

Sedimentos fosfatados en el Golfo de Tehuantepec.

E. A. Morales de la Garza y
A. Carranza-Edwards

Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Ciencias del Mar y Limnología, Laboratorio de Geología Marina.
Apartado Postal 70-305, 04510 México, D. F.

Morales de la Garza, E. A. y A. Carranza-Edwards, 1995. Sedimentos fosfatados en el Golfo de Tehuantepec. *Hidrobiológica* 5 (1-2): 25-36.

RESUMEN

Durante las campañas oceanográficas MIMAR III y MIMAR IV, efectuadas a bordo del B/D El Puma en mayo-junio de 1987 y marzo-abril de 1988, respectivamente, se recolectaron sedimentos superficiales del piso del Golfo de Tehuantepec, así como datos físico-químicos de la columna de agua y perfiles de ecosonda. Se discuten los rasgos fisiográficos del área a través de los perfiles de ecosonda, los cuales permitieron definir la Fractura de Tehuantepec. El principal componente mineralógico en los sedimentos fosfatados fue el colofano, el cual se encontró asociado con francolita, dahlita y glauconita. Los valores de pentóxido de fósforo son mayores a medida que aumentan los componentes biogénicos, en los cuales fue común observar reemplazamientos en las testas calcáreas de organismos. La génesis de estos sedimentos fosfatados, se relaciona directamente con la presencia de surgencias y con zonas de mínimo oxígeno disuelto.

Palabras clave: Fosforitas, Golfo de Tehuantepec, sedimentos.

ABSTRACT

Surficial sediments from the Gulf of Tehuantepec floor were collected on board of R/V El Puma, during oceanographic cruises MIMAR III and MIMAR IV on may-june 1987 and march-abril 1988, respectively. Physical and chemical data from water column, as well as echosounding profiles were taken. The Tehuantepec Fracture was discussed through physiographic features after echosounding analysis. Collophane was the main mineralogical component found in the bottom sediments. The collophane is associated with frankolite, dahallite and glauconite. When biogenic components increase, phosphorous pentoxide is enriched in total sediment sample, resulting a replacement in organic detritus. Phosphatic sediment genesis is directly related to upwelling existence as well as minimum dissolved oxygen zones.

Key words: Phosphorites, Gulf of Tehuantepec, sediments.

INTRODUCCIÓN

En los Estados Unidos, Japón, Sudáfrica, Australia e India, se extraen minerales de sus zonas costeras tanto en las porciones sumergidas como emergidas. Entre otros, se han explotado yacimientos de ilmenita, rutilo, casiterita, cromita, zircón, oro nativo, plata nativa, diamantes y fosforita. Esta última es de gran interés, toda vez que es importante en la producción agropecuaria, pues la fosforita es una

materia prima fundamental para la elaboración de fertilizantes.

El efecto de las surgencias no queda restringido a las capas superficiales de agua donde ocurren, ni a los seres vivos que ahí se encuentran, sino que además su efecto queda registrado en los sedimentos. De las características del agua superficial de las surgencias, dos de ellas, la baja temperatura y la alta productividad orgánica, son importan-

tes. Pueden reflejarse en los sedimentos y por lo tanto diferenciar aquellos que están debajo de masas de aguas surgentes y sedimentos de las mismas latitudes que no tienen influencia de las surgencias (Diester, 1978). Según Neshyba (1978) estas dos características se reflejan en los sedimentos, sólo si las masas de aguas surgentes influyen por períodos suficientemente largos. Los sedimentos superficiales reflejan un promedio de las condiciones hidrológicas de las últimas décadas o siglos. En ocasiones se pueden presentar factores que enmascaran la influencia de las surgencias, como son: 1) las corrientes que a veces pueden ser tan fuertes y que erosionan a los sedimentos del fondo, provocando que estas influencias desaparezcan y, 2) frentes de continuo hundimiento que provocan la disolución de algunos componentes biogénicos de los sedimentos, como son los esqueletos de organismos calcáreos (como los foraminíferos) y silíceos (como las diatomeas). Cuando el agua del fondo pierde oxígeno, o existe sulfuro de hidrógeno debido a un gran aporte de materia orgánica, la vida en el fondo es muy escasa y los sedimentos muestran capas poco perturbadas (Diester, 1978).

La formación de los depósitos de fosforitas es un indicador geoquímico de las surgencias, según se observa su distribución a lo largo de las márgenes occidentales continentales.

Goldberg y Parker (1960), durante una expedición realizada por el Instituto Scripps de Oceanografía, descubrieron un fragmento de madera fosfatizada a una profundidad de 410 m y de una edad de 28,000 años, además reportaron valores máximos de fósforo de 3 micromoles por litro. Fisher (1961) hace una descripción fisiográfica de la plataforma continental del Golfo de Tehuantepec en donde muestra una serie de elevaciones y depresiones a profundidades mayores a los 200 m.

La Secretaría de Marina (1978), realizó una serie de estudios sobre las características físicas, químicas, biológicas y geológicas del Golfo de Tehuantepec. Moulin (1979) analizó la productividad primaria de la región y Sánchez-Barreda (1981) describió la evolución geológica de la margen continental del Golfo de Tehuantepec, mediante estudios de geología superficial y del análisis de datos paleomagnéticos, gravimétricos y de reflexión sísmica.

Pedrazzini *et al.* (1982), efectuaron una evaluación geológica y geoquímica de la parte noroccidental del Golfo de Tehuantepec. Carranza-Edwards (1980), realizó un estudio en la porción costera del sur del Istmo de Tehuantepec, en donde determinó que los sedimentos de los ambientes fluviales, lagunar deltaico y playa de barrera,

presentan concentraciones altas de minerales pesados. Carranza-Edwards (1986) en un estudio de playas del Estado de Chiapas, determinó los diferentes ambientes y su potencial económico asociado con arenas negras de placer.

Carranza-Edwards *et al.* (1989) señalaron la existencia de una gran fractura en el piso del Golfo de Tehuantepec, así como de dos bancos ricos en P_2O_5 , a los que llamaron Banco Oaxaqueño y Banco Chiapaneco. La Gran Fractura es discutida por Morales de la Garza *et al.* (1988). Antes de la realización de las campañas oceanográficas MIMAR III y IV (Carranza, 1987 y 1988), no se tenía referencia alguna de los sedimentos fosfatados. Morales de la Garza (1990) hace un estudio detallado sobre la geomorfología y los sedimentos de la Plataforma del Golfo de Tehuantepec, siendo uno de los principales aportes que se tienen a la fecha.

El objetivo del presente trabajo es analizar las principales características físicas, químicas y biológicas de los sedimentos fosfatados, así como discutir los procesos más importantes que intervienen en la génesis y distribución de las fosforitas.

Como objetivos particulares se tienen los siguientes: 1) el determinar a detalle los principales rasgos fisiográficos y las posibles causas que los originaron, 2) analizar la naturaleza textural y la composición de los sedimentos superficiales, con la finalidad de interpretar los mecanismos que intervienen en su distribución y 3) contribuir al conocimiento de la génesis de los sedimentos fosfatados del Golfo de Tehuantepec.

ÁREA DE ESTUDIO

El Golfo de Tehuantepec se encuentra al sur del Istmo de Tehuantepec, y constituye una extensa entrada de la costa sureste del Pacífico Mexicano. Su ubicación geográfica esta delimitada por las siguientes coordenadas: 14° 10' y 16° 13' de Latitud Norte, 92° 15' y 95° 55' de Longitud Oeste (Fig.1). Su porción litoral comprende la zona costera del Estado de Chiapas y el extremo occidental del Estado de Oaxaca.

La región del Golfo de Tehuantepec se encuentra dentro de la zona tropical, con un clima húmedo y abundantes lluvias (Tamayo, 1991). En el verano está afectado por alteraciones atmosféricas tropicales que ocasionan lluvias abundantes a lo largo de la costa. En el invierno azotan fuertes vientos provenientes del norte denominados "Tehuantepecos" los cuales son originados por masas de aire continental polar que invaden el Golfo de México, siendo en ocasiones aún más fuertes que los mismos

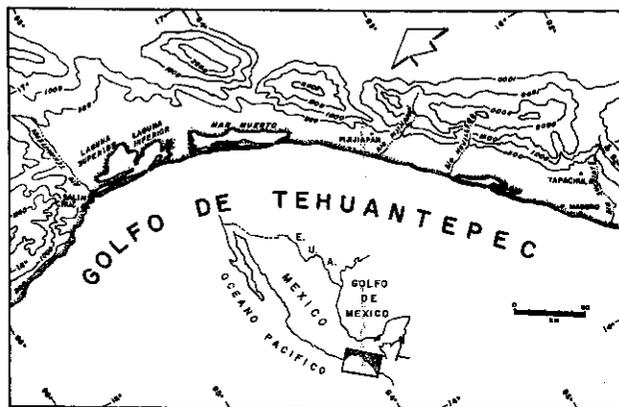


Figura 1. Localización del área de estudio.

"nortes" de éste golfo (Hurd, 1929 y Roden, 1961). Según Tamayo (1991) estos vientos llegan a alcanzar velocidades de hasta 12 m/seg como consecuencia de las diferencias barométricas entre el Golfo de México y el Golfo de Tehuantepec.

De acuerdo con Roden (1961), en la región de los fuertes vientos, la corriente se mueve hacia el sur con una velocidad media de 20 cm/seg. La circulación local del golfo se observa hacia el sur, hasta las latitudes de 12° o 13° N donde se localiza una de las corrientes oceánicas mayores, que es la Corriente Ecuatorial del norte. En el verano las corrientes presentan una dirección hacia el oeste y suroeste, con velocidades de unos 15 cm/seg.

Stumpf (1975) y Stumpf y Legeckis (1977) (en Legeckis, 1978), determinaron las surgencias en estas zonas a través de imágenes térmicas infrarrojas por medio de satélites y coinciden con lo descrito por Roden (1961); además indican que el incremento de las temperaturas superficiales dentro de la zona de surgencias hacia el sur, tienen valores de 5°C/km, originándose movimientos de remolinos hacia el oeste en la época de mayor velocidad del viento. Cuando estos vientos del norte cesan, las condiciones se estabilizan y las aguas dejan de ser transportadas hacia el sur.

De acuerdo con Tamayo (1991) y la Secretaría de Marina (1978), los ríos más importantes y caudalosos de la zona son los Ríos Tehuantepec, Juchitán, Chicapa, Ostuta, Huehuetán, Coatán, Cahuacán y el Suchiate; este último constituye parte del límite internacional entre México y Guatemala en sus 85 km finales.

Entre las lagunas presentes en el área, se encuentra la Laguna Superior e Inferior y la del Mar Muerto, siendo esta última la más extensa, con un área de 700 km². Las lagunas

Superior e Inferior se encuentran comunicadas por un estrecho paso, y sólo esta última está comunicada directamente al Golfo de Tehuantepec a través de la Barra de San Francisco.

El Golfo de Tehuantepec está situado al sur del Istmo de Tehuantepec, que constituye una importante interrupción de la Sierra Madre del Sur de México. Se encuentra bordeado por dos provincias fisiográficas, en la porción más occidental se encuentra la Sierra Madre del Sur (Tamayo, 1991) o Zona Montañosa de Guerrero-Oaxaca y en su mayoría por la Sierra de Chiapas (Alvarez, 1962).

MATERIALES Y MÉTODOS

Del 14 de mayo al 7 de junio de 1987, se realizó en el Golfo de Tehuantepec la campaña oceanográfica MIMAR III a bordo del B/O "EL PUMA". En ella se efectuaron 45 transectos, con un total de 244 estaciones (Fig. 2); se utilizó una draga tipo Smith McIntyre para la recolección de sedimentos superficiales a profundidades que oscilan entre 20 y 200 m, y se obtuvieron datos de pH, Eh y el análisis faunístico, además cada 5 transectos y a profundidades de 100, 150 y 200 m se tomaron muestras de agua de fondo, utilizando botellas tipo Niskin, donde se tomaron datos de temperatura, oxígeno disuelto (O₂), salinidad, pH y Eh.

Una segunda campaña (MIMAR IV) se realizó del 25 de marzo al 8 de abril de 1988 en el mismo buque y en la misma región, se realizaron un total de 124 estaciones de las cuales 34 correspondieron a muestreos de sedimentos superficiales (Fig. 2), cuyas profundidades varían entre 50 y 200 m. Además en varias de las estaciones se realizaron hidrocalas y muestreos de agua de fondo que permitieron establecer los valores de oxígeno disuelto en el área de estudio.

En ambas campañas oceanográficas se tuvo un registro continuo de ecosonda y posicionamiento por medio de satélite y radar para cada estación, y los datos obtenidos se usaron para el análisis geomorfológico del área estudiada.

Los análisis granulométricos, mineralógicos, químicos y petrográficos de los sedimentos se realizaron en los laboratorios de Sedimentología, Química Marina y de Microscopía Electrónica de Barrido del Instituto de Ciencias del Mar y Limnología de la UNAM.

El análisis granulométrico consistió en determinar el contenido de gravas, arenas y lodos (limos + arcillas), y la relación de estos tamaños para determinar su composición textural, de acuerdo con Folk (1969). La fracción gruesa (gravas y arenas) de todas las muestras, fue observada en

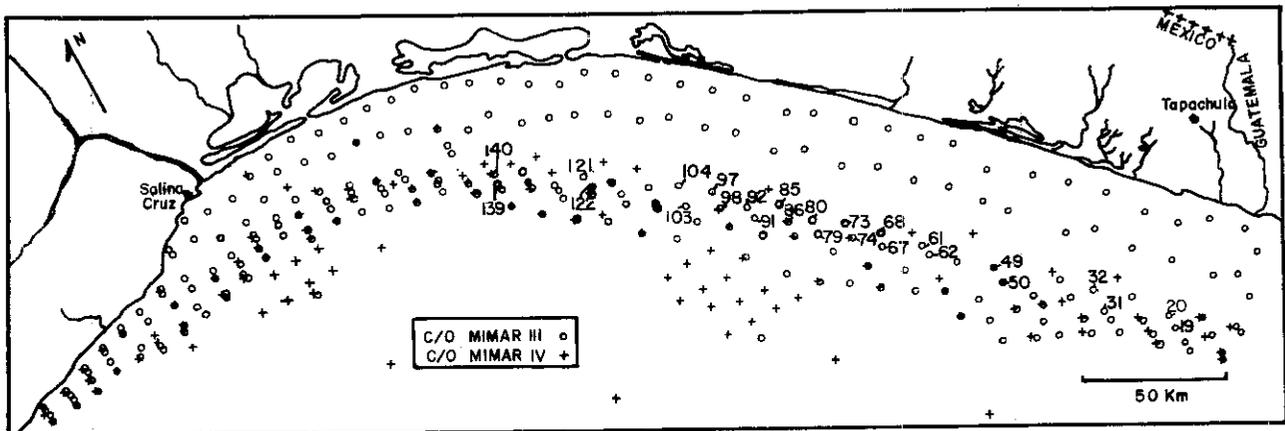


Figura 2. Ubicación de estaciones oceanográficas de las campañas MIMAR III y IV.

un microscopio binocular de 20 aumentos para su análisis composicional, estimándose el porcentaje de los principales constituyentes terrígenos, biogénicos, de reemplazamiento y/o autigénicos y otros. Además se procedió a la realización de láminas delgadas en muestras que presentaron altos porcentajes de fósforo, para observar sus propiedades ópticas y texturales mediante un microscopio petrográfico y electrónico de barrido.

Finalmente, el contenido de fósforo (P_2O_5) en las muestras de sedimentos se determinó por el método volumétrico (según la Association of Florida Phosphate Chemist., 1970; Voguel, 1983 en Ruíz-Ramírez, 1990). Este método se basa en la disolución ácida (HCl con HNO_3) de los fosfatos presentes en los sedimentos y en la reacción estequiométrica del molibdato de amonio y los fosfatos disueltos. La reacción produce un precipitado de fosfomolibdato de amonio del cual se cuantifica volumétricamente disolviéndolo con una fuerte base ($NaOH$) y titulando el exceso con un ácido fuerte (HCl). El contenido de fósforo total, se expresa como por ciento de P_2O_5 sobre base seca.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Geomorfología del Piso Oceánico del Golfo de Tehuantepec

De acuerdo con el plano batimétrico (Fig. 3) realizado con el posicionamiento de estaciones por medio de satélites, radar y registros continuos de ecosonda, quedan expresados los rasgos fisiográficos del piso oceánico del Golfo de Tehuantepec que han sido originados por la compleja geodinámica de la región.

En la porción oriental del Golfo de Tehuantepec se observa que la extensión de la plataforma continental es amplia, con un promedio de 45 km y con pendientes suaves que van de 0.3 grados a 1.5 grados (Fig. 4, secciones A-A' y B-B') a diferencia de la parte occidental, donde es muy estrecha (1 a 15 km de extensión, secciones C-C' y D-D') o incluso nula (sección E-E'), con pendientes de 1.0 grado en promedio. La región esta formada por un conjunto de bloques afallados, según datos sísmicos y gravimétricos de Fisher (1961); Hayes y Ewing (1970); Sánchez-Barreda (1981) y

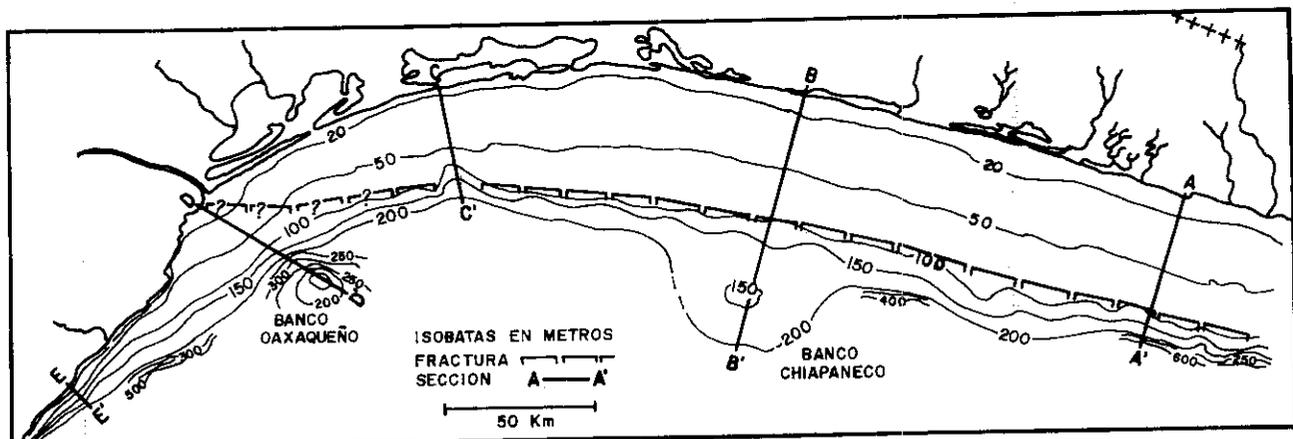


Figura 3. Batimetría del Golfo de Tehuantepec.

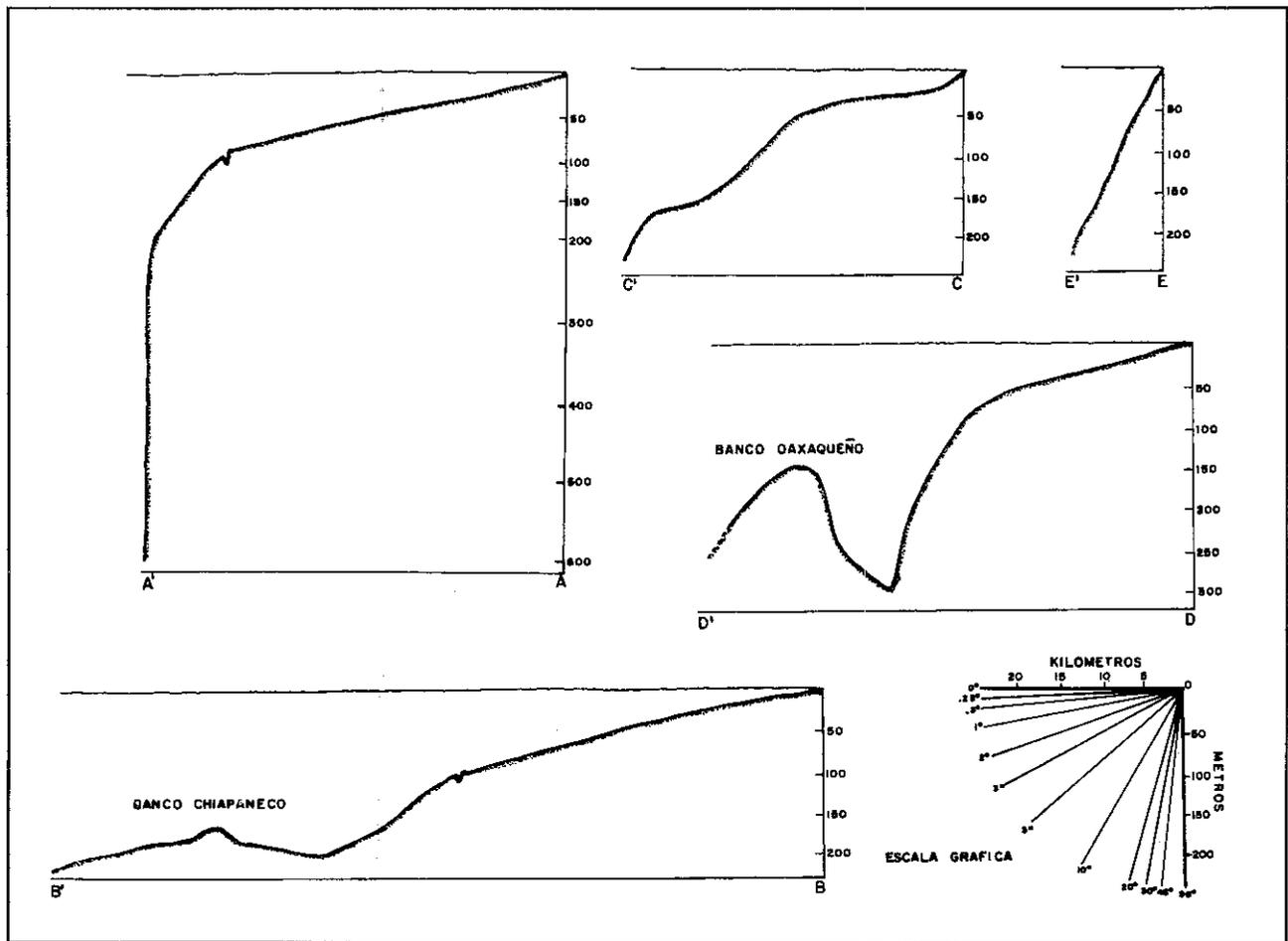


Figura 4. Perfiles batimétricos del Golfo de Tehuantepec.

Pedrazzini *et al.* (1982), entre otros. En los registros de los ecogramas obtenidos durante la campaña MIMAR III, este conjunto de bloques afallados está representado por fracturamientos localizados entre las isobatas de 80 a 100 metros (Figs. 3 y 5), los cuales conforman una gran fractura con un salto de 10 a 20 m, que corre casi paralela a la línea de costa y a otras fracturas de la parte continental, con una dirección NW-SE. Su extensión cartografiada es de aproximadamente 250 km y posiblemente se continúa hacia el Río Tehuantepec que presenta la misma dirección (Morales, *et al.*, 1989).

Esta fractura representa el límite inferior de la plataforma continental, en donde existen quiebres muy abruptos que oscilan desde 5 hasta más de 45 grados, formando paredes casi verticales. La fractura es sensiblemente perpendicular a la Dorsal de Tehuantepec y pudo haberse originado como resultado de la tectónica del sistema de fallas transformantes Motagua-Polochic, o debido a la subducción de la placa de Cocos en este sector, siendo principalmente un rasgo distensivo.

En los perfiles obtenidos de los ecogramas (Fig. 5) se observaron pequeños promontorios de unos 10 a 15 m de altura que se asocian con dicha fractura, más comunmente en la parte superior que en la inferior. Estos promontorios son colonias de hexacorarios que se desarrollan sobre un sustrato duro (areniscas bien cementadas por CaCO_3) que fue expuesto posiblemente cuando se originó la fractura, el cual constituye una base apropiada para un crecimiento arrecifal.

Otros rasgos importantes por su contenido y distribución de fosforitas en el Golfo de Tehuantepec, son dos bancos denominados por Carranza-Edwards *et al.* (1989) "Banco Chiapaneco" y "Banco Oaxaqueño". El banco Chiapaneco se ubica 65 km al suroeste de Majahua, Chiapas y el Banco Oaxaqueño se encuentra a 40 km al sur de Salina Cruz, Oaxaca. El primero abarca un área de aproximadamente 1,200 km² y se encuentra en profundidades que oscilan entre 160 y 200 m; presenta flancos de pendientes suaves; el segundo es más pequeño ocupando un área de 350 km cuadrados aproximadamente y presenta flancos de

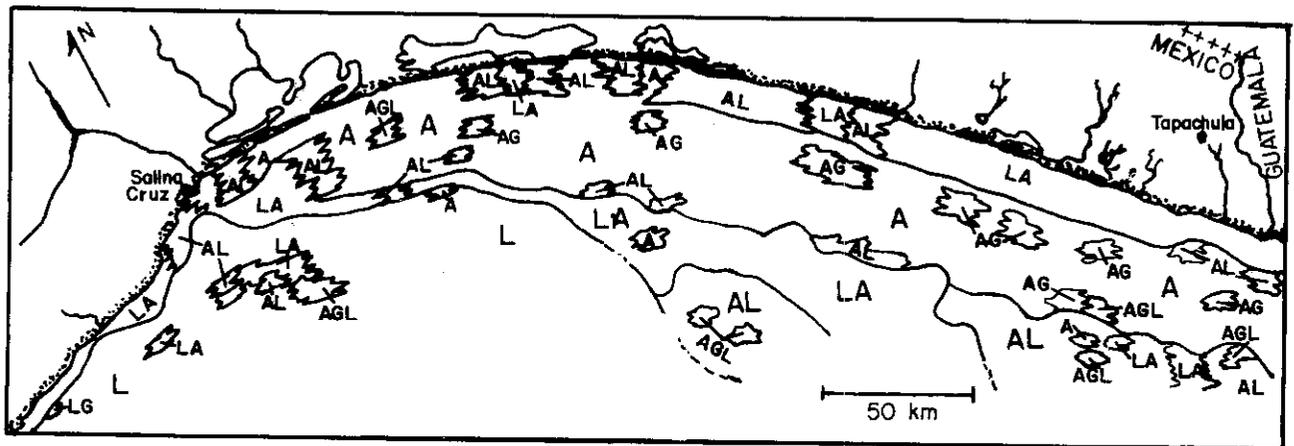


Figura 7. Distribución de los diferentes tipos de sedimentos superficiales del Golfo de Tehuantepec. Abreviaturas: A, arena; AG, arena con grava; AGL, arena con grava lodosa; AL, arena lodosa; L, lodo; LA, lodo arenosa; LG, lodo con grava.

en la gradación de las franjas adyacentes o contiguas. Es importante mencionar que la franja de arena no es continua hacia la porción occidental, pues la plataforma continental es muy estrecha o prácticamente nula; además se tienen fuertes pendientes y escasos sistemas fluviales que aporten arena.

Es común que los sedimentos que se depositan en las plataformas continentales sean más gruesos hacia la línea de costa, donde la alta energía del oleaje remueve los sedimentos finos. Normalmente se presenta entonces una gradación de sedimentos gruesos en aguas someras a sedimentos finos en aguas profundas.

En el Golfo de Tehuantepec, en su parte oriental y central, se presenta una franja de lodos arenosos y arenas lodosas hasta una profundidad de 30 m. Estas variaciones en la distribución normal de los sedimentos, pueden deberse a variaciones estacionales y a las épocas del muestreo. La influencia que ejercen los sistemas lagunares y fluviales en distintas épocas, a lo largo de uno o varios años, es determinante para la distribución de los sedimentos. Los sistemas lagunares son importantes receptores de materiales finos, que eventualmente serán transportados hacia la plataforma y pueden ser aportados en épocas de lluvias con alta energía del oleaje (invierno), provocando que las barras se abran y dejen paso libre a la depositación de estos materiales hacia la plataforma.

En la región donde se ubica el Banco Chiapaneco, se encuentran arenas lodosas con dos manchones de arena con grava, mientras que en el Banco Oaxaqueño está constituido por un conjunto de pequeñas zonas de arena lodosa, lodo arenoso y arenas con grava lodosa (Fig. 7). En ambos casos las fracciones gruesas están compuestas

casi en su totalidad por testas de foraminíferos y otros restos de organismos marinos, lo que indica una alta productividad en ambas zonas.

Análisis Composicional

La determinación de los principales constituyentes mineralógicos y orgánicos se realizó únicamente en las fracciones gruesas de los sedimentos. Se agruparon dentro de los terrígenos a los siguientes: cuarzos, feldspatos, fragmentos de rocas, micas, materia vegetal o leñosa y otros (magnetita, ilmenita, zircón, olivino, etc.). Estos constituyentes se determinaron en un microscopio binocular, siguiendo el procedimiento de estimación visual de porcentajes sugerido por Terry y Chilingar (1955). La determinación de los minerales fosfatados, por ser en su mayoría constituyentes de reemplazamiento biogénico, no fue estimativa sino cuantitativa (Ruíz-Ramírez, E., 1990), por medio de análisis químicos. Finalmente se analizaron los componentes de origen biogénico, que comprenden testas de foraminíferos, restos de bivalvos, gasterópodos, vertebras de peces, etc.

Como se observó en los análisis, el cuarzo y los restos de organismos marinos son los componentes más abundantes en las fracciones de arena de los sedimentos, ambos guardan una relación inversamente proporcional con respecto a la profundidad. El cuarzo es abundante hasta profundidades de 70 a 90 m y disminuye a profundidades mayores. En cambio, los biogénos aumentan considerablemente (principalmente foraminíferos); esta relación posiblemente depende de las variaciones e influencias que ejercen los ríos, corrientes superficiales y de fondo, a la

amplitud de la plataforma y a la alta productividad orgánica que se manifiesta en la región.

La presencia de feldespatos está directamente relacionada con la descarga de grandes ríos, como el Suchiate y Tehuantepec. En profundidades menores de 70 m predominan las arenas y las arenas lodosas; los valores más altos no sobrepasan del 10%, debido a que contienen minerales poco estables y resistentes a las acciones del intemperismo y del transporte.

Los fragmentos de roca se restringen principalmente a los sedimentos arenosos en profundidades menores que 100 m, que se ubican frente a la región del Suchiate-Barra de Zacapalco, provenientes de rocas metamórficas (gneises y esquistos) intrusivas y volcánicas. En la parte occidental del área la presencia de los fragmentos de rocas es muy escasa o nula, debido a la acción erosiva del oleaje.

En la gran mayoría de las muestras analizadas se observaron dos tipos de micas, la biotita, que es la más abundante y la muscovita. Debido a su forma laminar, las micas son fácilmente transportadas en suspensión y están ampliamente distribuidas; a pesar de su baja dureza y su crucero bien desarrollado difícilmente se redondean y fracturan.

La materia vegetal o leñosa que se encuentra en el área de estudio está constituida por fragmentos fibrosos, tales como tallos y hojas vegetales, que frecuentemente se encuentran en estados de carbonización. Se distribuyen principalmente en la parte occidental del golfo, desde la desembocadura del Río Tehuantepec hasta la Barra de

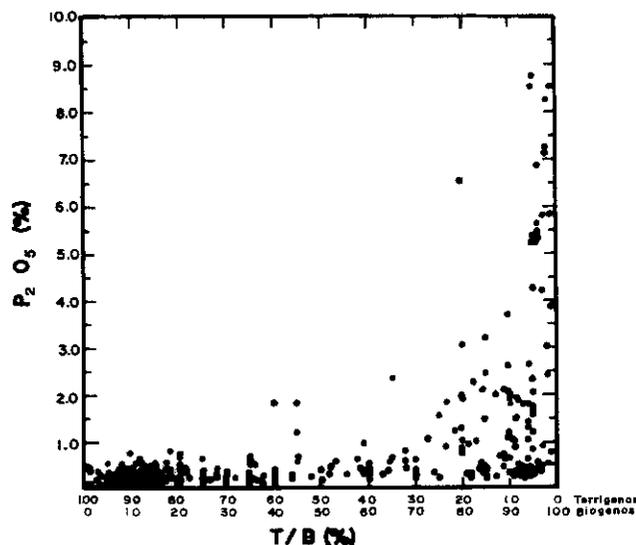


Figura 8. Relación porcentual terrígenos/biógenos y contenido de P_2O_5 en sedimentos del Golfo de Tehuantepec.

Ayutla, con valores menores al 5%. Su presencia se relaciona con profundidades generalmente mayores que 90 m, lo que hace suponer condiciones reductoras para su preservación.

Los biogénicos están representados por conchas de moluscos (gasterópodos y bivalvos) en la fracción de gravas (mayores que 2 mm), principalmente cuando forman los parches de arenas con gravas y que se localizan entre los 30 y 90 m de profundidad. Los foraminíferos son el principal componente biogénico, pues constituye hasta el 99% de la fracción de arena en profundidades mayores de 100 m, como es el caso de los Bancos Chiapaneco y Oaxaqueño. Algunos biogénos se encuentran parcial o totalmente reemplazados por P_2O_5 , principalmente foraminíferos, tanto planctónicos como bentónicos, que en ocasiones se encuentran aglutinados y cementados también por minerales fosfáticos.

Sedimentos Fosfatados

Uno de los recursos marinos no renovables que se encontraron en el Golfo de Tehuantepec, por su interés científico y económico, lo constituyen los sedimentos fosfatados (fluorapatitas carbonatadas).

En los sedimentos recolectados del Golfo de Tehuantepec se encontraron concentraciones importantes de P_2O_5 . Cressman y Swanson (1964) consideran que los sedimentos marinos tienen una concentración promedio de 0.2% de P_2O_5 ; cuando ésta es mayor que 0.6% denominan al sedimento sedimento fosfatado. En la figura 8 se observa la relación de P_2O_5 con la composición del sedimento referente a su origen. Cuando el sedimento es más terrígeno (70T/30B) se tienen concentraciones normales de fosfatos que generalmente no sobrepasan el 0.6% de P_2O_5 . A partir de la relación 60T/40B se encontraron concentraciones mayores que 1.0%. Las concentraciones de mayor interés se presentan a partir de la relación 20T/80B (sedimento netamente biogénico) llegándose a tener concentraciones hasta de 8.75% de P_2O_5 , lo cual constituye una evidencia de la gran productividad orgánica de la región. En la distribución de las concentraciones de fosfatos en los sedimentos se observa que a profundidades menores que 100 m se presentan valores que oscilan entre 0.04 y 0.5%, los cuales se consideran como normales; pero a partir de los 100 m de profundidad existen valores mayores que 1.0% de P_2O_5 (Fig. 9).

Las máximas concentraciones de P_2O_5 se encontraron en dos bancos: el Banco Oaxaqueño, con valores que van desde 2.0 hasta 5.45% y el Banco Chiapaneco, de mayor extensión y con valores que oscilan entre 2.0 y 8.75%. Así, dichas regiones son las más importantes por su potencialidad

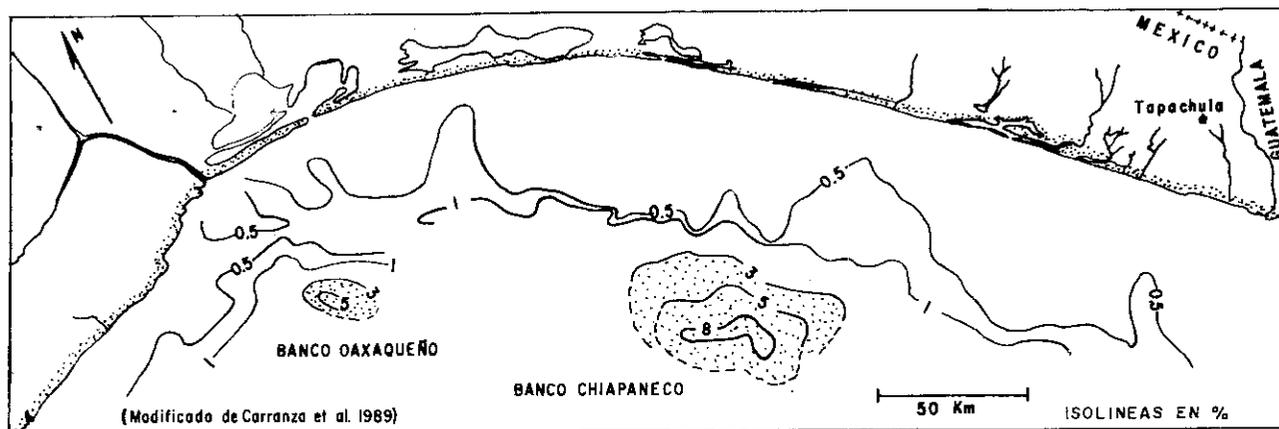


Figura 9. Distribución de las concentraciones de P_2O_5 en los sedimentos del Golfo de Tehuantepec (modificado de Carranza-Edwards, *et al.*, 1989).

de este recurso mineral. Entre estos dos bancos existen también valores de hasta 6.12% de fosfatos (Carranza-Edwards, 1989).

Estas altas concentraciones de fosfatos están estrechamente asociadas con las corrientes de surgencias que se originan durante el invierno por los fuertes vientos conocidos como los "Tehuantepecos", dando lugar a una alta productividad orgánica. En la composición del sedimento en dichas regiones, se llega a tener hasta el 95% de biogénos en la fracción gruesa, observándose un reemplazamiento diagénético, parcial o total, de fosfatos (Fig. 10).

De los parámetros analizados en el área de estudio, el oxígeno disuelto en el medio, la concentración de los iones de hidrógeno (pH), y la habilidad del ambiente para reducir u oxidar un elemento o causar un cambio en su estado de oxidación o reducción (Eh) son importantes para la formación de depósitos de fosfatos. Estos parámetros juegan un papel determinante en la precipitación directa y en los reemplazamientos de fosfatos en la región.

Los análisis de oxígeno disuelto (Carranza-Edwards, 1988) mostraron que entre la superficie y los 50 m de profundidad las concentraciones oscilaron entre 5.03 ml/l y 1.5 ml/l; a profundidades de 75 a 100 m los valores fueron menores o iguales a 0.5 ml/l y a profundidades mayores de 100 m los valores son de 0.4 ml/l y llegan incluso a cero. Estos últimos valores se mantienen hasta los 500 m de profundidad. Generalmente el contenido de oxígeno disuelto en la época de muestreo (marzo-abril, 1988) está cerca de la saturación en las aguas superficiales y disminuye al incrementarse la profundidad hasta un valor menor o igual que 0.05 ml/l entre 75 y 200 m. Las concentraciones de oxígeno en las aguas de fondo manifiestan una disminución

gradual al alejarse de la línea de costa, teniéndose valores que oscilan entre 0.8 y 0.00 ml/l. Entre los Bancos Oaxaqueño y Chiapaneco se observa un empobrecimiento de oxígeno, el cual llega a ser menor que 0.05 ml/l. Esta deficiencia de oxígeno es el resultado de la oxidación de una gran cantidad de materia orgánica contenida en los sedimentos del área. De acuerdo con el patrón de distribución se detectó una zona de oxígeno mínimo que se caracteriza por tener menos que 0.05 ml/l de O_2 disuelto, que se extiende desde los 75 m a más de 500 m de profundidad.

Aunque la mayoría de las reacciones de óxido-reducción (Eh) son químico-inorgánicas, en el Golfo de Tehuantepec, donde se tienen valores de Eh que oscilan entre -31.0 y 270.7, las reacciones biológicas tienen una función importante, dada la alta productividad orgánica y los procesos de reemplazamiento diagénéticos que se llevan a cabo en el medio donde se originan los depósitos de sedimentos fosfatados.

Mediante un análisis petrográfico y las observaciones con el microscopio electrónico de barrido se determinó que la asociación de la apatita con testas de foraminíferos, con pequeños nódulos (de 0.3 a 2.0 mm) y con otros organismos como micromoluscos, pterópodos, etc., exhibe varios grados de reemplazamiento, observándose claramente su relación carbonatos-fosfatos y la paragénesis glauconita-apatita (Fig. 11), indicando probablemente un desarrollo final que se presenta dentro de pequeñas grietas o formando una matriz glauconítica que rellena internamente las testas individuales de los foraminíferos.

Un mecanismo propuesto por D'Anglejan (1968) para el reemplazamiento de $CaCO_3$ por fosfato se expresa con la siguiente ecuación:

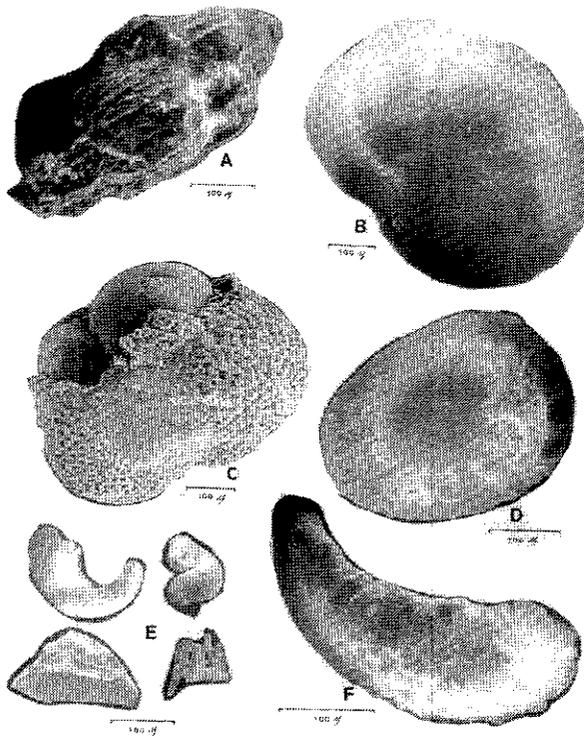
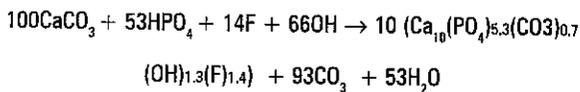


Figura 10. Diferentes componentes biogénicos reemplazados por P_2O_5 , contenidos en los sedimentos del Golfo de Tehuantepec. A. Foraminífero bentónico (*Uvigerina*) reemplazado (x 200). B. Foraminífero bentónico (*Hanzawaia*) reemplazado (x 150). C. Foraminífero planctónico (*Globigerinoides*) parcialmente reemplazado, observándose parte de la testa de $CaCO_3$ (x 150). D. Foraminífero bentónico (?) reemplazado (x 220). E. Micromoluscos (parte superior, diente de tiburón (inferior izquierda) y vértebra de pez (inferior derecha), totalmente reemplazados (x 200). F. Pterópodo totalmente reemplazado (x 300).



donde se expresa la formación de fluorapatita-carbonatada por la reacción de calcita con el fosfato disuelto en el piso marino. Este mecanismo puede ajustarse a lo que está sucediendo en el Golfo de Tehuantepec, ya que la ecuación también manifiesta un ambiente alcalino, que según datos químicos para el área de estudio presentan esta tendencia.

En secciones delgadas de muestras de los dos bancos (Fig. 11), se observó que el componente principal del fosfato es el colofano (variedad apatita), que se encuentra en estructuras oolíticas, masivas, colofórmicas y orgánicas de foraminíferos, micromoluscos, fragmentos de braquiópodos, etc. El colofano es un carbonofosfato amorfo de calcio, que se considera generalmente un mineraloide

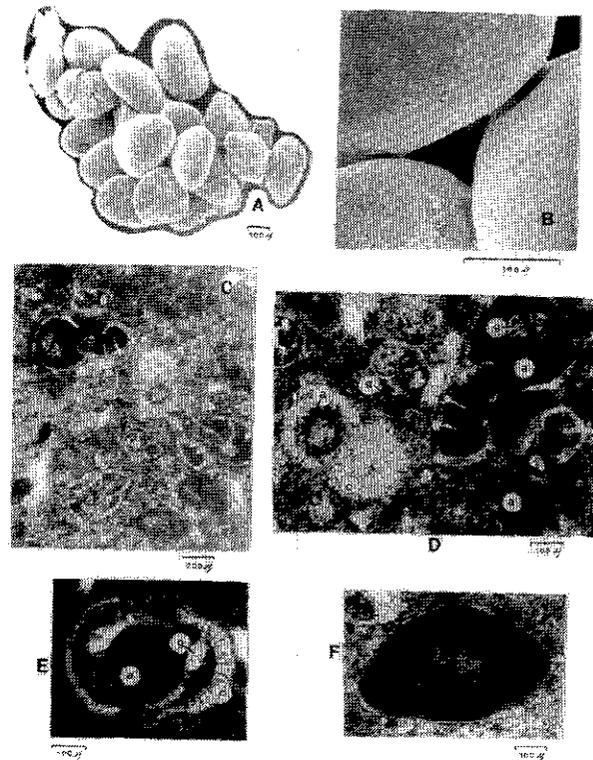


Figura 11. Análisis petrográfico de nódulos de P_2O_5 , en sedimentos del Golfo de Tehuantepec. A. Aglutinamiento de las partículas que componen a los sedimentos, para cementarse y formar los pequeños nódulos de P_2O_5 (x 72). B. Detalle del contacto y forma de cementarse de las partículas para formar un nódulo (x 300). C. Sección en una lámina delgada, de un nódulo, observándose las características generales de los reemplazamientos de P_2O_5 (x 5). D. Asociaciones de carbonatos (c)-apatita (a) y glauconita (g)-apatita en los nódulos de P_2O_5 (x 10). E. Detalle de una estructura de un foraminífero que presenta un "núcleo" de glauconita-apatita (x 10). F. Estructura oolítica de P_2O_5 en los nódulos fosfáticos (x 10).

por ser una forma amorfa de apatita; generalmente se le observó de color pardo oscuro y pardo amarillento. Con el colofano se asocia la francolita y la dahllita, que son minerales secundarios que se han formado probablemente por una recristalización gradual del colofano y por la migración de parte del fosfato de calcio (Kerr, 1965), éstas se presentan con estructuras bandeadas subradiales y en esferulitas con un color más pálido que el colofano. Otra asociación común con los minerales anteriores, es la glauconita (Fig. 11), que puede ser un producto de los cambios diagénéticos de la sedimentación intersticial, alteración de la biotita detrítica o bien que se origine por introducir hierro a un mineral arcilloso del ambiente marino. Puede aparecer como agregado de diminutos cristales, formando "núcleos" de color verde, verde-amarillo o verde olivo en los reemplazamientos de foraminíferos.

La presencia de los sedimentos fosfatados en los bancos Oaxaqueño y Chiapaneco del Golfo de Tehuantepec abre nuevas perspectivas hacia un interés económico para la región, dado que en la actualidad el fósforo es el elemento principal en la elaboración de compuestos químicos, en la industria de la seda, levaduras, cerámicas, bebidas, vidrio, cerillos, fotografías y medicamentos, entre otros. En el desarrollo agropecuario, los fosfatos constituyen una materia prima básica para la elaboración de fertilizantes, que son importantes, dada la gran demanda de alimentos a nivel mundial, derivados de la sobrepoblación del planeta.

CONCLUSIONES

Los sedimentos fosfatados del Golfo de Tehuantepec se encuentran favorecidos por surgencias de aguas del fondo que provocan una alta productividad orgánica. Esta contribuye a la sustitución de carbonato de calcio por apatita calcárea pseudomórfica en restos biogénicos.

La compleja dinámica tectónica de la región ha producido rasgos morfológicos extensivos que al correlacionarse definen la gran Fractura de Tehuantepec, ubicada entre profundidades de 80 a 100 m.

La surgencia se refleja en el empobrecimiento de oxígeno observado en aguas de fondo entre los dos bancos ricos de P_2O_5 , conocidos como Banco Oaxaqueño y Banco Chiapaneco.

El componente principal del fosfato en los sedimentos (variedad apatita) es el colofano, en estructuras oolíticas, masivas, colofórmicas y en estructuras orgánicas de foraminíferos, bivalvos, gasterópodos, etc. Asociadas al colofano se encuentran la francolita y la dahllita, formadas probablemente por una recristalización gradual del colofano y una migración del fosfato de calcio. También fue común observar glauconita como "nucleos" en los reemplazamientos fosfáticos o agregados de pequeños cristales.

Estos sedimentos exhiben varios grados de reemplazamiento diagenético, donde se observa la asociación carbonato-fosfato y apatita-glauconita; esta última, probablemente indica el final del desarrollo de las fosforitas.

AGRADECIMIENTOS

Se agradece a las autoridades del Instituto de Ciencias del Mar y Limnología el apoyo brindado durante las campañas MIMAR y al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología el apoyo financiero otorgado a través del Proyecto UNAM-

CONACYT clave P221CCON880148, el cual fue fundamental para la realización de las campañas oceanográficas MIMAR IV y MIMAR V así como para el desarrollo del proyecto. A Susana Santiago-Pérez y Ernesto Ruíz Ramírez, se les agradece su apoyo con análisis químicos, y a Patricia Frías G. por las tomas de fotomicrografías en el Microscopio Electrónico de Barrido. A la tripulación y al personal científico que participó en las campañas oceanográficas MIMAR III, MIMAR IV y MIMAR V, se les agradece también por su estimulante apoyo.

LITERATURA CITADA

- A.F.P.CH., 1970. *Methods used and adopted by the Association of Florida Phosphate Chemist*. Fifth Edition, pp. 74-77.
- ALVAREZ, JR. M., 1962. Provincias Fisiográficas de la República Mexicana. *Bol. Soc. Geol. Mex.*, 20p. 1 map.
- CARRANZA-EDWARDS, A. 1980. Ambientes Sedimentarios Recientes de las Llanuras Costera Sur del Istmo de Tehuantepec., *An. Centro de Cienc. del Mar y Limnol., UNAM.* v.7(2):13-66.
- CARRANZA-EDWARDS, A., 1986. Estudio Sedimentológico de las Playas de Chiapas, México. *An. Inst. de Cienc. del Mar y Limnol., UNAM.* v.13(1): 331-334.
- CARRANZA-EDWARDS, A., 1987. Informe Técnico de la Campaña Oceanográfica MIMAR III. *Inst. Cienc. del Mar y Limnol., UNAM.* México, Informe Inédito.
- CARRANZA-EDWARDS, A., 1988. Informe Técnico de la Campaña Oceanográfica MIMAR IV. *Inst. Cienc. del Mar y Limnol., UNAM,* México, Informe Inédito.
- CARRANZA-EDWARDS, A., 1989. Segundo Informe del Proyecto Investigaciones Geológicas y Químicas de Recursos Minerales Marinos Mexicanos, clave CONACYT: P221CCON88014B, 42p. Inédito.
- CARRANZA-EDWARDS, A.A., L. ROSALES-HOZ, E. RUIZ-RAMÍREZ y S. SANTIAGO-PÉREZ, 1989. Investigations of phosphorites deposits in the Gulf of Tehuantepec, Mexico. *Marine Mining*, 8:317-323.
- CRESSMAN, E. R. y R.W. SWANSON, 1964. Stratigraphy and Petrology of the Permian rocks of SW-Montana, U.S.G.S., *Prof. Pap.* 313 C: 275-569.
- D'ANGLEJAN, B. F., 1968. Phosphate diagenesis of carbonate sediments as a mode of in situ formation of marine phosphorites: observations in a core from the eastern Pacific. *Can. J. Earth Sci.* v.5, 81-87.
- DIESTER, H. L., 1978. Sediments as Indicators of Upwelling. *In: Upwelling Ecosystems*. BOJE, R. and M. TOMCKSACK (Eds.). Springer-Verlag, Germany., p. 261-281.

- FISHER, R. L., 1961. Middle America Trench: Topography and Structure. *Geol. Soc. Am. Bull.*, v.72: 703-720.
- FOLK, R. L., 1969. Petrología de Rocas Sedimentarias. Trad. por Schlaepfer C. y Schmitter R. M., Inst. Geol., UNAM, 405 p.
- GOLDBERG, E. D. y R.H. PARKER, 1960. Phosphatized wood from the Pacific sea floor. *Geol. Soc. Amer. Bull.*, v.71: 631-632.
- HAYES, D. E. y M. EWING, 1970. Pacific Boundary Structure (July 1968). *THE SEA*, v.4 (I y II): 29-57.
- HURD, W. E., 1929. Northers of the Gulf of Tehuantepec. *Monthly Waether Rev.* v.57(5).
- KERR, P. F., 1965. *Mineralogía Optica* (3ª Ed.), McGraw-Hill Book Company, Inc., Ed. Castilla, S.A. Madrid, España, 433 p.
- LEGECKIS, R., 1978. A Survey of Worldwide Sea Surface Temperature Fronts Detected by Environmental Satellites. *Jour. of Geophysical Research.* v.83, No.C9, p.4501-4522.
- LUGO-HUBP, J., 1989. *Diccionario Geomorfológico*. U.N.A.M., Inst. de Geografía. págs. 26 y 171.
- MORALES DE LA GARZA, E. A., A.Z. MÁRQUEZ-GARCÍA, A. CARRANZA-EDWARDS y J.E. AGUAYO-CAMARGO, 1988. Descubrimiento de una Gran Fractura en el Golfo de Tehuantepec, México. En: *Resúmenes de la X Conv. Nal. de la Soc. Geol. Mex.*
- MORALES DE LA GARZA, E. A., 1990. Estudio de Sedimentos Fosfatados en el Golfo de Tehuantepec, México, Tesis de Maestría (Ocean. Geológica). UACPyP-CCH, UNAM, 113 p.
- MOULIN, J., 1979. Estudio de la Productividad Primaria del Golfo de Tehuantepec, México. Tesis Prof. Fac. de Ciencias UNAM, 31 p.
- NESHYBA, S., 1978. *Oceanography*. John Wiley & Sons, U.S.A., p.177-179.
- PEDRAZZINI, C., N. HOLGUIN y R. MORENO, 1982. Evaluación Geológico-Geoquímica de la Parte Noroccidental del Golfo de Tehuantepec. *Rev. del Inst. Mex. del Petróleo*, Vol.XIV, 4:6-26.
- RODEN, G. L., 1961. Sobre la Circulación Producida por el Viento en el Golfo de Tehuantepec y sus Efectos sobre la Temperatura Superficial. *Geof. Int.*, 1(3): 55-76.
- RUÍZ-RAMÍREZ, E., Análisis Químico en Sedimentos Marinos para Análisis y Distribución de Fosforitas en la Plataforma Continental del Golfo de Tehuantepec. Tesis Profesional. Fac. Química, UNAM.
- SÁNCHEZ-BARREDA, L. A., 1981. Geologic Evolution of the Continental Margin of the Gulf of Tehuantepec in Southeastern Mexico: Ph. D. Dissertation, Univ. of Texas at Austin, 191 p.
- SECRETARÍA DE MARINA, DIRECCIÓN GENERAL DE OCEANOGRAFÍA, 1978. Estudio Oceanográfico del Golfo de Tehuantepec. Tomos I-III (Biología; Física y Química; Geología). *Inv. Ocean/Tehu.*
- SHEPARD, F. P. y K.O. EMERY, 1941. Submarine Topography off the California Coast: Canyons and Tectonic Interpretations, *Geol. Soc. Am. Spec. Paper.* 31, 171 p.
- STUMPF, H. P., 1975. Satellite detection of upwelling in the Gulf of Tehuantepec, Mexico. *Journal of Physical Oceanography.* v.(5): 383-388.
- STUMPF, H. P. y R.V. LEGECKIS, 1977. Satellite observations of mesoscale eddy dynamics in the eastern tropical Pacific Ocean. *Jour. Phys. Oceanogr.*, v.7(5): 648-658.
- TAMAYO, J. L., 1991. *Geografía Moderna de México*. Ed. Trillas, México. 400 p.
- TERRY, R. D. y G.V. CHILINGAR, 1955. Summary of "Concerning some additional aids in studying sedimentary formations," by M. S. Shvetsov: *Jour. Sed. Petrology*, v.25, p.229-234.
- VOGUEL, A. I., 1983. *Química Analítica Cualitativa*. Kapelusz, Argentina. pp. 136-138.

Recibido: 16 de agosto de 1994.

Aceptado: 31 de enero de 1995.