

VII.- SEDIMENTOLOGIA, AMBIENTE Y MODELO SEDIMENTARIO DE LAS SECUENCIAS ESTRATIGRAFICAS.

La sedimentología estudia la composición y génesis de los sedimentos y de las rocas sedimentarias, tratando de entender las causas y efectos que influyen en su depósito. Incluye la petrología sedimentaria que se interesa en la naturaleza e interrelaciones de las partículas constituyentes (Reading, 1978).

El lugar de depósito o ambiente de depósito de los sedimentos está caracterizado por un juego único de condiciones físicas, químicas y biológicas que operan con una tasa e intensidad específicas suficientes para imprimir su firma en el sedimento. Tales condiciones varían de lugar a lugar, dando como resultado subambientes (Reineck y Singh, 1980). La suma de todas las características primarias de una unidad sedimentaria definen a una facies. Los modelos sedimentológicos son herramientas de trabajo que sirven para caracterizar en un primer paso un ambiente, en base a cierta asociación de estructuras sedimentarias y litofacies. Muchas variaciones en el depósito de ambientes similares son posibles (Reineck y Singh, 1980).

El estudio de sedimentos carbonatados recientes y rocas carbonatadas antiguas muestran que se tiene un grupo de componentes principales que son: aloquemias, lodo o micrita, cemento y granos terrígenos; comúnmente su presencia y relación varía de acuerdo al subambiente. Los aloquemias (Folk, 1959) pueden distinguirse como esqueletales o biogénicas que incluyen a todas las partículas fósiles y no-esqueletales o no-biogénicas que incluyen a los ooides, granos agregados, litoclastos y peloides. Algunas partículas como los ooides y peloides pueden resultar de la interacción de organismos (Flügel, 1982).

Las partículas esqueletales o fósiles tienen un importante significado sedimentológico y diagenético como se verá en otro capítulo. Básicamente su interacción con la sedimentación es su acción como perforadores, bioturbadores, formadores y armazón esquelético, acumulaciones de partes duras (conchas o esqueletos) atrapadores de sedimentos, agentes cementantes o incrustantes.

Los ooides con forma oval o esférica y un núcleo con una o más envolturas laminares formadas por cristales aragoníticos principalmente orientados tangencial o radialmente. Sedimentológicamente se restringen a áreas marinas normales o hipersalinas tropicales y subtropicales, generalmente son de agua somera con alta energía de mareas y olas, en profundidades de <2 hasta 15 m. Los ooides con pocas láminas ocurren preferencialmente en ambientes de baja energía (Flügel op. cit.). Los ooides podrían incluirse dentro de la categoría de los cortoides o granos envueltos (Tucker y Wright, 1990).

Los granos agregados se caracterizan por la unión de dos o más partículas fuertemente unidas por matriz micrítica o cemento, son aragoníticas y sedimentológicamente se restringen a áreas de agua somera con flujos lentos de corrientes y baja energía de las olas (Flügel op. cit.).

Los litoclastos son fragmentos calcáreos delimitados abruptamente, incluye a los intraclastos y exoclastos. Pueden ser aragoníticos, calcíticos o de calcita magnésica.

Sedimentológicamente ocupan áreas relativamente cercanas a fuentes de aporte subaéreo o submarino.

Los peloides incluyen una amplia serie de subcategorías, se caracterizan por ser partículas subarredondadas, sin ninguna estructura interna. Dominan en la zona de submarea y de intermarea inferior (Flugel op. cit.).

La micrita comprende la calcita microcristalina de -4 um. de tamaño que constituye la parte de la roca en la cual todas las partículas están embebidas (Folk, 1959). Se le atribuyen varios orígenes producidos por la actividad puramente química, física y biológica o una combinación entre cualquiera de ellas (Flugel op. cit.).

El cemento constituye el material precipitado químicamente que rellena los espacios porosos entre o dentro de las partículas. Puede tener diferente composición. Los cementos de carbonatos y sus diferentes formas, texturas y composición depende del ambiente diagenético en que se formen (Longman, 1981).

La mayoría, aunque no todos los carbonatos requieren para su depósito de un ambiente marino especial; el de agua clara, caliente y somera. Esto ocurre en latitudes tropicales principalmente y subtropicales (Wilson, 1975). Dentro de este marco general de agentes físicos y químicos, todas las tasas de sedimentación dependen de la productividad del sedimento carbonatado en la que interactúan latitud, temperatura, salinidad, profundidad del agua, intensidad de luz, turbidez, circulación de agua, presión de CO₂ y aporte de nutrientes. Cuando varios de estos factores se conjugan puede resultar una vigorosa fábrica de carbonato (Handford y Loucks, 1993). Sin embargo otros elementos importantes que influyen en la constitución de un ambiente, además del clima que contribuye a determinar condiciones de humedad o aridez, están la subsidencia junto con la eustasia que crean el espacio donde la sedimentación tomará lugar; la posición tectónica dentro de un marco de márgenes divergente, convergente o transformante. La asociación o aislamiento de un terreno continental que influirá en la entrada de terrígenos, la morfología y amplitud de la plataforma o terraza que influye en el patrón de mareas y corrientes y la orientación general del marco sedimentario con respecto a los patrones mayores de vientos y corrientes (Handford y Loucks, 1993).

Agentes clave en la determinación de un ambiente son las estructuras sedimentarias primarias tanto de origen físico o biológico. Aunque la mayoría de las estructuras ocurren en varios ambientes, (Reineck y Singh, 1980), un espectro de estructuras cuya combinación es típica puede caracterizar determinado ambiente.

Abundantes artículos describen los ambientes y subambientes carbonatados, pero un buen resumen de éstos se encuentra en la Memoria 33 de la AAPG (Scholle, Bebout y Moore, 1983).

Modelos para interpretar los depósitos de carbonatos han sido descritos por Irwin (1965), Wilson (1975), Ahr (1973) y Read (1985); sin embargo, todos ellos presentan esquemas fijos. Handford y Loucks (op. cit.) integran estos patrones dentro de modelos dinámicos donde interactúan con los cambios del nivel del mar. Tucker (1990) describe y resume varios de los modelos desde un punto de vista más dinámico.

VII.1.- SEDIMENTOLOGIA, AMBIENTE Y MODELO SEDIMENTARIO DE LA SECUENCIA E-1.

La sedimentación en los Pozos Entabladero-2, Entabladero-101 y Sabaneta-2A se llevó a efecto sobre un basamento cristalino ígneo del Paleozoico tardío fallado normalmente. (Lams. I, a, c y II a) Fig. 13, mientras que en los pozos ubicados al sureste desde Xalostoc-1 hasta Martínez de la Torre-1, el sustrato fueron las rocas continentales del Jurásico Medio de las Formaciones Cahuwasas (lodolitas, limolitas y areniscas) y Tenexcate (conglomerados, brechas y limolitas (Lams. I, b,d y II, b-e). Esto mismo ocurre hacia el noroeste en el pozo Entabladero-1 (Fig. 13). En los pozos ubicados al sureste del basamento cristalino se percibe la presencia de una fosa tectónica o medio graben que está ocupado por casi 1000 m de rocas del Jurásico Inferior de la Formación Huayacocotla (areniscas y lutitas). Este esquema es el que probablemente influyó en el marco y evolución sedimentaria del área.

Es probable que al inicio del depósito se tuviera una topografía muy irregular que en ocasiones provocó la ausencia de importantes paquetes como se esquematiza en las secciones estratigráficas.

La sedimentación de esta secuencia se inicia con un sistema de depósito transgresivo hasta alcanzar una primera superficie de inundación. Esta construida por varios ciclos. Inicialmente se presenta en la base de la secuencia una litofacies de litarenitas con matriz calcárea, en ocasiones conglomeráticas. Algunas de ellas son ricas en partículas carbonatadas como intraclastos, ooides y peloides, como se presenta principalmente en los Pozos Carolina-1, Relicario-1 (Lam. IX, d,f), Tenexcate-1 y Tecantepec-1.

Esta sedimentación terrígena se depositó alrededor y sobre altos de basamento que fueron invadidos por el mar. La existencia de escasos ríos alimentaron cantidades importantes de sedimento terrígeno que fue aportado a los incipientes depósitos carbonatados que rápidamente dominaron la sedimentación.

La sedimentación carbonatada y en algunas partes todavía híbrida o con fuerte influencia terrígena del sistema transgresivo, se caracterizó por un dominio de partículas carbonatadas no esqueléticas en cantidades que varían en ocasiones desde el 50 hasta el 90%. Incluyen oolitas inmaduras del tamaño de arena media (300 μm .) en el Pozo Carolina-1, arena media-fina (300-200 μm) en los Pozos Pahuatatepa-1 y Relicario-1 y arena fina en el Pozo Sabaneta-2A. Por otro lado los peloides se ubican entre la arena muy fina a fina (100-150 μm). También se presentan granos compuestos o agregados, intraclastos y granos envueltos. En Carolina-1 se tienen pellas fecales (*Favreina* sp.). Las partículas esqueléticas se presentan en cantidades desde el 5 al 15%, incluyen fragmentos de algas verdes (*Acicularia* sp) y rojas, moluscos (pelecípodos y gasterópodos principalmente), equinodermos y ostrácodos.

Este tipo de sedimentación corresponde a una asociación chlorozoan. De acuerdo a Sellwood (1978) las asociaciones de granos no esqueléticos se concentra hacia los 38° norte y sur del ecuador y el factor principal que la controla parece ser la temperatura. La escasez de cuerpos de oolitas bien desarrolladas permite pensar que la salinidad hasta cierto punto fue baja y jugó un papel importante pues no se presentaron condiciones ideales para su formación. En general se tuvieron

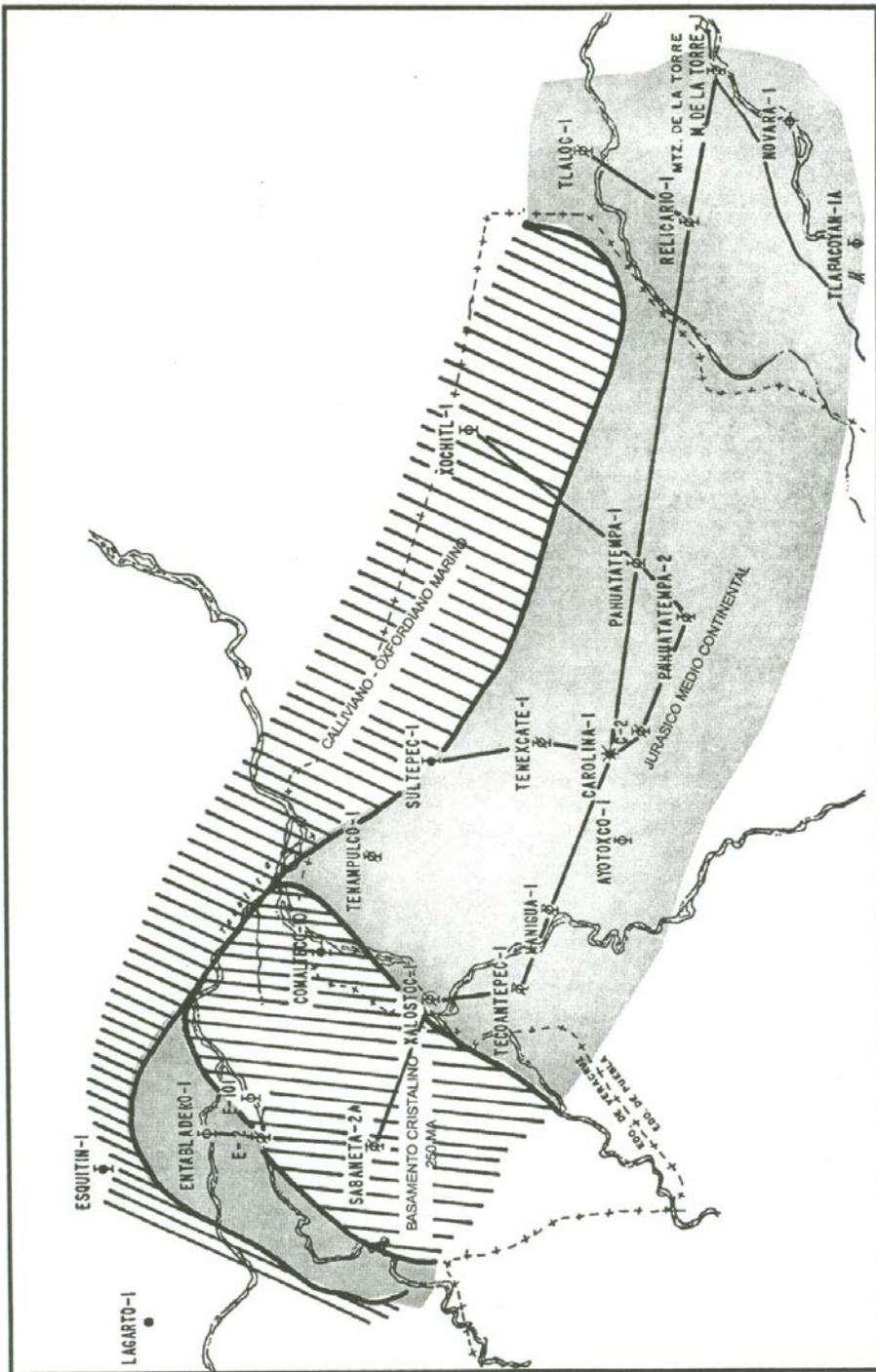


Fig. 13.- Distribución de litofacias pre-kimmeridgianas

condiciones de energía, luz y aguas calientes con salinidades normales que ayudaron al florecimiento de las algas así como a la formación de oolitas, en su mayoría inmaduras.

La presencia de cuarzo y algunos fragmentos de roca se tiene en cantidades importantes en el Pozo Tenexcate-1, donde pueden llegar hasta el 15%; en el Pozo Tecoaatepec-1 alcanzan tamaños de arena media (300-400 μm). Llama la atención la presencia en el Pozo Sabaneta-2A de un grainstone de oolitas del tamaño de arena fina (150-200 μm) con grandes bioclastos de amonitas. Lam. V, a, b, c.

Texturalmente en este sistema predominan los grainstones-packstones y packstones-grainstone sobre los wackestones y packstones. En el Pozo Relicario-1 se tiene un mudstone arenoso que puede ser de una planicie de marea o de una porción mas profunda dentro de una plataforma.

El sistema transgresivo de la Secuencia E-1 no fue posible estudiarlo en el Pozo Entabladero-1, pues sus muestras nunca fueron localizadas.

Las litofacias de este sistema son variables y corresponden a ambientes terrígenos costeros, de rampa restringida cercana a costa o con aporte terrígeno, de rampa interna media marino-normal donde se desarrollan algunos bancos delgados de arenas carbonatadas. Fig. 14.

La superficie de inundación se ubicó en el Pozo Carolina-1 donde se encontraron mudstone-wackestones de bioclastos con la presencia de cortes de espículas de esponja (*Rhaxella* sp.) y calciesferúridos, así como foraminíferos bentónicos hialinos mas característicos de rampa profunda.

Se considera que el perfil sedimentológico fue el de una rampa con un echado en la sedimentación hacia el noreste. Las facies mas gruesas se deben encontrar hacia el sureste en los afloramientos de la sierra.

Los sistemas de depósito del estado alto también son dominados por partículas carbonatadas no esqueléticas en cantidades que varían entre el 60 y 90% de partículas. Constituyen grainstones-packstones y packstones-grainstones de peloides y ooides inmaduros principalmente, con laminaciones intercaladas de wackestone-packstone muy arenoso. Tiene además laminación planar paralela, laminación irregular, flaser y bioturbación. Lams. III, a-d y IV, a-f. Los tamaños de arena alcanzan las 500 μm . en Carolina-1 mientras que en Entabladero-1 son de 150-200 μm . También se tienen peloides de tamaños mas finos (100-200 μm) en Carolina-1. Algunas partes también presentan granos envueltos, intraclastos, fragmentos de roca y cuarzo. Fig. 15.

El contenido de bioclastos varía desde menos del 5% en Carolina-1 y Pahuatatepa-1, donde se observa abundante bioturbación peloides y ooides inmaduros. Lam. VI, a-f, Lam. VII, a-f y Lam. VIII, a-e. Facies de este tipo se reportan ocupando toda la zona lagunar que se extiende al oeste de la isla de Andros (1963), en la parte interna de las Islas Ragge en Bahamas (Illing, 1954).

En las litofacias de rampa interna media se tienen fragmentos de equinodermos, algas verdes y rojas, moluscos y llama la atención las espículas de esponja que se observan. La cantidad de bioclastos se incrementa hasta aproximadamente 10% en el

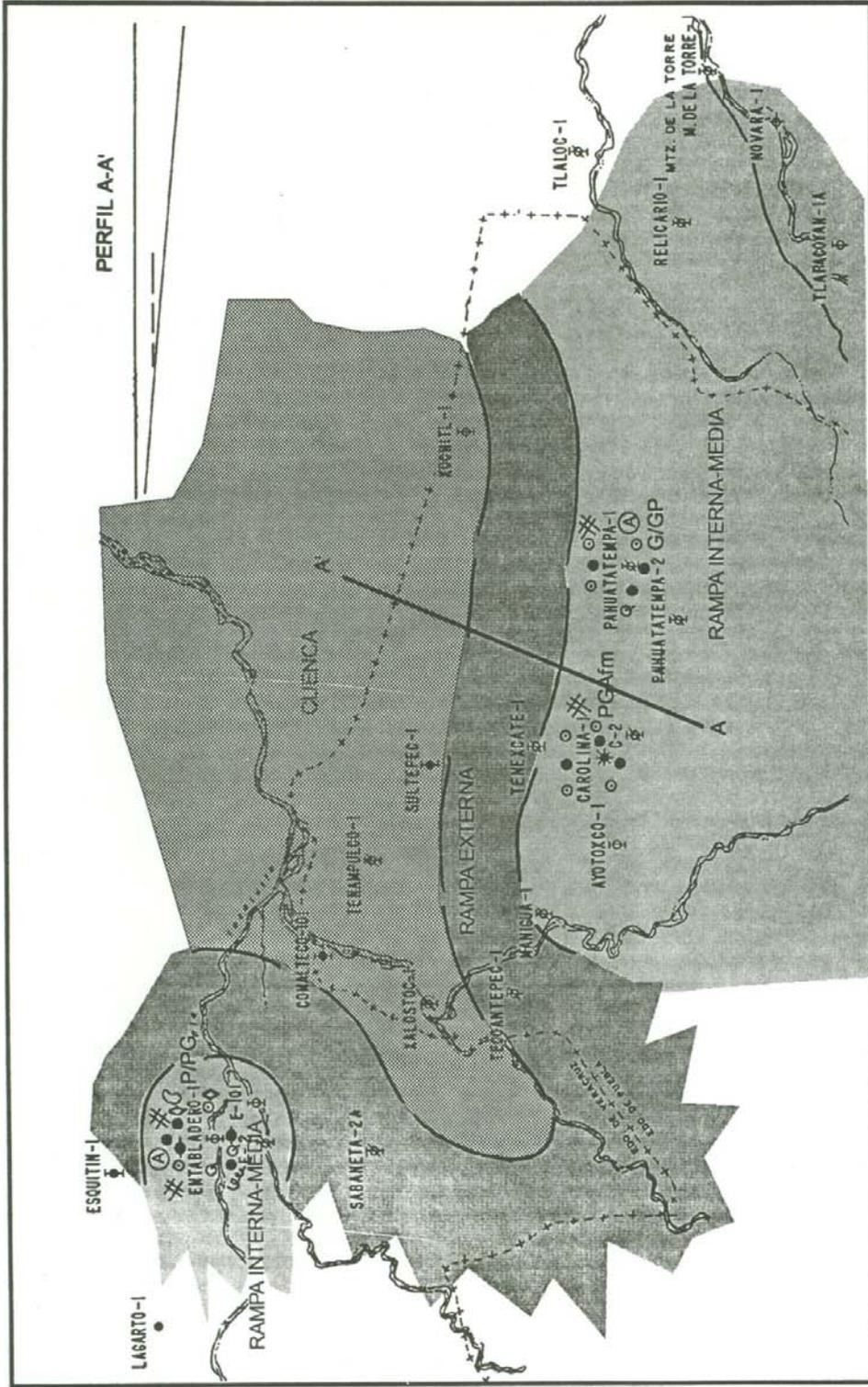


Fig. 15.- Sedimentación y distribución de litofacies del sistema deposicional de nivel alto correspondiente a la Secuencia E-1. El esquema superior derecho muestra un perfil sw-ne.

Pozo Entabladero-1 donde se tienen fragmentos de crinoides y otros equinodermos, moluscos y algas (Acicularia jurasica y Marinella lugeoni).

La presencia de las partículas no esqueléticas, en particular los ooides y peloides indujo a considerar en trabajos anteriores un modelo de sedimentación de plataforma de borde protegido (Menes, 1974) como el propuesto por Wilson (1975). Este borde ha sido buscado a través de la perforación de varios Pozos (Comalteco-101, Tenampulco-1 y Sultepec-1), sin embargo las facies encontradas correspondieron a un ambiente de sedimentación de aguas más profundas (Fig. A.3).

De acuerdo a datos obtenidos en el presente estudio se considera que los cuerpos de bancos de arenas carbonatadas limpias raramente sobrepasan los 10 m. y nunca hace su presencia un cuerpo con espesor verdaderamente potente, portándose más bien de manera errática, lo que anima a pensar en un complejo de bancos. Petrográficamente se puede considerar la presencia de litofacies de arenas carbonatadas pertenecientes a barras de arena, bancos de arenas marinas, canales de marea así como sedimentos de barras de rampa media o interna principalmente en el sistema transgresivo. Lo anterior soporta la idea de que el depósito de esta secuencia se efectuó más bien dentro de un modelo de sedimentación de rampa carbonatada. La proposición se sostiene con base en:

1. Que esta secuencia tiene aún una fuerte influencia terrígena. Handford y Loucks (1993), mencionan que las plataformas carbonatadas con fuerte influencia terrígena desarrollan perfiles de rampa más que de terraza de borde.
2. Siguiendo las ideas de Irwin (1965), sobre la sedimentación en mares someros se observa una fuerte predominancia de partículas del tamaño de arena o más gruesas dispersas en diferentes formas de cuerpos.
3. La falta de construcciones (corales) esqueléticas que dieran un perfil más abrupto.
4. Una vez constituidas las partículas carbonatadas del tamaño de arena, en la rampa tuvieron fuerte influencia las corrientes de marea y el oleaje que de acuerdo a su fuerza originaron diversas formas de cuerpos de arenas carbonatadas como barras, dunas, olas y campos de arena. Estos cuerpos cambian de facies a las partes más lodosas entre ellas, sumándose a esto una importante actividad de organismos bioturbadores (Núcleo 2 del Pozo Pahuatatepa-1 y Núcleo 6 del Pozo Entabladero-1. Lams. III, c-d, VI y VII).
5. La generación de arenas carbonatadas no requiere de fuertes cambios en la pendiente de sedimentación y en ocasiones son suficientes los mismos cambios dentro de la plataforma (Ball, 1967).

Cabe mencionar que aunque el espesor vertical de los cuerpos de arenas carbonatadas es pequeño, su distribución horizontal puede ser grande como lo describe Ball (op. cit.) para los diferentes tipos de arenas carbonatadas que estudia.

Definir la morfología de estos cuerpos de arenas carbonatadas se hace difícil dadas las condiciones de información con que se cuenta. Entre algunas de las causas están: que los pozos están muy alejados entre sí, no se tienen núcleos continuos o cuando

menos mas nucleos cortados en esta secuencia y el uso de la muestra de canal puede ser riesgoso pues puede estar mal ubicada, los núcleos no están orientados y se desconoce cual pudo ser el patrón de las corrientes.

Como resultado de lo anterior solo se propone una franja entre los pozos Tenexcate-1 y Pahuatatempa-1 que se giraría hacia los pozos Relicario-1 y Tláloc-1, donde se podría esperar el desarrollo de un complejo de arenas carbonatadas de rampa. Hacia el sur y sureste de esta franja se podrían esperar diversas formas de cuerpos de arena; sin embargo su espesor no va a ser grande y cambian de facies a una laguna.

Toda la secuencia presenta espesores anómalos como resultado de una discordancia cuya existencia se discute mas adelante y que probablemente erosionó una buena parte de ella. De esta manera los mayores espesores se tienen entre los pozos Carolina-1 y Pahuatatempa-1; mientras que los menores o aun ausencia de estos depósitos se tienen entre los pozos Relicario-1 y Martínez de la Torre-1 y entre los pozos Manigua-1 y Entabladero-2, quedando pequeños remanentes en el área de los pozos Tecoantepec-1 y Sabaneta-2A. Esta discordancia imprimió una diagénesis de agua dulce que se manifiesta regionalmente como se verá mas adelante.

VII.2.- SEDIMENTOLOGIA, AMBIENTE Y MODELO SEDIMENTARIO DE LA SECUENCIA E-2.

Esta secuencia se inicia con un sistema depositacional de cuña de margen de plataforma (Shelf margin wedge). Durante esta etapa se depositan litofacies terrígenas con cuerpos de litarenitas que contienen pedruzcos o litoclastos calcáreos en ambientes litorales en el área del Pozo Xalostoc-1 (Núcleo 3, Lam XIII a, b). La forma del registro es de campana y recuerda un relleno de canal. Estos depósitos se podrían extender hasta el Pozo Manigua-1, donde también se encontraron estas litofacies en la base. Fig. 16.

En el Pozo Entabladero-2 se tienen litofacies de una plataforma restringida con abundante aporte terrígeno con filarenitas calcáreas que contienen fragmentos de algas y pelecípodos (Núcleo 3, Lam. XI, a-d y Lams. XII a-c). Durante este estado mucho sedimento fue erosionado, retrabajado y depositado en forma de cuñas progradantes hacia el nor-noreste de la plataforma de Entabladero. Entre los Pozos Entabladero-1 y Entabladero-2 estas cuñas son ricas en partículas no esqueletales (alcanzan 50-80%) con ooides rotos y compactados, peloides, intraclastos y granos compuestos. El cuarzo y fragmentos de roca juntos alcanzan en ocasiones hasta el 20%, en tamaños que van desde arena fina a arena media (100-1000 um). El contenido de partículas esqueletales varía entre 5 a 20% y corresponden a bioclastos de algas verdes (*Acicularia jurasica* y otras), algas rojas (*Marinella lugeoni*), equinodermos, corales escasos, pelecípodos y foraminíferos bentónicos muy escasos. Texturalmente son packstone-grainstones y packstones. Se considera que representan litofacies de ambientes de plataforma restringida o cercana a costa en el Pozo Entabladero-2. Fig.16.

Parte de estas cuñas pero en litofacies terrígenas de litarenitas calcáreas fueron encontradas también en el Pozo Sultepec-1.

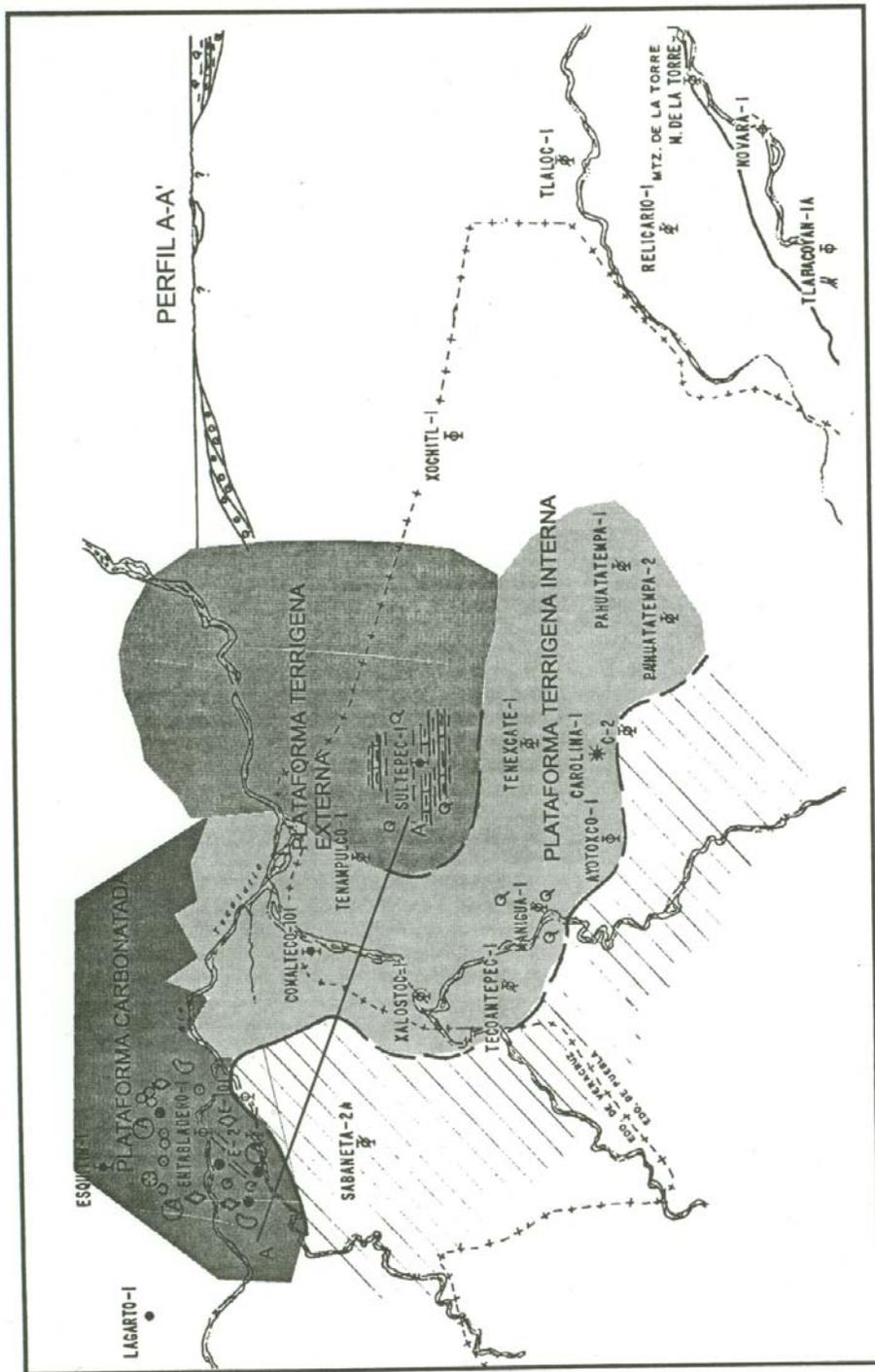


Fig. 16.- Sedimentación y distribución de litofacies del sistema deposicional de nivel bajo correspondiente a la Secuencia E-2. El esquema superior muestra un perfil entre el pozo Entablado-1, Xalostoc-1 y Sultepec-1. Lo achurado representa posible erosión.

Sobre estos sedimentos se instala rápidamente un sistema depositacional transgresivo. Las partículas que predominan fueron lodos calcáreos que alcanzaron porcentajes desde el 40 al 90%. Las partículas esqueléticas incrementan su presencia alcanzando entre el 10 al 30%. Comprenden bioclastos y microbioclastos en tamaños desde limo (50-60 μm) hasta arena gruesa (>1000 μm), de equinodermos, moluscos, esponjas y ostrácodos; biomorfas de radiolarios, calciesferúridos y escasos foraminíferos bentónicos hialinos.

Las partículas no esqueléticas que predominan son los peloides en tamaños de arena muy fina o limos, también se tienen intraclastos. La presencia de cuarzo terrígeno es casi generalizada en tamaños de arena muy fina a limo en porcentajes que varían entre el 5 al 10%. Los fragmentos de roca son muy escasos y la arcilla también es escasa.

Texturalmente presenta una gama desde mudstone a wackestone y muy escaso packstones en todas sus combinaciones.

Siguiendo las ideas de Irwin (op. cit.) se considera un ambiente de depósito de plataforma profunda o margen de cuenca hacia donde los bioclastos que fueron transportados decayeron durante el transporte. La presencia de bioclastos grandes dentro de esa matriz microbioclástica permite considerar procesos tales como flujos de granos y turbiditas que estuvieron siendo aportados desde una zona más somera. Los radiolarios aparecen con más frecuencia entre los Pozos Entabladero-1 y Sabaneta 2A, lo que permite pensar que pudo haber sido la porción más abierta o un poco más profunda (Fig. 17).

Llama la atención un packstone-grainstone de ooides rotos, intraclastos, granos envueltos y fragmentos de roca y cuarzo con fragmentos de alga y equinodermo en el Pozo Tecoahtepac-1, su presencia se podría deber a procesos de turbidez.

El sistema depositacional de estado alto entre los pozos Entabladero-2, Tecoahtepac-1 y Sultepec-1 continúa siendo dominada por lodos micríticos y bioclastos del tamaño de limo hasta arena gruesa de fragmentos de esponjas, equinodermos, pelecípodos y otros moluscos. Los peloides son escasos y el cuarzo sigue manifestándose. En el Núcleo 2 del Pozo Entabladero-2 se identificó el alga *Acicularia elongata elongata*, *Colomiosphaera pulla*, *Lenticulina* sp., *Rhaxella sorbyana* y *Pithonella perlonga*. Presenta además laminación paralela y laminación ondulada, laminación lenticular en ocasiones, laminación graduada, bioturbación, laminación convoluta escasa, estructuras geopetales en diversas posiciones, estilolitas verticales y porciones estilodulares. Texturalmente varía desde un mudstone a wackestone. Sus litofacies corresponden a un ambiente de plataforma profunda o margen de plataforma profunda con cierto declive. Lam X a-d. Fig. 18.

Estas litofacies sufren un cambio donde predominan las partículas no esqueléticas como ooides de 150-300 μm de tamaño (arena fina y media) en Carolina-1, ooides inmaduros con núcleo de cuarzo en Entabladero-1, peloides, granos envueltos y granos compuestos e intraclastos entre los Pozos Manigua-1 y Tenexcate-1. El porcentaje de estas partículas varía entre el 50 hasta el 95% y los esqueléticos difícilmente alcanzan hasta el 10%, comprenden fragmentos de equinodermo, algas rojas, ostrácodos, moluscos y en Relicario-1 y Tenexcate-1 se tienen además

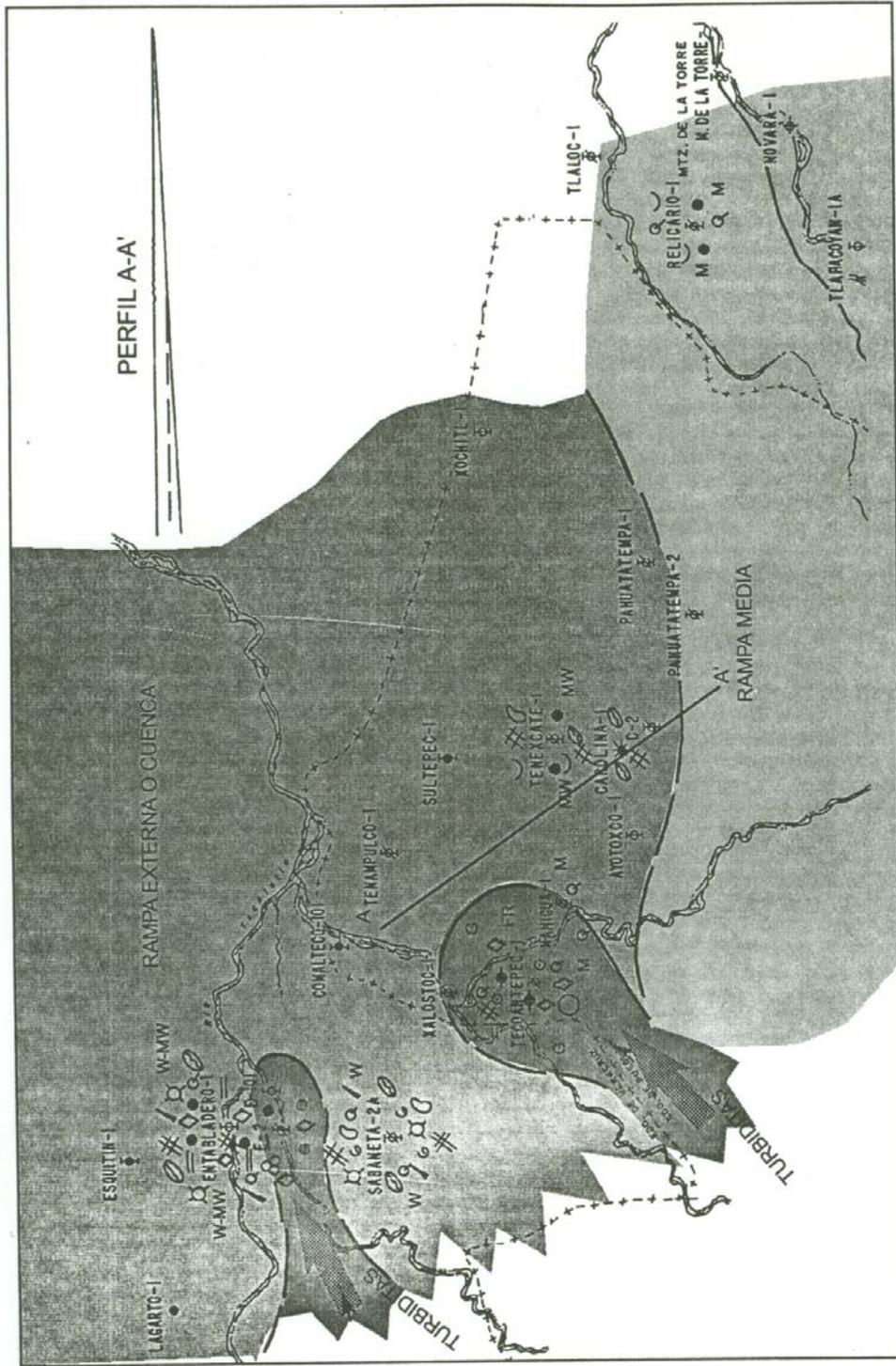


Fig. 17.- Sedimentación y distribución de litofacies del sistema deposicional transgresivo correspondiente a la Secuencia E-2. El esquema superior derecho es un perfil nw-se.

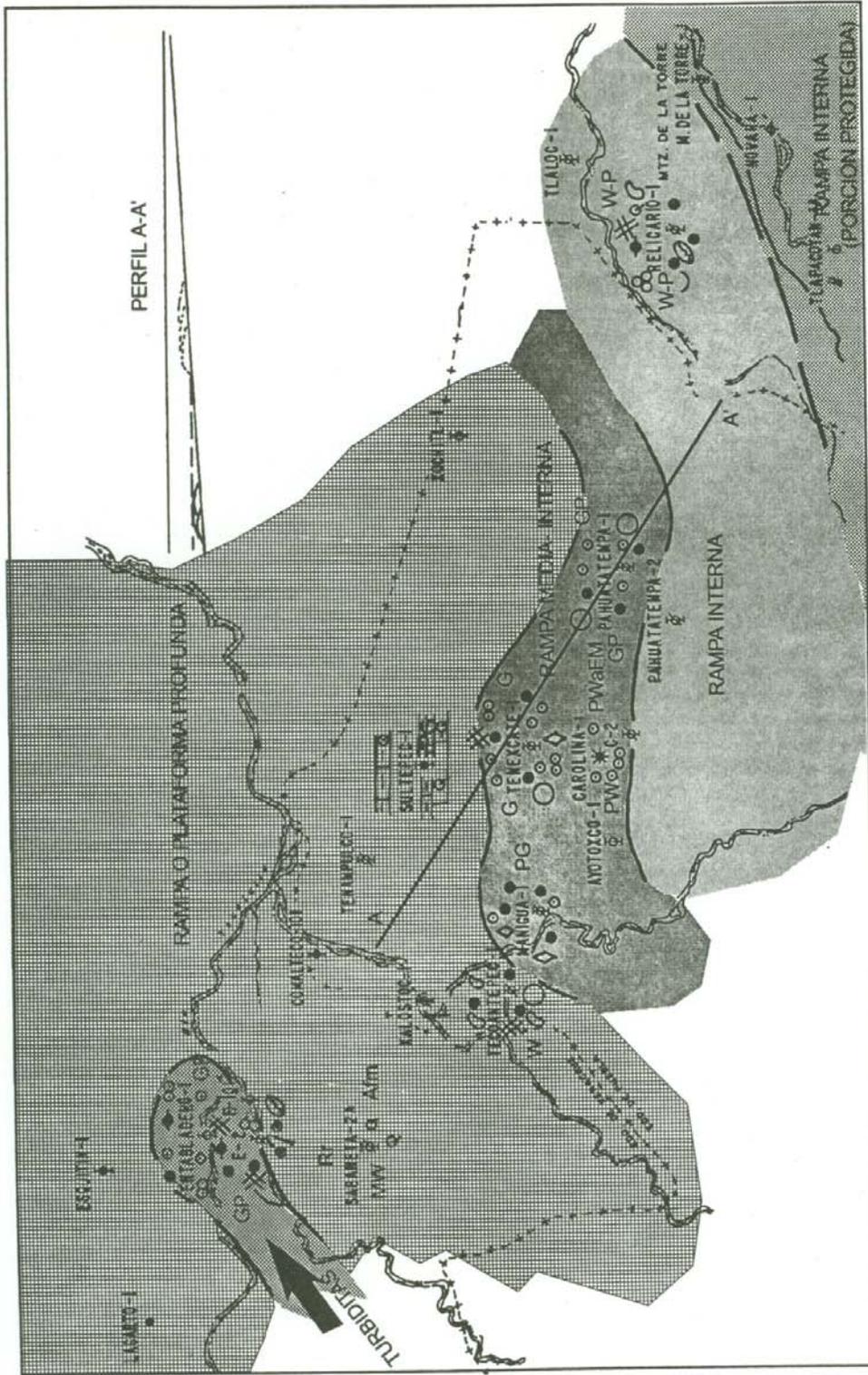


Fig. 18.- Sedimentación y distribución de litofacies del sistema deposicional de nivel alto correspondiente a la Secuencia E-2. El esquema superior es un perfil nw-se.

espículas de esponja (Rhaxella sp). El cuarzo terrígeno se presenta en Entabladero-1 y Relicario-1.

Hacia el Pozo Martínez de la Torre-1 predominan condiciones de plataforma restringida. Lam. XIII, c y d y XIV, a-d.

El modelo sedimentario para la parte inferior de esta secuencia, es el de una rampa expuesta con cuñas progradantes de nivel bajo en su alrededor, que fue rápidamente invadida por una elevación del nivel del mar conformándose como una rampa carbonatada con polaridad probablemente hacia el sur-suroeste. La Plataforma de Entabladero quedó situada en la parte de la rampa profunda o margen de cuenca. Durante el nivel alto se tuvieron una serie de bancos de arenas carbonatadas en forma de barras probablemente de marea que progradaron desde la parte externa, relleno el espacio dejado por el tirante de agua, dejando porciones de plataforma abierta. El ambiente de depósito fue el de banco de arenas carbonatadas donde se tuvieron las condiciones de profundidad, luz, energía y saturación de carbonato de calcio suficiente para permitir el depósito de estas partículas. Desafortunadamente esta parte de la secuencia carece de muestras de núcleo que dieran más información.

VII.3.- SEDIMENTOLOGIA, AMBIENTE Y MODELO SEDIMENTARIO DE LA SECUENCIA E-3.

El sistema depositacional transgresivo se caracteriza casi regionalmente por una asociación de litofacies de plataforma profunda o margen de cuenca.

Los sedimentos que inician el depósito son ricos en micrita, en ocasiones hasta el 90%. Las únicas partículas presentes son entre el 10 y 20% de bioclastos correspondientes a fragmentos de equinodermos y espículas de esponja (Rhaxella sp y Rhaxella sorbyana), moluscos y ostrácodos. En el Pozo Entabladero-1 se tienen biomorfas de radiolarios. El cuarzo terrígeno en tamaño de limo es otra partícula presente casi regionalmente. En el Pozo Tenexcate-1 se presentan hasta el 25% de peloides.

En el Pozo Xalostoc-1 esta secuencia comienza con litofacies de plataforma restringida, (Núcleo 4) Presenta capas delgadas con cambios texturales constantes que van desde mudstone a grainstone, los contactos en su mayoría son abruptos. Presenta laminaciones paralelas onduladas, laminación irregular, estructura estilonodular, tiene abundante bioturbación, posibles rizocreaciones, ojos de pájaro, grietas de desecación, estructuras geopetales y posibles carpetas de alga. También presenta fragmentos de alga roja, gasterópodos y pelecípodos que dominan en algunas capas en la parte superior del núcleo. Todo el núcleo es muy arenoso. La presencia de carpetas de alga, ojos de pájaro y grietas de desecación podrían indicar períodos de exposición subaérea. La litología cortada en este pozo llama la atención, pues no se ajusta al esquema regional lo que podría deberse a problemas estructurales. Lams XV, a-e y XVI, a-d.

Durante esta etapa transgresiva, desde el Pozo Manigua-1 hasta Carolina-1 y Tenexcate-1 se tienen ambientes de rampa profunda. Presentan fuerte influencia de una rampa media interna que se instala entre los pozos Pahuatatempa-1 y Relicario-1. Aquí se depositan wackestones y packstones de peloides dispersos en forma de sábanas que cambian lateralmente a zonas más restringidas con peloides y

bioturbación abundante. Lams. XVII, a-d y XIX, c-d. Las texturas que presentan son de grainstones, grainstone-packstones, packstones y packstones-wackestones. Estos cuerpos se instalan sobre un delgado paquete de ambiente de plataforma externa o margen de cuenca como ocurre en el Pozo Carolina-1 donde se tienen wackestone y packstones microbioclásticos con espículas de esponja y cuarzo del tamaño de limo (Lam. XVIII, a-d) y en el Pozo Pahuatatempa-1. Lam. XIX a,b.

Estas litofacies de sábanas de arena carbonatada de plataforma cambian lateralmente a litofacies de ambiente de plataforma profunda y margen de cuenca hacia el noroeste, presentándose packstone-wackestones de peloides con fragmentos de equinodermos, moluscos, esponjas y calciesferúlidos en los pozos Tecoaatepec-1 y Xalostoc-1. Entre los pozos Sabaneta-2A y Entabladero-1 se tienen mudstones y wackestones de peloides con escasa arcilla (<10%), cuarzo terrígeno y fragmentos de roca. Los bioclastos alcanzan hasta el 20% de fragmentos de moluscos y equinodermos. En el Pozo Entabladero-1 se presentan radiolarios.

Las litofacies de arenas carbonatadas son ahogadas por litofacies de ambiente de rampa externa o margen de cuenca representados por mudstones, wackestones y packstone-wackestones de bioclastos y peloides. Los bioclastos corresponden a partículas de 50-100um de molusco y equinodermo. En el Pozo Pahuatatempa-1 se tiene un mudstone muy arcilloso (<30%) con radiolarios que también se presenta en el Pozo Tecoaatepec-1. Fig. 19.

El sistema depositacional de estado alto se caracteriza por una asociación de litofacies de ambiente de rampa profunda a margen de cuenca. En este sistema las partículas dominantes son la micrita, los bioclastos y biomorfas. Los peloides se encuentran en porcentajes mayores en la porción sureste (20-30%) igualando en cantidad a los bioclastos, mientras que en el noroeste su porcentaje es menor (5-20%) y los bioclastos se conservan en cantidad. El cuarzo terrígeno se presenta hasta un 5% en el noroeste entre los pozos Tecoaatepec-1 y Entabladero-1, mientras que en el sureste su presencia se incrementa hasta un 10-15%. La arcilla se presenta desde el pozo Tecoaatepec-1 hacia el noroeste en porcentajes que no exceden el 10%.

Las partículas esqueléticas presentes en el noroeste son radiolarios, espículas de esponjas, fragmentos de equinodermos, pelecípodos, ostrácodos, calciesferúlidos y foraminíferos bentónicos hialinos. Hacia el sureste del Pozo Tecoaatepec-1 se tienen bioclastos de moluscos y equinodermos principalmente. En el Pozo Entabladero-2 se encontró *Stomiosphaera molucana*, *Parastomiosphaera malmica*, *Pithonella perlonga*, *Didemnoides moreti* y *Lenticulina* sp. Las texturas que predominan son los wackestones y packstones al sureste y mudstones, wackestones y packstones al noroeste.

Las litofacies anteriores cambian en la parte superior del Pozo Entabladero-1 a un packstone de peloides (50%) con bioclastos (10%) de pelecípodos, equinodermos, escasos foraminíferos bentónicos hialinos y cuarzo terrígeno (5 a 10%) depositados hacia la parte externa y profunda de un banco carbonatado. Fig.20.

En el Pozo Relicario-1 el cambio es a un packstone-wackestone de peloides, ooides y granos envueltos, bioclastos de equinodermo, moluscos, algas rojas y espículas de esponja depositados en un ambiente de plataforma abierta o parte externa de una margen de rampa interna.

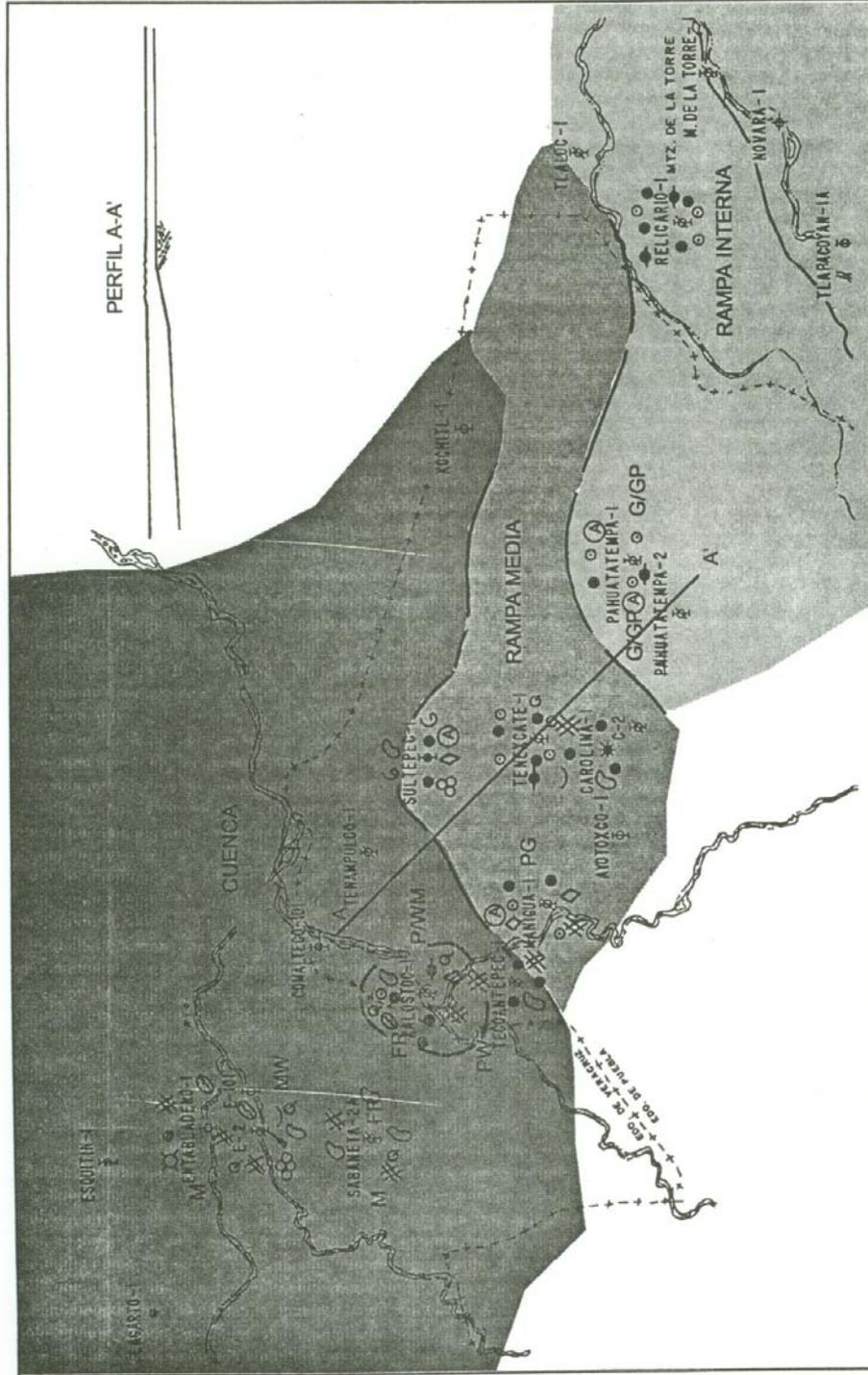


Fig. 19.- Sedimentación y distribución de litofacies del sistema deposicional transgresivo de la Secuencia E-3. La posición de las litofacies encontradas en el pozo Xalostoc-1 podrían estar afectadas por fenómenos estructurales. El esquema superior es un perfil nw-se.

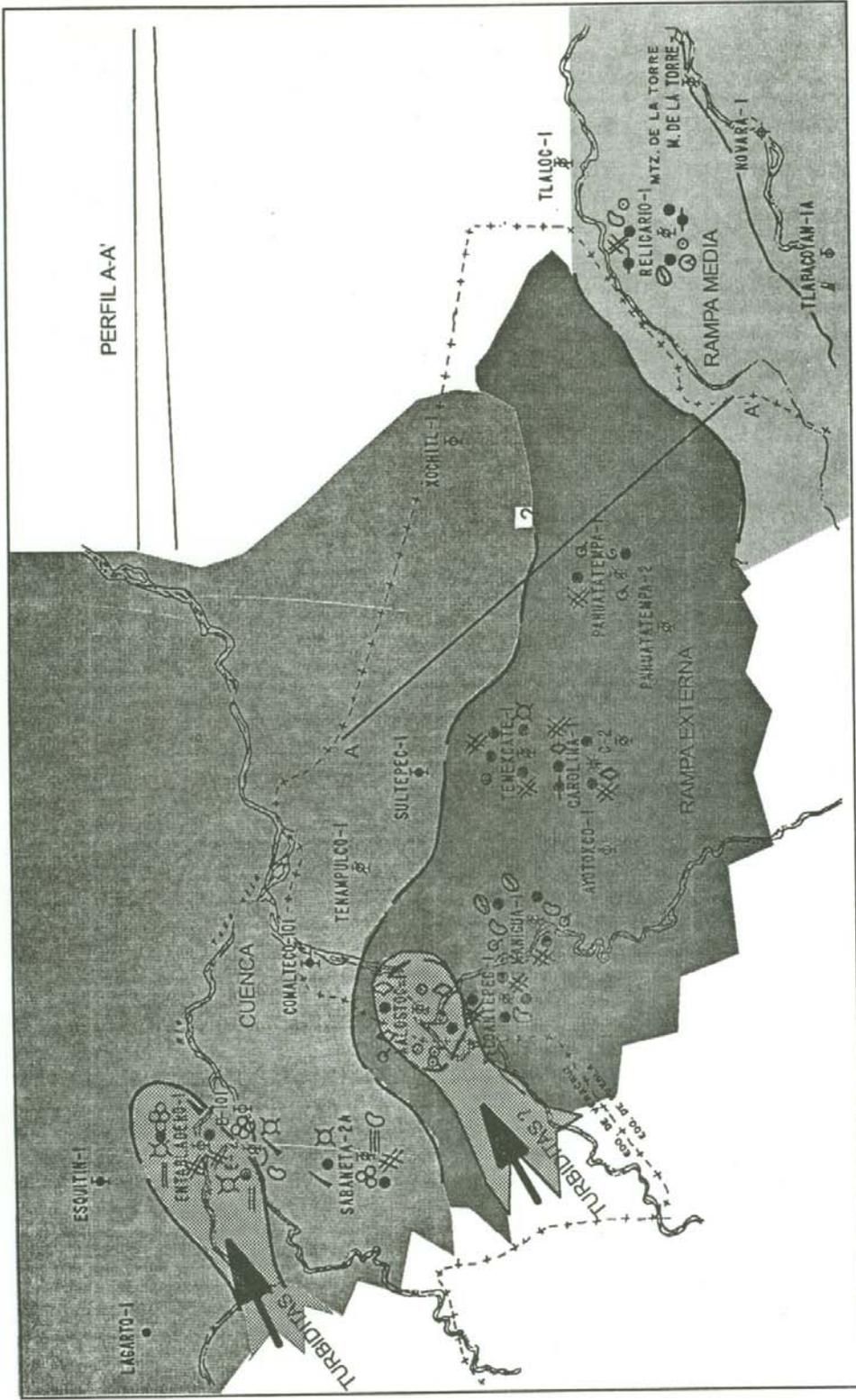


Fig. 20.- Sedimentación y distribución de litofacies del sistema deposicional de nivel alto correspondiente a la Secuencia E-3. El esquema superior es un perfil nw-se.

El modelo sedimentario asociado a la etapa transgresiva se inició con una plataforma profunda o margen de cuenca regional, al que le siguió la instalación de una sábana muy delgada de arenas carbonatadas que difícilmente sobrepasa los 10-15 m en su porción este-sureste, pero que parece iniciar un cambio en el relieve topográfico. Fue rápidamente ahogada en toda su extensión, por la superficie de inundación correspondiente, que coincide con la aparición de *Rhaxella sorbyana* y el inicio del Kimmeridgiano. Estas arenas carbonatadas pudieron estar situadas hacia la parte externa de un banco.

El modelo de sedimentación para la etapa de estado alto, corresponde al de una plataforma abierta profunda o rampa profunda en el sureste, hacia la que fueron acarreadas gran cantidad de bioclastos, mientras que el noroeste representa un modelo de margen de plataforma profunda o cuenca hacia donde fueron lavadas además de los bioclastos más finos las arcillas, todo enriquecido por una lluvia de radiolarios. El espacio de depósito se fue rellenando y fue progradado por facies de ambientes más someros.

VII.4.- SEDIMENTOLOGIA, AMBIENTE Y MODELO SEDIMENTARIO DE LA SECUENCIA E-4.

Los sistemas depositacionales transgresivo y de "highstand" de esta secuencia se encuentran dominados casi en su mayor parte por una asociación de litofacies de ambiente de plataforma profunda a margen de plataforma profunda o cuenca que cambian hacia el Pozo Relicario-1 a una asociación de litofacies de ambientes de banco de arena carbonatada de rampa. Los ambientes de rampa restringida se presentan hacia los pozos Martínez de la Torre-1 y Tlapacoyan-1. Lam. XXIII, a-d.

Las partículas dominantes en las litofacies de rampa profunda o margen de rampa profunda son la micrita, las biomorfos y bioclastos, partículas no esqueléticas escasas y terrígenos.

La micrita ocupa entre el 30 al 75%. Los granos no esqueléticos en su mayoría peloides, presentan porcentajes entre 5-15%, en muy escasas ocasiones ocupan hasta el 20-30%. Las partículas esqueléticas son más predominantes y ocupan de 20-40%, corresponden a radiolarios, fragmentos de ostrácodos, equinodermos, pelecípodos, gasterópodos, saccomas, esponjas y calciesferúlidos. Los terrígenos son el cuarzo en tamaño de limo y la arcilla (10-20%). Las texturas que dominan son los wackestones, mudstones y wackestone-packstones. Lam. XXII, a-e.

Litofacies correspondientes a una superficie de inundación solo se reconocieron en los Pozos Tecantepec-1 y Pahuatatempa-1, representados por lodos carbonatados arcillosos ricos en radiolarios.

A partir de la superficie de inundación, en el área del Pozo Relicario-1 y al sur-sureste de él, se establece un importante sistema depositacional constituido de litofacies de ambiente de arenas carbonatadas y de rampa y restringida. El espesor alcanzado por las litofacies de arenas carbonatadas (50-60 m) constituyeron cayos en una rampa interna. Fig. 21.

Las arenas carbonatadas del Pozo Relicario-1 se encuentran constituidas por peloides del tamaño de arena fina (100-150 μ m) y ooides del tamaño de arena media

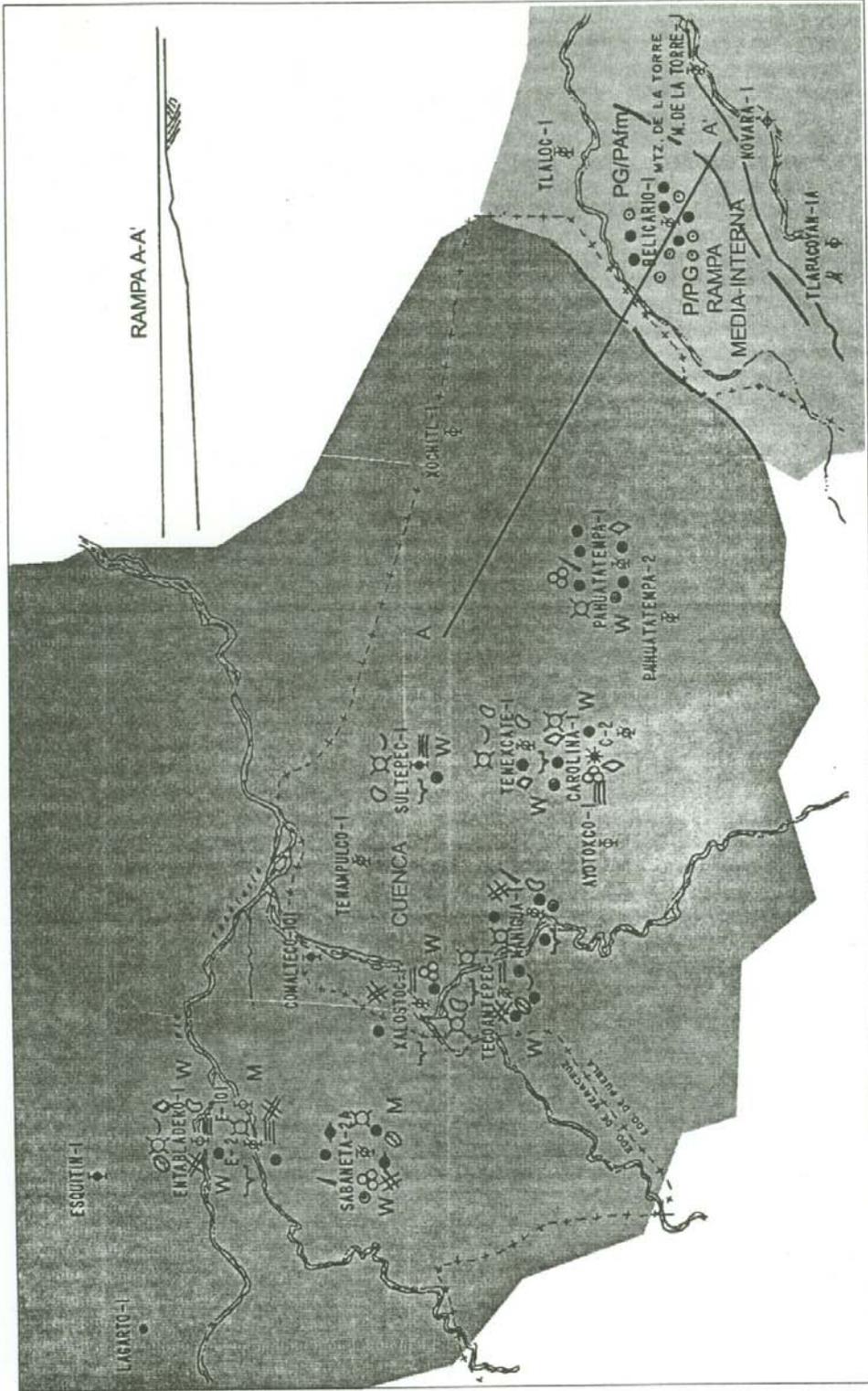


Fig. 21.- Sedimentación y distribución de litofacies de la Secuencia E-4. Se desarrollan callos de arenas carbonatadas en una rampa interna. El esquema superior es un perfil mw-se.

(300-350 μm). Otros granos que se encuentran son granos envueltos y granos agregados. Es notable la ausencia de cuarzo y se tiene un 10% de micrita. Todo se encuentra muy alterado por neomorfismo provocado por una diagénesis de agua dulce. Las texturas son packstones y packstone-grainstones, sin embargo cabe la posibilidad de que originalmente se hayan depositado como grainstones y después se les introdujo el lodo calcáreo.

Las litofacies de la plataforma externa son packstone-wackestones de granos agregados, granos envueltos y peloides depositados a barlovento de un banco principal. Presenta bioclastos de equinodermos, pelecípodos y algas rojas. Está atacado por un importante evento neomórfico y diagénesis de agua dulce. Se puede ver en el Núcleo 3. Lam. XXI, a-e.

VII.5.- SEDIMENTOLOGIA, AMBIENTE Y MODELO SEDIMENTARIO DE LAS SECUENCIAS E-5 Y E-6.

Regionalmente la secuencia está dominada por una asociación de litofacies correspondiente a un ambiente de cuenca. Las partículas dominantes son los lodos calcáreos micríticos de color negro con abundante material terrígeno del tamaño de arcilla que alcanza en ocasiones hasta el 40% y llega a dominar constituyendo lutitas calcáreas. Las partículas esqueléticas que predominan son las biomorfas de radiolarios cónicos y esféricos que alcanzan ellos solos del 10 al 50% en ocasiones; sin embargo estos porcentajes tan altos son resultado de procesos de compactación sufridos. Otros esqueletos son fragmentos de equinodermos pelágicos, principalmente *Saccocoma arachnoidea*, y holotúridos. Los fragmentos de moluscos son muy escasos. También se presentan calciesferúlidos. Fig. 22.

Esta asociación de litofacies se cortó en el Núcleo 5 del Pozo Entabladero-1, en él predominan la laminación paralela plana, laminación graduada, en algunas partes se tiene laminación paralela ondulada, laminación cruzada de ángulo bajo y estructura estilolaminar. La bioturbación es muy escasa y localizada. Se observan radiolarios abundantes y algunos fragmentos pequeños de pelecípodos. Lams XXIII, e,f y XXIV,a-f.

En el área del Pozo Relicario-1 estas litofacies cambian a packstones de ooides, peloides, granos envueltos e intraclastos con fragmentos de equinodermo; depositados posiblemente en un proceso de transgresión y ahogamiento rápido muy semejante a lo ocurrido en la Secuencia E-3, o como turbiditas acarreadas de una zona de arenas carbonatadas.

El modelo de sedimentación de esta secuencia corresponde al de una cuenca en partes anóxica, con un borde muy efímero hacia el sureste que fué rápidamente ahogado.

Esta secuencia coincide en parte con las lecturas más radioactivas que se presentan en los registros de rayos gamma y coincide con la máxima inundación que se tuvo a nivel global en el Titoniano medio (Haq 1987). Esto explica su gran contenido terrígeno, ya que grandes extensiones de tierra fueron invadidas. También coincide con la zona de *Saccocoma*-Radiolarios.

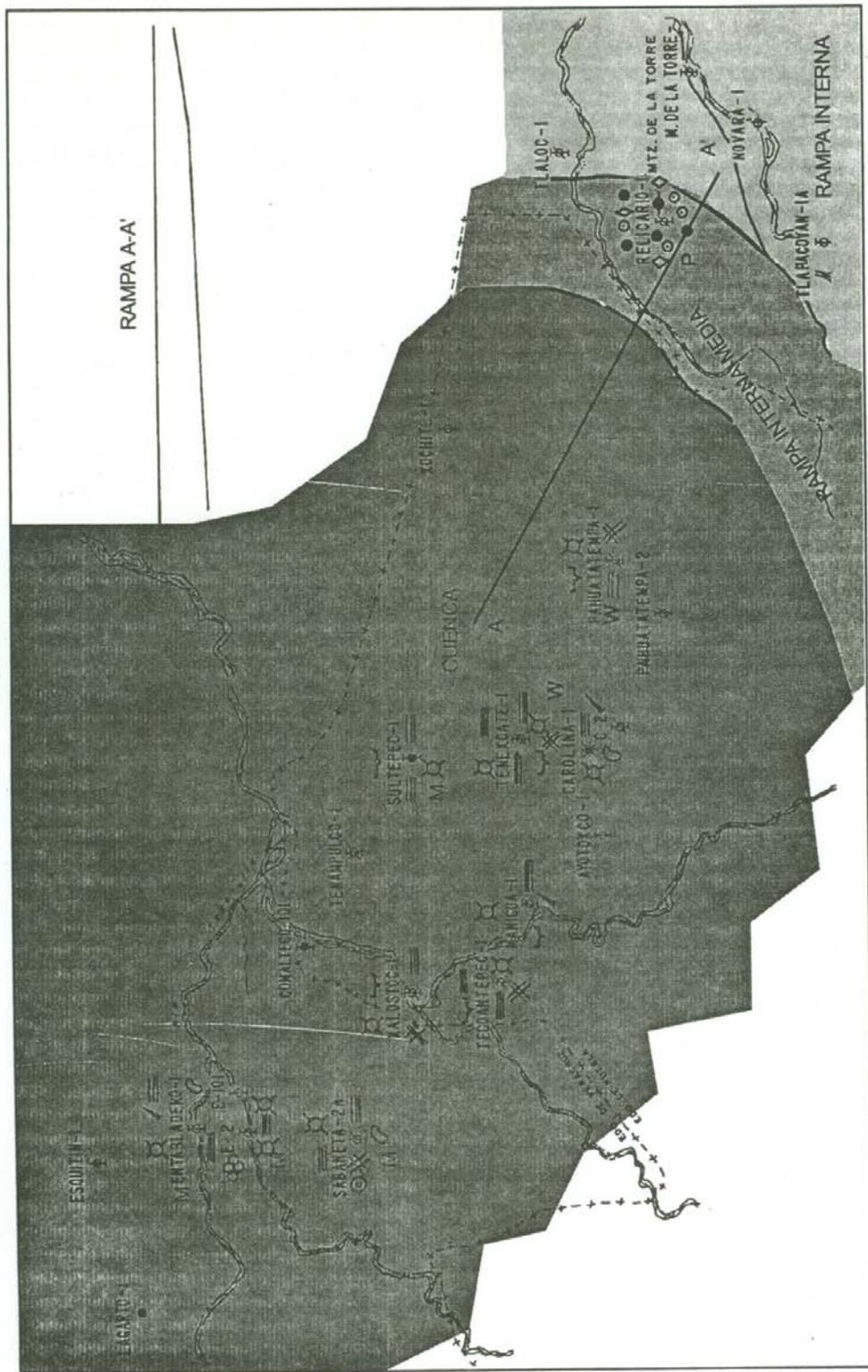


Fig. 22.- Sedimentología y distribución de litofacies de la Secuencia E-5.

La Secuencia E-6 no se estudió completa y solo se vieron partes de ella en los pozos Carolina-1, Pahuatatempa-1 y Relicario-1. Comprende litofacies de cuenca muy semejantes a las descritas con anterioridad y coincide con la Zona de Chitinoidea bonetti.

Un esquema que muestra la relación y evolución de las secuencias se representa en la Fig. 23.

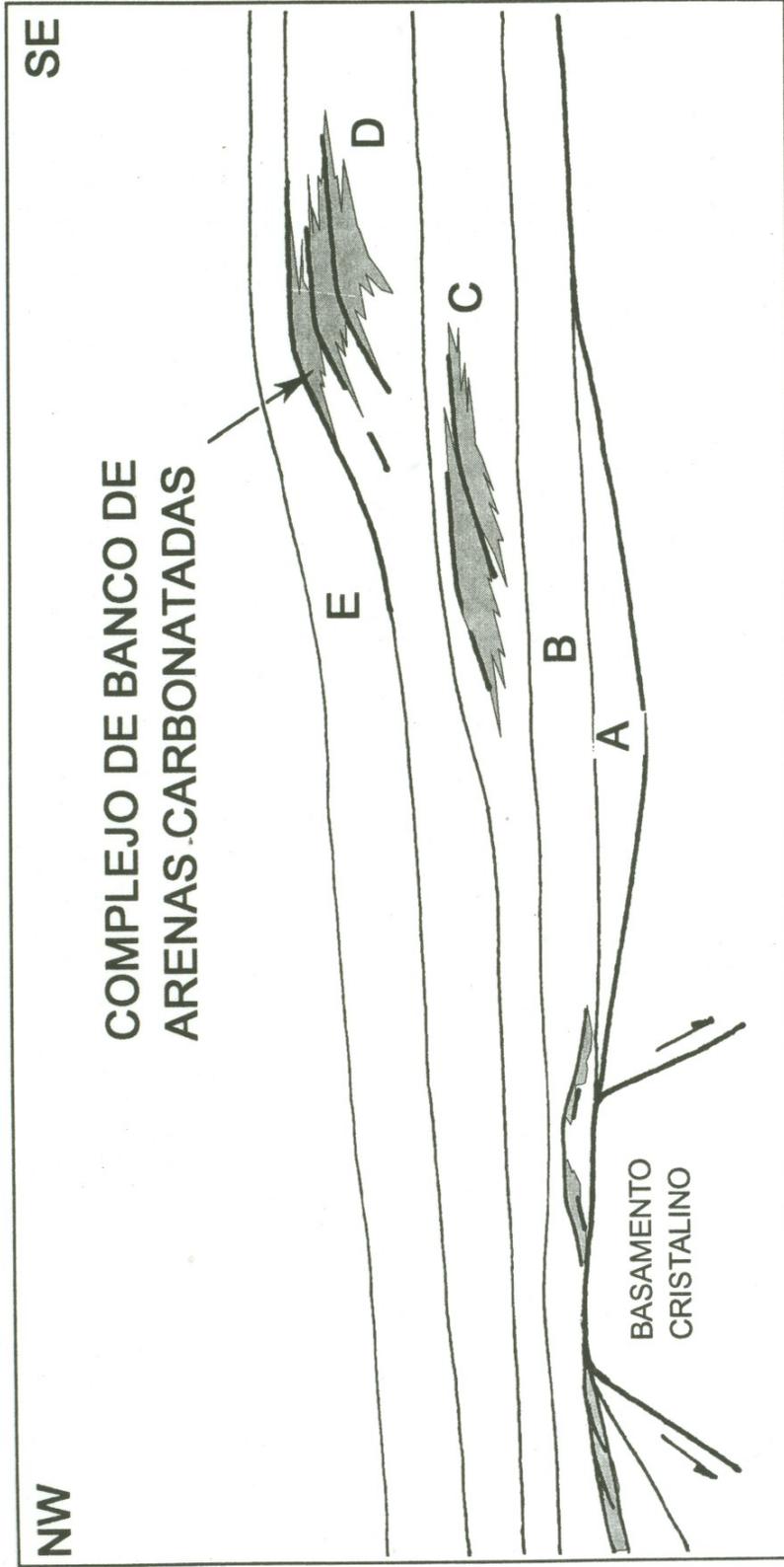


Fig. 23.- Esquema generalizado del modelo de sedimentación de la Rampa Carbonatada de Entabladero. El corte está orientado aproximadamente noroeste - sureste conforme a la sección estratigráfica I-I'. (A) Secuencia E - 1, (B) Secuencia E - 2, (C) Secuencia E - 3, (D) Secuencia E - 4 y (E) Secuencia E - 5.