuente sísmica Guerrero Central, pues se observa que para un periodo de retorno de alrededor de 100 años, las aceleraciones horizontales máximas del terreno se pueden exceder de  $1000 \text{ cm/s}^2$ . Para propósitos de diseño estructural, se recomienda utilizar este enfoque de peligro sísmico en los Reglamentos de Construcción. Su



aplicación conduciría a diseños más realistas y confiables, así como a evaluaciones estructurales de construcciones existentes.

A través de sus relaciones de atenuación se realizó una comparación entre los resultados del enfoque Determinista y Neo-Determinista. Se encontró en general una correlación razonable que robustece el enfoque Neo-Determinista. Finalmente, Los resultados de este trabajo respaldan la tesis de que el enfoque Neo-Determinista es adecuado para la valoración del peligro sísmico. Existen aún variables y detalles no explorados en este trabajo, que sería conveniente estudiar.

## AGRADECIMIENTOS

Se agradece a los árbitros, por su revisión y comentarios que sirvieron para mejorar el trabajo. También se agradece al Instituto de Ingeniería de la Universidad Nacional Autónoma de México, por todas las facilidades otorgadas para la realización del trabajo.

## REFERENCIAS

- Aguirre, J., Irikura K. y Kudo K., 1994. Estimation of strong ground motion on hard rock and soft sediments sites in the AshigaraValley using the empirical Green's function method. *Bulletin Disaster Prevention Research Institute, KyotoUniversity*, Vol. 44, part 1, No 379, pp. 45-64.
- Anderson, J. G., Bodin P., Brune J. N., Prince J., Singh S. K., Quaas R. y Onate M., 1986. Strong Ground Motion from the Michoacan, Mexico, Earthquake. *Articles, Science*, Vol. 233.
- Aki, K., 1967. Scaling law of seismic spectra. *Journal of Geophysical Research*, Vol. 72, pp. 5359-5376.

Asano, K., T. Iwata, y K. Irikura, 2005. Estimation of source process and strong ground motion simulation of the 2002 Denali, Alaska, earthquake. *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol. 95, 1701-1715.

Asano, Kimiyiki, y Tomotaka Iwata, 2006. Source process and near-source ground motions of the 2005 West off Fukuoka Prefecture earthquake. *Earth Planets Space*, Vol. 58, 93-98.

Astiz, L. y Kanamori H., 1984. An earthquake doublet in Ometepe, Guerrero, México. *Physics of the Earth and Planet Interiors* 34, pp. 24-25.

Centroid Moment Tensor (CMT:Harvard) Catalogo, <http://www.globalcmt.org/CMTsearch.html>

Courboux, F., *et al.*, 1997. The 14 September 1995 (M=7.3) Copala, Mexico, Earthquake: A Source Study Teleseismic, Regional, and Local Data. *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol. 87, No. 4, pp. 999-1010.

Hartzell, S. H., 1978. Earthquake aftershock as Gree's function. *Geophysic Research Letter*, Vol. 5, pp. 1-4.

Irikura, K., 1983. Semi-Empirical Estimation of Strong Ground Motions During Large Earthquake. *Bulletin Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University*, Vol. 33, Part 2, No. 298.

Irikura, K., 1986. Prediction of strong acceleration motion using empirical Green's function. *Proc. 7th Japan Earthquake Eng. Symp.*, pp. 151-156 (en japonés).

- Kamae, K., K. Irikura, 1998. Rupture process of the 1995 Hyogo-ken-Nanbu earthquake and simulation of near-source ground motion. *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol. 88, pp. 400-412.
- Kanamori, H., 1977. The energy release in great earthquakes. *Journal Geophysical Research*, Vol. 82, pp. 2981-2987.
- Kostoglodov, V. y Pacheco J. F., 1999. Cien años de sismicidad en México. Instituto de Geofísica de la UNAM y Servicio Sismológico Nacional.
- Klügel, Jens-Uwe, 2006a. Procedure for the evaluation of damaging effects of earthquakes. IAEA Specialist meeting on the Seismic Probabilistic Safety Assessment of Nuclear Facilities, Seogwipo, Jeju Island, Korea. OECD.
- Klügel, Jens-Uwe, 2006b. A Procedure for Probabilistic Scenario-Based Seismic Risk Analysis for Critical Infrastructures-Method and Application for a Nuclear Power Plant. Poster GC41B-1054, AGU Fall Meeting, San Francisco, December 11-15.
- Klügel, Jens-Uwe, 2006c. Lesson learned from seismic PSA Level 1 and Level 2 at NPP Goesgen. IAEA Specialist meeting on the Seismic Probabilistic Safety Assessment of Nuclear Facilities, Seogwipo, Jeju Island, Korea. OECD.
- Klügel, Jens-Uwe 2006d. Data analysis for the evaluation of parameters of the temporal and spatial frequency distribution of earthquake recurrence around the Goesgen site. *KKG-report*, VER-D-23274, pp. 79.
- Klügel, Jens-Uwe, 2007a. Error inflation in probabilistic seismic hazard analysis. *Engineering Geology* 90, 186-192.
- Klügel, Jens-Uwe, 2007b. How to eliminate non-damaging earthquake from the results of the probabilistic seismic hazard analysis (PSHA)-A comprehensive procedure with site specific application. SMIRT 19, Toronto, paper # 1142.
- Lomnitz-Adler, J. y Lomnitz C., 1979. A modified form of the Gutenberg-Richter magnitude-frequency law. *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol. 63, pp. 1999-2003.
- Matsushima, S., y H. Kawase, 2000. Multiple asperity source of the Hyogo-ken Nanbu earthquake of 1995 and strong motion simulation in Kobe. *J. Struct. Constr. Eng., AIJ*, Vol. 534, 33-40. (En japonés con resumen en inglés ).
- Merz, H. A. y Cornell C. A., 1973a. Seismic risk based on a quadratic magnitude-frequency law. *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol. 73, No. 6, pp. 1949-2006.
- Miyake, H., T. Iwata, K. Irikura, 2003. Source Characterization for Broadband Ground-Motion Simulation: Kinematic Heterogeneous Source Model And Strong Motion Generation Area. *Bulletin of the Seismological Society of America*, V. 93, 2531-2545.
- Newmark, N. M. y Hall, W. J., 1973. "Procedures and criteria for earthquake-resistant design", Building Practices for Disaster Mitigation, Washington, D. C., Building Science Series 46, U. S. Department of Commerce, pp. 209-236.
- Nishenko, S. P. y Singh S. K., 1987. Conditional probabilities for the recurrence of large and great interplate earthquakes along the Mexican subduction zone. *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol. 77, No. 6, pp. 2095-2114.

- Ortiz, M., *et al.*, 2000. Sources areas of the Acapulco-San Marcos, Mexico earthquakes of 1962 (M 7.1; 7.0) and 1957 (M 7.7), as constrained by tsunami and uplift records. *Geofísica Internacional*, Vol. 39, Num. 4, pp. 337-348.
- Panza, G. F., *et al.*, 2008. Recent achievements of the neo-deterministic seismic hazard assessment in the CEI region. United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization and International Atomic Energy Agency.
- Reiter, L., 1990. Earthquake Hazard Analysis—Issues and Insights. *Columbia University Press*, New York, 254 pp.
- SEAOC, 1996. “A framework for performance based design”, Structural Engineers Association of California. VISION 2000 Committee, California.
- Schwartz D. P. y Coppersmith K. J., 1984. Fault behavior and characteristic earthquake: examples from the Wasatch and San Andreas fault zones. *Journal of Geophysical Research*, Vol. 89, No. B7, pp. 5681-5698.
- Schwartz, D. P., 1988. Geology and seismic hazard: moving into the 1990s. *Proceedings, Earthquake Engineering and Soil Dynamics II: Recent Advances in Ground Motion Evaluation*, Geotechnical Special Publication 20, ASCE, New York, pp. 1-42.
- Shah, H. C., *et al.*, 1975. A study of Seismic Risk for Nicaragua, Part I. Report 11, The Jonh A. Blume Earthquake Engineering Center, Stanford University, Stanford, California.
- Singh, S. K., *et al.*, 2007. A Report on the Atoyac, Mexico, Earthquake of 13 April 2007 ( $M_w$  5.9). *Seismological Research Letters*, Vol. 78, Number 6.
- Somerville, Paul G., *et al.*, 2002. Characterizing heterogeneous slip models for large subduction earthquakes for strong ground motion prediction. *Memorias del 11º Simposium de Ingeniería Sísmica*, 163-166. (japonés).
- Suzuki, W., *et al.*, 2005. Estimation of the source model for the foreshock of the 2004 off the Kii peninsula earthquakes and strong ground motion simulation of the hypothetical Tonankai earthquake using the empirical Green’s function method. *Earth Planets Space*, Vol. 57, 345-350.
- U. S. Geological Survey, <http://www.usgs.gov/>
- Youngs, R. R. y Coppersmith K. J., 1985. Implications of fault slip rates and earthquake recurrence models to probabilistic seismic hazard assessments. *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol. 75, No. 4, pp. 939-964.
- Zúñiga, F. Ramón y Wyss Max, 2001. Most- and Least-Likely Location of Large to Great Earthquakes along the Pacific Coast of Mexico Estimated from Local Recurrence Times Base don b- Values. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 91, 6, pp. 1717-1728.

Manuscrito recibido: 13 de octubre, 2010

Recepción del manuscrito corregido: 20 de julio, 2011

Manuscrito aceptado: 15 de septiembre, 2011

# RASGOS GEOLÓGICOS Y MORFOLÓGICOS ASOCIADOS CON PELIGROS NATURALES EN LOS FRACCIONAMIENTOS EL VALLE Y HACIENDA ACUEDUCTO, TIJUANA, BAJA CALIFORNIA

Luis A. Delgado Argote, Gemma Gómez Castillo, Tomás A. Peña Alonso, Xóchitl G. Torres Carrillo y Porfirio Avilez Serrano

Departamento de Geología  
División de Ciencias de la Tierra, CICESE  
E-mail: ldelgado@cicese.mx, gomezc@cicese.mx, alepena@cicese.mx, xtorres@cicese.mx y pavilez@cicese.mx

## RESUMEN

Los fraccionamientos El Valle y Hacienda Acueducto, en Tijuana, Baja California, se encuentran en una región caracterizada por pliegues suaves y fallas normales, ambos orientados NE-SW, casi perpendiculares a las fallas regionales de rumbo. Localmente, las fallas de desplazamiento lateral se orientan N-S y E-W. Dichas estructuras se desarrollan principalmente en areniscas marinas y fluviales pobremente consolidadas, posiblemente miocénicas. En algunos sitios se observan deslizamientos rotacionales a partir de esas zonas de falla, promovidos por cortes en las laderas y construcción de viviendas. En la zona cartografiada, los echados de la secuencia sedimentaria buzan preferentemente en dirección contraria a la pendiente del cerro principal sobre el que se asientan las construcciones, lo que le da cierta estabilidad al terreno. La inestabilidad, promovida principalmente por la acción del agua, se asocia a la reactivación de estructuras de falla y a las pendientes pronunciadas, por lo que se recomienda un monitoreo permanente o sistemático del drenaje pluvial y de las obras de ingeniería civil. Es importante considerar también que la zona es sísmicamente activa y que esta actividad es también un factor que dispara los deslizamientos de ladera en zonas inestables.

Palabras clave: Deslizamientos; inestabilidad de talud; Tijuana, Baja California.

## INTRODUCCIÓN

Este estudio tuvo como objetivo determinar las condiciones geológicas, geomorfológicas y estructurales del terreno en el que asientan los fraccionamientos Privada Acantilado, Hacienda Acueducto y El Valle, en la ciudad de Tijuana, Baja California, mediante un reconocimiento geológico, mapeo estructural en afloramientos y mapeo de daños en las casas de los fraccionamientos. El estudio se realizó a solicitud de la Asociación de Colonos Privada Hacienda Santa Claudia, A.C., debido a que un gran número de viviendas de esos fraccionamientos presentan daños y agrietamientos recurrentes.

La zona de estudio se localiza en la parte centro-sur de la ciudad de Tijuana, Baja California (Fig.1).

Los fraccionamientos Privada Acantilado, Hacienda Acueducto y El Valle están asentados en la parte central de un cerro que en este trabajo llamaremos Cerro El Valle, que y está limitado al noroeste por la Avenida Emperadores y, al sur, por las avenidas Art. 53 y Ejército Trigarante.

Este cerro tiene una geometría irregular (Fig. 2); la extensión de su eje norte-sur es de aproximadamente 1200 metros y la de su eje este-oeste, es de aproximadamente 900 metros. La altura máxima del cerro es de 233 m, en un lugar ubicado en el límite sur del Fraccionamiento Hacienda Acueducto, a partir del cual el terreno donde se desarrollan los fraccionamientos tiene una pendiente relativamente suave hacia el norte y oeste, y abrupta hacia el este y sur.



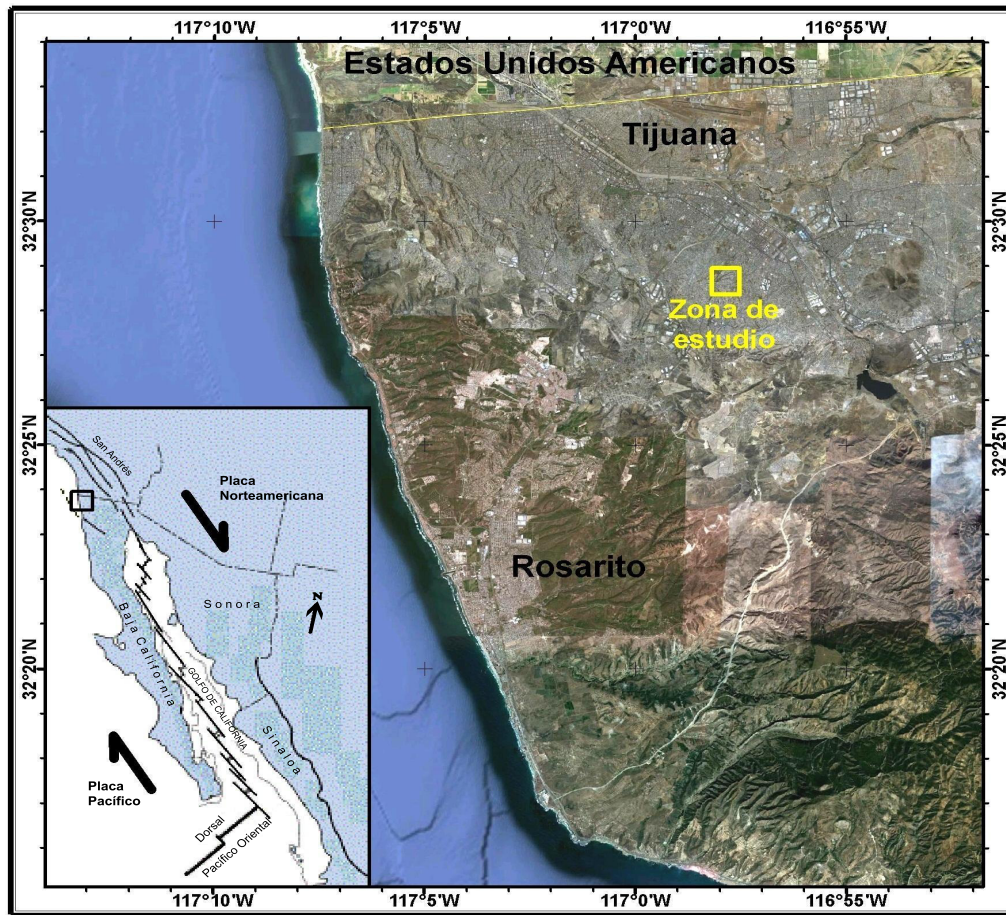


Fig. 1. Imagen satelital de la ciudad de Tijuana obtenida y modificada de Google Earth. El símbolo amarillo en la parte central de la imagen indica la localización del área de estudio. Las líneas amarillas interrumpidas son las principales vialidades de la ciudad.

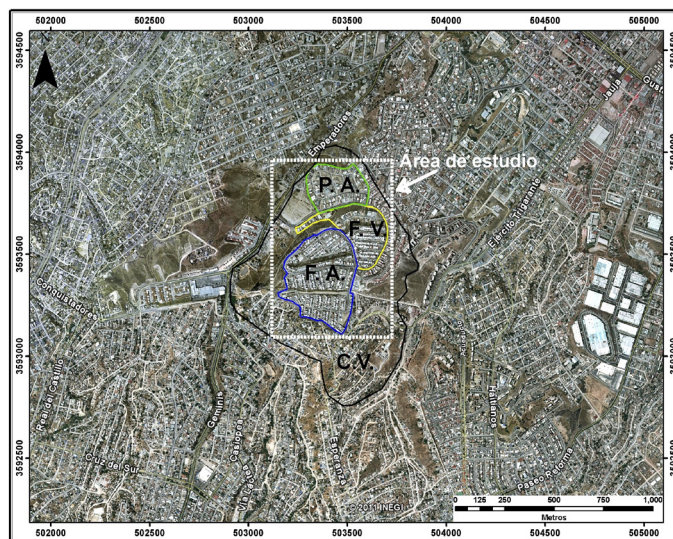


Fig. 2. Imagen satelital obtenida y modificada de Google Earth donde se indica el cerro urbanizado (área externa) en el que se localizan los fraccionamientos Privada Acantilado, Hacienda Acueducto y El Valle (área interna). Las líneas gruesas y continuas son las principales vialidades de la ciudad.

## Ambiente tectónico

La península de Baja California es un fragmento de corteza desprendida del macizo continental de México que se desplaza hacia el NW junto con la placa Pacífico. En el oriente, en la cuenca marginal del Golfo de California, se desarrolla un sistema de fallas escalonadas que definen al sistema transforme San Andrés-Golfo de California, activo desde hace aproximadamente 5 Ma. La región del norte de la península y sur de California se caracteriza por la presencia de fallas regionales activas orientadas NWSE. Legg y colaboradores (1991) definieron a este bloque como la Zona de Cizalla del Sur de California (Southern California Shear Zone). Sus límites están marcados por el sistema de fallas San Andrés en el oriente, el sistema San Clemente en el occidente (en ambiente marino), las Sierras Transversas en el norte, cerca de Los Ángeles, California, y el sistema de fallas Agua Blanca, al sur de Ensenada.

Dentro de este marco tectónico, en el norte de la península se desarrolla un complejo arreglo de fallas sísmicamente activas orientadas NW y una sismicidad cuyos epicentros se alinean NE, perpendicularmente a las fallas regionales. Entre Tijuana y aproximadamente 75 km al sur de Ensenada, el borde de la península muestra evidencias de importantes levantamientos (Rockwell et al., 1989). Se ha documentado por medio de sísmica de reflexión que las fallas cercanas a la costa afectan a sedimentos cuaternarios (Legg, 1991; Legg et al., 1991).

## Litología regional

En la parte noroccidental de la península, el basamento está formado por rocas graníticas y una secuencia metamorfizada de rocas volcánicas y volcanosedimentarias de arco de la Fm. Alisitos del Cretácico, que aflora ampliamente en el extremo oriental de Tijuana. El basamento está cubierto discordantemente por depósitos sedimentarios pobremente consolidados de la Fm. Rosario del Cretácico tardío (Fig. 3).

A las unidades cretácicas del basamento les sobreyace la Fm. Rosarito Beach, la cual está bien expuesta desde Tijuana hasta Ensenada.

Esta unidad del Mioceno está constituida por derrames basálticos, brechas y arenas con matriz de lodo, tobas, areniscas tobáceas, calizas y conglomerados característicos de ambientes fluviales, lacustres y de plataforma marina somera (Ashby, 1989). Durante el Plio-Pleistoceno, en los alrededores de Tijuana, se depositó la Fm. San Diego sobre tobas de la Fm. Rosarito Beach, la cual está constituida por arenas finas en la base y arenas y conglomerados en la cima, todo depositado en cuencas estructurales de tipo transtensional (Minch et al., 1984).

Sobreyace discordantemente la Fm. Lindavista del Pleistoceno-Reciente (Gastil et al., 1975) formada por areniscas y conglomerados que, en el sur de Tijuana, corona los cerros y mesas. La ciudad de Tijuana está edificada principalmente sobre estas dos últimas formaciones.

## Rasgos estructurales mayores y sismicidad

La deformación general del NW de Baja California está gobernada por el sistema San Andrés-Golfo de California. En el borde continental, los sismos son escasos pero los epicentros se alinean con las fallas (Legg et al., 1991). Todas las fallas en esta región son de tipo lateral derecho de las que se estiman velocidades de desplazamiento desde 1 mm hasta 6 cm por año (Rockwell et al., 1987; Legg et al., 1991; Legg, 1991; Suárez et al., 1991; Suárez, 1993). La presencia de estas fallas hace que el peligro geológico por sismicidad sea alto. Los mecanismos focales son consistentes con el sentido de desplazamiento inferido y los epicentros son paralelos a las trazas de las fallas (Legg et al., 1991). Una excepción importante es el sistema de fallas Vallecitos-Calabazas, el cual es considerado activo y su traza termina pocos kilómetros al SE de Tijuana. Cartografía reciente apoyada con estudios paleomagnéticos en el basamento (Böhnell et al., 2002) no indican actividad reciente en esta falla. Desde el punto de vista sísmico, mapas de distribución de energía sísmica en la región indican notables alineamientos de epicentros en dirección NE (Frez y Frías-Camacho, 1998) que pueden correlacionarse con las fallas cartografiadas por Gastil et al. (1975) en la región de Tijuana (Fig. 3).



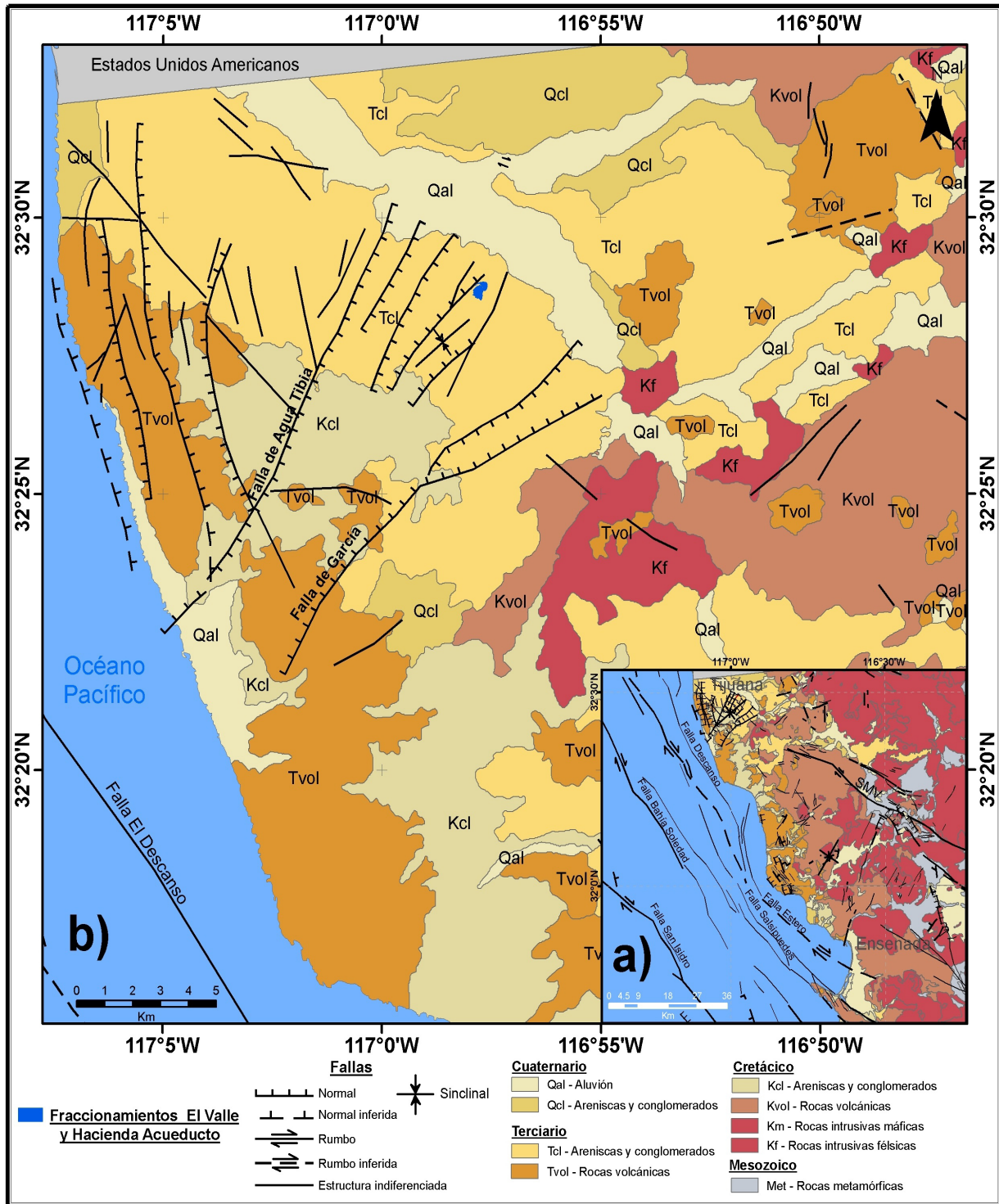


Fig. 3 a) Mapa geol3gico del NW de Baja California, donde se muestran las principales unidades litol3gicas y rasgos estructurales (Gastil *et al.*, 1975); b) Acercamiento a la regi3n de Tijuana del mismo mapa (a) indicando en el cuadro rojo la ubicaci3n de la zona de estudio. Litol3gicamente la zona se encuentra en rocas del Mioceno y Plioceno de origen marino y fluvial. Los principales rasgos estructurales son las fallas normales orientadas hacia el NE que indican el origen estructural de algunas cuencas de dep3sito y la presencia de pliegues con la misma orientaci3n. Las fallas con orientaci3n NW (San Miguel Vallecitos) son regionales de desplazamiento lateral derecho y las orientadas NNW cercanas a la costa son, en buena medida, producidas por levantamiento regional.



De acuerdo con el Servicio Geológico Mexicano (2003), la zona de estudio se encuentra a 7 km al NW de la falla normal Agua Tibia que se orienta hacia el NNE-SSW con echado hacia el oeste, y a 10 km al noroeste del sistema de fallas San Miguel-Vallecitos (Fig. 3). Aunque este sistema de fallas es relativamente lejano, su carácter regional y potencial sísmico es importante. Dicho sistema está conformado por una serie de fallas de transcurrencia derecha, escalonadas y orientadas NW-SE. Aunque la actividad sísmica en el área de estudio es de baja magnitud, no deja de ser importante debido a la inestabilidad propia del terreno por las pendientes pronunciadas en algunas zonas así como a la poca competencia de las rocas.

En la Fig. 4 se muestran los epicentros de los sismos reportados por la Red Sismológica del Noroeste de México (RESNOM) durante las tres últimas décadas cuya magnitud es mayor de 2.5. Debe destacarse: a) la correlación entre el alineamiento de los epicentros con respecto a la traza de algunas fallas del mapa geológico de la Fig. 3, principalmente en el sistema San Miguel-Vallecitos; b) la alineación de epicentros en segmentos más pequeños, aunque menos evidentes, con orientación NE-SW; y c) la cercanía a la zona de este estudio de sismos de magnitud 2.7 y 2.8 en 1989 y, hasta de 3.9 en 2003 y 2005, en otras partes de la zona urbana de Tijuana.

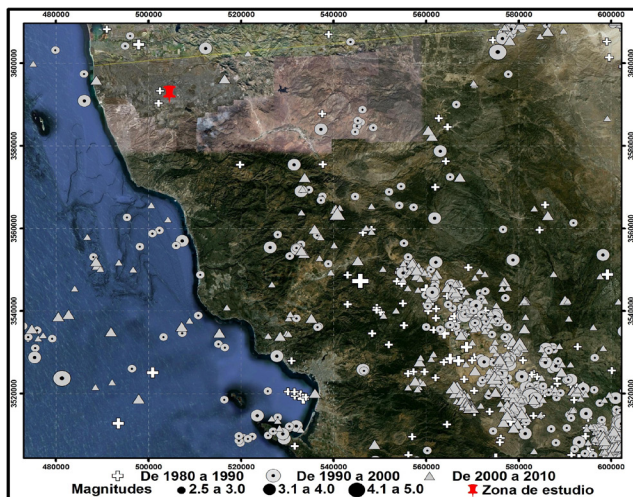


Fig. 4. Epicentros de sismos de magnitud mayor de 2.5 reportados por el CICESE (RESNOM) para las décadas 1980-1990, 1990-2000 y 2000-2010. El icono amarillo representa la zona de estudio.

## Antecedentes de deslizamientos en Tijuana

De acuerdo con Delgado-Argote et al. (1996), el riesgo geológico en Tijuana se debe a la conjunción de tres factores principales: presencia de fallas o fracturas, pendiente del terreno mayor o igual a 18% (10°) y una litología incompetente. De la evaluación regional de zonas de peligro, efectuada por los autores citados, se observa que éstas se localizan en los taludes o están cercanas a los rompimientos de pendiente en sitios donde la litología está dominada por las formaciones San Diego y Lindavista. La geometría dominante es de deslizamientos rotacionales. Deben considerarse como factores disparadores de los deslizamientos el grado de saturación de agua en los sedimentos, la respuesta sísmica del terreno y los cortes inducidos por la actividad del hombre.

## MÉTODOS

El trabajo de campo lo realizaron dos brigadas durante cinco días. Los datos estructurales se obtuvieron utilizando brújulas Brunton Geo en afloramientos de roca natural. La parte del estudio estructural se enfocó hacia la búsqueda y medición de estructuras geológicas tales como estratificación, fallas y fracturas en los terrenos con obras civiles. En estas formaciones incompetentes, los planos de estratificación pueden estar modificados por agentes erosivos. Otros fenómenos que contribuyen en la modificación del relieve son los asociados a las fallas y las fracturas, debido a que, cuando el material se comporta de manera rígida bajo un régimen de esfuerzos (gravitacionales o tectónicos), está sujeto a deformación por ruptura. Con los datos estructurales se construyeron dos perfiles para facilitar la visualización estructural del área de estudio.

Durante el reconocimiento del daño presente en las casas afectadas, el criterio usado para la medición de las grietas incluidas en este estudio, fue que: a) tuvieran una geometría clara e identificable; b) fueran penetrativas y claramente distintas a las debidas por defectos en la construcción; y c) su orientación y estilo se repitiera en el mismo inmueble. Se hicieron mediciones de agrietamientos que sugirieran movimiento en las viviendas a las que se tuvo acceso en la zona de estudio.

Estos datos se clasificaron en tres diferentes tipos:

a) plano de grietas con movimiento horizontal, b) plano de grietas con movimiento vertical y c) grietas en donde la dirección de movimiento se deduce a partir de series de fracturas, indicadas como plano inferido. Debido a que la gravedad es la fuerza principal de los deslizamientos, también se consideró la inclinación o pendiente del terreno en grados y la orientación azimutal de las pendientes, las cuales se midieron con brújula y se estimó visualmente la altura de los taludes donde se efectuaron las observaciones geológicas y de ruptura de obras civiles. Para correlacionar la orientación e inclinación de los taludes con respecto a las áreas de mayor daño, se cartografiaron direcciones estimadas de taludes.

Las estimaciones de orientación de taludes se efectuaron porque el mapa topográfico con el que se cuenta es de 1999 y muchos de los rasgos morfológicos actuales no aparecen. Es claro que en un mapa topográfico actualizado, los vectores de las pendientes deben ser perpendiculares a las curvas de nivel y, en este caso, los vectores se obtuvieron del promedio de por lo menos cinco mediciones de la dirección de la pendiente, comúnmente modificada por las obras de construcción.

Durante el trabajo de gabinete, la edición de las imágenes presentadas en este estudio se realizó por medio de la paquetería AutoCAD y Adobe Illustrator; la edición de las fotografías se llevó a cabo con la paquetería Corel Photopaint. Los datos obtenidos en este estudio fueron compilados en la paquetería Microsoft Excel y los mapas desarrollados a partir de la información de campo fueron generados en Arc Map 9.3.

La topografía se obtuvo de los datos vectoriales de la carta I11D71 (La Presa; INEGI, 1999). Las curvas de nivel con equidistancia de 20 metros fueron procesadas posteriormente en el programa ArcMap 9.3 para obtener curvas de nivel interpoladas con equidistancia de 5 m. A partir de estas curvas de nivel, con ayuda de las herramientas Spatial Analyst de ArcMap, se elaboró un modelo digital de elevación y la hidrología superficial del área de estudio.

## RESULTADOS

La litología de la zona de estudio consiste en horizontes de tobas, ocasionalmente con cristales de cuarzo y/o líticos de pómez hasta de pocos centímetros, de arenas tobáceas intercaladas con horizontes de varios centímetros de espesor de areniscas, similares a las de la Formación Rosarito Beach del Mioceno. Las areniscas están cubiertas, en contacto discontinuo, por depósitos de conglomerados polimícticos subangulosos y subredondeados de 20 a 0.5 mm, mal graduados, en una matriz de arenisca tobácea. También se observaron areniscas ligeramente cementadas de grano fino a medio, cuya relación estratigráfica con los depósitos anteriores se desconoce. En diferentes sectores se observó material de relleno para fines de obra civil, por ejemplo, en el terraplén donde se localiza el acueducto.

En la Fig. 5 se muestran los 18 sitios de donde se obtuvieron los datos con los que se elaboró el mapa estructural. La información está distribuida en los alrededores y dentro de los fraccionamientos Hacienda Acueducto, Privada Acantilado y El Valle. Con fines descriptivos, el área de estudio se dividió en cuatro cuadrantes: NW (noroeste), NE (noreste), SE (sureste) y SW (suroeste), según se indica en la Fig. 5.

En el cuadrante NW del área de estudio se identificó un conjunto de cizallas laterales izquierdas con componente normal con echado menor de 30°, lo que hace suponer que pueden estar asociadas con frentes de algún deslizamiento rotacional, toda vez que se localizan en las partes topográficamente más bajas, como hacia el sur de mercado Soriana y flanco NE del cañón que ocupa la avenida Emperadores. Las fallas normales son las más comunes. El rasgo más sobresaliente en estas estructuras es que todas, con excepción de una que se encuentra al NE del mercado Soriana y que es E-W con bloque caído hacia el sur, se orientan hacia el NE con caída dominante hacia el SW, en dirección de la pendiente. La orientación de las estructuras tiende a ser, en consecuencia, paralela a las curvas topográficas.

Se observa del histograma de pétalos de la Fig. 5 a del cuadrante NW y del estereograma 5 b del mismo cuadrante, que la dirección dominante de los planos de cizalla normales es  $N42^{\circ}E$ , con buzamiento promedio de  $80^{\circ}SE$ . La orientación de los planos de cizalla es paralela al gradiente topográfico de la zona de estudio.

En el cuadrante NE sólo se cartografió un plano de cizalla de desplazamiento lateral derecho con bloque caído hacia el W a lo largo de plano buzante  $60^{\circ}$ . A unas decenas de metros hacia el norte de este cuadrante, con centro en las coordenadas 503566-3594040 UTM, cerca del fraccionamiento Acantilado, se encuentra un área con colapso de casas que obedece a la reactivación de una falla que seguramente pertenece a la descrita, la cual se desarrolla en areniscas con material tobáceo y que se rellenó con material fluvial posiblemente durante el Cuaternario (Fig. 6 a).

La falla se orienta  $N10^{\circ}W$  con echado vertical y bloque caído hacia el W, similar al plano de cizalla cartografiado.

En la parte topográfica y estratigráficamente más alta del cuadrante SE, en el fraccionamiento Hacienda Acueducto, se cartografiaron planos que corresponden a fallas de desplazamiento normal o de gravedad, como la que se muestra en la Fig. 6 b. Es común que en estos sitios se observen estrías que indican, tanto movimientos verticales, como horizontales, por lo que se interpreta que el movimiento puede estar asociado con deformación transtensiva (transcurrencia y extensión) o antiguos deslizamientos rotacionales en donde hay, tanto fallas normales, como fallas de desplazamiento lateral (Fig. 6 b). Es muy probable que el plano de cizalla lateral localizado al oriente del acueducto tenga conexión con la falla lateral del cuadrante NE, definiendo una falla continua de desplazamiento lateral derecho que atraviesa toda la zona de estudio. Aunque son pocos datos, se observa en el histograma de pétalos y en el estereograma de planos de cizalla del cuadrante SE de la Fig. 5 a-b, que la tendencia NNW y NNE corresponden a las fallas de desplazamiento lateral cartografiadas en los cuadrantes NE y SE,

mientras que los pétalos menores con direcciones NE-SW estarían asociadas al movimiento de bloques por fallas normales. Esta interpretación es consistente con el origen estructural por fallas del relieve de la zona de estudio.

En el cuadrante SW también se cartografiaron planos de cizalla laterales pero, a diferencia de los cuadrantes orientales, los planos de cizalla indican movimiento con tendencia E-W, similar a las medidas en el cuadrante NW que está arriba. Los planos de falla normal, como en los casos anteriores, se orientan principalmente hacia el NE, siguiendo el estilo regional. El cambio de estilo de deformación lateral en este cuadrante puede interpretarse que se debe a la existencia de un bloque estructural distinto, como lo sugiere también la falta de regularidad en los echados de los horizontes estratigráficos.

Es común que los sitios donde se cartografiaron planos de cizalla, también tengan fracturas con arreglo paralelo al rumbo de los planos de falla, lo que indicaría que las fracturas fueron ocasionadas por el movimiento relativo de bloques.

Los estratos muestran una dispersión aparente al graficarlos en un estereograma (Fig. 7 a), sin embargo, en el histograma de pétalos de planos de estratificación de la Fig. 7 b, se observa que los planos se orientan preferentemente hacia el N y NE, de manera similar a la tendencia estructural. Lo anterior indica que los estratos se inclinan siguiendo el patrón de fallas regional y local, en un estilo de bloques hundidos y levantados que, por ser de origen tectónico, pueden estar asociados con fallas de varios kilómetros de profundidad.

Con respecto a los perfiles estructurales, se buscó que la orientación de éstos cortara de la manera más perpendicular posible a las estructuras geológicas dominantes, en las zonas donde existe mayor densidad de datos medidos. Los perfiles se presentan en la Fig. 8 a y b, donde se visualiza la dirección de la inclinación de los estratos y la separación en bloques estructurales debida a fallas de tipo normal y de desplazamiento lateral.



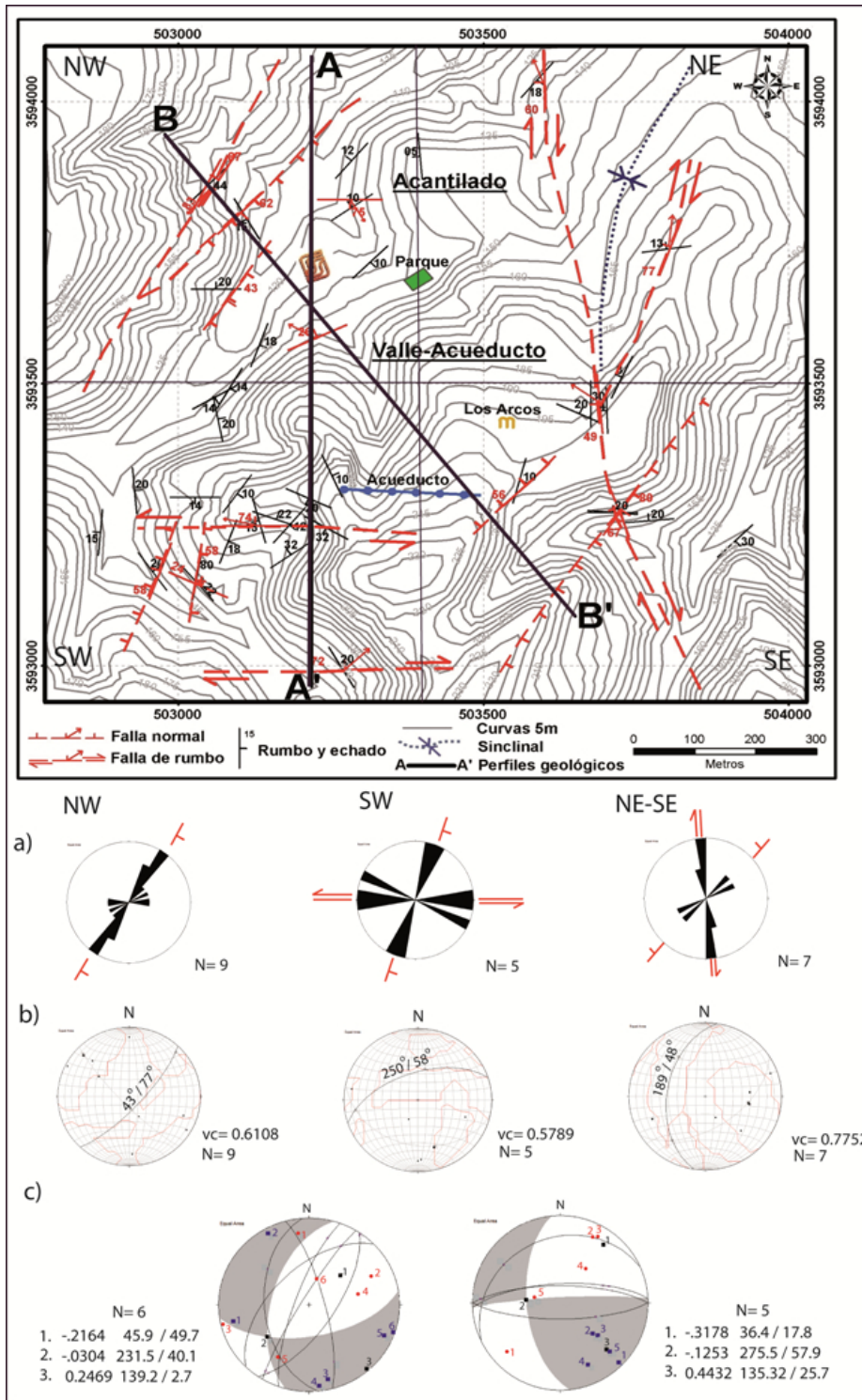


Fig. 5. Mapa de sitios con medición de planos de cizalla y de estratificación en el área de estudio. A partir de las mediciones y otras observaciones, por ejemplo de relieve y grietas, así como de correlación con estructuras adyacentes, se infiere con línea discontinua la extensión de las fallas. a) Histogramas que muestran la dirección de las fallas indicando con los símbolos su naturaleza; b) Proyección estereográfica de los planos de falla de los histogramas, indicando con el círculo máximo el rumbo e inclinación promedio; c) Análisis cinemático de los indicadores de movimiento de las fallas, donde se muestran los vectores de los esfuerzos máximo (1) y mínimo (3), que definen fallas normales (por gravedad) con componente de desplazamiento lateral en la solución de la izquierda y de movimiento lateral en la solución de la derecha.



Fig.6. a) Zona de colapso de una casa por reactivación de una falla normal con movimiento hacia el W, localizada hacia el NE del fraccionamiento Acantilado; la corona del deslizamiento es mayor a los 50 m. b) Falla normal con movimiento lateral derecho, indicando con la flecha el movimiento del bloque donde se encuentra el observador. Se infiere la existencia de una familia de fallas conjugadas desarrolladas en material compuesto por arenas pobremente consolidadas.

Con respecto al sentido del echado, se puede observar que éste no aumenta la inestabilidad del terreno pues está en dirección opuesta a la pendiente, salvo en el extremo derecho, que se encuentran fuera del perímetro de los fraccionamientos para los que se hizo este estudio. En el mismo extremo derecho, el bloque estructural indicado con fallas normales en sus costados también tiene movimiento lateral: hacia el observador en A-A' y hacia el interior de la imagen en la sección B-B'. Se observa también en ambas secciones que las fallas dominantes son de tipo normal y que, en combinación con los movimientos laterales definen a la zona como sujeta a deformación transtensional (movimiento lateral y por gravedad). Al mismo resultado se llega del análisis cinemático que está en la Fig. 5 c, donde se obtienen dos soluciones a partir de los datos de toda la región los cuales, se infiere que deben ser casi contemporáneos en tiempo geológico, esto es: en la solución de la izquierda, el vector del esfuerzo principal máximo (1) está cerca del centro del círculo, corresponde a la gravedad y forma fallas normales. Por su parte, en la solución de la derecha, el esfuerzo principal máximo (1) está cerca de la periferia del círculo, indica que es casi horizontal y dirigido hacia el SW, y produce fallas de desplazamiento lateral.

Para evaluar el daño estructural en los inmuebles se hicieron 48 mediciones de agrietamientos que sugieren movimiento en las viviendas a las que se tuvo acceso en la zona de estudio. Se identificaron siete sitios con grietas que indican movimiento horizontal, cinco de ellos localizados en el sector norte del área de estudio, en los límites de los cuadrantes NW y NE, y dos en la zona SE, cerca del límite con el cuadrante SW, donde se encuentra el acueducto.

En los sitios del cuadrante SE, donde hay movimiento horizontal, se observaron grietas en una barda de contención de la parte sur del acueducto y en una vivienda de la privada Hacienda del Bosque. Esta última había sido ampliada a principios de 2010. En esta zona, las grietas indican movimiento casi en dirección de la pendiente, la cual ha sido modificada por obras civiles, lo que hace difícil distinguir si el movimiento se debe a fallas de tipo geológico (como las observadas principalmente en los cuadrantes del norte) o a deslizamiento promovido por la pendiente modificada. Los sitios con movimiento vertical fueron 27. Se trató de muestrear todas las privadas del área de estudio; sin embargo, debido a que se tuvo más acceso a la zona cercana al acueducto y de las construcciones ubicadas próximas a la calle Paseo de los Parques, la densidad de datos es mayor en esos lugares (Fig. 9).

En la Privada Santa Claudia, que se encuentra en una cresta cuyo origen es geológicamente estructural, el movimiento vertical en las obras civiles muestra un comportamiento asociado, tanto a las pendientes, como a la existencia de fallas (ver falla lateral vertical en 800 del eje horizontal de la sección estructural A-A' de la Fig. 8). En un área de algunos cientos de metros cuadrados se observó movimiento vertical en sentidos opuestos; esto es, las grietas del lado Este, en barda y pavimento indican movimiento hacia el SSW, mientras que las encontradas en el Oeste, en bardas y paredes de casa, se mueven hacia el N.

El conjunto de grietas que definen planos inferidos con movimiento vertical fueron 14. En una vivienda se pudo observar que la base de una construcción se separa del resto de la casa, y este estilo se observó en seis casas del fraccionamiento Hacienda Acueducto. La caída en la mayoría de los casos es hacia el Norte, por lo que guarda una estrecha relación con la dirección de pendiente de los taludes.

Se cartografiaron 34 direcciones estimadas de taludes y se puede apreciar en el mapa de la Fig. 9, que la mayoría de los planos con movimiento vertical tienden a orientar su caída siguiendo la pendiente de los taludes. Se encontraron varias evidencias de la relación entre la deformación por ruptura de las estructuras de las casas con respecto a la cercanía con los taludes de las plataformas.

## DISCUSIÓN

El agrietamiento en las unidades habitacionales cercanas a los taludes puede ser la respuesta a la desestabilización de terraplenes por cortes al pie de talud, por las pendientes altas en terrenos con litología pobremente consolidada y por el aumento considerable de peso en las construcciones originalmente diseñadas debido a ampliaciones o remodelaciones, lo cual puede hacer que se pierda el equilibrio de esfuerzos en el interior de las masas sobre las que se asientan las edificaciones.

Se identificó que la dirección de movimiento en la mayor parte de las zonas afectadas concuerda con las orientaciones de los taludes indicados en la Fig. 9. Un ejemplo notable es la zona localizada en el extremo occidental del acueducto indicado como Santa Claudia en la misma Fig. 9, en donde las direcciones de movimiento tienden a ser hacia el norte y sur debido a que las viviendas se localizan en una cresta, además de que, por lo menos en el costado sur de dicha cresta, existen fallas geológicas de tipo normal y de desplazamiento lateral.

La información recabada indica movimiento del terreno en diferentes direcciones. De acuerdo con las características del terreno y las manifestaciones de movimiento, el área de estudio se puede dividir en tres sectores principales: fraccionamientos del Valle y Hacienda Acueducto, Fraccionamiento Acantilado y el coto Santa Claudia.

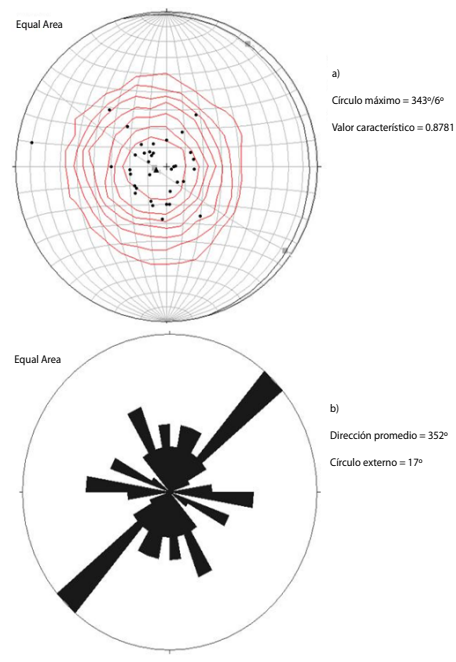


Fig.7. Estereograma de polos (a) e histograma de rosa (b) de los rumbos y echados de 41 estratos en la zona de estudio. a) El círculo máximo que mejor contiene a los polos es 344/6; b) el círculo externo corresponde al 17% de los datos; la dirección promedio se orienta 352°.



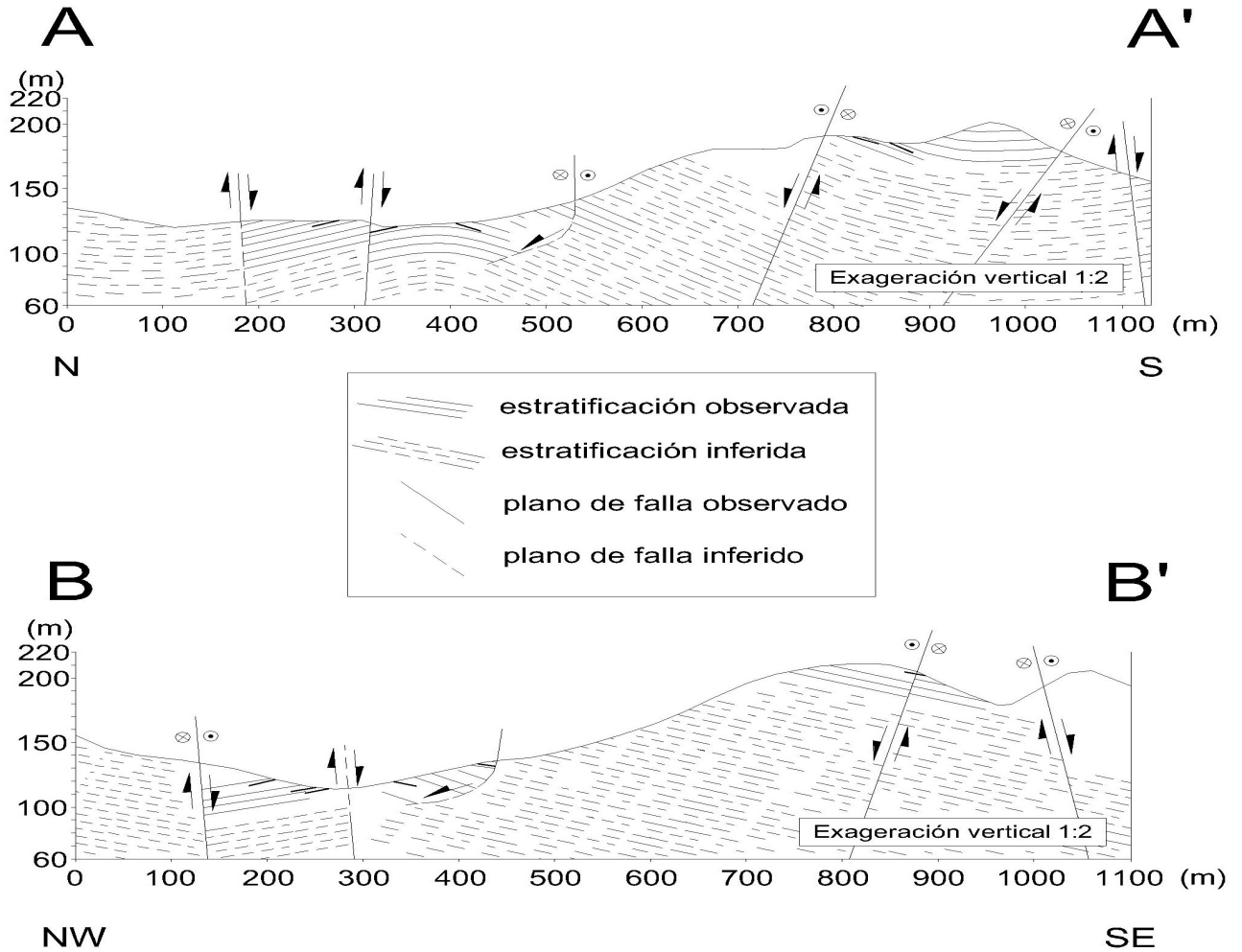


Fig. 8. Perfiles estructurales del cerro El Valle, donde se asientan los fraccionamientos Privada Acantilado, Hacienda Acueducto y El Valle. En el perfil A-A' se observa que en la parte topográficamente más baja, existe una estructura de tipo anticlinal cuyo origen puede ser el movimiento de bloques por fallas predominantemente normales. El círculo con cruz entre fallas normales indica que hay movimiento lateral del bloque interior hacia "enfrente" o hacia el oriente según el mapa de la Fig. 7; la parte topográficamente baja al sur de esa sección corresponde al coto Santa Claudia. En el perfil B-B', en el extremo SE, se observa que la estructura dominante es la de un bloque levantado, aunque el bajo topográfico en forma de silla en la parte interna puede indicar la presencia de fallas o fracturas que no se observan por estar cubiertas por las obras civiles.

## Descripción por sectores

Como se muestra en la Fig. 9, en la zona de los fraccionamientos donde se efectuó el estudio geológico se observan movimientos orientados principalmente hacia el N-NW. Con excepción de los movimientos más orientales, localizados topográficamente debajo de la cresta definida por el parteaguas de la Fig. 9, la dirección de los movimientos correlaciona con la de los taludes.

**Sector Acantilado.**-En la zona de la privada Acantilado se identificó el mayor número de sitios con evidencias de movimiento horizontal, asociados a la existencia de fallas laterales con componentes normales que posiblemente resultan de la rotación de bloques debida a deslizamientos rotacionales. Se observa también que los movimientos en los inmuebles guardan correlación con la dirección de los taludes y con la topografía de la zona. Una explicación alternativa a las evidencias de movimiento horizontal es asociar este movimiento a razones más gravitacionales que estructurales; esto es, una geometría relacionada con deslizamiento traslacional en donde segmentos discretos de la masa de la parte inferior están separados entre sí por fallas de desplazamiento lateral. Bajo este esquema, el sector Valle-Acueducto estaría en la parte alta de la masa en movimiento.

**Sector Valle-Acueducto.**- Estructuralmente, la parte central del sector se caracteriza por la ausencia de estructuras de falla importantes, debido presumiblemente a la escasez de afloramientos. Las estructuras de falla más importantes se encuentran en el extremo oriental del sector, donde se cartografió la falla de desplazamiento lateral derecha que atraviesa la zona de estudio en dirección N-S.

En contraste, la parte central tiene los gradientes topográficos más pronunciados hacia el norte que el resto de la zona de estudio, caracterizándose también porque el echado de las capas es opuesto a la pendiente general.

Como se puede observar en los perfiles estructurales de la Fig. 8, las fallas con movimiento normal están inclinadas en dirección de la

pendiente, por lo que se interpreta que parte del sector tiene un origen estructural, y es de esperar que en el interior de los bloques existan fallas o fracturas menores pero paralelas a las principales. Al combinar estructuras geológicas de ruptura (fallas y fracturas) en terrenos cuya litología sedimentaria está pobremente consolidada, y la construcción densa de viviendas de concreto, se promueve el desarrollo de deslizamientos rotacionales. La importancia de estas inferencias radica en que ahora es necesario confrontar las explicaciones que atribuyen los movimientos en las viviendas a procesos de asentamiento local (escala de pocos lotes; García-Ramírez, 1999) con respecto a aquellas de tipo eológico y de alcance más regional (escala del cerro El Valle completo).

En la zona topográficamente más alta de este sector se observó que en las viviendas cercanas al muro de contención que se extiende paralelo al acueducto, el movimiento registrado en los inmuebles es predominantemente hacia el Norte, lo cual sugiere que se debe principalmente a la inestabilidad del terreno causada por las pendientes pronunciadas, además de la posible existencia de fallas geológicas orientadas N-S, paralelas al cañón que corta en ángulo recto al acueducto; este último resalta claramente en la Fig. 10 y en la actualidad se localiza en la zona de la Privada Hacienda del Río. Debe mencionarse que en esta zona de escurrimiento antiguo (que incluso puede explicar la ruptura del acueducto), de acuerdo con la opinión de Díaz-García (2010), se interpreta la presencia de una estructura lineal también de dirección casi N-S.

**Subsector Santa Claudia.**- En la zona de la privada Santa Claudia se observaron dos direcciones principales de movimiento: uno hacia el Norte que sigue, tanto la dirección de fallas regionales importantes, como la tendencia principal del movimiento de los fraccionamientos El Valle y Hacienda Acueducto, y otro en el extremo Sur de este coto, donde se registró una caída hacia el SW. Esta última dirección es la misma que tiene el talud en esta zona. Es importante señalar que en el escarpe orientado E-W que separa al fraccionamiento Hacienda Acueducto de la Colonia Anexa Sánchez Taboada se midió una falla de desplazamiento lateral paralela al

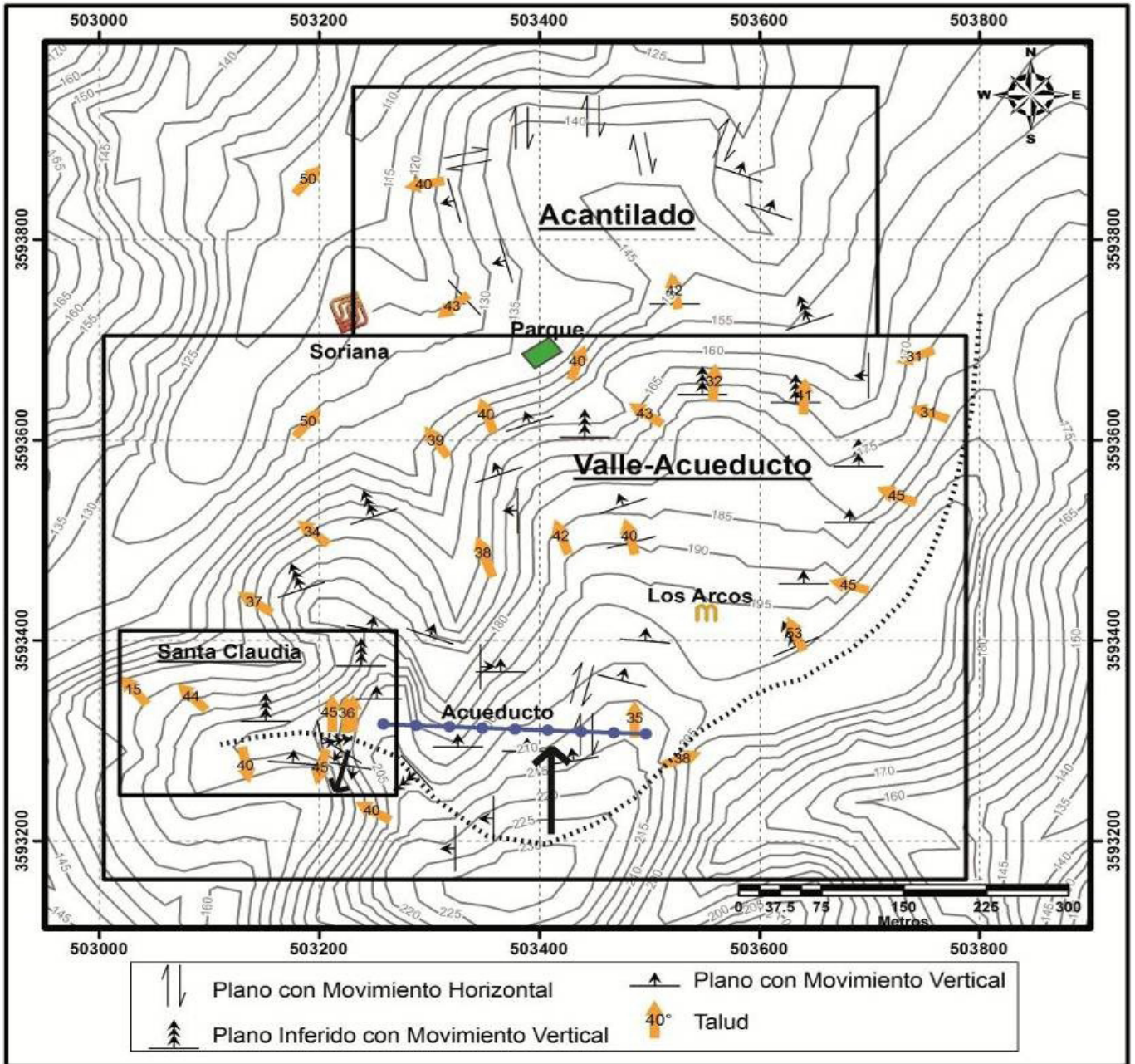


Fig. 9. Cartografía de fracturas observadas en los inmuebles del área de estudio, clasificadas de acuerdo con el movimiento observado o inferido a partir de rasgos de movimiento. Se muestra la dirección de los movimientos verticales, orientación de taludes actuales y, en recuadros, las tres zonas en las que se dividió el área, según sus características de deformación. La línea punteada marca el parteaguas topográfico en la zona. Las flechas gruesas apuntan hacia la dirección del movimiento predominantemente: hacia el Norte en los fraccionamientos El Valle y Hacienda Acueducto, y hacia el SSW en los límites de Santa Claudia con Valle-Acueducto.



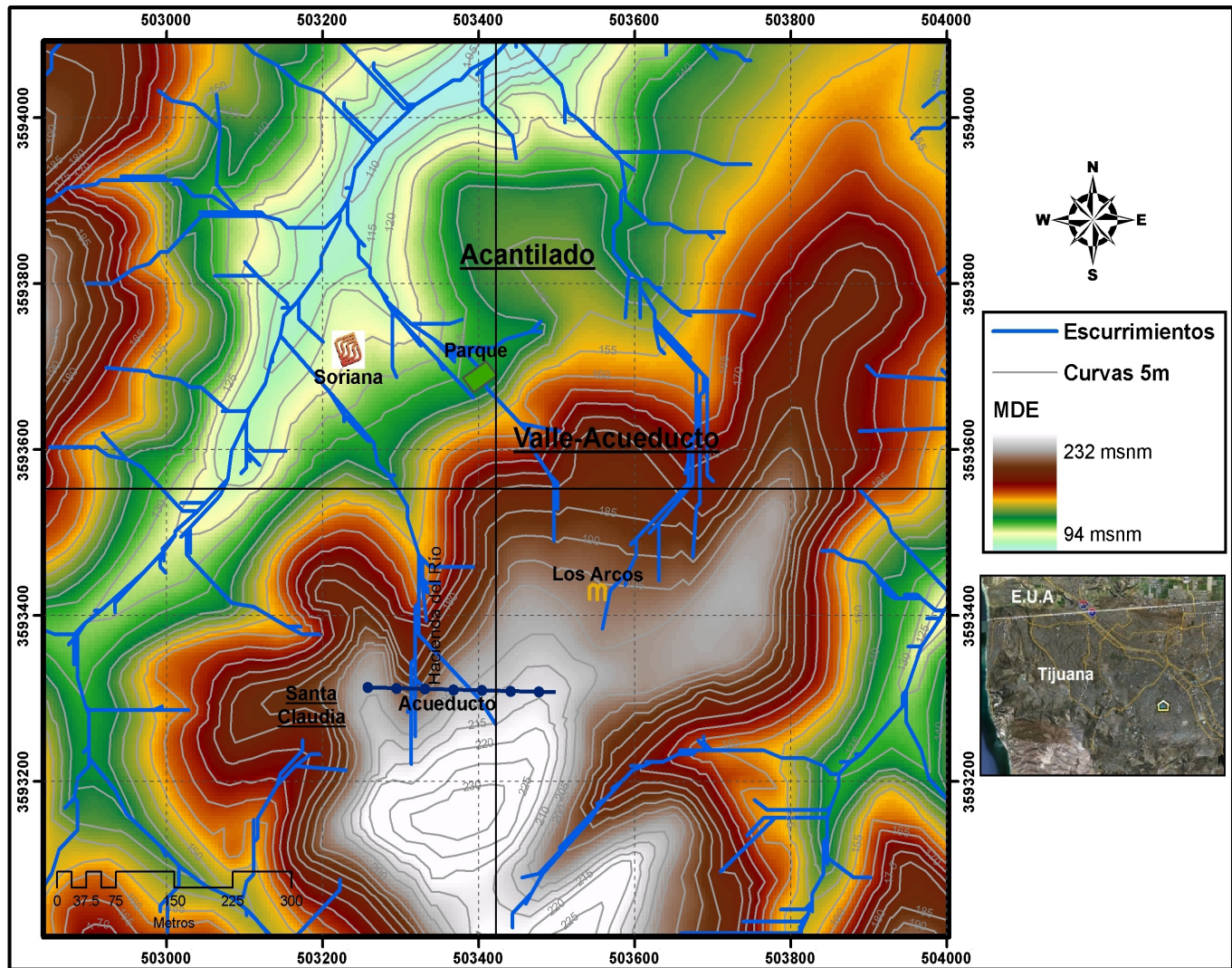


Fig. 10. Mapa de escurrimientos obtenidos a partir de la topografía de 1999. Se observa que tanto los drenajes principales, como el cerro El Valle, se orientan hacia el NE, al igual que las fallas y pliegues regionales mostrados en el mapa geológico. Los escurrimientos tienen un patrón predominantemente rectilíneo que sigue la orientación de las fallas cartografiadas en la zona de estudio: N-S, NW y E-W. Este patrón, de origen estructural, es distinto al que se esperaría en una zona estable dominada por sedimentos pobremente consolidados en donde se desarrollaría un drenaje integrado de tipo dendrítico. Es particularmente importante observar los escurrimientos orientados N-S en Valle-Acueducto y Acantilado, donde se midieron fallas en esa dirección, y en Hacienda del Río que corta al acueducto, donde se infiere la existencia de una falla o fractura; el pequeño rasgo al sur de Santa Claudia que se orienta E-W es paralelo a la falla de desplazamiento lateral medida y puede ser la expresión de una estructura mayor que continúa hacia el oriente.

escarpe que indica que la zona ha estado sujeta a deformación reciente. Además, es importante resaltar que el límite sur de este coto tiene una pendiente que en algunos lugares es incluso superior a 60.

## CONCLUSIONES

Tomando en cuenta la información estructural recabada en este estudio, el resultado de las direcciones en los movimientos verticales en las viviendas dañadas y en las pendientes del cerro El Valle, así como de la inferencia de fallas de posible carácter regional, ambas interpretadas a partir de imágenes satelitales, los autores del presente trabajo no identifican la existencia de cabeceras de deslizamiento. En su lugar, aquí se reporta que los movimientos en la zona se correlacionan de manera más directa con las direcciones de las pendientes en los taludes de los terraplenes, y que el movimiento principal en la zona es hacia el NNW, además de identificar que el cerro El Valle es de origen estructural y su geometría coincide con los rasgos estructurales regionales e incluso con los que se desprenden de la sismicidad regional.

Se recomienda a los habitantes de estos fraccionamientos:

1. Mantener un monitoreo permanente en las zonas donde se han medido e inferido fallas geológicas pues cada una de estas estructuras es una discontinuidad susceptible de moverse por efectos naturales como los sismos o peso adicional al natural del terreno debido a las construcciones. Debe tomarse en cuenta que un agente disparador o promotor de movimiento es el agua, por lo que deberá hacerse una revisión cuidadosa del drenaje pluvial y vigilar permanentemente la fuga de tuberías.

2. Instalar estaciones de monitoreo topográfico de detalle para detectar posibles movimientos de masas asociados a deslizamientos traslacionales, los cuales son muy lentos pero pueden producir deformaciones por ruptura en obras civiles al cabo del tiempo.

3. Evitar las ampliaciones o modificaciones a los inmuebles para no aumentar la carga al terreno.

4. Monitorear el desarrollo de las fracturas en las casas midiéndolas en periodos mensuales o trimestrales, dependiendo de los antecedentes de la zona, y evitar cubrirlas para observar su desarrollo.

## AGRADECIMIENTOS

Un agradecimiento especial a los miembros de la asociación de colonos Privada Hacienda Santa Claudia, A.C. y a los habitantes de los fraccionamientos Privada Acantilado, Hacienda Acueducto y El Valle por su amabilidad y confianza. Los autores agradecen el agudo arbitraje efectuado por Felipe Escalona, gracias al cual este manuscrito mejoró enormemente.

## REFERENCIAS

- Ashby, J.R., 1989. A resume of the Miocene stratigraphic history of the Rosarito Beach Basin, northwestern Baja California, Mexico. En: Patrick L. Abbott, editor, *Geologic studies in Baja California*, Book 63, p. 37-45.
- Böhnel, H., Delgado-Argote, L.A. and Kimbrough, D., 2002. Discordant paleomagnetic data for Middle-Cretaceous intrusive rocks from northern Baja California: Latitude displacement, tilt, or vertical axis rotation? *Tectonics*, V. 21-5. p. 1029-1043.
- Delgado-Argote, L.A., Hinojosa-Corona, A., Aragón-Arreola, M., y Frías-Camacho, V., 1996. Estudio de riesgo geológico en Tijuana, Baja California, con base en rasgos estructurales y la respuesta del terreno, *GEOS*, vol. 16, no.2, p. 57-89.
- Díaz-García, J., 2010. Estudio de fotointerpretación en el área de la Privada Hacienda Santa Claudia en el Fraccionamiento Acueducto en Tijuana, B.C., *3GEO Servicios Profesionales de Geología, Geofísica y Geotecnia*, 15 pp.

- Frez, J. y Frías-Camacho, V.M., 1998. Distribución de energía sísmica en la region fronteriza de ambas Californias, GEOS, 18-3, p. 189-196.
- García-Ramírez, R.R., 1999. Proyecto "El Valle Fase II, Colonia Sánchez Taboada, Tijuana, Baja California: Estudio Geotécnico, GEOCON Inc., 21 pp y anexos.
- Gastil, R.G., Phillips, R. and Allison, E., 1975. Reconnaissance geology of the State of Baja California, Geological Society of America Memoir 140, 170 pp.
- INEGI, 1999. Conjunto de datos vectoriales de la carta topográfica I11D71 La Presa, escala 1:50,000.
- Legg, M.R., 1991. Sea beam evidence of recent tectonics activity in the California Continental Borderland. En: Paul Dauphin and Bernard Simoneit, Editors, The gulf and peninsular province of the Californias, American Association of Petroleum Geologists, Memoir 47, p. 179-196.
- Legg, M.R., Wong, V. and Suárez, F., 1991. Geologic structure and tectonics of the inner Continental Borderland of northern Baja California. En: Paul Dauphin and Bernard Simoneit, Editors, The gulf and peninsular province of the Californias, American Association of Petroleum Geologists, Memoir 47, p. 145-177.
- Minch, A. J., Ashby, J., Deméré, T. and Kuper, T., 1984. Correlation and depositional environments of the Middle Miocene Rosarito Beach Formation of northwestern Baja California, Mexico. En: J.A. Minch and J.R. Ashby, Editors, Miocene and Cretaceous depositional environments, northwestern Baja California, Mexico: Pacific Section, American Association of Petroleum Geologists, V. 54, p. 33-46.
- Rockwell, K.T., Hatch, E.M. and Shug, L.D., 1987. Late Quaternary rates Agua Blanca and borderland faults: Final Technical Report USGS, contract No. 14-08-0001-22012, 122 pp.
- Rockwell, K.T., Muhs, D., Kennedy, G., Hatch, M., Wilson, S. and Klinger, R., 1989. Uraniumseries ages, faunal correlations and tectonic deformation of marine terraces within the Agua Blanca fault zone at Punta Banda, northern Baja California, México. En: Patrick Abbott, editor, Geologic Studies in Baja California, The Pacific Section Society of Economic Paleontologists and Mineralogists, Los Angeles, California U.S.A., p. 1-16.
- Servicio Geológico Mexicano (2003), Carta Geológica-Minera Tijuana I11-11, escala 1:250,000.
- Suárez-Vidal, F., Armijo, R., Morgan, G., Bodin, P. and Gastil, G., 1991. Framework of recent and active faulting in northern Baja California. En: Paul Dauphin and Bernard Simoneit, Editors, The Gulf and Peninsular Province of the Californias. American Association of Petroleum Geologists, Memoir 47, p. 285-300.
- Suárez-Vidal, F., 1993. Marco estructural de la Falla Agua Blanca, Baja California, México. En: Delgado-Argote, L. A. y Martín-Barajas, A., Editores, Contribuciones a la Tectónica del Occidente de México, Unión Geofísica Mexicana, Monografía No. 1, p. 24-39.

Manuscrito recibido: 15 de marzo, 2011

Recepción del manuscrito corregido: 25 de junio, 2011

Manuscrito aceptado: 5 de julio, 2011



## FACTORES QUE AFECTAN LA EDUCACIÓN EN GEOCIENCIAS EN MEXICO Y COLOMBIA

John J. Sánchez<sup>1</sup>, Rosa M. Chávez-Dagostino<sup>2</sup>, Francisco J. Núñez-Cornú<sup>2</sup>, Amilcar Cupul-Magaña<sup>2</sup>,  
Carlos Suárez-Plascencia<sup>3</sup>, y Elizabeth Trejo-Gómez<sup>2</sup>.

<sup>(1)</sup>Universidad Nacional de Colombia, Departamento de Geociencias,  
Carrera 30 # 45-03, Edificio "Manuel Ancizar", Bogotá D. C., Colombia.

<sup>(2)</sup>Universidad de Guadalajara, Centro Universitario de la Costa,  
Avenida Universidad 203, Puerto Vallarta, Jalisco, México. C.P. 48280.

<sup>(3)</sup> Universidad de Guadalajara, Centro Universitario de Ciencias Sociales y Humanidades,  
Guanajuato 1045, Guadalajara, Jalisco, México. C. P. 44260.

e-mail: jjsancheza@unal.edu.co (J. J. Sánchez, autor para correspondencia)

Tel: (57) 1 3165000 ext. 16522, Fax: (57) 1 3165000 ext. 16526

rosac@pv.udg.mx (R. M. Chávez-Dagostino), fcornu@pv.udg.mx (F. J. Núñez-Cornú)

alevi@pv.udg.mx (A. Cupul-Magaña), csuarez@cencar.udg.mx (C. Suárez-Plascencia) elyt@pv.udg.mx (E. Trejo-Gómez)

### RESUMEN

La desorganización institucional y la idiosincracia de países como México y Colombia pueden ser factores que impactan de manera negativa a la educación en Geociencias. En este artículo identificamos y describimos varios factores que causan inconformidad y conllevan a situaciones conflictivas que afectan tanto a profesores como a estudiantes. Condiciones laborales inciertas, categorización intrincada del personal académico, políticas institucionales injustas hacia nuevos programas en Geociencias, y una actitud negativa hacia los nuevos miembros del cuerpo profesoral son posiblemente algunos aspectos que influyen en el progreso y la calidad de los programas a nivel de pregrado y posgrado. Compartimos experiencias con otros docentes e investigadores en otras partes del mundo para contribuir a la búsqueda de un mejoramiento en la formación de futuros geocientíficos.

### ABSTRACT

Education in Geosciences in Mexico and Colombia may be negatively impacted by issues related to institutional organization and idiosyncrasy. In this paper we identify and describe several factors that cause discomfort and lead to conflicting situations that affect both professors and students. Uncertain labor situation, convoluted categorization of academic personnel, institutional policies towards new programs in Geosciences and negative attitude toward new faculty members are among some of the possible aspects that influence progress and quality of Geosciences programs at the undergraduate and graduate levels. We share these experiences with other faculty at universities elsewhere and hopefully contribute to the search for improvement in education to benefit future generations of geoscientists

## 1. INTRODUCCIÓN

La educación en Geociencias exhibe diferencias fundamentales entre países desarrollados y en vías de desarrollo. Estas diferencias involucran aspectos tales como: 1) Número de escuelas donde se ofrecen programas en Geociencias, 2) costo de las matrículas, 3) disponibilidad de becas y 4) características académicas de los programas. Las diferencias entre países desarrollados y en vías de desarrollo en muchos aspectos de los programas de licenciatura y posgrado en Geociencias son frecuentemente muy grandes. Nuestro enfoque es entonces el reporte de experiencias educativas en Geociencias y otras ciencias en dos países en vías de desarrollo: México y Colombia. Nuestra motivación para este reporte es meramente el deseo de compartir nuestras observaciones con otros investigadores o educadores, con la expectativa de generar conciencia y un futuro mejoramiento en las condiciones de la educación en programas de Ciencias de la Tierra. Las observaciones y reportes que contiene este artículo son derivados de experiencia en varias universidades, pero con el fin de preservar la privacidad, los autores se reservan el derecho de mencionar los nombres de instituciones. Por otra parte, las descripciones que se presentan aplican tanto a programas de licenciatura como de posgrado, porque los autores acreditan experiencia en docencia e investigación en ambos niveles. Las siguientes Geociencias caen dentro de nuestra experiencia académica a nivel de posgrado: Sismología, Volcanología, Geología y Peligros Naturales. A nivel de licenciatura nuestra experiencia incluye: Ecología, Matemáticas, Estadística y Física. Todas estas materias han sido impartidas en universidades públicas, cada una con varias sedes dentro de cada país.

Para facilitar el análisis e interpretación de nuestras experiencias en docencia e investigación, dividimos las observaciones en cinco áreas principales: 1) Situación laboral y condiciones de trabajo; 2) categorización de los puestos académicos y políticas relacionadas a investigación y docencia; 3) apoyo institucional a los programas de posgrado y a la investigación en Geociencias y otras ciencias; 4) actitud hostil hacia nuevos profesores y jóvenes científicos; y 5) otros.

## 2. Varios factores que afectan la educación en Geociencias.

### 2.1. Situación laboral y condiciones de trabajo.

Los científicos y profesores de nuevo ingreso usualmente trabajan en períodos de prueba de al menos un año, en los mejores casos. Durante el período de prueba el académico es evaluado por un grupo de pares y la situación laboral está representada por un contrato válido por un período que oscila entre seis meses y un año. En algunas instituciones bien organizadas, cuando el periodo de prueba termina y la evaluación de los pares es sometida, las instancias superiores de la Universidad toman una decisión acerca de la permanencia o no del académico evaluado y en caso favorable se le otorga un nombramiento definitivo. Sin embargo, en algunas instituciones, la permanencia definitiva sólo llega luego de periodos extensos de hasta varios años. Esto implica que aunque el periodo de prueba finalice, el académico de nuevo ingreso enfrenta la firma de contratos durante un tiempo indefinido, algunas veces de hasta una década. Como resultado se tienen condiciones laborales inestables ya que la renovación de cada contrato siempre es retrasada debido a problemas administrativos, lo que da como resultado períodos de desempleo entre cada renovación, que se prolongan por semanas, en los mejores casos. Sobre mencionar que estos factores afectan el trabajo y la productividad de un académico de nuevo ingreso.

Las condiciones físicas de trabajo también influyen en el rendimiento de los jóvenes docentes. Al parecer se crean y ocupan nuevas plazas sólo en el papel, pero no se designa previamente espacio físico para quienes llegan a ocupar dichas plazas. En algunos casos, los nuevos profesores se ven obligados a compartir espacio de oficina con dos o más colegas, pero en muchos ejemplos desafortunados, el recién incorporado se ve forzado a ser “presencia virtual”, a trabajar desde casa o a usar la cafetería más cercana como oficina por un período extendido de tiempo. El problema se agrava aún más cuando los estudiantes ansiosos de conocimiento aparecen en escena queriendo interactuar y trabajar con el nuevo profesor.

## 2.2 Categorización de los puestos académicos y políticas relacionadas a investigación y docencia.

En algunas universidades el personal académico es clasificado ya sea como docente o como técnico académico y también de acuerdo a alguna de los siguientes criterios:

- Carácter de la adscripción.
- Dedicación en tiempo a la Universidad.
- Duración de la adscripción.

Cada uno de estos criterios tiene subdivisiones, que para el caso de los profesores, se resume en la Figura 1. La subdivisión que se muestra implica jerarquía y/o antigüedad. Por ejemplo, un profesor asociado está por debajo de un profesor titular y tiene rango mayor al de un profesor asistente, y el nivel B está por debajo del nivel C y arriba del nivel A. Nótese cómo las tareas relacionadas a docencia e investigación no están claramente delineadas en esta clasificación algo tortuosa de categorías. La categorización para técnicos académicos es muy similar a aquella mostrada en la Figura 1. Aunque los puestos de técnicos académicos aún existen en los estatutos de varias universidades, existe la tendencia de contratar cada vez menos personal a este nivel, debido a problemas como la falta de presupuesto disponible para contratación, por ejemplo.

En algunas universidades los puestos o plazas para profesores de tiempo completo son usualmente divididas en tres o cuatro categorías que, desde la más baja a la más alta son: a) Profesor Auxiliar; b) Profesor Asistente; c) Profesor Asociado; d) Profesor Titular. Estas categorías implican, obviamente, diferentes salarios y se asignan de acuerdo al currículo, grados académicos, productividad científica y/o experiencia. Una universidad con este esquema de categorías usualmente establece que porcentaje de tiempo debe dedicarse a las labores de docencia e investigación. Las labores de docencia se distribuyen de alguna manera en los niveles de licenciatura y posgrado y las actividades de investigación se dividen usualmente entre proyectos de investigación (que los llamaremos Proyectos tipo I, que usualmente terminan en publicaciones) y proyectos de extensión

(Proyectos tipo E, que evolucionan en actividades que tienen impacto directo en la sociedad, ver por ejemplo Buddington and Garver, 2003). Una distribución común de porcentajes de tiempo dedicados a investigación y docencia se muestra en la Tabla 1.

Actividad	Nivel/Tipo	Dedicación de tiempo
Docencia	Licenciatura	50%
	Posgrado	
Investigación	Proyecto tipo "I"	50%
	Proyecto tipo "E"	

Tabla 1. Distribución de porcentajes de tiempo en docencia e investigación.

Los porcentajes de la Tabla 1 varían dependiendo de la institución y con frecuencia se requiere mayor dedicación a las actividades de docencia. Por ejemplo, la universidad puede requerir que los profesores dediquen un 60%-70% de su tiempo a la docencia. Como se ve en la Tabla 1, aunque hay una distribución clara en el tiempo de dedicación a docencia e investigación, no es claro cuánto de este tiempo debe dedicarse, por ejemplo a docencia a nivel licenciatura o docencia a nivel posgrado.

Lo mismo aplica para la distribución de tiempo entre los dos tipos de proyectos. Esta situación lleva eventualmente a confusiones y conflictos institucionales internos. Por ejemplo, algunos profesores tienen preferencia (o conocimiento, o capacidad) para enseñar en nivel de posgrado y se rehúsan a impartir clases a nivel de licenciatura. De manera análoga, algunos profesores que tienen una clara tendencia a realizar actividades de investigación que implican publicaciones, pueden encontrar no atractivo el trabajo relacionado a proyectos de extensión, que pueden o no terminar en la publicación de un artículo. Lo contrario también ocurre y hay múltiples casos de profesores que prefieren trabajar en ciertos tipos de proyectos de extensión y relegan a segundo plano las actividades de investigación.

En algunos casos existe una diferenciación formal entre docentes e investigadores. Sin embargo, esta separación no implica dedicación completa

a alguna de las actividades, porque a los profesores que ocupan una plaza en cualquiera de las dos categorías comúnmente se les asigna un número mínimo de horas clase (o mínimo número de cursos a impartir) en los niveles de licenciatura y/o posgrado. Esta asignación siempre depende de las múltiples necesidades actuales de los diferentes programas ofrecidos por la Universidad.

Esto también resulta en conflicto y confusión, pues un académico de nuevo ingreso que toma una plaza como Profesor Investigador se ve forzado a dedicar mucho de su tiempo a la preparación de clase y a actividades frente a grupo, algunas veces a un nivel que no es realmente óptimo (por ejemplo, un Ph.D. en Geofísica enseñando Matemáticas fundamentales a estudiantes de primer ingreso de Licenciatura en Turismo, o estudiantes de ingeniería de primeros semestres), una situación que, aunque beneficiosa para el propósito de algunos programas académicos, puede impactar seriamente la productividad del investigador.

Por lo tanto, un aspecto importante relacionado a la educación en Geociencias y otras ciencias es la falta de organización relacionada a una diferencia marcada (quizás establecida institucionalmente) entre aquellos que son docentes y aquellos que son investigadores. Un Profesor Docente sería uno dedicado exclusivamente a actividades de enseñanza frente a grupo. Debido a esto, no hay tiempo para investigación científica, y por lo tanto la productividad de artículos y propuestas de investigación es muy baja o nula. Sin embargo, la mayoría de universidades requieren que todos los académicos muestren alguna productividad en investigación y usan esto como un parámetro para evaluar el desempeño. De otra parte, un Profesor Investigador es aquel cuyo trabajo está relacionado a actividades que culminan en publicaciones profesionales (artículos en revistas internacionales, libros de texto, etcétera) y la productividad de tal académico es evaluada en términos de los artículos y su calidad, así como en el número y calidad de proyectos escritos, sometidos y exitosamente concluidos. La universidad, sin embargo, puede requerir que los investigadores también dediquen algo de su

tiempo a docencia y usa esto como un aspecto evaluable. Las dos plazas son diferentes, porque ambas categorías existen en los estatutos (o en el menor de los casos, son mencionadas explícitamente), pero reiteramos que no hay distinción clara en lo que se refiere a la dedicación a docencia e investigación. Esto podría significar que las reglamentaciones ya necesitan modificaciones debido a su antigüedad.

### **2.3. Apoyo institucional a los programas de posgrado y a la investigación en Geociencias y otras ciencias.**

Una Universidad que realmente persigue altos estándares académicos debe promover y apoyar la creación o continuidad de programas de posgrado en Geociencias y otras ciencias. Desafortunadamente el apoyo se canaliza principalmente a aquellos programas que son preferenciales, en muchos casos quizás por afinidad de las instancias superiores (por su profesión o área de experiencia), con estos programas; o simplemente porque la “ciencia dura” (la teoría y los trabajos basados en ciencias matemáticas, físicas o químicas, que aplican soluciones a ecuaciones en el entendimiento de otros fenómenos) es erróneamente concebida como de poca relevancia local o regional. En muchos casos el financiamiento es otorgado a programas de posgrado en áreas humanísticas o sociales debido a que éstas tienen un mayor nivel de inscripción, mientras que los programas en Geociencias luchan por obtener autorización incluso para poder funcionar con un ingreso mínimo de estudiantes y recursos.

De otra parte, las instituciones deberían mostrar la decisión de optimizar y hacer más claras las condiciones de ingreso de estudiantes. Cuando un programa, particularmente de posgrado en Geociencias, es lo suficientemente afortunado como para “capturar” un mínimo número de aspirantes, la burocracia y desorganización administrativa impiden ya sea la aceptación al programa, o causan el retiro de aplicaciones o candidatos, principalmente porque el proceso de selección y admisión es tortuoso e irracionalmente inflexible y en muchos casos los requisitos de aplicación no son claros para nadie.

Esta es una situación que perturba y desgasta. Como ejemplos de fuentes de confusión para potenciales estudiantes citamos las siguientes: Entre los requisitos listados para admisión a un programa de posgrado está la aptitud en idioma inglés, pero para muchas personas es un misterio cuál es el nivel de suficiencia que cumpla el requisito de admisión a la universidad. Los aspirantes no saben con anticipación los niveles aceptables de aptitud en las siguientes áreas: auditivo, escrito, oral y comprensión de lectura.

Aunque hay algo de información disponible con respecto a costos de admisión y colegiatura, no hay claridad en cuanto a los mecanismos de condonación o ayuda para cubrir estos gastos. Algunas universidades tienen sistemas de exención de matrículas y colegiaturas que obviamente están orientados a proveer asistencia financiera, pero los requisitos de aplicación, documentos de soporte y fechas de aplicación son bastante crípticos. Esto es particularmente confuso para los estudiantes internacionales que no están familiarizados con universidades en el extranjero pero que desean acceder a educación más allá de sus países de origen (IAU, 2005).

#### **2.4. Actitud hostil hacia nuevos profesores y jóvenes científicos: el problema generacional.**

Los nuevos académicos usualmente son contratados por medio de concurso de méritos o en ocasiones por contratación directa, dependiendo de las necesidades particulares de una Universidad y la disponibilidad de plazas. En la mayoría de los casos se requiere que los aspirantes a puestos académicos tengan grado doctoral. En ocasiones el grado de maestría es aceptable. Los requisitos adicionales están relacionados a experiencia docente a nivel universitario, experiencia laboral y entrenamiento o capacitación. Un proceso de evaluación riguroso por parte de un comité de pares asegura que los mejores candidatos sean seleccionados. Una vez que la plaza es asignada, el nuevo académico entra a un período de prueba de por lo menos un año, durante el cual un grupo diferente de pares seguirá de cerca el progreso del nuevo académico para posteriormente emitir una evaluación. El otorgamiento de nombramiento definitivo está sujeto a los términos de dicha evaluación.

En algunas ocasiones al nuevo académico le es asignado un comité evaluador cuyos miembros comparten los mismos intereses científicos o académicos, y si el evaluado muestra trabajo en los mismos proyectos de su comité evaluador, y ayuda a aumentar la productividad del grupo con publicaciones y propuestas, se garantiza una buena evaluación. En algunas situaciones aún más desafortunadas que la anteriormente descrita, el nuevo profesor es evaluado por un grupo de "oponentes" quienes simplemente hacen del período de prueba una pesadilla académica sin fin, con una no muy benévola evaluación final. Ninguna de las dos situaciones descritas es atractiva, por supuesto.

Las universidades grandes usualmente tienen numerosos grupos de investigación que compiten por fondos para financiar proyectos y por establecimiento de poderío (representado en más inscripción de estudiantes, más infraestructura, más equipos, más publicaciones, etcétera). El juego limpio entre estos grupos no está siempre garantizado. Un nuevo académico debe decidir entre incorporarse a un grupo particular o trabajar de manera independiente, lo cual siempre representa un gran reto. Cuando un nuevo profesor entra a un grupo de investigación las expectativas son elevadas y se le encomiendan tareas de manera indiscriminada e irresponsable, resultando en sobrecarga de trabajo y estrés significativo para el recién llegado. A continuación relacionamos una posible lista de tareas: a) asumir el trabajo de clase de otros profesores; b) escribir múltiples propuestas acerca de varios temas; c) asumir la coordinación de un proyecto que ya está en ejecución.

Una situación adversa común en algunas universidades de México y Colombia está relacionada la diferencia en generaciones y grados académicos de los miembros del cuerpo profesoral. Usualmente los departamentos están compuestos de científicos o profesores con antigüedad que tienen título de licenciatura, maestría, y en algunos casos, doctorado. Sin desconocer importancia de la experiencia, sugerimos que no hay manera de establecer equivalencia justificable, entre experiencia laboral y grados académicos.



Mientras que muchos sostienen que cinco o seis años de experiencia laboral en un campo particular del conocimiento deberían ser reconocidos o equiparados a la obtención de un grado de doctor, existe la clara tendencia de parte de las universidades para contratar solamente jóvenes investigadores con título doctoral en una universidad reconocida, incluso si no acreditan experiencia laboral o en docencia.

Esta situación genera conflicto y descontento, porque los profesores de nuevo ingreso, que acreditan título doctoral o en ocasiones tanto maestría como doctorado, son contratados con sueldos menores a los de académicos antiguos que tienen un grado académico menor y ocasionalmente sometidos a trabajar bajo la supervisión de un jefe de departamento que en los mejores casos sólo tiene título de maestría. Es aquí donde el encuentro generacional causa serios inconvenientes y desacuerdos tanto en las áreas académicas como administrativas e influencia fuertemente el progreso de los cursos y proyectos en Geociencias. En la Figura 2 resumimos de manera satírica el encuentro generacional, con base en una experiencia real.

## 2.5. Otros

A continuación enumeramos varias situaciones que causan reacciones contrastantes entre los académicos:

a) Profesores que han obtenido sus títulos académicos en universidades acreditadas en países desarrollados versus académicos que se han titulado en universidades acreditadas (¿?) en países en vías de desarrollo.

b) Productividad de un profesor en términos de artículos científicos publicados en revistas internacionales arbitradas versus productividad en forma de artículos publicados localmente o en revistas no arbitradas.

c) Nuevas ideas, métodos y herramientas de docencia e investigación provocan controversias porque algunas metodologías o técnicas al parecer novedosas no contribuyen realmente a una mejor enseñanza (Metzenberg, 1998;

de Caprariis, 2000; Harris, 2001), pero esto no debería ser justificante para cerrar las puertas a las ideas frescas de los nuevos académicos.

d) Tendencia de los programas de posgrado a trabajar como ínsulas con respecto al departamento o al programa de licenciatura correspondiente. Mientras que los programas de licenciatura pueden tener varias décadas de existencia en algunas universidades, los programas de posgrado en ciencias son relativamente nuevos y han sido creados quizás como iniciativa de un grupo reducido de académicos interesados. Al parecer, una vez que un nuevo programa de posgrado es creado, entra en conflicto con programas de licenciatura o posgrado previamente establecidos, principalmente debido a la competencia por espacio físico, infraestructura y financiamiento. En muchos casos, por ejemplo, el acceso a servicios y laboratorios es restringido a estudiantes de uno u otro programa. Esta situación puede impactar negativamente el funcionamiento de muchos programas en Geociencias.

e) Restricciones no siempre justificadas para los estudiantes de primeros semestres se inscriban en cursos opcionales de nivel posgrado. La razón para esto es que algunos cursos de posgrado opcionales son “muy avanzados” para estudiantes de licenciatura. Una situación anecdótica involucró un curso de Volcanología ofrecido para nivel posgrado que resultó ser más atractivo para estudiantes de licenciatura de lo que lo fue para los mismos estudiantes de posgrado. A pesar de que lo ocurrido era indicio de que el curso hubiera sido mejor recibido o hubiera tenido mayor impacto de haberse ofrecido en el programa de licenciatura, un jefe de departamento argumentaba que ello habría sido una clara contravención a las reglas de la Universidad.

Esta visión parroquial de un jefe de departamento es sin duda un concepto fascinante, en vista de la tendencia actual hacia un mejor progreso académico (Basu and Middendorf, 2003). Sentimos que una actitud prohibitiva respecto a que cursos puedan inscribir los estudiantes de un cierto nivel puede afectar la moral y reducir



el entusiasmo de estudiantes deseosos de aventurarse por caminos de la ciencia que les resultan interesantes, particularmente en ciertas áreas como la Sismología o la Volcanología, que de hecho necesitan urgentemente el influjo de nuevas generaciones. No queremos esto. De hecho deberíamos trabajar en lo opuesto, es decir creando nuevas formas de motivar a los estudiantes de Geociencias a inscribirse en cursos interesantes y exigentes y así fortalecer los programas actuales de licenciatura y posgrado (Anderson et al., 2006).

### 3. Discusión y conclusiones.

La educación en Geociencias y otras ciencias en algunas universidades en América Latina está siendo afectada por una serie de problemas, algunos de ellos tratados aquí desde una perspectiva anecdótica. Aunque existen factores adicionales tales como el retraso tecnológico, la falta de fondos y el bajo nivel salarial, que son también relevantes, no son nuestro enfoque en este reporte. Más bien orientamos nuestra atención hacia problemas cuyas raíces están en la idiosincrasia y la desorganización institucional. Algunos de estos problemas pueden ser difíciles de atender porque podrían requerir el acuerdo de un gran número de personas. Por ejemplo, si se desease un esquema simplificado y mejorado de categorías y plazas académicas, con una clara definición de dedicación en tiempo a docencia e investigación, se necesitaría, quizás, una modificación de los estatutos y los salarios, tarea que siempre es un reto y tema que provoca controversia en una Universidad. Por otra parte, algunos problemas no deberían ser difíciles de enfrentar, porque sugerimos que básicamente dependen del acuerdo entre algunos académicos y quizás un cambio de actitud de un pequeño grupo de individuos.

Por ejemplo: 1) con las medidas de precaución y procedimientos adecuados, no hay razón para restringir el acceso a laboratorios o centros de investigación a estudiantes de licenciatura, porque estos pueden beneficiarse enormemente de las prácticas en tales sitios. Lo mismo aplica a los cursos que pueden ser inscritos simultáneamente por estudiantes de licenciatura y posgrado y 2) se

puede aprender a ser tolerantes con las nuevas ideas y que se pueden integrar las capacidades y conocimientos de generaciones diferentes de geocientíficos. Otros problemas pueden estar relacionados al profesionalismo y la ética de los académicos, particularmente en lo que tiene que ver con las relaciones laborales entre colegas nuevos y antiguos y la actitud en general hacia las nuevas generaciones de científicos.

### REFERENCIA

- Anderson, S., Flood, T. and Munk, L., 2006, Bucking the trend: Three new geoscience programs, *Journal of Geoscience Education*, v. 54, p. 41-49.
- Basu, A. and Middendorf, J., 2003, Demanding and enforcing high expectations in freshman courses, *Journal of Geoscience Education*, v. 52, p. 320-323.
- Buddington, A. and Garver, J., 2003, Raising the level of geoscience awareness through a public lecture series: Bringing earth sciences to the community, *Journal of Geoscience Education*, v. 51, p. 250-254.
- De Caprariis, P. P., 2000, Creating or adapting courses for on-line presentation, *Journal of Geoscience Education*, v. 48, p. 673-678.
- Harris, M. T., 2001, Strategies for implementing pedagogical changes by faculty in a research university, *Journal of Geoscience Education*, v. 49, p. 50-55.
- IAU-International Association of Universities., 2005, Sharing quality higher education across borders: A statement on behalf of higher education institutions worldwide, [http://www.unesco.org/iau/p\\_statements/index.html](http://www.unesco.org/iau/p_statements/index.html) (14 July, 2008).
- Metzenberg, S., 1998, A Critique of the "research basis" for the national science education standards and the AAAS benchmarks for science literacy, *Journal of Geoscience Education*, v. 46, p. 484-488.

Manuscrito recibido: 25 de enero, 2010

Recepción del manuscrito corregido: 13 de octubre, 2010

Manuscrito aceptado: 10 de diciembre, 2010

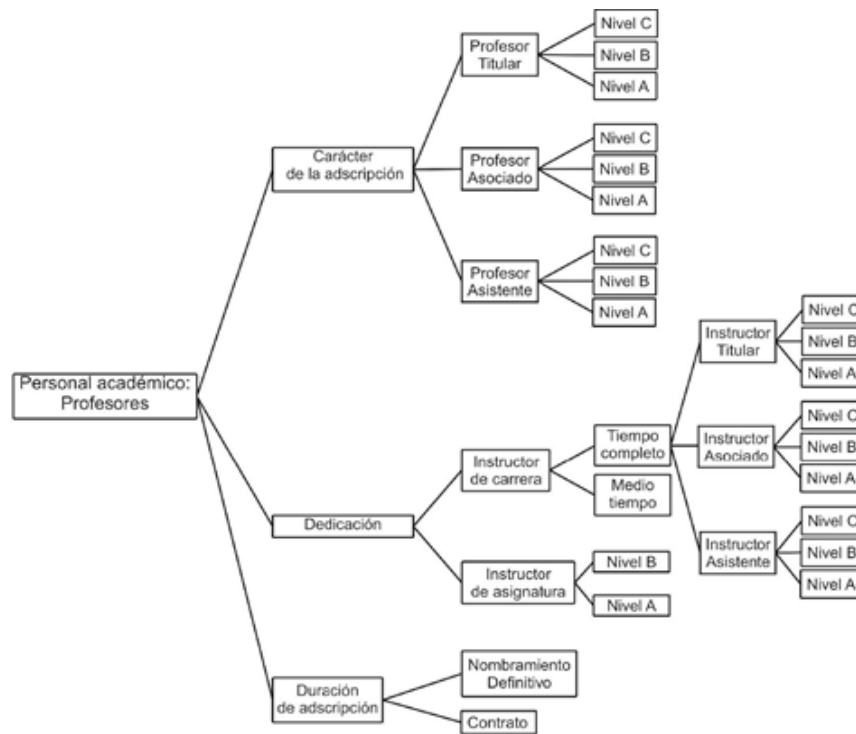


Figura 1. Categorías y niveles para el personal académico. Sólo se muestra la categorización para profesores, ya que la clasificación sigue un patrón similar. También se han omitido, por claridad, algunas ramas repetitivas para instructores de medio tiempo.

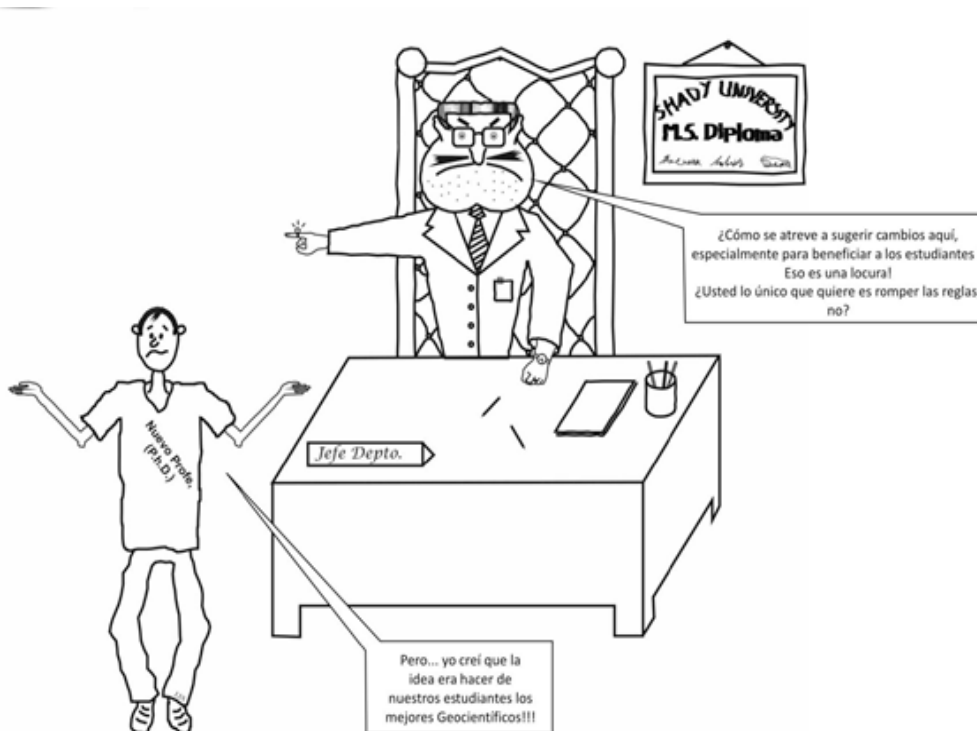


Figura 2. El encuentro generacional.

## EXPERIMENTOS DIDÁCTICOS EN RESISTIVIDAD DE CORRIENTE DIRECTA: ARREGLOS TETRAPOLARES EN UN MEDIO ESTRATIFICADO

Marco Antonio Pérez Flores, José Serrano Ortiz, Armando Calderón Moctezuma y Yunuhen Muñiz Gallegos  
CICESE, Departamento de Geofísica Aplicada. Ensenada, B.C.

### RESUMEN

Este trabajo está dirigido a los estudiantes de Geofísica Aplicada y Geofísicos que trabajen con Resistividad de Corriente Directa. Se proponen cuatro experimentos numéricos sencillos con arreglos tetraelectródicos. En el primero se estudia qué tan exacto es usar el arreglo del Método de Schlumberger aproximado comparado con el de Wenner. El segundo consiste en abrir los electrodos MN (de potencial) para ver los efectos provocados en la curva de resistividad aparente. El tercer experimento consiste en rotar los electrodos MN. El cuarto, consiste en desplazar MN lateralmente sobrepasando un electrodo de corriente. Se podrá ver en los diversos experimentos que la curva de resistividad aparente se afecta, lo que resulta en una mayor o menor profundidad de penetración. Todos los experimentos se comparan con el método Schlumberger, que se utiliza como referencia dada su importancia en los aún tan usados Sondeos Eléctricos Verticales (SEV's).

### INTRODUCCIÓN

El método de Resistividad de Corriente Directa se empezó a usar desde los tiempos de los hermanos Schlumberger en Francia (Schlumberger, 1922; Wenner, 1912). Fue un método que ganó con rapidez adeptos por todo el mundo y para la década de los 70, ya se usaban las famosas Curvas Maestras de Orellana (Orellana y Mooney, 1966). Como geofísicos siempre nos preguntamos por qué el arreglo de Schlumberger debe tener una aproximación para  $MN$  muy pequeños, con respecto a la distancia  $AB$ . La respuesta es que es más fácil en campo mover los electrodos  $MN$  lo menos posible. También porque esa aproximación nos permite usar solo una integral en lugar de dos, cuando se hace modelado con capas. En aquella época, ahorrarse tiempo de cómputo debió ser muy importante. Con las computadoras actuales, ya no tiene sentido. Para un medio estratificado, se tiene que resolver el problema numéricamente con una transformada de Hánkel. Si el arreglo es colineal tetrapolar y simétrico se resuelven dos integrales; si es asimétrico o no-colineal se resuelven cuatro y si es el de Schlumberger solo una.

$$V(R, z) = \frac{\rho_1 I}{2\pi} \int_0^\infty (1 + 2A_1) J_0(\gamma R_{AM}) d\gamma$$

$$= \frac{\rho_1 I}{2\pi} \int_0^\infty K_1(\gamma) J_0(\gamma R_{AM}) d\gamma$$

Con las computadoras modernas y los métodos de integración hechos a la medida, toma menos de un segundo una sola integral; podemos calcular miles en pocos minutos. En los experimentos numéricos que se plantean aquí se usan arreglos colineales y no-colineales, así que en general trabajaremos con el caso de las cuatro integrales. El algoritmo que diseñamos trabaja con el método recursivo de Pekeris (1940), para hallar la transformada de la resistividad de la primera capa, que es donde inyectamos corriente y medimos la diferencia de potencial entre los electrodos  $M$  y  $N$ .

El algoritmo que diseñamos nos permite mover los electrodos asimétricamente y en forma no-colineal. Es decir que entran las coordenadas  $(x, y)$  de cada electrodo. Esto nos permite mover los cuatro electrodos arbitrariamente sobre el plano  $(x, y)$ .

## METODOLOGÍA

La metodología se puede hallar en diversos libros de Métodos Geo-eléctricos (Koefoed, 1979; Nabighian, 2008). Parte de este material está contenido en los cursos de las carreras de Geofísica Aplicada. Sin caer en lo obvio haremos una descripción breve de la metodología utilizada.

Si medimos sobre un medio (semi-espacio) homogéneo, tenemos que resolver la ecuación de Laplace para el potencial eléctrico  $V$ :

$$\nabla^2 V=0 \quad (1)$$

Debido a la simetría esférica de las líneas de igual potencial (equi-potenciales), la ecuación (1) se resuelve en coordenadas esféricas. Para el caso más sencillo, de un punto fuente  $A$  y un punto de medición  $M$ , la solución para  $V$  nos queda

$$V=I\rho/2\pi R \quad (2)$$

donde  $I$  es la corriente inyectada por la fuente (Electrodo  $A$ ),  $V$  es el potencial medido en el electrodo receptor  $M$ . Las fuentes y receptores se suponen puntuales, porque están representados por varillas de cobre que se entierran sobre el suelo (electrodos). La distancia entre fuente y receptor es  $R$ . A este tipo de arreglo se le llama polo-polo, que sería el arreglo elemental. Lo que midamos en el receptor  $V$  dependerá de la corriente, de la distancia fuente-receptor y de la resistividad del medio  $\rho$ . La ecuación (2) también nos dice que podemos determinar la resistividad del medio con solo saber la corriente inyectada, el potencial medido y la distancia entre electrodos. Esta ecuación es utilizada aun para medios heterogéneos, pero entonces la resistividad obtenida ya no será la real. Convencionalmente se le llama resistividad aparente.

Para un arreglo tetrapolar, o sea dos electrodos de fuente ( $A$  y  $B$ ) y dos electrodos de recepción ( $M$  y  $N$ ), la ecuación (2) en términos de la resistividad aparente nos queda:

$$\rho_a = 2\pi \frac{\Delta V}{I} \left[ \left( \frac{1}{R_{AM}} - \frac{1}{R_{BM}} \right) - \left( \frac{1}{R_{AN}} - \frac{1}{R_{BN}} \right) \right]^{-1} \quad (3)$$

$$= 2\pi \frac{\Delta V}{I} G^{-1}$$

donde:

$$R_{AM} = \sqrt{(x_A - x_M)^2 + (y_A - y_M)^2} \quad (4)$$

Es la distancia entre el electrodo fuente  $A$  y el electrodo receptor  $M$ . De manera similar para  $R_{BM}$ ,  $R_{AN}$  y  $R_{BN}$ .  $G$  es el factor geométrico y solo depende de la localización de los electrodos.

La ecuación (3) nos dice que para el caso de un arreglo de cuatro electrodos, es equivalente a cuatro arreglos polo-polo. La ecuación (3) solo es válida si el medio es homogéneo y con frontera aire-tierra plana. Sin embargo, tal ecuación se usa cotidianamente para convertir los datos crudos de campo a resistividad aparente. Esto quiere decir que se usa aun para medios complejos con topografía, con estructuras bidimensionales o tridimensionales en el subsuelo. Este sobreuso indiscriminado puede llevar a obtener resistividades aparentes absurdas en casos especiales. La ecuación (3) nos sirve para tener una idea burda de las capas del subsuelo. Es la ecuación que usaremos para representar los datos de los experimentos numéricos aquí propuestos, solo que  $\Delta V = V_B - V_A$  está asociado a un semi-espacio estratificado.

Los arreglos más conocidos son Schlumberger, Wenner y dipolo-dipolo. Los dos primeros se abren simétricamente alrededor de un centro o eje de simetría y su objetivo es ver variaciones de la resistividad aparente a un medio estratificado. Sin embargo, actualmente se usan para modelado e inversión de medios bidimensionales. El dipolo-dipolo se usa abriendo los electrodos y recorriéndolos lateralmente. Se usa para ver variaciones de la resistividad vertical y lateralmente. Es el arreglo más usado para modelado e inversión en un semi-espacios 2D y 3D.

Para un medio estratificado (1D), la resistividad aparente dependerá también de las resistividades verdaderas de cada capa y sus espesores. La ecuación de Laplace (1) se aplica a cada una de las capas, excepto la primera que es donde está la fuente. En un medio de capas las líneas de igual potencial son circulares en el plano  $(x, y)$  y ya no son circulares en el plano  $(x, z)$ . Por lo tanto se resuelve la ecuación de Laplace para cada capa, pero con coordenadas cilíndricas, que son las que presentan la simetría antes descrita.

$$\begin{aligned}
 V(R, z) &= \frac{\rho_1 I}{2\pi} \int_0^\infty (1 + 2A_1) J_0(\gamma R_{AM}) d\gamma \\
 &= \frac{\rho_1 I}{2\pi} \int_0^\infty K_1(\gamma) J_0(\gamma R_{AM}) d\gamma
 \end{aligned}
 \tag{5}$$

donde  $J_0$  es la función de Bessel de orden cero,  $A_1$  es un coeficiente de la primera frontera debajo de la superficie aire-tierra. Este coeficiente representa una ecuación que depende de las resistividades de cada capa y sus espesores. Esta ecuación puede ser corta si se trata de solo dos capas, larga para tres capas y casi imposible de obtener para cuatro o más capas. Para muchas capas se usa un método numérico recursivo.

$$\begin{aligned}
 \Delta V &= \frac{\rho_1 I}{2\pi} \left[ \int_0^\infty K_1(\gamma) J_0(\gamma R_{AM}) d\gamma + \int_0^\infty K_1(\gamma) J_0(\gamma R_{BM}) d\gamma \right. \\
 &\quad \left. + \int_0^\infty K_1(\gamma) J_0(\gamma R_{AN}) d\gamma + \int_0^\infty K_1(\gamma) J_0(\gamma R_{BN}) d\gamma \right]
 \end{aligned}
 \tag{6}$$

Este  $\Delta V$  se sustituye en la ecuación (3); de esta manera podremos calcular la resistividad aparente para un medio estratificado. Pero no debemos olvidar que en la ecuación (3), aunque  $\Delta V$  sea el apropiado, la ecuación en general es la de un semi-espacio homogéneo, por eso le llamamos resistividad aparente. Las ecuaciones (5 y 6) contienen  $\rho^1$  en forma explícita, porque los electrodos de medición ( $M$  y  $N$ ) están colocados sobre la primera capa. Sin embargo,  $K^1$  contiene todas las resistividades de las capas de manera implícita. La ecuación (6) se puede usar para cualquier arreglo colineal o no-colineal, pues la ecuación (4) nos permite poner los electrodos donde sea dentro del plano  $(x, y)$ , pero sobre  $z=0$ , o sea, en una superficie aire-tierra plana (figura 1). Para un arreglo colineal simétrico como el Wenner y el Schlumberger sin aproximación, las cuatro integrales se reducen a dos, pues  $R_{AM}=R_{BN}$  y  $R_{AN}=R_{BM}$ . En el caso del Schlumberger aproximado se reduce a una integral en términos de  $J^1$ . Hace algunas décadas este ahorro era sustancial, pues las computadoras no tenían el rendimiento de las actuales. En la actualidad, podemos trabajar con la ecuación (6) incluso para arreglos simétricos sin mayor diferencia en el tiempo de cómputo. Usamos la ecuación (6) por su generalidad para cualquier arreglo. El coeficiente se obtiene por medio del método recursivo de Pekeris (1940) y

las integrales de Hánkel se calculan de una manera bastante rápida y eficiente, usando métodos de integración o filtros a la medida.

Nosotros utilizamos los de Anderson (1979). Existen otros métodos recursivos y otros filtros, pero los resultados deben ser los mismos. Nuestros experimentos los realizamos tomando como ejemplo un modelo de cinco capas o dicho de otra manera, cuatro capas y un semi-espacio (figura 1). O sea, que  $K^1$  depende de cinco resistividades y de cuatro espesores. Los arreglos que se usaron para los experimentos, son tres colineales y uno no-colineal.

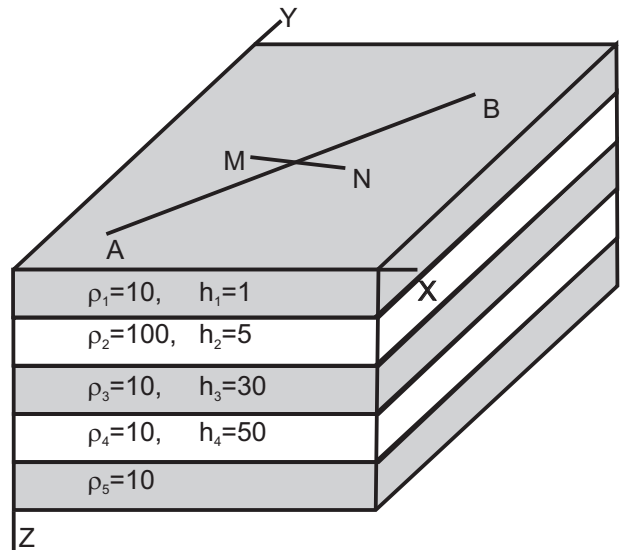


Figura 1. Modelo usado para los cuatro experimentos. La quinta capa, es un semi-espacio homogéneo y no requiere de espesor. Las unidades de la resistividad y espesores son en ohm-metro y en metros, respectivamente.

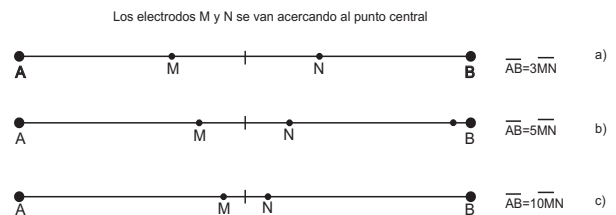


Figura 2. Disposición de los electrodos MN para el experimento 1. Los electrodos M y N se van acercando al punto central.



### Experimento 1

Se trata de un arreglo colineal, donde los electrodos de corriente se localizan en los extremos y los de potencial en medio (Figura 2). Cuando las distancias  $AM$ ,  $MN$  y  $NB$  son iguales, se dice que es un Wenner (Figura 2a). Cuando la distancia  $AB \geq 10MN$ , entonces se dice que es un Schlumberger con la aproximación. Cuando la distancia  $MN$  es infinitesimal, la razón  $\Delta V/R_{AB} \equiv EX$  esto reduce las cuatro integrales de la ecuación (6) a una en términos de la función de Bessel de orden uno. Existen programas de modelado e inversión para Sondeos Eléctricos Verticales (tipo Schlumberger) que trabajan con esa aproximación. Si se dispone de ese tipo de software, es importante tomar los datos en campo respetando la proporción  $AB$  contra  $MN$ . De otra manera, estaríamos usando datos sin aproximación y un software con aproximación.

En este experimento mantendremos  $MN$  siempre en el centro y abriéndose para mantener una proporción determinada. Por ejemplo, si queremos mantener la proporción  $AB = 3MN$  que sería la del Wenner, abriríamos los electrodos  $AB$  con el objeto de ver las capas más profundas de nuestro modelo (Figura 1) y simultáneamente abriríamos  $MN$  para mantener la proporción. Esto lo podemos hacer fácilmente, porque es un ejemplo de computadora, pero en la práctica,  $MN$  se mantiene pequeño y se mueve lo menos posible. Empezaremos con:  $p=3$ , o sea  $AB=pMN=3MN$ , luego por  $p=4, 5, 10, 15$  (Figura 3).

En la Figura 3 se grafica el logaritmo de base diez de  $AB/2$  contra el logaritmo de base diez de la resistividad aparente. Como se ve, el  $AB/2$  máximo fue de 10,000 metros. El modelo es conductor, resistivo, conductor, resistivo y conductor. Por eso muestra dos máximos debido a las dos capas resistivas. La gráfica en general muestra que todas las curvas se parecen mucho. Esto nos dice que el Wenner ( $p=3$ ) y el Schlumberger ( $p=10$ ) ven casi lo mismo. No hay mucha diferencia entre ellos. Las curvas de  $p=10$  y  $p=15$  se sobrepone, lo cual nos indica que efectivamente para  $p \geq 10$ , la aproximación del Schlumberger funciona bien. Es decir que no hay necesidad de hacer en campo  $MN$ , 10 veces menor que  $AB$ . La diferencia entre curvas se observa mayor entre  $p=3$  y  $p=10$ . Para  $p=10$  se

alcanza la cuspide del máximo resistivo en  $AB/2=1.0$  y para  $p=3$  poco después. También el mínimo se alcanza en  $AB/2=1.7$  y para  $p=3$  poco después. En general la curva de  $p=3$  se halla un poco recorrida hacia la derecha. Esto nos dice que el Wenner tiene ligeramente menor profundidad de penetración. Pues para un  $AB/2$  fijo, por ejemplo  $1.0$ ,  $p=10$  empieza a ver la siguiente capa y  $p=3$  todavía no. Es decir que tenemos que abrir ligeramente más el  $AB/2$  para ver las mismas capas que ve el Schlumberger. También se observa que en la curva de  $p=3$  los mínimos y máximos de resistividad aparente, son menores que los de  $p=10$ . Es decir, que la curva de  $p=3$  se deforma ligeramente menos que la de  $p=10$ . Esto nos dice, que el Wenner también tiene menos resolución. En un programa de inversión los datos del Schlumberger nos darían un modelo más cercano al real que si trabajamos con los datos del Wenner. Podemos concluir que Schlumberger y Wenner ven casi lo mismo, aunque existe una ligera ventaja del Schlumberger sobre el Wenner en profundidad de penetración y resolución. También de que la aproximación del Schlumberger se cumple para  $p=10$  ó mayor.

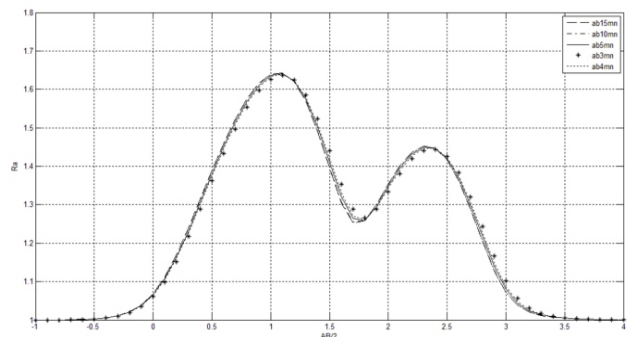


Figura 3. Respuesta del modelo de la figura 1, para el experimento 1.

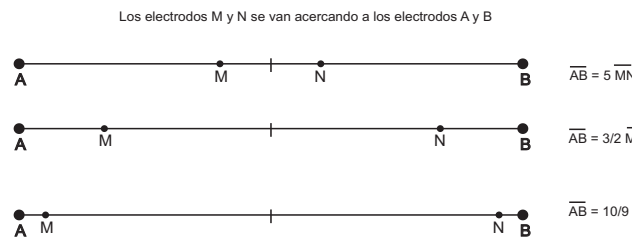


Figura 4. Disposición de los cuatro electrodos para el experimento 2. Los electrodos M y N se van acercando a los electrodos A y B.

### Experimento 2

Este experimento es muy parecido al experimento 1. Ahora abriremos aun más los  $MN$ , hacia  $p=3/2$  y  $p=10/9$ . Tomando como referencia  $p=10$  (ver figuras 4 y 5). Al abrir más los electrodos  $MN$ , las distancias entre  $AM$  y  $BN$  son menores y esto provoca una menor profundidad de penetración. La curva de  $p=10/9$  muestra un desfase hacia la derecha muy pronunciado indicando que se necesitan  $AB/2$  mayores para ver las capas que el Schlumberger ya vio. Por ejemplo, la curva de  $p=10$  alcanza el máximo a  $AB/2=1.0$  y empieza a ver la capa conductora que hace descender la resistividad aparente, a esa misma  $AB/2=1.0$  la curva de  $p=10/9$  sigue subiendo sin llegar al máximo y por lo tanto aún no se percata de la presencia de una capa conductora más profunda.

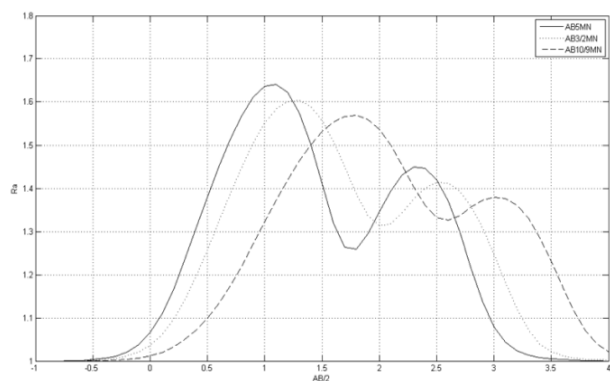


Figura 5. Respuesta del modelo para el experimento.

También a  $p=10/9$  los máximos y mínimos son menores con respecto a  $p=10$ . Esto nos indica que la resolución es menor. La curva de  $p=10$  alcanza una resistividad aparente más cercana a 2.0 (que es la real), en ambos máximos y una resistividad aparente más cercana a 1.0 en el mínimo (que es la real). La curva de  $p=10/9$  tiene los lóbulos más anchos, lo que da la impresión de que fue filtrada por un pasa bajas frecuencias. Podemos concluir que mientras los  $MN$  estén más cercanos al centro del arreglo o punto de simetría, alcanzaremos la mayor profundidad de penetración y resolución, que es el caso del Schlumberger.

### Experimento 3

En este experimento aprovechamos la ecuación (4), donde expresamos las distancias entre  $AM$  y demás como no-colineales, es decir que los electrodos tienen coordenadas  $(x, y)$ .

Como se ve en la Figura 6, Los electrodos  $MN$  se rotaron a  $30^\circ$ ,  $60^\circ$  y  $90^\circ$  y se compararon con la curva de Schlumberger cuyos electrodos  $MN$  están a  $0^\circ$ . Para el caso de  $90^\circ$ , el programa no funcionó. La respuesta está en el factor geométrico  $G$  (ecuación 3). En este caso, la línea  $MN$  quedaría perpendicular a la línea  $AB$ , por lo tanto las distancias  $AM=AN$  y  $BM=BN$ . De acuerdo a la ecuación (3), el factor geométrico es  $G=0$  y por lo tanto su inverso es indeterminado. A esto se le llama *arreglo nulo*. En un semi-espacio homogéneo, unidimensional y algunos casos de bidimensional,  $\Delta V = 0$ . Sin embargo, para casos tridimensionales  $\Delta V \neq 0$ . Usar arreglos nulos en el campo y obtener  $\Delta V \neq 0$  es indicador de la tridimensionalidad de las estructuras geoelectricas del subsuelo.

El experimento consistió en incrementar la distancia  $MN$  conforme se iba abriendo  $AB$ , conservando la proporcionalidad de  $p=10$ . Además los electrodos se rotaron  $30^\circ$  y  $60^\circ$ . Es interesante ver que las tres curvas son prácticamente iguales. Si tomamos mediciones en el campo, sobre un semi-espacio estratificado, las mediciones serían iguales, considerando el rango de error del equipo. Esto significa que de la ecuación (3)  $2\pi/I$  es una constante. Solo varían  $\Delta V$  y  $G$ . El cociente  $DV=f(AB/2)$ , es una función invariante con la rotación de  $MN$ . O sea que,  $\Delta V$  y  $G$  varían, pero de alguna manera se compensan. En un medio homogéneo, 1D ó 2D se debe comportar como invariante. Sin embargo en un medio 3D las curvas deben ser diferentes entre  $0^\circ$ ,  $30^\circ$  y  $60^\circ$ . Ésta es otra alternativa para enfatizar estructuras 3D en lugar de *arreglos nulos*, pues se evita la indeterminación de  $G^{-1}$ .

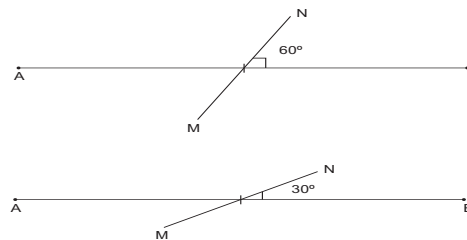


Figura 6. Disposición de los electrodos en el experimento 3. Rotación de M y N.

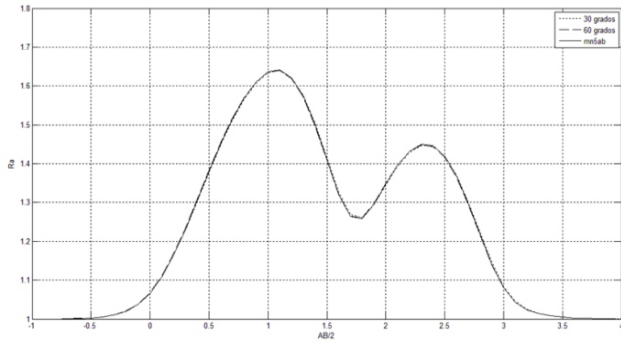


Figura 7. Respuesta del modelo para el experimento 3.

#### Experimento 4

Este experimento consistió en mover los electrodos  $MN$  lateralmente, sacándolos del centro o eje de simetría. En la Figura 8 se aprecia cómo el par se va acercando al electrodo  $B$  y en un caso  $N$  queda fuera de la línea  $AB$ . Se usó la proporción  $p=5$  y se comparó con el Schlumberger ( $p=10$ ). Si tomamos como unidad la distancia  $AB/2$ , en el primer caso  $M$  queda a  $1/4$  de esa distancia y  $N$  a  $2/4$ . Para el segundo caso,  $(M, N) = (2/4, 3/4)$ . En el tercer caso,  $(M, N) = (3/4, 5/4)$ , o sea que,  $N$  queda fuera de la línea  $AB$ . En lo sucesivo nos referiremos por el número de caso o por la posición de  $N$ . En el primer caso ( $N=2/4$ ), se observa que sigue la forma de la curva del Schlumberger, pero está desfasada a la derecha y sus máximos son menores al Schlumberger (Figura 9). Esto nos indica que tenemos menor profundidad de penetración y resolución. Ello, debido a que la distancia  $NB$  disminuye como se observó en el experimento 2. Lo mismo sucede para el segundo caso ( $N=3/4$ ). En este caso la profundidad de penetración es todavía menor, pero la resolución no parece empeorar comparado con el caso 1. El caso 3 ( $N=5/4$ ; *traslape*) nos da algo inesperado. La curva se desfasa hacia la izquierda y los mínimos parecen tener la misma altura que los del Schlumberger. Esto pareciera indicar que la resolución es la misma, pero que penetra más que el Schlumberger. En este caso,  $M$  y  $N$  están más cercanos a  $B$ , pero más lejanos de  $A$  y eso produce la mejoría en

la profundidad de penetración. La distancia  $MN$  es mayor en el caso 3, comparado con el caso 1 y 2. Sin embargo, si se conservara la distancia el comportamiento sería muy parecido. Si los electrodos  $MN$  se mueven hacia  $A$ , es equivalente a cambiar la polaridad de la fuente y por el principio de reciprocidad deben obtenerse las mismas curvas de resistividad aparente.

Se puede concluir que al mover lateralmente  $MN$  no se produce ninguna mejoría con respecto a la profundidad de penetración y resolución. Sin embargo, cuando  $MN$  se traslapa sobre una de las fuentes, hay una mejoría en la profundidad de penetración, pero no en la resolución.

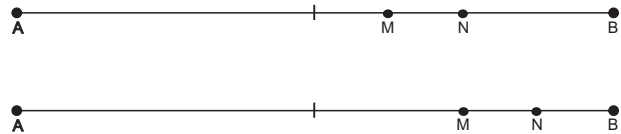


Figura 8. Disposición de los electrodos en el experimento 4. Los electrodos  $M$  y  $N$  se recorren hacia la derecha, la distancia a  $MN$  es  $1/4$  de la distancia del punto central a  $B$  en los primeros dos movimientos, y para el último la distancia  $MN$  es  $1/2$  del punto central a  $B$ , esto para que exista un traslape como se ve en la última ilustración.

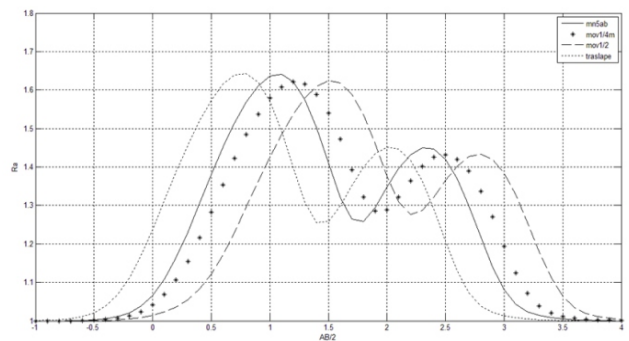


Figura 9. Respuesta del modelo para el experimento 4.

## CONCLUSIONES

Los Sondeos Eléctricos Verticales aún son muy usados en la industria de la Geofísica Aplicada. Estos experimentos nos permiten conocer mejor la física de los arreglos Schlumberger, Wenner y variaciones cercanas a ellos.

Vimos que al colocar  $MN$  centrados al eje de simetría y acortándolos desde la apertura del Wenner, hasta el Schlumberger y un poco más, observamos que todas las curvas son muy similares. Hay una ligera ventaja del Schlumberger con respecto al Wenner en profundidad de penetración y resolución, pero esta ventaja es mínima. También observamos que la aproximación en el Schlumberger de  $MN$  infinitesimal es equivalente a  $AB \geq 10MN$  en el campo.

Al abrir los  $MN$  desde el Wenner, observamos que la profundidad de penetración y resolución disminuyen. Concluyéndose que mientras  $MN$  este más cercano al eje de simetría, la profundidad de penetración y resolución serán máximas, que es el caso del Schlumberger.

Al rotar los  $MN$  a  $30^\circ$ ,  $60^\circ$  y  $90^\circ$ , pensábamos que la resistividad aparente variaría, pero no fue así. Al trabajar con un margen de error como en los equipos comerciales, estas curvas fueron prácticamente iguales. Para  $90^\circ$  se indetermina y no se pueda calcular la resistividad aparente, no obstante que para estructuras 3D,  $\Delta V \neq 0$ . Sin embargo, no podríamos calcular la resistividad aparente. No al menos con la ecuación (3). Habría que modificar esa ecuación para hacerla útil en el caso 3D. Para  $30^\circ$  y  $60^\circ$ , las curvas son iguales al Schlumberger ( $0^\circ$ ). En un medio 1D y 2D no existe ninguna ventaja, pero en 3D cada ángulo aporta información diferente. En términos de inversión en 3D, sería muy útil para incrementar la resolución.

Cuando movemos los  $MN$  lateralmente, alejándolos del eje de simetría, observamos que la profundidad de penetración y resolución disminuyen. Es decir que no hay ventaja alguna sobre el Schlumberger. Sin embargo, cuando el  $MN$  traslapa en uno de los electrodos fuente, el resultado es inesperado.

Nos da una clara ventaja sobre el Schlumberger en cuanto a profundidad de penetración, no así en la resolución. Podemos realizar Sondeos Eléctricos Verticales de muchas maneras, pero definitivamente el Schlumberger nos ofrece mayor profundidad de penetración y resolución. También es más rápido y económico en campo.

La ventaja en campo de los arreglos como el Wenner es que difícilmente tendremos  $\Delta V$  menores que la precisión del equipo como sucede cotidianamente con el Schlumberger cuando se cambia de  $MN$ . Debemos recordar que por el principio de reciprocidad, podemos intercambiar  $MN$  por  $AB$ . En este artículo se muestran cuatro experimentos moviendo  $MN$  dentro de la línea  $AB$ . Pero es lo mismo que si hubiéramos intercambiado  $MN$ , por  $AB$ .

## AGRADECIMIENTOS

Agradecemos las valiosas sugerencias del árbitro Jonás D. de Basabe Delgado para mejorar el contenido del manuscrito, así como a conacyt por las becas de posgrado para los estudiantes participantes.

## REFERENCIAS

- Anderson, W.L., 1975. Improved digital filters for evaluating Fourier and Hankel transforms integrals. Geological Survey, U.S.G.S.-GD-75-012. Denver, Colorado.
- Koefoed, O., 1979. Geosounding Principles, 1. Resistivity Sounding Measurements. Ed. Elsevier.
- Nabighian, M., 2008. Electromagnetic methods in applied geophysics: vol. 1, Theory. Ed. Society of Exploration Geophysics.
- Orellana, E. y Mooney H. M., 1966. Master tables and Curves for Vertical Electrical Soundings over Layered Structures, Interciencia, Madrid, p. 150

Pekeris, C.L., 1940. Direct method of interpretation in resistivity prospecting. *Geophysics*, 5, p. 1-31.

Pérez-Flores, M.A., 1995. Inversión rápida en 2D de datos de resistividad, magnetotelégrafo y electromagnéticos de fuente controlada a bajos números de inducción. Tesis de Doctorado. División de Ciencias de la Tierra, CICESE.

Schlumberger, C., 1920. Etude sur la prospection électrique de sous-sol. Ed. Gauthiers-Villars.

Wenner, F., 1912. The four-terminal conductor and the Thompson bridge. *Bull. U.S. Bur. Standards*, 8, 559-610.

Manuscrito recibido: 13 de octubre, 2010

Recepción del manuscrito corregido: 14 de diciembre, 2010

Manuscrito aceptado: 8 de febrero, 2011



## RAYOS Y CENTELLAS Y LA XV OLIMPIADA DE CIENCIAS DE LA TIERRA

Enrique Gómez Treviño

División de Ciencias de la Tierra, CICESE, Ensenada, Baja California

Es una gran suerte para nuestra generación y para las generaciones futuras que existan todavía muchos fenómenos misteriosos en nuestro planeta. Por lo general, uno termina la preparatoria con la idea de que la ciencia es lo que se dice en los libros de física, biología, química o matemáticas. Que lo que uno tiene que hacer es simplemente aprenderse las fórmulas, conceptos y datos que ahí se dan, y que con eso ya se posee una educación científica. De hecho así son las cosas, pero se pierde lo que para muchos, desde Platón, es lo más importante de la ciencia: un docto ignorar. Ignorar algo, enmarcarlo en el conjunto de conocimientos que ya se tienen, planear y ejecutar experimentos u observaciones que nos lleven de la ignorancia al conocimiento, y así lograr incrementar el nivel de conocimientos, es, y siempre será, la esencia de la ciencia.

Este año decidimos compartir esta sensación del no saberlo todo con los estudiantes y maestros de preparatoria. Escogimos fenómenos que mucha gente ha observado, como los rayos, las centellas y las luces de terremotos. Los últimos dos apenas si se han reconocido como objetos para ser tratados por la ciencia, y apenas si sabemos qué los causa o a qué se deben en detalle. Antes era difícil informarse uno desde su casa o en la escuela sobre estos fenómenos, pero ahora con la existencia de la Red uno puede conseguir información de última hora en unos cuantos minutos. Existen videos de rayos cayendo sobre aviones, autos o edificios, así como de centellas, luces de terremotos y hasta de nubes asociadas a terremotos. También se pueden leer artículos al respecto, ya sea de divulgación o publicados en revistas de prestigio. Los temas mencionados se complementaron con otros dos, el del cambio climático y el de los colores del cielo, que ya habían sido tratados en concursos anteriores.

El primer lugar fue ganado por Jesús Manuel Durán Morales, estudiante del Cobach plantel Guadalupe Victoria de Mexicali, quien recibió un premio económico y una medalla, así también su asesor, José Espinoza González. El segundo sitio lo obtuvo el joven Miguel Ángel Hernández Cruz, del Cobach Siglo XXI de Tijuana y Gabriela de la Selva Rubio como su asesora; y el tercer puesto recayó en Miguel Galeno Rocha de Cobach La Mesa y su asesor Manuel Armando Gómez Piñón.

En lo que sigue se incluye la guía proporcionada a los estudiantes un mes antes del examen, así como las 25 preguntas sobre el nuevo tema de rayos y centellas. En la liga siguiente encontrarán una reseña del evento:

<http://www.youtube.com/watch?v=Q5d-4HvP32U>

**Rayos y Centellas: guía para la XV Olimpiada de Ciencias de la Tierra para estudiantes de preparatoria de Baja California. Sábado 28 de Noviembre de 2009. Salón de Usos Múltiples. CICESE. Ensenada, Baja California.**

La ciencia no lo sabe todo ni pretende saberlo todo. Lo que sí pretende, y de hecho lo hace y lo hace muy bien, es saber cada vez más sobre múltiples aspectos de la realidad. En eventos anteriores ustedes y sus maestros han explorado los avances en lo que respecta al origen del Universo y lo que pasa en el interior de las estrellas, así como lo relativo al cambio climático, sismos, tsunamis, huracanes y hasta sobre los colores del cielo y de las puestas de sol. Esta vez el tema nuevo abarcará diversos fenómenos eléctricos que suceden en la atmósfera, como los familiares rayos y relámpagos, así como otros menos conocidos y aún otros que son controversiales. Busquen y lean sobre centellas o rayos en bola, fuegos de San Telmo, fuegos fatuos, y luces y nubes asociadas a terremotos. La ciencia no lo sabe todo sobre varios de estos fenómenos. Es increíble que sepamos más sobre lo que sucede en el interior de las estrellas que lo que sucede en la atmósfera en determinadas circunstancias. En parte esto se debe a que la misma estrella se puede observar muchas veces, mientras que algunos de estos fenómenos son únicos o duran muy poco, y no es fácil hacer mediciones cuando ocurren.

Investigando estos temas en la Red se van a asombrar y a divertir mucho. Aunque todos los temas son muy interesantes, seguramente encontrarán que el de las centellas es el más fascinante y misterioso. Hasta hace algunas décadas no se le consideraba como tema científico serio, sino como producto de alucinaciones o ilusiones ópticas. Si alguien veía una, mejor se quedaba callado porque seguro lo tildarían de loco. Y es que no es para menos, porque las centellas parecen cosa de otro mundo. Según reportes pueden entrar por las chimeneas, por debajo de las puertas, por una ventana aunque esté cerrada y hasta atravesar paredes. Actualmente, con tantas cámaras

fotográficas en el mundo ya no se tienen dudas de su existencia, pues hay muchas fotografías y videos que confirman las observaciones y reportes de antaño.

De hecho, en varios laboratorios y universidades de prestigio en el mundo han logrado producir centellas con características similares a las observadas. Sin embargo, a pesar de los avances en física y química y otras disciplinas, no sabemos a ciencia cierta lo que son las centellas. El problema es que diferentes investigadores han sintetizado lo que parecen ser centellas, usando diferentes métodos y materiales, de tal forma que sus centellas son de diferente naturaleza entre sí. Y como nadie ha logrado hacer mediciones en centellas reales, pues entonces no se sabe si algunas de las centellas creadas en laboratorio son de la misma naturaleza que las reales. Uno de los logros más espectaculares en la síntesis de centellas artificiales lo lograron en enero de 2007 investigadores brasileños. Un año antes un profesor de una universidad de Texas en San Marcos logró también resultados alentadores pero usando métodos y materiales diferentes. Revisen estos reportes, vean fotos y videos de centellas y lean anécdotas sobre ellas. Tal vez ustedes, sus familiares o amigos hayan visto una y no quieren decir, o lo han dicho y no les creen.

Sobre los fuegos de San Telmo no hay ninguna duda. Se trata de un fenómeno eléctrico muy común, bien conocido y reproducible. Sobre los fuegos fatuos existen varias hipótesis, ninguna comprobada cabalmente. Revisen lo que son estos fuegos y las hipótesis y críticas al respecto. Las luces de terremotos es otro fenómeno que ahora se acepta en la comunidad científica y se estudia con seriedad, pero aún no tenemos una explicación satisfactoria. Otra vez, lean al respecto y vean fotos y videos de estas luces. Más controversial es el tema de que semanas antes de que ocurra un gran terremoto aparecen extrañas nubes en el cielo. Estas nubes se reportan desde la antigüedad en Grecia, China e India como algo normal antes de un sismo fuerte. Recientemente, algunos científicos han retomado esta idea para predecir la ocurrencia de terremotos. Para monitorear un continente

se requieren fotografías de satélite, pero localmente las observaciones se pueden hacer a simple vista. Según los entusiastas de esta técnica de predicción las nubes deben ser de cierta forma. Busquen ejemplos e identifiquen la forma, busquen quién en la antigua Grecia dejó escritos al respecto y quién en la India.

Además, busquen cómo se llama el científico contemporáneo que revivió estas ideas y de qué nacionalidad es. La idea es que en el proceso de buscar los nombres se familiaricen con las ideas y las teorías que ellos manejan. Por ejemplo: ¿Qué saldrá de la Tierra antes de un temblor para que se formen esas nubes? Como se mencionó anteriormente, estas ideas de las nubes no están aceptadas por la corriente principal de estudiosos de los sismos. Sin embargo, nada se pierde si todos los días inspeccionan el cielo buscando nubes con las características adecuadas. Tal vez ayuden a confirmar o desmentir estas ideas.

El tema mejor investigado es el de los rayos y relámpagos, en donde sí se han tomado innumerables mediciones, fotografías y videos, y en donde existe una teoría con todo y ecuaciones para simular el proceso en una computadora. Se desconocen todavía algunos detalles, pero en términos generales se conoce muy bien el fenómeno. En la Red encontrarán no sólo fotos y videos sino además detalles como rayos negativos y positivos, distribuciones de cargas eléctricas en las nubes y en la tierra, valores típicos de la duración de los rayos, de los voltajes necesarios para que sucedan, valores de corrientes eléctricas y longitudes medias, así como la cantidad de rayos que caen por segundo en la Tierra. Busquen todos estos datos y traten de memorizarlos, pero no sólo memorizarlos, sino también imaginarlos. Busquen el tipo de nubes en las que se producen los rayos, vean fotos y videos de las mismas y déjense impresionar por su aspecto majestuoso. No sólo se aprendan el nombre de esas nubes, eso sólo sirve para medio impresionar a otros, véanlas en las fotos y videos y recuerden si las han visto en el cielo, y si no las han visto seguro algún día las verán. Lo importante es poder relacionar lo que se aprende con lo que se ve, o al revés, relacionar lo que se ve con lo que se aprende.

El rayo, el relámpago y el trueno son fenómenos diferentes, aunque están íntimamente relacionados. Los tres son consecuencia de que en cierto tipo de nubes se separan cargas positivas y negativas. Revisen a qué se refieren cuando usan cada uno de los tres términos. Los rayos son fenómenos que suceden en una pequeña fracción de segundo. Fue necesaria la invención de cámaras muy rápidas para revelar detalles y demostrar que los rayos también tienen historia, aunque es una historia muy corta. Sobre esto revisen lo que son los líderes escalonados hacia arriba y hacia abajo. Sobre el relámpago busquen de dónde proviene la luz o cómo es que se produce luz, y lo mismo para el trueno, de dónde proviene el sonido o cómo es que se produce. Busquen estadísticas sobre la incidencia de rayos en personas y aviones y seguramente se sorprenderán. Busquen las precauciones que uno puede tomar para estar menos expuesto a que le caiga un rayo.

En el examen de este año habrá de 25 a 30 preguntas sobre estos fenómenos eléctricos de la atmósfera. Se recomienda que busquen en la Red artículos al respecto. Existe bastante información sobre ellos en español. También pueden buscar en inglés. Para esto necesitarán conocer los términos en inglés. Rayo es lightning, centella es ball lightning, fuego de San Telmo es Saint Elmo's fire, fuego fatuo es ghost-lights, luces de terremotos es earthquake lights, nubes de terremotos es earthquake clouds, trueno es thunder y relámpago es flash. Un buen lugar para empezar es la Wikipedia, la cual además de contener información tiene muchas ligas hacia otras fuentes. En youTube encontraran videos de rayos, centellas, crecimiento de nubes, luces de terremotos y de temas relacionados.

Otras 25 preguntas del examen estarán basadas en las 25 preguntas nuevas del examen de la XIV olimpiada en 2008. Esto es, versaran sobre los colores del cielo, del porqué el cielo es azul y demás material relacionado. Revisen muy bien esas 25 preguntas, aunque algunas estén muy extensas. No sólo busquen las respuestas correctas, porque en las mismas preguntas hay mucha información y sobre esa información se pueden reformular preguntas nuevas. Encontrarán estas preguntas

en el informe sobre la XIV olimpiada, el cual se incluye en esta misma página. El resto del examen se basará en las 50 preguntas incluidas en el informe de la X olimpiada, la cual se llevó a cabo en el año 2004. Este informe también se incluye aquí para mayor comodidad. El tema de ese año fue el de Cambio Climático, y se incluyó el año pasado como parte del examen porque es un asunto muy importante. Este año repetimos esta parte porque muchos de ustedes no eran estudiantes de preparatoria ni en el 2004 ni el año pasado. En total serán 100 preguntas. Las nuevas 25 preguntas sobre los rayos y centellas las conocerán hasta el día del examen y valdrán el doble que las restantes 75.

Por favor recuerden que es muy conveniente para nosotros que se inscriban con anterioridad, ya sea en forma individual o en grupo, al fax 646-175-05-67, o mejor electrónicamente según se indica en esta página, porque nos permite planear mejor la cantidad de exámenes que debemos imprimir, preparar un día antes los gafetes con sus nombres, imprimir los diplomas de participación, así como el número de mesa-bancos que necesitaremos y la cantidad de comida que debemos ordenar. Sin embargo, aún si no se inscriben con anticipación, pueden llegar ese mismo día e inscribirse. A la fecha hemos podido manejar perfectamente a los pocos que a última hora se deciden en participar.

Pan, café, chocolate y frutas para quienes no hayan desayunado. De 8:00 a 10: AM se entregarán los gafetes con sus nombres. A las 10:00 AM inicia el examen y se termina a las 12:01 PM. Antes de la comida tendremos, como siempre, la visita a varios laboratorios incluyendo la red sismológica donde se reciben las señales de los sismos que ocurren en Baja California. Entre las 2:00 y 3:00 PM se harán las premiaciones.

Saludos cordiales y buena suerte. Los esperamos en Ensenada.

Atentamente,

Dr. Enrique Gómez Treviño  
Coordinador de las Olimpiadas

## Las 25 preguntas nuevas para la XV olimpiada.

1. De 1959 a 1994, en los Estados Unidos fallecieron 3,239 personas que fueron alcanzadas por rayos, un promedio de alrededor de 100 por año. Este promedio es mayor que el de fallecimientos por huracanes y tornados, pero su impacto en los medios de comunicación es pequeño porque se trata de eventos aislados. De 1995 a 2004 fallecieron por la misma causa 489, un promedio de alrededor de 50 por año. La reducción se le atribuye a la mayor educación en cuestiones de prevención y seguridad. Si uno se encuentra en medio de una tormenta eléctrica los peores lugares son los lugares altos o debajo de un árbol, y los más seguros son una casa o un auto. Más detalles al respecto los pueden buscar en la Red. Los aviones también son muy seguros por los sistemas de protección que tienen. En la aviación comercial se estima que a un avión le caen en promedio 2 rayos por año, y sin mayores consecuencias. La cuestión es que una vez en un lugar seguro uno no debería de tener miedo a los rayos, o a lo sumo tener un poco de miedo pero controlado. Sin embargo, está documentado alrededor del mundo que muchas personas experimentan una fobia o miedo irracional a los truenos y relámpagos. Es especialmente común en los niños. Los síntomas, como en las demás fobias, incluyen el pánico, dificultad para respirar, taquicardia, sudoración, y náuseas. El fóbico suele sentirse sin control de estos síntomas. Muchos afectados intentan controlar su fobia escondiéndose durante las tormentas. Los niños típicamente se esconden en lugares sin ventanas, como en un armario, debajo de la cama, o en cualquier otro lugar donde puedan evitar ver el relámpago y escuchar el trueno. Esta fobia se conoce con el nombre de

a) Agarofobia  
c) Astrafobia

b) Truenofobia  
d) Rayofobia

2. La destrucción que causan los rayos, la majestuosidad de los relámpagos y la sensación que producen los truenos de que algo terrible está pasando, nos sugieren, al igual que a los antiguos, que los rayos poseen una energía inimaginable. De cierta manera esto es así, pero también es cierto que tienen una debilidad, y esta es que no duran casi nada, apenas si menos de una milésima de segundo.

Si existiera la tecnología para aprovechar su energía, que de hecho no existe, y convertirla en energía eléctrica utilizable, el negocio seguramente no sería rentable. Un rayo negativo promedio de una sola descarga despliega una energía equivalente a mantener encendido un foco de 100 W por dos meses. Suponiendo que el kWh vale 2 pesos: ¿Cuántos pesos se obtendrían de uno de esos rayos?

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

3. Un rayo negativo promedio de una sola descarga puede bajar de la nube a la tierra una carga eléctrica negativa de 5 Coulombios. Esta cantidad de carga es pequeña si la comparamos con las cargas que circulan por nuestros aparatos electrodomésticos. Por ejemplo, por un tostador de pan pasan 10 Amperios, lo que significa que pasan 10 Coulombios cada segundo. Esto es, el doble de lo que baja de la nube. La gran diferencia es que de la nube los 5 Coulombios no bajan en un segundo, sino en una fracción muy pequeña de un segundo. La situación es tal que mientras en el tostador la corriente es de 10 Amperios, en el canal de descarga del rayo la corriente es de 30,000 Amperios. Con corrientes de esta magnitud es sorprendente que muchos a los que les cae un rayo sobrevivan, como de hecho sobrevive el 80 %, aunque con lesiones de leves a severas. Utilizando los datos de 5 Coulombios de carga eléctrica y de 30,000 Amperios de corriente, calcular el tiempo de descarga del rayo. Este tiempo en milisegundos es de:

- a) 160
- b) 16
- c) 16
- d) 0.16

4. Aunque ahora nos parezca obvio que los rayos son de naturaleza eléctrica, o sea producidos por cargas eléctricas, hubo un tiempo en que esto era sólo una sospecha. Eran los tiempos anteriores al famoso experimento que realizó Benjamín Franklin en 1752. Franklin notó que las fibras sueltas de la cuerda de la cometa o papalote se repelían más a medida que el papalote se acercaba a la nube. La chispa que saltó entre uno de sus dedos y la llave al final de la cuerda completaba la prueba:

la nube y el suelo tenían cargas contrarias capaces de crear chispas, al igual que sucedía en experiencias de laboratorio donde se tenía control sobre las cargas. El experimento, cuidadosamente diseñado para probar o refutar la hipótesis-sospecha, había sido un éxito. Franklin también tenía consigo instrumentos de la época además de la cometa y la llave de bronce al final de la cuerda. La pregunta es: ¿Determinó Franklin el signo de la carga en la nube?

- a) No. No pudo.
- b) Sí. Determinó que era (+).
- c) No. Ni lo intentó.
- d) Sí. Determinó que era (-).

5. Georg Wilhelm Richmann fue un físico perteneciente a la Academia Imperial de Ciencias de San Petersburgo, donde estaba a cargo del observatorio astronómico. Tras la publicación de los escritos de Benjamin Franklin se dedicó al estudio de la electricidad atmosférica. Mientras trataba de reproducir los experimentos de Franklin con la cometa, falleció electrocutado por una descarga en 1753. ¿Qué tipo de descarga golpeó a Richmann?

- a) un rayo positivo
- b) una centella
- c) un fuego de San Telmo
- d) un rayo negativo



6. Franklin no fue el primero en demostrar que los rayos son de naturaleza eléctrica. Thomas Dalibard realizó un mes antes que Franklin un experimento equivalente, pero basándose en una publicación de 1750 del mismo Franklin, en donde éste proponía dicho experimento. Franklin aclara en su autobiografía que comparando las fechas, su experimento con la cometa lo realizó varias semanas después del de Dalibard, pero que en 1752 él no lo sabía. Se dice que ellos se conocieron personalmente en 1767 y se hicieron amigos cuando Franklin, quien vivía en lo que ahora son los Estados Unidos, visitó el país de Dalibard.

Ese país ayudó mucho a lo que ahora son los Estados Unidos a independizarse en 1776, y para celebrar los 100 años de independencia ese mismo país le regaló en 1876 a los Estados Unidos la estatua de la libertad. ¿De qué país era Dalibard?

- a) Inglaterra    b) Italia
- c) Canadá      d) Francia

7. Los aztecas tenían su dios de la lluvia, el cual también era el dios de los rayos y las tormentas. Este dios era Tlaloc. Para los mayas el dios era Chaac. Para los antiguos griegos era Zeus, y para los romanos era Júpiter, aunque Zeus y Júpiter eran en realidad la misma deidad. ¿Cómo llamaban los vikingos a su dios de los rayos?

- a) Odin            b) Thor
- c) He-Man        d) Ullr

8. El metro es la unidad de longitud y el segundo es la unidad de tiempo en el sistema internacional de medidas. La duración de un rayo es menor que un segundo, la unidad de tiempo, y resulta que el diámetro del rayo es también menor que un metro, la unidad de longitud. Considerando que la longitud media de un rayo típico es de 5,000 metros, resulta que los rayos son entes bastante esbeltos, muy altos y muy delgados. ¿Cual es el diámetro o grosor del canal del rayo en metros?

- a) 0.001 a 0.002    b) 0.01 a 0.02
- c) 0.1 a 0.2        d) 1 a 2

9. Cuando una corriente eléctrica tan grande como la de los rayos pasa por un canal tan estrecho, implica que hay muchos iones que deben pelearse por seguir su camino, los positivos en una dirección y los negativos en la dirección opuesta, resultando en golpeteos que necesariamente aumentan la temperatura del aire en el canal de descarga. Esta temperatura puede alcanzar unos 30,000 grados Centígrados, la cual equivale a varias veces la temperatura de la superficie del Sol. ¿Cuántas veces?

- a) 2                    b) 3
- c) 5                    d) 8

10. La mayor parte de las descargas eléctricas que se inician en las nubes terminan en las mismas nubes. Si en la misma nube se llaman intra-nube, y si es entre diferentes nubes se les llama inter-nube. Le siguen en frecuencia los rayos entre la parte inferior de las nubes, por lo general con carga negativa, y la tierra, la cual responde por simple inducción con cargas positivas. A estos se les llaman rayos negativos porque bajan carga negativa a la tierra. Después de muchos de estos rayos, hacia el final de las tormentas, las nubes tienen exceso de cargas positivas. Al parecer, este exceso de cargas positivas es la causa de la existencia de los rayos positivos, llamados así porque bajan carga positiva a la tierra. Estos rayos se inician en la parte alta de la nube y por lo general no bajan verticalmente, como los negativos, sino que suelen tocar tierra a una distancia promedio de 10 km de la nube, aunque en esa área no haya habido tormenta. Son mucho más peligrosos que los rayos negativos, pues descargan en promedio 300 Coulombios y la corriente típica es de 300,000 Amperios, afortunadamente sólo representan alrededor de 5 % de los rayos que caen a tierra. Otra de las causa por las que son más peligrosos es que duran mucho más tiempo que los rayos negativos. Con los datos de la carga de 300 Coulombios y la corriente de 300,000 Amperios, calcular la duración de un rayo positivo. El tiempo en milisegundos es

- a) 1                    b) 10
- c) 100                d) 1000

11. Hace apenas si dos décadas que se descubrió que durante las tormentas eléctricas se disparan rayos positivos gigantescos que, en lugar de caer a la tierra, o sea hacia abajo, se disparan hacia arriba, hacia las altas capas de la atmósfera. Estas descargas depositan cargas positivas particularmente en una capa de la atmósfera que se extiende desde los 50 hasta lo 100 km de altura llamada ionosfera.

El balance de las cargas que llegan a la tierra y las que se depositan en la ionosfera es tal que la tierra tiene cargas negativas y esa capa de la atmósfera tiene cargas positivas. Como resultado, en la superficie de la tierra, o sea donde nosotros estamos y caminamos todos los días, existe un campo eléctrico de 100 voltios por cada metro de altura. Por otra parte, el voltaje ente las dos esferas, la ionosfera y la tierra, es de alrededor de 350, 000 voltios y es más o menos estable, a pesar de que todos los días hay alrededor de 2,000 tormentas eléctricas que harían que este voltaje aumentara indefinidamente y que toda la atmósfera explotara en una gran descarga. La razón de que no explote es que la atmósfera es un poco conductora, de tal forma que deja que bajen lenta y continuamente cargas de arriba hacia abajo. Este flujo es pequeñísimo, pero sumado alrededor de toda la tierra es de alrededor de 2,000 Amperios. Si no hubiera tormentas eléctricas esta corriente terminaría por bajar toda la carga positiva de la ionosfera y cancelar la negativa en la tierra. Considerando que son alrededor de 1,200,000 Coulombios de carga que tendrían que bajar a tierra: ¿Cuánto tiempo se necesitaría para descargar la ionosfera?

- a) 10 segundos
- b) 10 minutos
- c) 10 horas
- d) 10 días

12. Los rayos positivos que caen a tierra son mucho más poderosos que los negativos. Si uno negativo despliega una energía capaz de mantener un foco de 100 Watts encendido por dos meses, la energía de uno positivo mantendría ese mismo foco de 100 Watts encendido por 100 años. Haciendo el mismo ejercicio que con la energía del rayo negativo, calcular los ingresos de una supuesta compañía ficticia que logró captar esa energía concentrada del rayo positivo, y convertirla en energía menos concentrada para venderla a 2 pesos por kWh. ¿Cuáles serían los ingresos, en pesos, de la supuesta compañía por vender la energía de un rayo positivo?

- a) 2,000
- b) 20,000
- c) 200,000
- d) 2,000,000

13. Los rayos, positivos o negativos, descargan su energía una vez que los líderes escalonados abren el conducto de descarga. Los rayos positivos por lo general consisten de una sola descarga y todo vuelve a la normalidad. Sin embargo, los rayos negativos por lo general consisten de más de una descarga. Estas descargas se suceden una a otra cada 50 milisegundos, un tiempo relativamente largo comparado con la duración de la descarga misma, la cual toma alrededor de 50 microsegundos. Los rayos negativos más comunes no son los de una sola descarga sino de varias. Por eso es que cuando cae un rayo observamos una especie de luz intermitente. Lo que pasa en realidad es que varias descargas aprovechan el mismo canal. Después de la primera descarga, otras partes de la nube descargan su carga negativa a través del mismo canal porque es el camino de menos resistencia a tierra. Cuando ya no hay más carga, el canal se enfría y rayos subsecuentes tendrán que construir su propio canal con nuevos líderes. ¿Cuántas descargas presentan típicamente los rayos negativos?

- a) 3 a 4
- b) 5 a 6
- c) 7 a 8
- d) 9 a 10

14. Comparando con otros países, en México cae una cantidad de rayos por kilómetro cuadrado que no es ni muy grande ni muy pequeña, sino más o menos promedio. El lugar de la Tierra donde caen más rayos se encuentra en África ecuatorial, en la República Democrática de el Congo. En ese lugar caen 160 rayos por kilómetro cuadrado cada año. Como un kilómetro cuadrado es lo mismo que cien manzanas, eso quiere decir que en promedio, cada año cae más de un rayo en una manzana. Esto no parece mucho pero: ¿Qué tal si tus padres te dicen que en la manzana donde tú vives han caído 30 rayos desde que naciste? Es lo mismo que 1.6 por año si tienes alrededor de 18 años de edad. Dentro de nuestro propio país la distribución de rayos no es uniforme, siendo algunos estados más propensos que otros. ¿En cuál de los siguientes cuatro estados de México caen menos rayos.

- |                    |            |
|--------------------|------------|
| a) Tamaulipas      | b) Yucatán |
| c) Baja California | d) Sinaloa |

15. De todas las descargas eléctricas el 70 % son intra-nube o inter-nube y 30 % caen a tierra, incluyendo el mar, donde si bien caen menos que en la tierra su contribución no es despreciable. Cuando se habla de rayos que caen a tierra se sobreentiende que se incluyen también los que caen en el mar. Un 5 % de ese 30%, o sea sólo 1.5 % son positivos, afortunadamente. Los rayos que se producen en tormentas de arena y en erupciones volcánicas no son tan comunes y no cuentan casi nada en las estadísticas. En toda la tierra existen en cualquier momento alrededor de 2,000 tormentas eléctricas activas, cada una contribuyendo al total de rayos que caen a la tierra. Antes de la existencia de satélites especializados para contar rayos, se estimaba una cantidad de rayos por segundo mayor a la que se considera correcta actualmente. Se considera correcta la estimada con satélites. Considerando esta cantidad: ¿Cuántos rayos caen por hora en toda la tierra?

- |           |            |
|-----------|------------|
| a) 10,000 | b) 30,000  |
| c) 60,000 | d) 120,000 |

16. Decir que los rayos caen a la tierra no es completamente correcto. En realidad el proceso de los rayos es más complejo, pues además del líder negativo que baja de la nube, existe otro positivo que, aunque de menos longitud, sube del suelo hacia la nube. Veamos cómo es el proceso completo: El líder escalonado negativo que baja de la nube, el cual no es otra cosa que cargas negativas, a medida que se acerca a tierra atrae y concentra cargas positivas en el suelo, las cuales pueden ser tan grandes que ionicen el aire cercano y formen un líder positivo hacia arriba. Cuando ambos se encuentran se crea el canal de descarga por donde suben iones positivos y bajan negativos. O sea que el rayo en realidad no baja, sino que sube y baja al mismo tiempo. Lo que sí es cierto es que todo se inicia porque el líder escalonado negativo empieza a bajar. Se le llama líder escalonado porque se va formando por escalones o pasos, los cuales duran si apenas 1 microsegundo y avanzan de 10 a 50 m cada uno. El siguiente paso tarda en aparecer como 50 microsegundos. En total el líder tarda en formarse cientos de milisegundos, hasta 1 segundo, y aunque es poco brillante comparado con el rayo que viene después, se puede ver en la mayoría de los casos. La forma ramificada hacia abajo se debe a que muchos de los escalones no tienen éxito y hasta allí llegan, quedando fuera del canal de descarga. A veces todo empieza con un líder positivo desde abajo. Esto pasa principalmente en los edificios altos con pararrayos, en donde frecuentemente se ve que las ramificaciones son hacia arriba, como debería de ser. Si bien estos líderes positivos en edificios se conocen desde hace mucho, los que aparecen en tierra como producto de un líder negativo son difíciles de observar. Su existencia se predijo teóricamente en 1950 por Heinz W. Kasemir pero sus trabajos fueron ignorados hasta 1980. Ahora que se han fotografiado no hay duda de que existen. Los líderes negativos que bajan de las nubes tienen varios kilómetros de longitud, mientras que los positivos que ascienden de la tierra son más pequeños. Su longitud típica hasta encontrarse con el líder negativo es del orden de

- |                      |                       |
|----------------------|-----------------------|
| a) centímetros       | b) metros             |
| c) decenas de metros | d) centenas de metros |

17. La caída de un rayo sobre un terreno arenoso provoca la fusión de los granos de sílice (óxido de silicio) hasta una profundidad de más de un metro, en una zona muy estrecha de no más de 5 cm, resultando una especie de tubo retorcido y ramificado. Tienen una apariencia de raíz y a veces muestran pequeños agujeros. Algunos les llaman tubos de rayos, electricidad petrificada o rayos congelados. Su nombre científico es

- a) tunderitas
- b) fulguritas
- c) electritas
- d) rayitas

18. El silicio es el segundo elemento más abundante en la corteza terrestre después del oxígeno. Por otro lado, cuando a rocas o arenas ricas en óxido de silicio les cae un rayo, el silicio puede evaporarse y separarse del oxígeno, para después volver a oxidarse y liberar energía. La abundancia del silicio y su forma de recombinarse con el oxígeno lo hace un buen sujeto de experimentación en la búsqueda de formas artificiales para producir centellas en el laboratorio. Para probar esta hipótesis los científicos brasileños Antonio Pavão y Gerson Paiva diseñaron un experimento en el que fundieron óxido de silicio y sí, sí aparecen bolas que parecen centellas y además duran varios segundos, como las que se reportan asociadas con las tormentas eléctricas. ¿Qué utilizaron como fuente de energía para simular el rayo?

- a) microondas
- b) radiofrecuencias
- c) arco eléctrico
- d) positrones

19. El científico Karl D. Stephan de la Texas State University-San Marcos, generó centellas en el laboratorio, en el aire y a presión atmosférica, y lo más importante, sin el uso de vapores de sólidos como requieren otros experimentos. ¿Qué utilizó como fuente de energía para simular el rayo?

- a) microondas
- b) radiofrecuencias
- c) arco eléctrico
- d) positrones

20. Los fuegos de San Telmo son descargas de efecto corona provocadas por la ionización del aire dentro del fuerte campo eléctrico que originan las tormentas eléctricas. Aunque se llaman "fuegos", son en realidad plasmas de baja densidad y relativamente bajas temperaturas. Los fuegos de San Telmo se observan con frecuencia en los mástiles de los barcos durante tormentas eléctricas en el mar, de ahí su nombre, pues San Telmo es el santo de los marineros. También se da en aviones y dirigibles. Se cuenta que también se da en las puntas de los cuernos del ganado durante tormentas eléctricas. En realidad, se trata del mismo fenómeno que se utiliza en los focos de muchas casas. ¿Qué tipo de focos?

- a) incandescentes
- b) de neón
- c) diodos de luz
- d) de tungsteno

21. Los fuegos fatuos son fenómenos consistentes en la inflamación de ciertos materiales que se elevan de las sustancias animales o vegetales en putrefacción, y forman pequeñas llamas que se ven andar por el aire a poca distancia de la superficie, especialmente en los lugares pantanosos y en los cementerios. Son luces pálidas que pueden verse a veces de noche o al anochecer. Se dice que los fuegos fatuos retroceden al acercarse a ellos. Existen muchas leyendas al respecto. El gas que supuestamente origina los fuegos fatuos es producto de la descomposición de la materia orgánica y arde a temperatura ambiente. ¿De qué gas se trata?

- a) metano
- b) butano
- c) gas natural
- d) fosfina

22. La primera mención escrita sobre luces de terremotos viene del historiador griego Calístenes, quien en 373 AC escribió que antes del terremoto que destruyó las ciudades de Helice y Buris aparecieron columnas de fuego. Calístenes es mejor conocido por sus escritos sobre las conquistas de Alejandro Magno, a quien acompañó en muchas de sus campañas. Por otra parte, ya en nuestros tiempos Marcel Ouellet en su artículo Earthquake lights and seismicity, publicado en la revista científica Nature del 6 de diciembre de 1990, reporta en relación con sismos ocurridos en 1988-1989 en Québec, Canadá, bolas luminosas de varios metros de diámetro que salían del suelo una detrás de otra a pocos metros de los observadores. En general, los diversos reportes que existen sobre luces indican que estas pueden aparecer antes, durante o después de un terremoto. El fenómeno no fue aceptado como real por la comunidad científica hasta que se tomó una fotografía en 1966 durante la ocurrencia de un enjambre de temblores. ¿En que país se tomó esa fotografía?

- a) Chile
- b) EEUU
- c) Japón
- d) China

23. La ciencia no ha logrado a la fecha uno de sus sueños dorados: predecir los terremotos. Ha habido éxitos aislados aquí y allá con base en fenómenos precursores, o sea fenómenos que anticipan el temblor, pero que a veces funcionan y a veces no, por lo que no son confiables en la mayoría de los casos. Para los antiguos las cosas eran más sencillas. Al parecer, ellos sí sabían cómo predecir terremotos, o por lo menos creían que sabían. Sobre la formación de cierto tipo de nubes antes de un terremoto Aristóteles hace la siguiente observación: "Hay también un indicio en los cielos, pues cuando se acerca una sacudida, en el cielo despejado se extiende una nube como línea fina y larga. Zhonghao Shou, químico jubilado de origen chino, revivió hace algunos años esta idea relacionando cierto tipo de nubes con terremotos, partiendo de imágenes públicas procedentes de satélites meteorológicos.

Según Shou, la nube que aparece antes del terremoto proviene del vapor de agua que sale del lugar de la falla geológica donde ocurrirá el terremoto. Las predicciones de Shou son a corto plazo, en una ventana de tiempo de alrededor de 30 días. Según Show su método funciona en un porcentaje de

- a) 70
- b) 80
- c) 90
- d) 100

24. La teoría de Shou llamó la atención de los científicos cuando anticipó el terremoto que asoló Irán el 26 de diciembre de 2003. Unos días antes, el 21 de diciembre, Shou predijo para la zona un terremoto de 5.5 grados o mayor, basándose en el tamaño de la nube. El terremoto resultó de mayor magnitud que 5.5 y costó la vida de 26,000 personas. ¿De cuantos grados fue el terremoto?

- a) 6.5
- b) 7.0
- c) 7.5
- d) 8.0

25. El capítulo 32 de La Gran Compilación, una especie de "Enciclopedia Británica" del siglo VI escrita en sánscrito por el filósofo, matemático y astrónomo Varahamihira, está dedicado a fenómenos precursores de terremotos. Entre esos fenómenos se menciona la aparición de nubes inusuales una semana antes de un terremoto. La Gran Compilación, también conocida como Brihat Samhita, fue escrito en

- a) China
- b) Japón
- c) India
- d) Mesopotamia



## TSUNAMI, EL ÚLTIMO DE LOS TITANES

Modesto Ortiz Figueroa

ortizf@cicese.mx

División de Oceanología, CICESE, Ensenada, Baja California

En la mitología griega, los Titanes eran una raza de poderosos dioses que gobernaban durante la edad dorada. Tras una legendaria lucha fueron vencidos por Zeus y la mayoría de ellos fueron encarcelados en el Tártaro, la región más profunda del inframundo. Pero uno de ellos, el hijo secreto de Tetis, se mantuvo oculto por milenios ante los ojos de los humanos. Su poder se engrandecía en el secreto de su existencia. Todo aquel que de cerca lo veía no vivía para contarlo y los testimonios de aquellos que sobrevivían se perdían en las leyendas. Poblados chicos y grandes, ciudades, y hasta civilizaciones enteras desaparecieron de la franja costera bajo el manto del Titán. Nombre común no tenía y actuaba a la sombra del terremoto cuando por sus vidas corrían bestias y humanos en medio de la tragedia. En algunos lugares se hablaba del maremoto, en otros, de la ola verde. El Titán también se ensañaba en el otro continente y con llanto en los ojos –Tsunami– gritaban en el oriente.

Guiados por la fortuna se asestó el primer golpe crucial cuando un puñado de eruditos en congreso internacional nombraron en común al Titán. Su furia no se hizo esperar y en el año de 1960 azotó al sur de Chile tras un terremoto brutal. Veloz como el rayo y sigiloso como la muerte misma, arrasó con Japón y a su paso con Hawaii, mostrando en todo el océano su poder descomunal. Ante tal desolación un poeta lo describió como tal:

*“...en la memoria del puerto hay ese descalabro, ese estremecerse de las tierras que tiemblan y el ruido ronco que llega de la profundidad, como si una ciudad subterránea echara a redoblar sus campanarios enterrados para decir al hombre que todo terminó. A veces, cuando ya rodaron los muros y los techos entre el polvo y las llamas, entre los gritos y el silencio, cuando ya todo parecía definitivamente quieto en la muerte, salió el mar, como el último espanto, la gran ola, la inmensa mano verde que, alta y amenazante, sube como una torre de venganza barriendo la vida que quedaba a su alcance”...*

Pablo Neruda “Confieso que he vivido”.

La visión del poeta enfadó tanto al Titán que el viernes santo de 1964 impuso penitencia a la humanidad descargando su furia en Alaska, y otra vez, a su paso, en Hawaii.

Al acecho, tras terremotos, causó muchos daños en sigilo total. No contaba con la tenacidad de los menos, que siguiéndole el paso por el Cinturón de Fuego del Pacífico, por el Índico, y por las islas Andamán, reconstruían su imagen para poderlo estudiar. Con modelos matemáticos y evidencia singular, mostraron su existencia a toda la humanidad. El síndrome de Casandra no se hizo esperar, los menos fueron castigados con la indiferencia global.

Confiado en su anonimato atacó el 2004 a Sumatra y Andamán, cobrando cientos de miles de vidas y hasta se dejó retratar. La prensa mundial logró más que los menos y por vez primera la humanidad entera tomó conciencia de su existencia. Sistemas de alerta y ciudades amuralladas cantaron victoria y relajaron su andar, dejando de señalar los lugares vulnerables en donde pudiera atacar. Tan astuto es el Titán, que burlando la vigilancia, al amparo de la penumbra, antes del amanecer, repitió el golpe en Chile el 2010, y a plena luz del día el 2011 atacó a Japón sin piedad matando a miles y causando un desastre nuclear ¡Qué descuido, a plena luz del día se reveló a los humanos en la TV mundial!

Defendernos sí podemos, ahora le conocemos su andar. Señalemos con prudencia la vulnerabilidad. Cuando el terremoto lo venga a delatar, apresuremos el paso para poder escapar.

¡La memoria de las víctimas de los tsunamis no debemos olvidar, los lugares vulnerables debemos señalar!

Marzo, 2011

## 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)

Liga Pérez Cruz (UNAM)  
[perezcruz@geofisica.unam.mx](mailto:perezcruz@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).

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

### Secciones:

### 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.** Las publicaciones de figuras a color en la versión

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 público, 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 vales 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  $\text{g/cm}^3$

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.

$$\mathbf{u}_h(x, z, t) = (U_j^x(t)\phi_j(x, z), U_j^z(t)\phi_j(x, z))^T \quad (1)$$

---

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

---

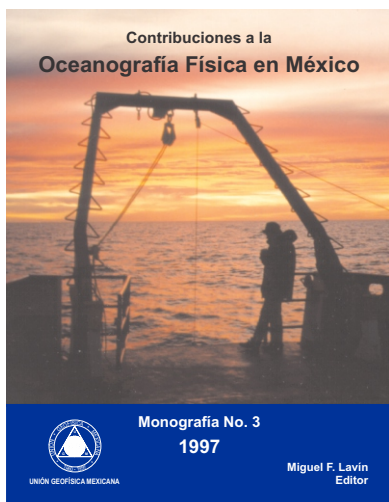
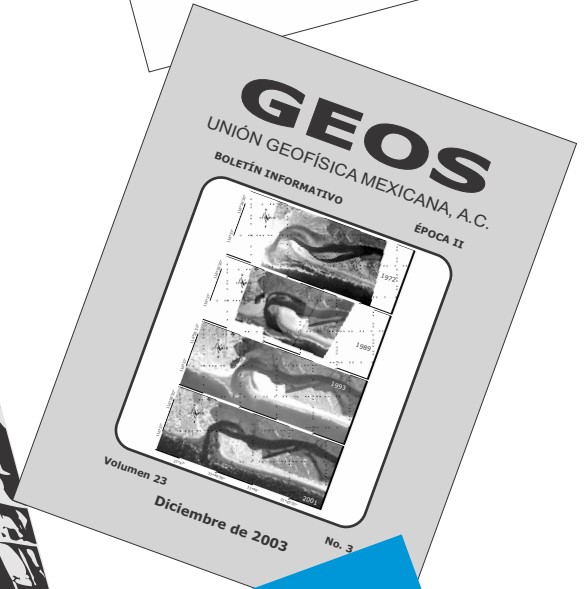
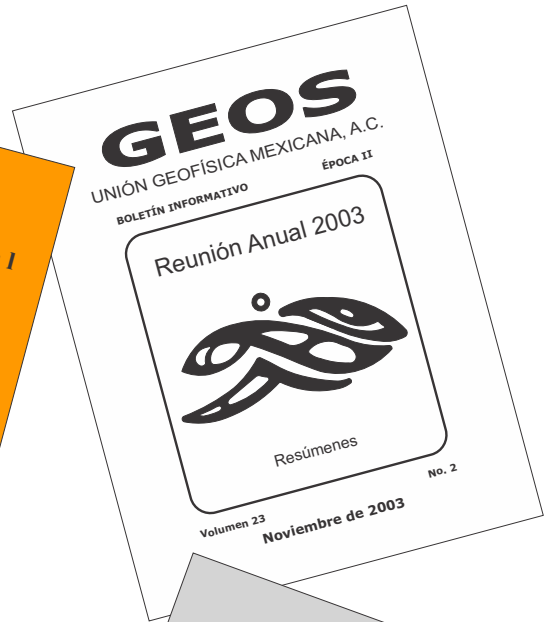
# GEOS

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.