



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

---

---

PROGRAMA DE POSGRADO EN CIENCIAS DE LA TIERRA  
INSTITUTO DE GEOLOGIA

SEDIMENTOLOGIA Y DIAGENESIS DE ROCAS  
CARBONATADAS DEL JURASICO SUPERIOR: UNA  
COMPARACION DE LAS FACIES PRODUCTORAS DE  
HIDROCARBUROS DE LA SONDA DE CAMPECHE  
CON LA FORMACION EL PORVENIR, OAXACA.

T E S I S

para obtener el grado de

MAESTRO EN CIENCIAS

PRESENTA

GERARDO HERNANDEZ RODRIGUEZ

TUTOR: DR. JOSE MANUEL GRAJALES NISHIMURA

2007





Universidad Nacional  
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

**Biblioteca Central**



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

---

---

## Agradecimientos

El presente trabajo se realizó gracias al otorgamiento de una beca para estancia de tesis de Maestría, por parte del Instituto Mexicano del Petróleo, por lo que agradezco a las autoridades de este Instituto. También agradezco todo el apoyo que me brindó el Instituto mediante el proyecto de investigación D.1003, dentro del cual llevé a cabo mi estancia para la realización de esta tesis, especialmente al Jefe de Proyecto, el Dr. José Manuel Grajales Nishimura; así como al grupo de investigadores y Técnicos que formaron parte de ese proyecto: Dr. Gustavo Murillo Muletón, Dr. Esteban Cedillo Pardo, M. en C. Ricardo Martínez Ibarra, quien brindó apoyo importante con su experiencia en catodoluminiscencia e inclusiones fluidas; Dr. Luis Velasquillo, Marcela Ugarte, Guillermo Aguilar Palma, así como a Martín Martínez, chofer del IMP quien brindó desinteresadamente gran apoyo logístico durante el trabajo de campo.

Quiero agradecer particularmente a mi tutor, el Dr. José Manuel Grajales Nishimura y a mi coasesor el Dr. Gustavo Murillo Muletón. De la misma manera, deseo expresar mi agradecimiento al Dr. José Francisco Vega Vera, Investigador del Instituto de Geología de la UNAM, quien fungió como mi tutor durante los primeros años de la Maestría.

Deseo agradecer igualmente a todas las personas que de alguna manera me dieron apoyo, facilidades, consejo, ánimos, o que simplemente estuvieron presentes durante todo este tiempo.

Finalmente quisiera dedicar este trabajo a mi hijo, quien vino a enseñarme que sí existe la felicidad. A Caro, quien le dio sentido nuevamente a mi vida. A mi mamá y a la memoria de mi padre, siempre presentes en mi pensar y en mi sentir. A Rodrigo, Luis Gerardo y Carlos, que nunca dejarán de ser mis niños.

---

---

## CONTENIDO

	Página
RESUMEN	
CAPITULO I. Introducción	1
I.1 Objetivo	2
I.2 Metodología	2
I.3 Localización	3
I.4 Estratigrafía del Area	5
I.4.1 Sonda de Campeche	5
I.4.2 La Formación El Porvenir como un Análogo de Superficie de las Facies Oolíticas Dolomitizadas de la Sonda de Campeche	6
I.4.2.1 Rocas Pre-Mesozoicas y Rocas Continentales del Mesozoico Temprano	7
1.4.2.2 Rocas Mesozoicas Marinas	7
1.4.2.3 Formación El Porvenir	7
CAPITULO II. Análisis de Facies y Diagénesis de la Formación El Porvenir	13
II.1 Facies de la Formación El Porvenir	13
II.1.1 Facies de Grainstone Oolítico	14
II.1.1.1 Litología y Estructuras Sedimentarias	14
II.1.1.2 Petrografía	15
II.1.1.3 Procedencia de los Clastos Terrígenos	17
II.1.2 Facies de Packstone Oolítico	18
II.1.2.1 Litología y Estructuras Sedimentarias	18
II.1.2.2 Petrografía	18
II.1.3 Facies de Wackestone de Radiolarios	20
II.1.3.1 Litología y Estructuras Sedimentarias	20
II.1.3.2 Petrografía	21
II.2 Asociación de Facies	23
II.3 Sucesión de Facies	23

---

---

II.4 Modelo e Interpretación de Facies	27
II.4.1 Interpretación de Facies	27
II.4.1.1 Facies de Grainstone y Packstone Oolítico	27
II.4.1.2 Facies de Wackestone de Radiolarios	29
II.4.2 Modelo de Facies	29
II.5 Marco de Estratigrafía de Secuencias	31
II.6 Paleogeografía	36
II.7 Análisis Diagenético	38
II.7.1 Secuencia Paragenética: Facies de Submarea Somera	38
II.7.2 Secuencia Paragenética: Facies de Submarea Profunda	44
II.7.3 Ambiente Diagenético de la Fm. El Porvenir	47
CAPITULO III. Análisis de Facies y Diagénesis de las Rocas Oolíticas	
Jurásicas del Campo Cantarell	52
III.1 Facies de las Rocas Oolíticas Kimmeridgianas del Campo	
Cantarell	52
III.1.1 Facies de Grainstone Oolítico	53
III.1.1.1 Litología y Estructuras Sedimentarias	53
III.1.1.2 Petrografía	54
III.1.2 Facies de Packstone Oncolítico-Bioclástico	58
III.1.2.1 Litología y Estructuras Sedimentarias	58
III.1.2.2 Petrografía	58
III.1.3 Facies de Wackestone de Bioclastos	59
III.1.3.1 Litología y Estructuras Sedimentarias	59
III.1.3.2 Petrografía	59
III.2 Asociación de Facies	61
III.3 Modelo e Interpretación de Facies	61
III.3.1 Interpretación de Facies	61
III.3.1.1 Facies de Grainstone y Packstone Oolítico	61
III.3.1.2 Facies de Packstone Oncolítico-Bioclástico	62
III.3.1.3 Facies de Wackestone de Bioclastos	63
III.3.2 Modelo de Facies	63

---

---

III.4 Análisis Diagenético	65
III.4.1 Secuencia Paragenética de las Rocas Oolíticas Kimmeridgianas del Campo Cantarell	65
III.4.2 Inclusiones Fluidas	72
III.4.3 Ambiente Diagenético	72
CAPITULO IV. Conclusiones	75
BIBLIOGRAFIA	77
ANEXOS	
ANEXO I. Descripción a Detalle de la Sección Compuesta Medida en la Formación El Porvenir	I
ANEXO II. Anexo Petrográfico Fm. El Porvenir	X
ANEXO III. Descripción de Núcleos del Kimmeridgiano de la Sonda de Campeche	XXI
ANEXO IV. Anexo Petrográfico Sonda de Campeche	XXVII

---

---

## RESUMEN

Se estudiaron afloramientos de rocas carbonatadas oolíticas de edad Kimmeridgiano de la Formación El Porvenir en Oaxaca y una secuencia sedimentaria de la misma edad del subsuelo de la Sonda de Campeche, con el fin de entender el modelo sedimentario de depósito en ambas localidades. La Formación El Porvenir está constituida por tres litofacies: grainstone y packstone oolíticos, y wackestone de radiolarios; la asociación de facies sugiere un ambiente sedimentario de rampa interna con depósitos de shoreface y de rampa externa con depósitos de offshore. La secuencia carbonatada de la Sonda de Campeche comprende también tres litofacies: grainstone oolítico, packstone oncolítico-bioclástico y wackestone de bioclastos; la asociación de estas facies revela que corresponden a bancos oolíticos de rampa interna con facies lagunares adyacentes. La historia diagenética de la Formación El Porvenir sugiere tres ambientes: marino somero, probable vadoso y de sepultamiento, pero sin dolomitización. En contraste, las rocas del subsuelo de Campeche fueron afectadas por diagénesis marina somera y posteriormente dolomitizadas en un ambiente de sepultamiento profundo. En la secuencia sedimentaria de shoreface y offshore de la Formación El Porvenir no se identificó un sistema de barrera-laguna, mientras que la secuencia sedimentaria del subsuelo corresponde a un complejo de bancos oolíticos asociados a una laguna. De esta forma, aunque las litofacies del subsuelo y las de afloramiento son semejantes, la información obtenida permite concluir que se trata de ambientes diferentes. El estudio realizado demuestra que distintos modelos sedimentarios carbonatados someros estuvieron activos durante el Jurásico Superior en el sureste de México.

## CAPITULO I. INTRODUCCION

Las rocas carbonatadas oolíticas del Jurásico Superior de la Sonda de Campeche presentan dolomitización intensa y disolución. Estas rocas producen hidrocarburos y por tanto representan un blanco exploratorio en esa importante región petrolera de México. Sin embargo, debido en parte a la destrucción parcial de las características sedimentológicas de esas rocas, como consecuencia del proceso de dolomitización, aún se desconocen partes del modelo sedimentario de las rocas oolíticas, su arquitectura estratigráfica y sus asociaciones de facies.

Con el fin de obtener datos sedimentológicos que permitan entender de mejor forma el modelo sedimentario de las rocas productoras de hidrocarburos de la Sonda de Campeche, se decidió estudiar un posible análogo de superficie. Se buscó que este análogo representara eventos contemporáneos y de ambientes de depósito semejantes a aquellos de la Sonda de Campeche. El posible análogo de superficie que se consideró para tal efecto es la Formación El Porvenir (Quezada, 1975; en Meneses, 1977), de edad Kimmeridgiano-Titoniano Temprano, del área de la Zacatera, en la región de la depresión Istmica, cerca de Matías Romero, Oax. Como parte de un proyecto integral del Instituto Mexicano del Petróleo (Proyecto D-01003) que involucra aspectos estratigráficos, sedimentológicos, estructurales y diagenéticos de rocas oolíticas del Jurásico Superior, en este trabajo se reporta la estratigrafía, sedimentología y diagénesis de muestras de núcleo del horizonte oolítico del Kimmeridgiano en el campo Cantarell, y se comparan con aquellas semejantes de la misma edad que afloran en la región del Istmo de Tehuantepec.

La interpretación sedimentológica generada en este estudio considera principalmente un análisis de los controles que llevaron a la formación de los bancos oolíticos de la Sonda de Campeche y los sedimentos oolíticos de la Formación El Porvenir, en el área de La Zacatera. Así como una reinterpretación de los llamados bancos oolíticos de El Porvenir y sus condiciones de depósito, ciclicidad en el nivel del mar, paleogeografía, influjo terrígeno y la mecánica de



depósito. También se desarrolla un marco de estratigrafía de secuencias para el Kimmeridgiano de la región de La Zacatera, basado en el análisis de los afloramientos.

Finalmente, se presenta un análisis diagenético que involucra la secuencia paragenética, además de una caracterización preliminar de la dolomitización mediante catodoluminiscencia e inclusiones fluidas, con el objeto de determinar los ambientes diagenéticos en estas rocas carbonatadas.

## OBJETIVO

El objetivo de este trabajo es estudiar la sedimentología y diagénesis de las rocas oolíticas del Kimmeridgiano, en el campo Cantarell de la Sonda de Campeche y de un análogo de superficie, la Fm. El Porvenir, y establecer una comparación sedimentológica y diagenética entre ambas.

## METODOLOGIA

El estudio estratigráfico-sedimentológico de las rocas oolíticas del Kimmeridgiano en la Sonda de Campeche se basó en núcleos de cuatro pozos, Cantarell-3001, 1065D y 1025; así como en algunas muestras pozo Taratunich-74 del campo Taratunich. En lo relativo al análogo de superficie, se midieron dos secciones para formar una columna compuesta a detalle y se propone un esquema estratigráfico de las calizas oolíticas de la Formación El Porvenir, de edad Kimmeridgiano-Titoniano Inferior.

Para el estudio diagenético se realizaron análisis petrográficos de todas las muestras (carácter de los cementos, relaciones de corte, relaciones espaciales, secuencia paragenética, etc.). Asimismo, fueron seleccionadas algunas muestras representativas de las distintas facies de la Fm. El Porvenir y de las rocas oolíticas dolomitizadas de la Sonda de Campeche para realizar análisis de catodoluminiscencia. Finalmente se seleccionaron algunas muestras de los distintos cementos de calcita y dolomita para efectuar un estudio de inclusiones

fluidas, de acuerdo con la técnica de Goldstein (1995), con el objeto de establecer posibles temperaturas de precipitación de los cementos.

## LOCALIZACION

### - Sonda de Campeche

La Sonda de Campeche está localizada en la porción occidental de la Península de Yucatán, y frente a los estados de Campeche y Tabasco en el Golfo de México. Dentro de la Sonda de Campeche se encuentra el Campo Cantarell (figura 1), una estructura anticlinal mayor, de 8-12 km de ancho y 30 km de largo, donde se han perforado rocas carbonatadas oolíticas de edad Kimmeridgiano (Meneses de Gyves, 1980).

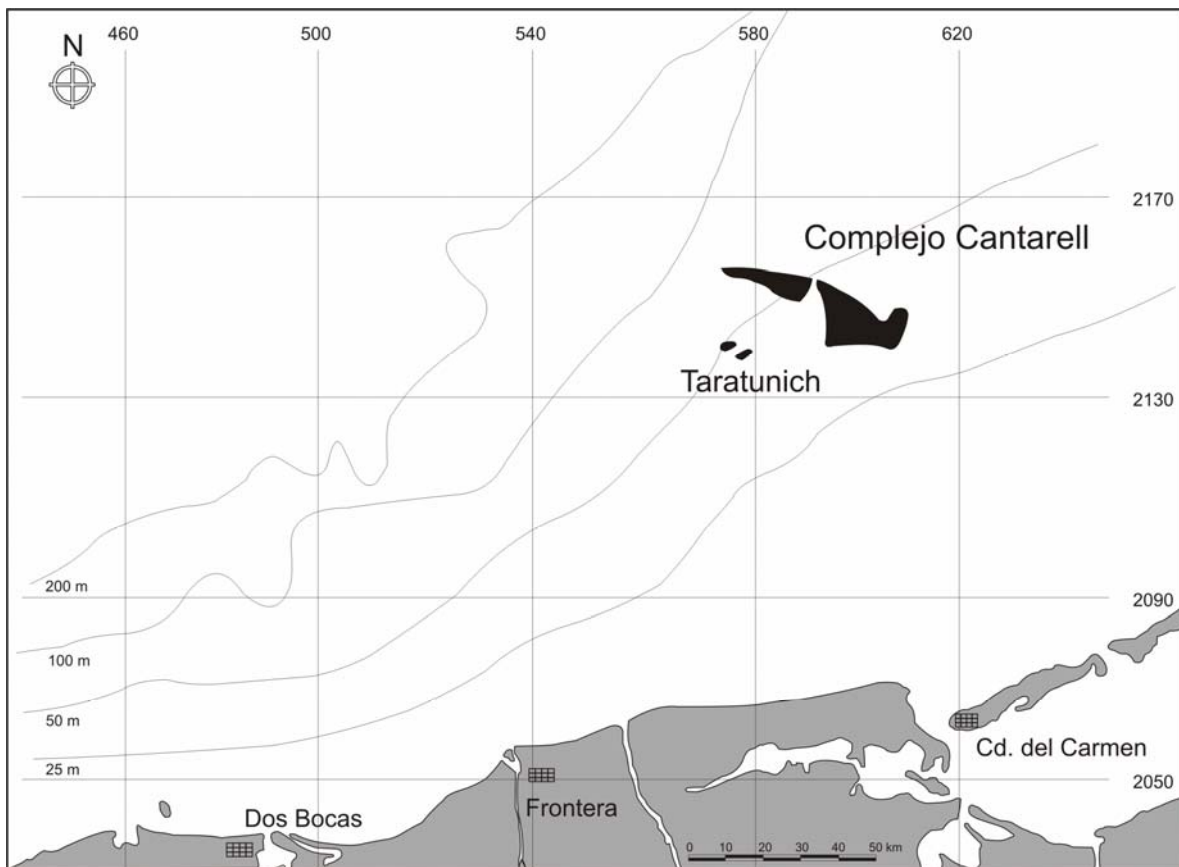


Figura 1. Mapa de localización de los campos Cantarell y Taratunich, de la Sonda de Campeche (Modificado de PEMEX, Exploración y Producción, 2000).

La Fm. El Porvenir aflora en las cercanías de La Zacatera, Oax., cerca de Matías Romero, en la región ístmica del sur de México (figura 2). Se trata de una secuencia compuesta por bancos carbonatados oolíticos de edad Kimmeridgiano, definida por Quezada (1975; en Meneses, 1977).

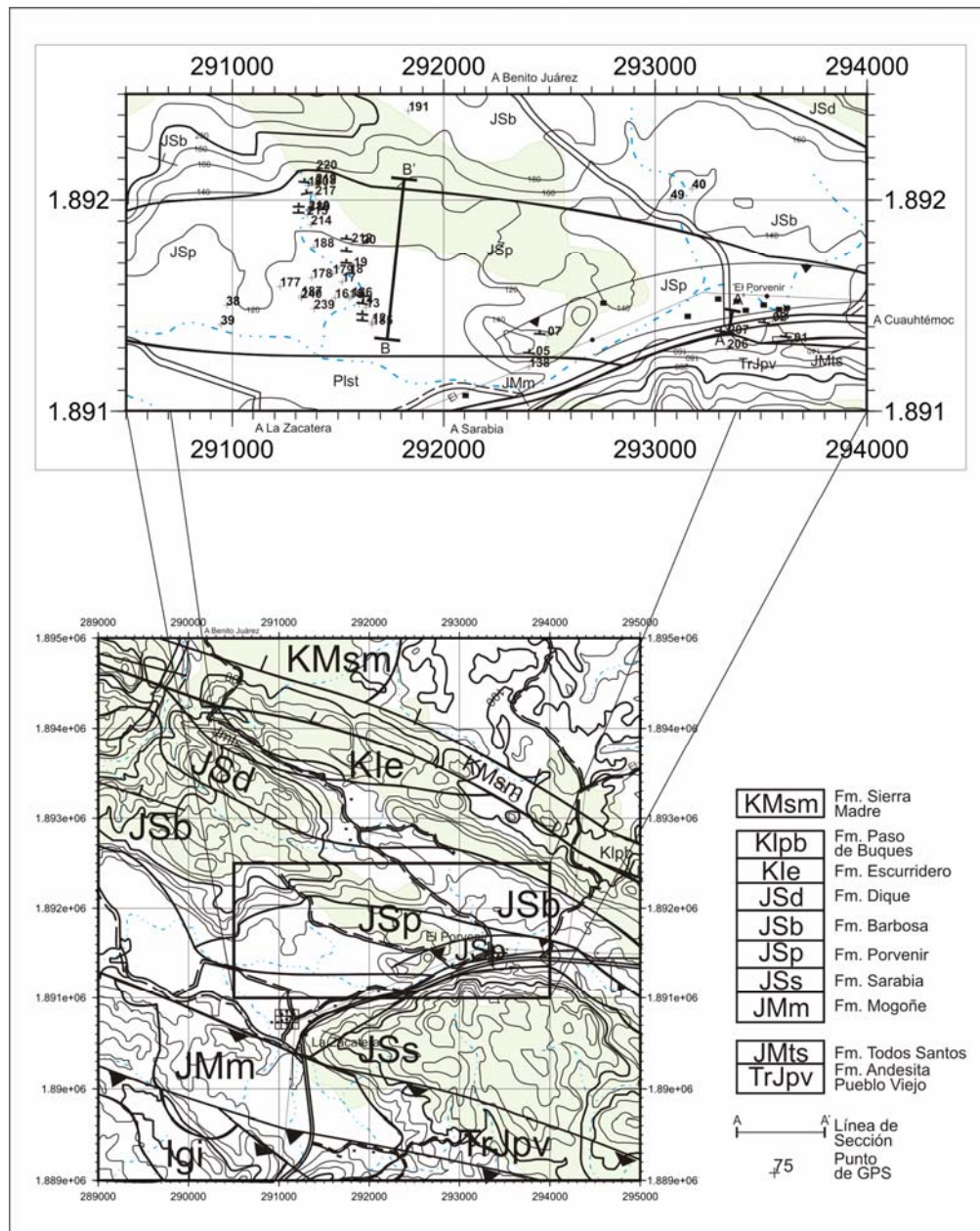


Figura 2. Mapa geológico y de localización de la Formación El Porvenir Modificado de Meneses (1977) y Quezada (1984).

## ESTRATIGRAFIA DEL AREA

### - Sonda de Campeche

La columna sedimentaria marina atravesada en los pozos de la Sonda de Campeche va del Jurásico Tardío al Terciario Tardío; tiene un espesor de más de 6000 m en la porción occidental del área. Los ambientes de depósito varían de plataforma a cuenca. De acuerdo con algunos autores, en la secuencia se presentan varias discordancias mayores, destacan la del Oligoceno-Mioceno y la que debe existir entre el Triásico-Jurásico Tardío (según Santiago y Martell, 1984).

Las rocas pre-Kimmeridgiano en la Sonda de Campeche (figura 3), han sido cortadas solamente en el pozo Chac-1, que ha penetrado rocas del Oxfordiano, constituidas en la parte superior por lutitas y escasas calizas depositadas en ambientes de cuenca o en plataforma externa profunda. En la porción más inferior del Oxfordiano se perforaron 50 m de areniscas de ambiente litoral (Meneses de Gyves, 1980).

Las rocas carbonatadas oolíticas del Kimmeridgiano (figura 3) tienen un espesor de 500 m; la porción superior del Kimmeridgiano es predominantemente arcilloso con algunas calizas oolíticas, mientras que la parte inferior es una secuencia de lutitas, dolomías y bentonitas, con algunas anhidritas intercaladas (Santiago, 1980). Por otra parte, Meneses de Gyves (1980), reporta que las porciones inferior y media del Kimmeridgiano consisten de dolomías con interestratificación de calizas y limolitas, en tanto que la parte superior está constituida por un potente cuerpo de dolomías y muy escasa limolita, asignado a las rocas kimeridgianas a un ambiente de plataforma. Posteriormente, Santiago y Martell (1984) interpretan que en la Sonda de Campeche se depositó una sección de carbonatos con alternancias de terrígenos finos, de ambientes someros que propiciaron condiciones favorables para generar el magnesio de las microdolomías que se tienen en esta secuencia sedimentaria, y que las condiciones de sedimentación más profunda del Kimmeridgiano, se localizan hacia el occidente de la plataforma mencionada.

Para el Titoniano, Meneses de Gyves (1980) interpreta una transgresión en los mares jurásicos y refiere que consiste esencialmente de sedimentos arcillosos oscuros con alto contenido de materia orgánica y escasas y delgadas intercalaciones de caliza (figura 3). Consistentemente, Santiago y Martell (1984) consideran que los ambientes marinos someros del Kimmeridgiano cambian a ambientes más profundos y de circulación restringida, depositándose arcillas y carbonatos con alto contenido de materia orgánica. Santiago (1980) reporta que la parte inferior del Titoniano consiste de calizas arcillosas que cambian hacia la cima a lutitas y unos cuantos lentes de arenisca.

**- La Fm. El Porvenir como un Análogo de Superficie de las Facies Oolíticas Dolomitizadas de la Sonda de Campeche**

La Fm. El Porvenir forma parte del Grupo Zacatera (figura 3) definido en el área del Istmo de Tehuantepec por Quezada (1975; en Meneses, 1977).

EDAD		SONDA DE CAMPECHE			LA ZACATERA (DEPRESION ISTMICA)			LA ZACATERA				
		MENESES DE GYVES (1980)	SANTIAGO (1980)	SANTIAGO, et al. (1984)	QUEZADA, 1975; en MENESES, 1977; MENESES, 1977; QUEZADA (1984)	ORTUÑO (1985)	MENESES (1990)	ESTE TRABAJO				
CRETACEO	SUPERIOR	APTIANO	Dolomías (~ 500 m)	Dolomías	Dolomías	GRUPO ZACATERA	PASO DE BUQUES	PASO DE BUQUES	PASO DE BUQUES			
		BARREMIANO					ESCURRIDERO			POTRERILLO	ESCURRIDERO	
		HAUTERIVIANO						DIQUE	POTRERILLO			DIQUE
		VALANGINIANO										
BERRIASIANO	EL PORVENIR	EL PORVENIR	EL PORVENIR									
JURASICO	SUPERIOR	TITONIANO	Roca Generadora (~ 90 m)	Lutitas	Lutitas y calizas arcillosas	GRUPO ZACATERA	SARABIA	MOGOÑE	SARABIA			
		KIMERIDGIANO	Calizas oolíticas y dolomías (~ 400 m)	Areniscas, lutitas, calizas oolíticas y dolomías	Lutitas, calizas oolíticas y dolomías		EL PORVENIR	EL PORVENIR	EL PORVENIR			
		OXFORDIANO	Lutitas y lutitas calcáreas (~ 280 m)	Lutitas, areniscas, calizas y lutitas calcáreas	Lutitas, calizas y lutitas calcáreas		MOGOÑE	MOGOÑE	MOGOÑE			
		CALOVIANO					TODOS SANTOS	TODOS SANTOS	TODOS SANTOS			
		BATONIANO					PUEBLO VIEJO	PUEBLO VIEJO	PUEBLO VIEJO			
	BAJOCIANO	PUEBLO VIEJO				PUEBLO VIEJO				PUEBLO VIEJO		
	ALENIANO										PUEBLO VIEJO	PUEBLO VIEJO
	INFERIOR	PUEBLO VIEJO	PUEBLO VIEJO	PUEBLO VIEJO								
	TRIASICO SUPERIOR											
	PRE-MESOZOICO				GRANITOS, GNEISSIS Y GRANODIORITAS	PALEOZOICO IGNEO Y METAMORFICO	ROCAS IGNEAS Y METAMORFICAS	GRANITOS, GRANODIORITAS				

Figura 3. Tabla estratigráfica de la Formación El Porvenir y la Sonda de Campeche. Se muestra la secuencia sedimentaria del Jurásico Superior en la Sonda de Campeche y en la Depresión Istmica (La Zacatera, Oaxaca). En este trabajo se utiliza la propuesta de Quezada, 1984.

- Rocas Pre-Mesozoicas y Rocas Continentales del Mesozoico Temprano

Las rocas más antiguas reportadas cercanas al área de estudio son rocas metamórficas gnéisicas del Precámbrico y rocas metamórficas esquistosas del Paleozoico Temprano en contacto tectónico. Posteriormente ocurrieron eventos magmáticos en el Paleozoico Tardío que emplazaron rocas graníticas en las rocas metamórficas mencionadas (Murillo, 1994). En el Triásico Tardío-Jurásico Temprano se formaron rocas andesíticas denominadas Andesita Pueblo Viejo (Quezada, 1984). Durante el Jurásico Medio ocurren eventos de erosión y de sedimentación continental que da origen a la formación de lechos rojos (Quezada, 1984) que han sido correlacionados con los depósitos del mismo tipo de la Formación Todos Santos en Guatemala.

- Rocas Mesozoicas Marinas

Durante el Caloviano y Oxfordiano inicia la transgresión marina que deposita las facies de wackestone carbonoso definidas y descritas por Quezada (1975; en Meneses, 1977) como las formaciones Mogoñé (Caloviano) y Sarabia (Oxfordiano). Por otro lado, Ortuño (1985) las agrupa como Fm. Mogoñé al no encontrar diferencias entre ellas (figura 3). El ambiente de depósito de estas rocas fue interpretado como de laguna marginal (Quezada, 1975; en Meneses, 1977; Quezada, 1984), de pantano (Meneses, 1977) y submarea somera (Ortuño, 1985).

- Formación El Porvenir

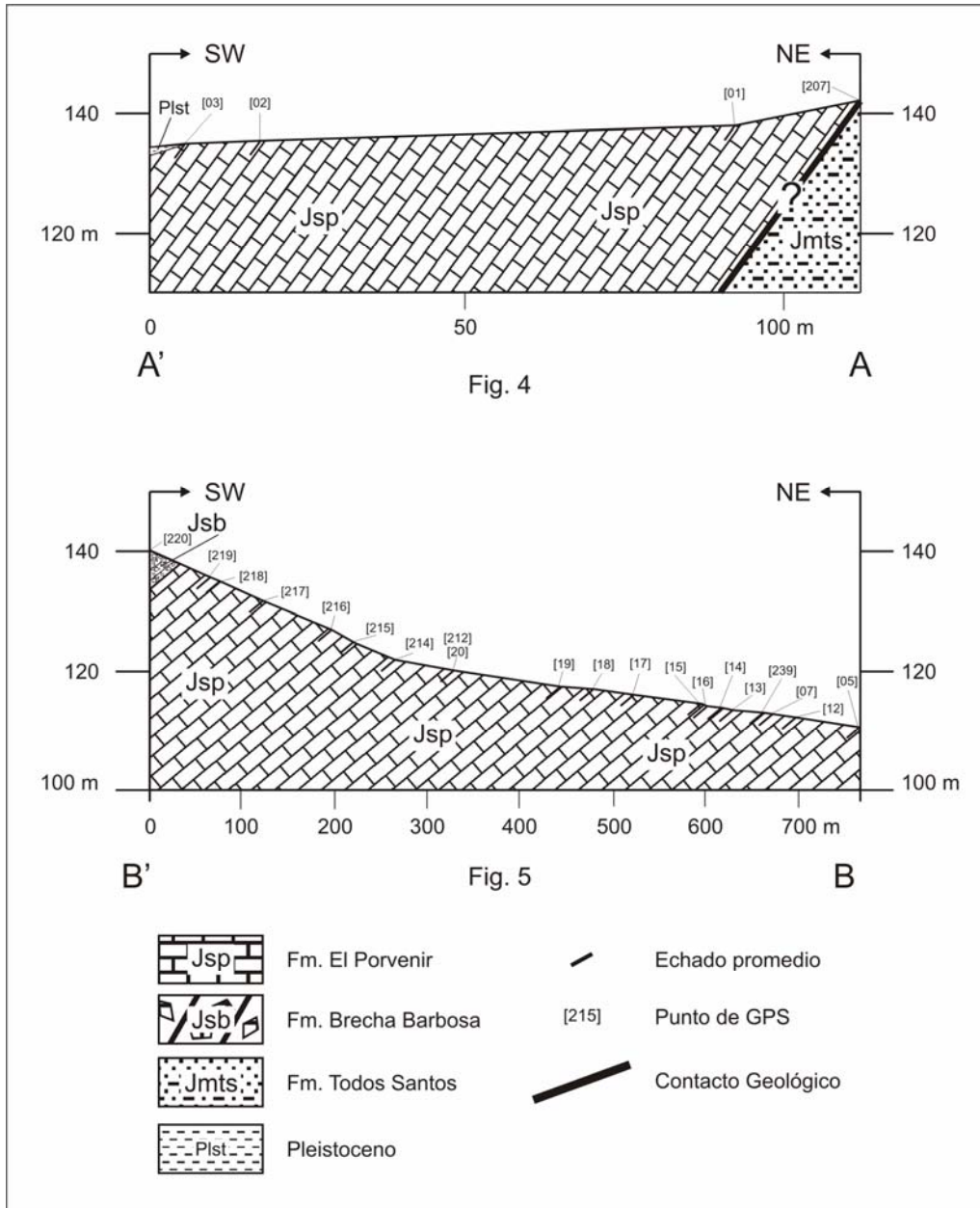
El Kimmeridgiano está representado en la zona de La Zacatera por la Formación El Porvenir, definida por Meneses (1977); originalmente esta secuencia fue definida como Fm. Zacatera por Quezada (1975; en Meneses, 1977), quien describió un espesor de 615 m de grainstone de oncolitos y oolitas principalmente, color gris, con exoclastos de roca ígnea intrusiva y extrusiva dispuestos en estratos bien definidos de 20-200 cm de espesor; en un nivel medio y superior reporta capas de 5 y 10 cm de mudstone a wackestone de rhaxelas y sacocómidos, así como packstone de pellets (Meneses, 1977; Quezada, 1984).

Meneses (1977) describe a la Fm. El Porvenir como una alternancia rítmica de grainstone oolítico y mudstone, y en la parte media reporta un paquete de mudstone-packstone. Ortuño (1985) menciona facies de ooesparitas e intramicritas areno-conglomeráticas, y biomicritas e intraesparitas arenosas en la parte superior de esta formación. La edad de la Formación El Porvenir es Kimmeridgiano-Titoniano Inferior, de acuerdo con la presencia de fauna perteneciente a las zonas de *Nautiloculina oolithica*, *Lenticulina*, *Cadosina* y *Saccocoma* (Meneses, 1977).

De acuerdo con Meneses (1977) y Quezada (1984), durante el Kimmeridgiano se estableció, en la región del Istmo de Tehuantepec, una plataforma somera cuyos depósitos sedimentarios indican etapas de alta y baja energía; las rocas de la zona estudiada se ubicaban en las cercanías de la línea de costa, evidenciado por un alto influjo de material terrígeno. Por otro lado, Ortuño (1985) interpreta para esta época una regresión parcial hacia el este, y el desarrollo de una sedimentación marina en ambiente de submarea somera de libre circulación, en plataforma interna, puntualizando que el ambiente se caracterizó por ser de energía alta a moderada, donde se depositaron sedimentos calcáreos con un importante aporte terrígeno.

En este trabajo, se estudiaron y muestrearon dos secciones para formar una columna compuesta de la Formación El Porvenir; la sección A-A' inicia en un punto al sur del poblado El Porvenir localizado en las coordenadas 1891328 y 293657 y termina en la carretera a Cuauhtémoc cerca del cruce con la brecha a B. Juárez (figura 2). En esta localidad la base de la Fm. El Porvenir está en contacto con un conglomerado polimíctico de la Formación Todos Santos (figura 4). El contacto se encuentra cubierto, pero se infiere que éste puede ser erosivo debido a la diferencia en edad entre ambas formaciones y además los echados en ambas son muy semejantes, lo que sugiere una discordancia erosional. La sección B-B' inicia en un punto localizado a unos 1400 m al oeste de El Porvenir, cuyas coordenadas son 1891267 y 292437, y termina sobre un arroyo (orientado N-S)

localizado al noreste del mismo poblado (figuras 2 y 5), donde la Formación El Porvenir subyace a la Formación Brecha Barbosa; este contacto también se encuentra cubierto. El contacto entre estas dos formaciones en esa localidad ha sido considerado como concordante por Meneses (1977) y Quezada (1984), a pesar de que reconocen que no aflora (posiblemente esté cubierto).



Figuras 4 y 5. Secciones geológicas medidas en la Formación El Porvenir.



Con base en la columna compuesta medida, la Formación El Porvenir tiene un espesor de 680 m (figura 7); está constituida por grainstone oolíticos con fuerte influencia terrígena, que con frecuencia se concentra en horizontes de milímetros a varios centímetros de espesor. Los clastos terrígenos están constituidos por fragmentos granodioríticos, andesíticos y limolíticos. De acuerdo con los diversos autores que han estudiado esta secuencia (Quezada, 1975; en Meneses, 1977; Meneses, 1977 y Ortuño, 1985) estos clastos terrígenos tienen como fuente de aporte un intrusivo granodiorítico del Paleozoico, la Andesita Pueblo Viejo del Triásico y la Fm. Todos Santos del Jurásico Medio. Los grainstone oolíticos pasan con relativa frecuencia a packstone y packstone-grainstone, igualmente oolíticos. Asimismo, esta formación está constituida escasamente por wackestone de radiolarios y calciesferas, con menores contenidos de bioclastos de grano muy fino. En el Anexo I se presenta la descripción detallada de la columna compuesta medida en la Fm. El Porvenir.

En el Titoniano se depositaron las formaciones Brecha Barbosa y Dique. La Fm. Brecha Barbosa consiste de 540 m de brechas con estructura masiva formadas en un 90% por fragmentos de “wackestone carbonoso manganesífero de color gris con tonalidades oscuras”, cuya fuente de suministro la constituyen afloramientos de las formaciones Mogoñé y Sarabia; en forma subordinada, pero abundante, se tienen clastos de roca ígnea intrusiva y extrusiva, de cuarzo y de areniscas; la matriz es areno-arcillosa y el cementante es calcáreo (Quezada, 1975; en Meneses, 1977).

La Fm. Dique está constituida por 385 m de areniscas calcáreas dolomitizadas que gradan hacia la cima a “calizas arenosas”, a “wackestone carbonoso manganesífero” y margas (Quezada, 1975; en Meneses, 1977). Ortuño (1985) menciona que para el Titoniano Tardío cambian las condiciones de depósito a submarea profunda con aporte de terrígenos, arenas medias a brechas calcáreo-terrígenas; en un ambiente de energía moderada y baja, por debajo de la acción del oleaje, lo que pudo preservar la materia orgánica (“de origen continental”) y el carácter laminar de los depósitos.

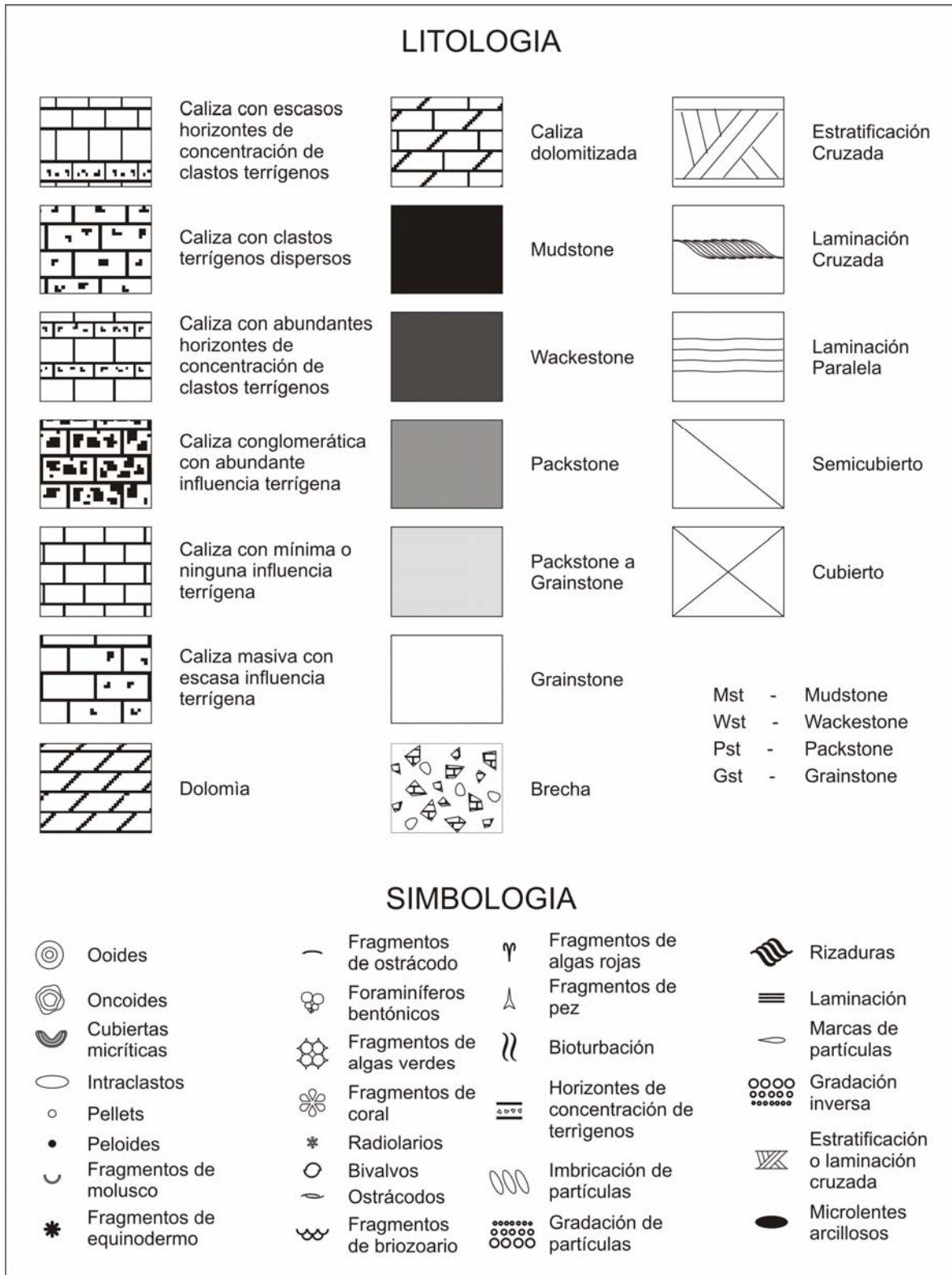


Figura 6. Leyenda para las columnas estratigráficas.

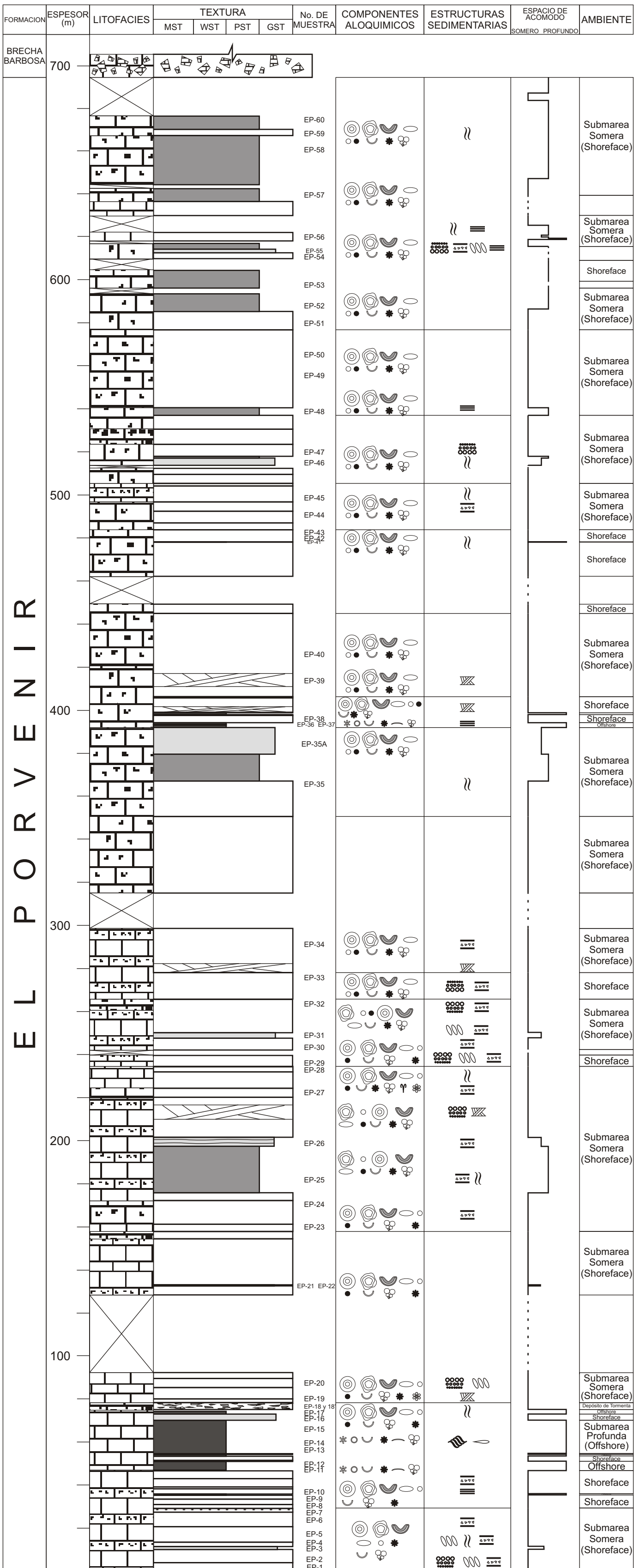


Figura 7. Columna estratigráfica de la Fm. El Porvenir.

## CAPITULO II. ANALISIS DE FACIES Y DIAGENESIS DE LA FORMACION EL PORVENIR

El estudio sedimentológico de la Fm. El Porvenir está basado en el concepto de análisis de facies de Walker (1984), dentro del cual se establece que el análisis de un sistema sedimentario debe partir del reconocimiento y determinación de las facies que lo constituyen, su descripción y caracterización, para definir las posibles asociaciones y sucesiones de las facies sedimentarias, y mediante la interpretación de estas relaciones, proponer un modelo de facies que ofrezca una explicación satisfactoria para el sistema sedimentario estudiado.

En seguida se presenta una descripción de las facies sedimentarias que constituyen a la Fm. El Porvenir.

### FACIES DE LA FORMACION EL PORVENIR

En el presente trabajo se divide a la Fm. El Porvenir en cuatro facies sedimentarias (tabla 1), de acuerdo con su composición litológica y estructuras sedimentarias: 1) facies de grainstone oolítico; 2) facies de packstone oolítico; y 3) facies de wackestone de radiolarios. Las dos primeras facies son muy semejantes en afloramiento, pero el estudio petrográfico permite separarlas con base en su composición.

**Tabla 1.** Características generales de las facies que constituyen a la Fm. El Porvenir (ver texto).

FACIES	LITOLOGIA	ESTRUCTURAS
Grainstone oolítico	Grainstone oolítico con escasa a abundante influencia terrígena, oncolitos y pellets comunes, escasos intraclastos y bioclastos; además de <i>envolturas de micrita</i> y ocasionalmente <i>lumps</i> .	Estratificación cruzada tabular de alto ángulo, imbricación y gradación inversa discretas; laminaciones u horizontes terrígenos y escasa bioturbación.
Packstone oolítico	Packstone oolítico, con oncolitos, pellets, <i>envolturas de micrita</i> y escasos lumps. Presenta influencia terrígena muy escasa. Los aloquímicos se encuentran micritizados.	Estratificación masiva; imbricación y gradación normal, escasa bioturbación (a nivel petrográfico).
Wackestone de radiolarios	Wackestone de radiolarios, calciesferas, fragmentos de ostrácodo, de equinodermo y de molusco y escasos foraminíferos bentónicos (hialinos y aglutinados muy pequeños). Contiene abundante materia orgánica. Raramente presenta influencia terrígena muy escasa.	Estratificación delgada, 10-12 cm de espesor en promedio, ocasionalmente en paquetes de hasta 8 m de espesor. Laminaciones peletíferas y de materia orgánica, escasas.

### 1) Facies de Grainstone Oolítico

#### - Litología y estructuras sedimentarias

La facies de grainstone oolítico está compuesta de capas gruesas de grainstone de oolitas gris claro a intermedio ocasionalmente con tonos rosados de intemperismo y gris intermedio al fresco; contienen material terrígeno disperso (gravas finas) y concentrado en horizontes delgados de 5-10 cm de espesor, aproximadamente (gravas finas a medias; ver figura 8A). El material terrígeno está mal clasificado y es anguloso a subanguloso. Frecuentemente esta facies presenta una estructura masiva, y el material terrígeno que contiene se encuentra dispuesto en una fábrica caótica (figura 8B). Sin embargo, en los horizontes de concentración de terrígenos se aprecia imbricación discreta de partículas y gradación inversa (figura 8C). Las orientaciones de paleocorrientes medidas en las partículas imbricadas, muestra una progradación hacia el norte. Además, en algunas partes (figura 7) la facies presenta estratificación cruzada de alto ángulo y

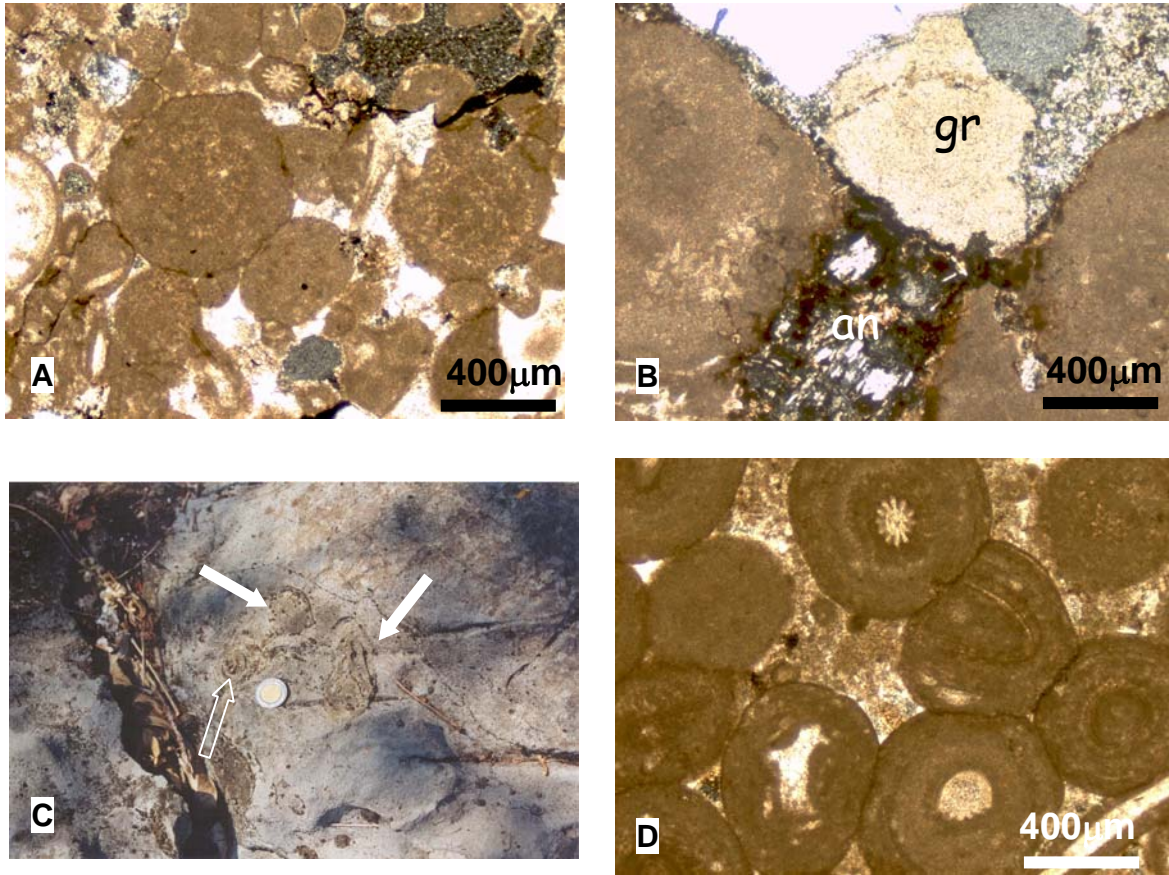
ocasionalmente laminación cruzada (figura 8D), que guardan orientaciones de progradación igualmente hacia el norte.

#### - Petrografía

Esta facies está compuesta de grainstone de oolitas, con oncolitos, pellets, escasos clastos calcáreos y bioclastos, además de una influencia terrígena de escasa a abundante (figura 9A). Las oolitas tienen tamaños que van de 0.22 mm a 0.75 mm de diámetro; los oncolitos tienen diámetros de hasta 3.3 mm; ocasionalmente se observan *lumps* (de hasta 3 mm de diámetro); en general, los granos envueltos (oolitas y oncolitos) tienen formas circulares y elipsoidales. Los núcleos de estos granos están constituidos por fragmentos de molusco, de equinodermo y de algas, aunque en ocasiones no se observa el núcleo. Las oolitas de esta facies presentan microestructura radial-concéntrica; Hird y Tucker (1988) consideran que ésta es típica de oolitas calcíticas; esta interpretación es acorde con el patrón de precipitados marinos (Sandberg, 1983; en Tucker y Wright, 1990), según el cual durante el Jurásico la composición de los sedimentos oolíticos fue calcítica a nivel global. Los clastos calcáreos presentes en esta facies consisten de packstone-grainstone peletífero de grano fino, con frecuentes peloides y fragmentos de equinodermo y de molusco, escasos foraminíferos bentónicos y radiolarios, pequeños oncolitos (alrededor de 1.25 mm de diámetro en promedio), oolitas (0.75 mm de diámetro) y material terrígeno (limos muy finos a arenas finas, 0.05-0.37 mm de diámetro en promedio). Los bioclastos presentes en esta facies están constituidos por fragmentos y espinas de equinodermo, fragmentos de molusco (posiblemente rudistas y otros pelecípodos), además de algunos foraminíferos bentónicos (pequeños textuláridos), fragmentos de algas rojas y verdes, ocasionalmente de briozoario y de corales. Los grainstone presentan escasa bioturbación con relleno de packstone-grainstone peletífero de grano muy fino.



**Figura 8.** Estructuras sedimentarias presentes en los grainstone oolíticos de la Fm. El Porvenir. **A)** Grainstone oolítico con alta influencia terrígena, se aprecia la distribución de los clastos en horizontes delgados. **B)** Aspecto de la fábrica y la granulometría que alcanzan los clastos terrígenos en esta facies, dando en ocasiones un carácter conglomerático a estas rocas. **C)** Grainstone oolítico, con gradación inversa muy discreta en algunos horizontes, estratificación cruzada de ángulo alto y superficies erosivas. **D)** Estratificación cruzada de alto ángulo e imbricación de partículas indicando paleodirecciones de corrientes hacia el NW.



**Figura 9.** Facies de grainstone y packstone oolíticos de la Fm. El porvenir. **A)** y **B)**: Facies de grainstone oolíticos. **C)** y **D)**: Facies de packstone oolíticos. **A)** Aspecto de los grainstone oolíticos, los núcleos de las oolitas están constituidos por fragmentos de molusco, de equinodermo y otros bioclastos; en ocasiones las oolitas no muestran núcleo (Muestra EP-19, XN). **B)** Grainstone oolítico con clastos de andesita (an) y de (gr) granodiorita (Muestra EP-5, XN). **C)** Macrofauna presente en la porción superior de la facies de packstone de oolitas; se muestran dos gasterópodos (flechas sólidas) y un estromatolito (flecha abierta). **D)** Packstone de oolitas muy semejantes a los grainstone oolíticos (Muestra EP-25, XN).

- Procedencia de los clastos terrígenos

Los clastos terrígenos que influenciaron a esta facies están constituidos por fragmentos andesíticos, granodioríticos y raramente de areniscas y limolitas. El contenido y la granulometría de estos clastos son muy variables, llegando a representar desde <3% hasta 10% en algunas muestras, con tamaño de grano desde 0.05 mm hasta 1.6 cm (limos muy finos a guijarros finos); son de carácter



anguloso y algunas veces subanguloso (figura 9B); esta característica, además del gran tamaño de algunos fragmentos volcánicos, ígneos y de limolitas, puede reflejar una fuente muy cercana al área de depósito. Tomando en cuenta que muy cerca del área de estudio afloran un intrusivo granodiorítico, la Andesita Pueblo Viejo y la Fm. Todos Santos, distintos autores en trabajos previos han considerado que estas rocas fueron la fuente del aporte de material terrígeno hacia la Fm. El Porvenir (Quezada, 1975; en Meneses, 1977; Meneses, 1977 y Ortuño y Ruiz, 1985).

## 2) Facies de Packstone Oolítico

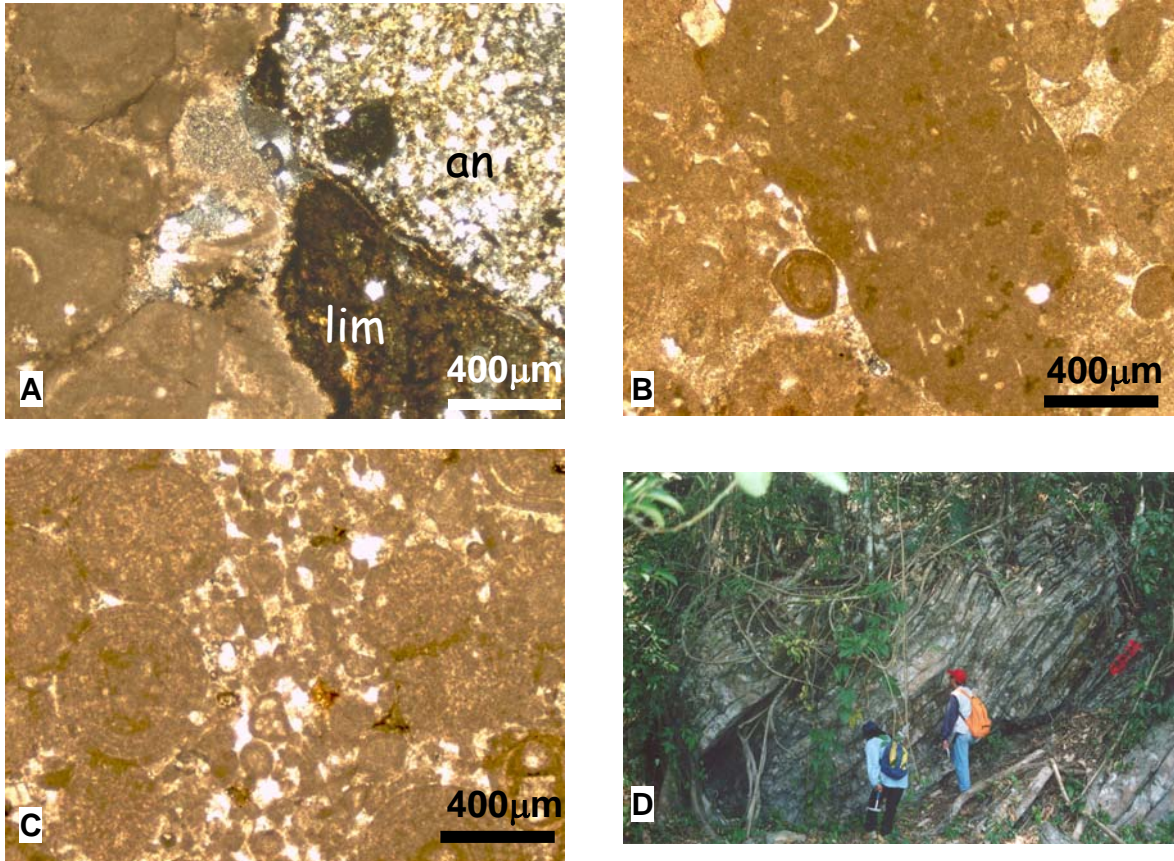
### - Litología y estructuras sedimentarias

Esta facies consiste de packstone de oolitas, de estratificación media a masiva, son comunes los horizontes de concentración de material terrígeno (de arenas a gravas medias), de hasta 10 cm de espesor, y ocasionalmente presenta imbricación de partículas y gradación normal. La imbricación de partículas es discreta, pero muestra orientaciones de paleocorrientes hacia el norte. La escasa presencia de macrofauna en la Fm. El Porvenir se concentra básicamente en esta facies, hacia la cima de la formación, donde se observa la presencia relativamente frecuente de gasterópodos y oncolitos (figura 9C). Los packstone oolíticos son muy escasos en la porción inferior de la Fm. El Porvenir, pero se vuelven frecuentes en la porción media, y más aún en la parte superior (figura 7). Esta facies es semejante a la facies de grainstone de oolitas descrita anteriormente, pero contiene matriz (figura 9D).

### - Petrografía

La facies se caracteriza petrográficamente por contener oolitas micritizadas con tamaños de 0.5 a 1.675 mm de diámetro, además de presentar comúnmente pellets y bioclastos (fragmentos de molusco y de equinodermo) con *envolturas de micrita*, algunos oncolitos y escasos *lumps*. Los aloquímicos se encuentran micritizados. La influencia terrígena en esta facies es generalmente menor a 5% y contiene clastos andesíticos, granodioríticos y limolíticos, con una granulometría

de arenas medias a gránulos (0.375-3 mm de diámetro, figura 10A). Raramente contiene clastos de wackestone de radiolarios y bioclastos de grano muy fino, pero sin laminaciones peletíferas (figura 10B).



**Figura 10.** Aspectos de las facies de packstone oolítico y wackestone de radiolarios. **A)** Packstone de oolitas, con influencia terrígena; se muestran clastos de andesita (an) y de limolita (lim) (Muestra EP-35, XN). **B)** Packstone oolítico, se muestra un clasto de wackestone (al centro) de radiolarios y calciesferas de la misma Fm. El Porvenir, evidenciando retrabajo de sedimentos durante el depósito (Muestra EP-46, XN). **C)** Intercalaciones de packstone-grainstone (izquierda) con grainstone, o de packstone-grainstone de grano fino (centro) con packstone (derecha) (Muestra EP-26, XN). **D)** Wackestone laminado en capas delgadas de aproximadamente 10 cm ligeramente plegadas, presentes en la porción inferior de la Fm. El Porvenir.

Esta facies presenta escasas intercalaciones muy delgadas (laminaciones u horizontes delgados de unos cuantos centímetros de espesor) de packstone-grainstone con el grainstone, o de packstone-grainstone con el wackestone, o de packstone-grainstone con packstone (figuras 7 y 10C); estos cambios de microfacies reflejan breves períodos de alternancia en el depósito de horizontes ligeramente más lodosos. Presenta escasa bioturbación con relleno de packstone-grainstone fino peletífero. A pesar del contenido de matriz, en el espacio poroso se observan dos etapas de cementación, aunque este proceso no fue muy abundante, dada la escasa disponibilidad del espacio poroso por la presencia de matriz. Presenta un mayor desarrollo de microestilolitas, en comparación con los grainstone descritos. La compactación fue intensa, provocando pérdida de material en muchos granos, como efecto de procesos disolución por presión.

### 3) Facies de Wackestone de Radiolarios

#### - Litología y estructuras sedimentarias

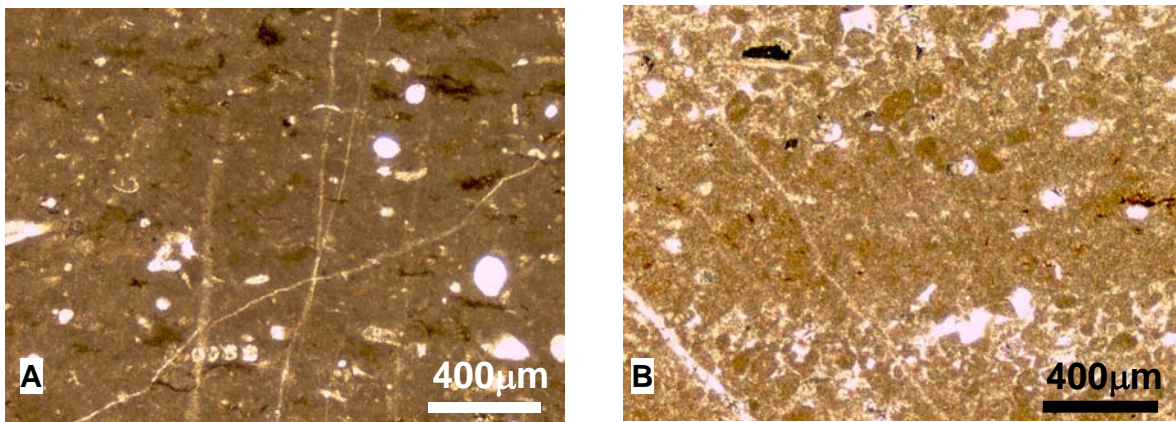
Esta facies aflora en la porción inferior y media de la Fm. El Porvenir; está conformada por intercalaciones delgadas de wackestone gris claro de intemperismo y gris oscuro al fresco, con laminaciones claras y sin influencia terrígena aparente, en estratos delgados desde 5 cm y hasta 15 cm de espesor (llegan a formar paquetes de hasta 10-15 m de espesor; figura 7); las laminaciones son de 2-3 cm de espesor. Escasamente se encuentra en esta facies capas muy delgadas del wackestone descrito, de 5 cm de espesor, sin laminaciones. Ocasionalmente, hacia la parte media baja de la formación, los wackestone presentan escasos horizontes delgados de concentración de terrígenos (arenas gruesas a gravas muy finas), además de rizaduras (observadas en las superficies de estratificación) y marcas de partículas (figura 10D), sin embargo, estas estructuras se encuentran parcialmente enmascaradas por la disolución.

---

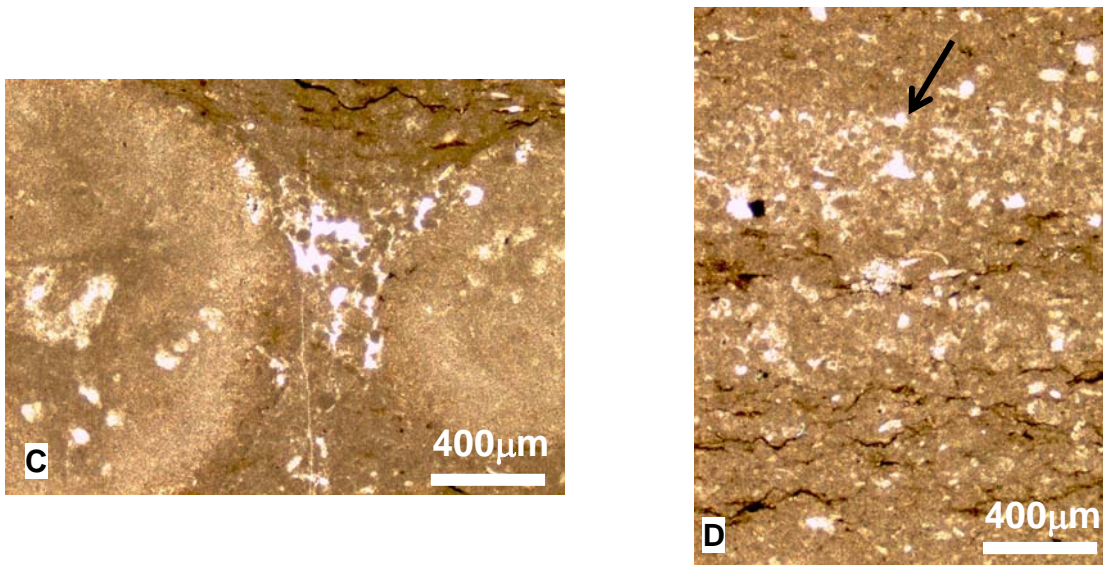
---

- Petrografía

Petrográficamente la facies está constituida por wackestone de radiolarios con abundantes fragmentos de ostrácodos, calciesferas, fragmentos muy pequeños de equinodermo y de molusco, y escasos foraminíferos bentónicos (hialinos y aglutinados muy pequeños, ver figura 11A). El wackestone es de grano muy fino y presenta laminaciones frecuentes (raramente abundantes). Contiene comúnmente materia orgánica en pequeños manchones y en microestilolitas poco desarrolladas. Raramente presenta influencia terrígena muy escasa, con cuarzo detrítico de 0.075 mm de diámetro, y en ciertas ocasiones clastos andesíticos de hasta 8 mm de diámetro. Los radiolarios son espumeláridos principalmente, pero también se encuentran frecuentemente naseláridos. Los radiolarios están calcitizados. Ocasionalmente se encuentran pequeños pelecípodos y ostrácodos completos.



**Figura 11.** Depósitos transgresivos de la Fm. El Porvenir. **A)** Wackestone de radiolarios y calciesferas, con fragmentos de ostrácodo, de equinodermo y de molusco, además de foraminíferos bentónicos. (Muestra EP-11, XN). **B)** Wackestone de radiolarios y calciesferas, con laminaciones de pellets y foraminíferos bentónicos (extremos superior e inferior de la imagen) (Muestra EP-14, XN).



**Figura 11** (*Continuación*). Depósitos transgresivos de la Fm. El Porvenir. **C)** Detalle que muestra oncolitos en las laminaciones peletíferas presentes en los wackestone de radiolarios y calciesferas (Muestra EP-10, XN). **D)** Wackestone de radiolarios y calciesferas con abundantes laminaciones peletíferas (flecha) y de materia orgánica en microestilolitas (Muestra EP-37, XN).

Las laminaciones (figura 11B) son horizontes muy delgados (0.37-1 mm de espesor) de pellets y pequeños foraminíferos bentónicos (aglutinados principalmente); en ocasiones las laminaciones contienen oncolitos y oolitas, así como *lumps* de hasta 2.125 mm de diámetro (figura 11C); además presentan laminaciones de concentración de materia orgánica en microestilolitas poco desarrolladas. La porosidad intergranular en los horizontes peletíferos está rellena por cemento de calcita micrítica (posiblemente) y un cemento posterior de espatita en cristales muy pequeños. En algunas muestras de estos wackestone las laminaciones peletíferas son más abundantes (figura 11D), reflejando una ciclicidad de alta frecuencia. Ciertas laminaciones representan horizontes ligeramente más arcillosos y muy delgados.

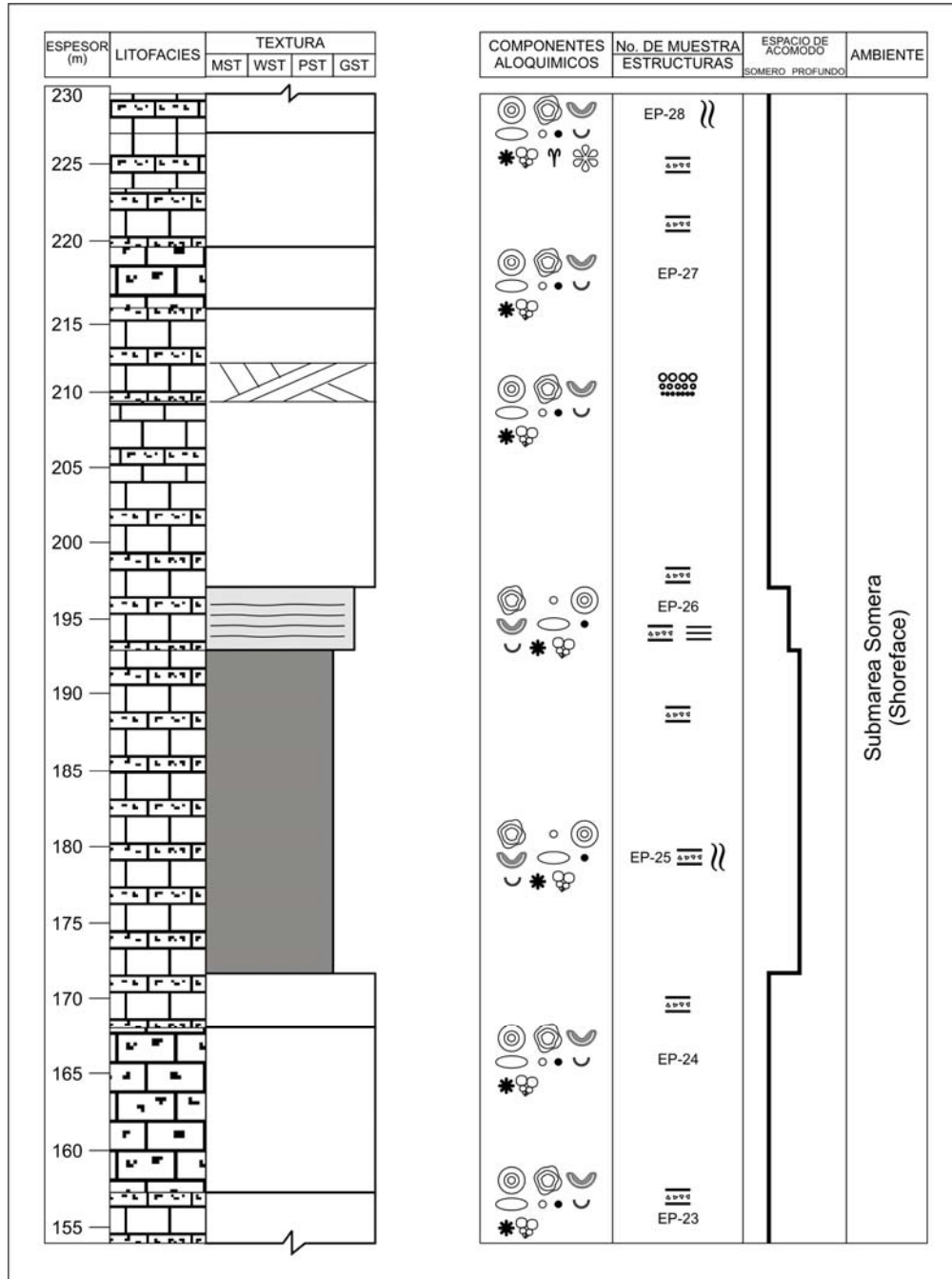
## ASOCIACION DE FACIES

La Fm. El Porvenir está conformada por tres facies: 1) facies de grainstone oolíticos, 2) facies de packstone oolíticos, y 3) facies de wackestone de radiolarios. De acuerdo con las características composicionales, texturales y las estructuras sedimentarias que presenta cada una de ellas, se considera que los depósitos de oolitas constituyen una asociación de facies oolíticas, mientras que las facies de wackestone de radiolarios puede considerarse, para fines prácticos, como una asociación de facies de submarea profunda (*offshore*), representando periodos transgresivos dentro del depósito de la Fm. El porvenir.

La asociación de facies oolíticas consiste de grainstone y packstone oolíticos y está caracterizada por una estratificación media a masiva, comúnmente presentando horizontes de concentración de terrígenos, estratificación cruzada recta, imbricación de partículas y gradación inversa, ocasionalmente normal. Estas características reflejan condiciones de alta energía durante el depósito de estas facies. Esta asociación de facies presenta ocasionalmente un carácter relativamente cíclico (figura 12), pasando de packstone de oolitas, con bioturbación y escasos oncolitos, a un packstone-grainstone con laminaciones y finalmente a un grainstone oolítico con estratificación cruzada, reflejando una cierta progradación de los depósitos de alta energía. Sin embargo, el comportamiento cíclico de esta asociación de facies es esporádico en la formación. Asimismo durante el depósito de esta asociación de facies hubo un aporte de terrígenos continuo, cuya abundancia en ocasiones originó el carácter conglomerático de estas rocas.

## SUCESION DE FACIES

En la parte baja de la formación, se aprecian 4 ciclos sedimentarios completos y uno incompleto, son asimétricos y presentan distintos espesores (figura 13). Estos ciclos están representados por wackestone laminados que pasan al packstone y grainstone de estratificación masiva (figuras 14A y 10D); el ciclo incompleto se encuentra en una posición estratigráfica más alta, y está interrumpido por un grainstone oolítico de textura conglomerática (figura 13).



**Figura 12.** Columna estratigráfica a detalle mostrando la asociación de facies oolíticas (shoreface) en la porción media-inferior de la Fm. El Porvenir.

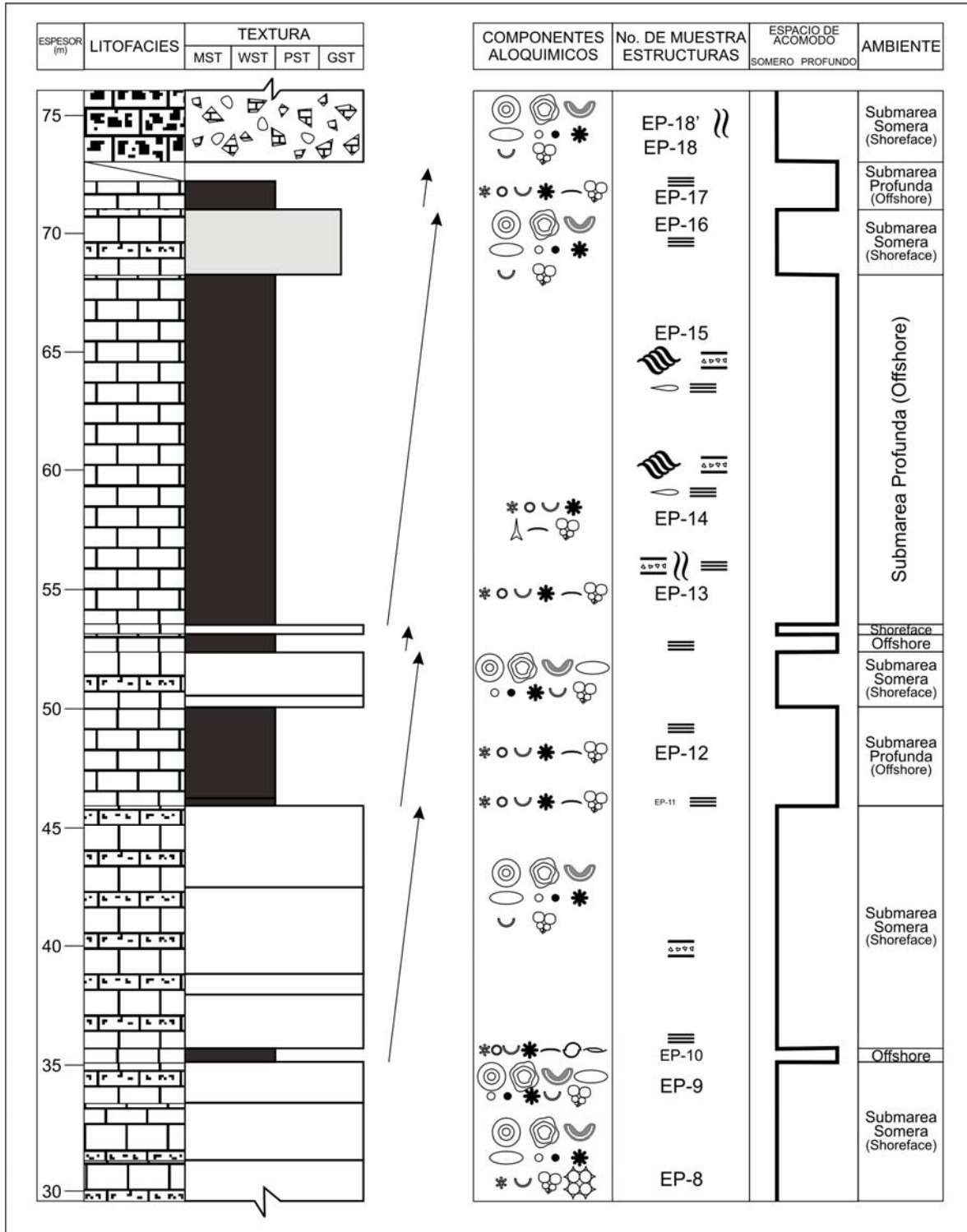
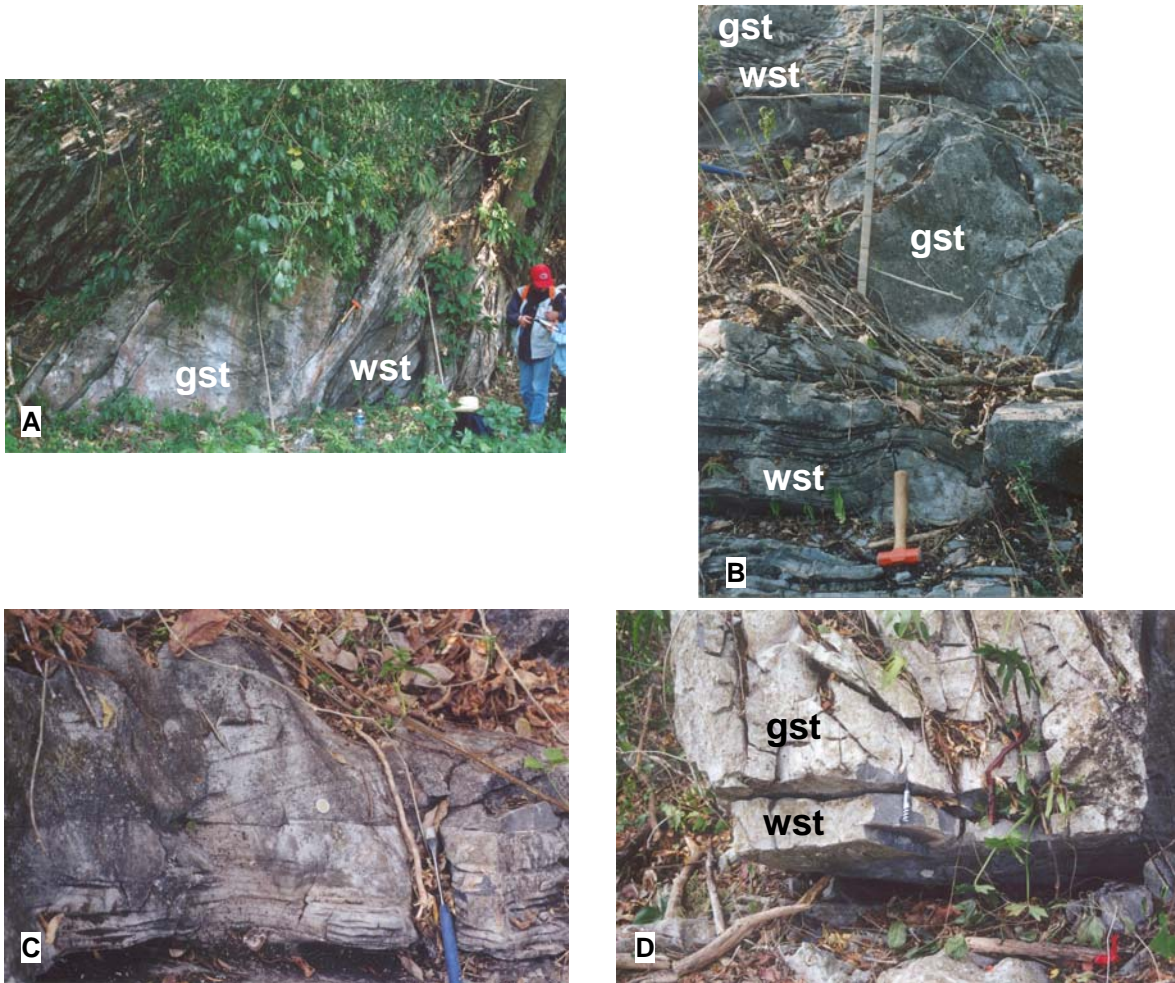


Figura 13. Columna estratigráfica a detalle mostrando la sucesión de facies observada en la porción inferior de la Fm. El Porvenir.





**Figura 14.** Sucesión de facies en la Fm. El Porvenir. **A)** Ciclo que inicia con wackestone laminado de radiolarios y calciesferas en capas delgadas (wst), que pasa a grainstone oolítico de estratificación masiva (gst). **B)** Sucesión de facies en la parte media baja de la Fm. El Porvenir. La imagen muestra dos ciclos: en la parte inferior el wackestone de radiolarios en capas delgadas pasa al grainstone oolítico (centro); hacia la parte superior se aprecia parcialmente un segundo ciclo (de wackestone a grainstone). **C)** Estratificación cruzada de alto ángulo en el ciclo superior de la foto B (facies de grainstone oolítico). **D)** Wackestone de radiolarios que pasa al grainstone oolítico en la porción media superior de la formación (figura 10).

En la parte media baja de la formación, se observan dos ciclos completos (figura 14B y C), el paso del wackestone de radiolarios al grainstone de oolitas es abrupto, pero no se observó evidencia alguna de que esta sucesión haya provocado erosión en la cima del wackestone. La misma sucesión de facies se aprecia nuevamente en la porción media superior de la formación, donde el

wackestone de radiolarios pasa nuevamente al grainstone oolítico (figura 14D), sin embargo no se vuelve a presentar en el resto de la secuencia.

## MODELO E INTERPRETACION DE FACIES

### - INTERPRETACION DE FACIES

#### - Facies de Grainstone y Packstone Oolíticos

Las características de las estructuras sedimentarias, la litología y la petrografía de posibles bancos carbonatados conformados por grainstone y packstone oolíticos, pudieran representar condiciones de: 1) depósitos de tormenta, 2) depósitos de margen de plataforma; o bien, 3) depósitos de *shoreface*.

Los depósitos de tormenta se caracterizan por la presencia de estratificación cruzada de tipo *hummocky*, gradación normal en packstone-grainstone bioclásticos, bases con rasgos de socavación por corrientes, estratificación cruzada ondulada, marcas de corrientes, coquinas, etc. (Ahr, 1985; Burchette y Wright, 1992; Jones y Desrochers, 1992; Bádenas y Aurell, 2001).

Los depósitos oolíticos de margen de plataforma no difieren texturalmente de otros depósitos oolíticos acumulados en zonas distintas de una plataforma (Tucker y Wright, 1990), sin embargo, un margen de plataforma representa condiciones de muy alta energía, por lo que los depósitos oolíticos acumulados en tal ambiente corresponderían a texturas grainstone más que a packstone.

Los depósitos de *shoreface* se caracterizan por los siguientes rasgos, de acuerdo con Tucker y Wright (1990): bioturbación, estratificación cruzada tabular, presencia de bioclastos de fauna marina normal, así como la presencia de abundantes peloides y de granos micritizados.

Los depósitos oolíticos de la Fm. El Porvenir representan condiciones de alta energía; presentan escasa estratificación cruzada tabular (además de gradación inversa e imbricación), concentrada en algunas porciones de la sección (figura 8C y D). Por otro lado, en los depósitos oolíticos estudiados se tiene una característica sumamente particular, como lo es el contenido relativamente abundante de clastos terrígenos gruesos (figura 8A y B), lo que permite interpretar que estas rocas oolíticas fueron acumuladas en un área suficientemente cercana a

la costa, de tal manera que el influjo terrígeno fue importante. El aporte terrígeno, así como la presencia común de clastos de hasta 65 cm de longitud (cantos medianos, Blair y McPherson, 1999), dan lugar a esta conclusión y descarta la posibilidad de que estos depósitos sean bancos de margen de plataforma. Esto permite considerar que la Formación El Porvenir se depositó en condiciones de plataforma interna, por encima del nivel base del oleaje normal.

La distribución del material terrígeno dentro de los packstone y grainstone de oolitas, además de estar disperso entre estas arenas carbonatadas (figura 8B), se encuentra comúnmente concentrado en horizontes en los cuales los clastos terrígenos son sumamente abundantes (figura 8A). Estos horizontes de concentración de terrígenos podrían interpretarse al menos de dos maneras distintas, una de ellas en el sentido de que en depósitos carbonatados someros suelen considerarse estas acumulaciones terrígenas como depósitos de *lowstand* del nivel relativo del mar; una segunda interpretación sería que estos horizontes de concentración terrígena sea el resultado de pulsos tectónicos, considerando que el área se encontraba sujeta a una tectónica local activa (Ortuño y Ruiz, 1985), y por lo tanto había un mayor influjo de material terrígeno de manera episódica e intermitente. Esta última interpretación es considerada en este trabajo como la más aceptable, debido a que los horizontes en los que se presenta esta concentración de terrígenos no pierden el carácter carbonatado de la sedimentación, es decir, fueron depositados dentro de la llamada fábrica de carbonatos.

Por otra parte, los depósitos correspondientes a la facies de packstone oolíticos son interpretados como depósitos acumulados al margen de los grainstone de oolíticos. Estos depósitos de packstone representan condiciones ligeramente de menor energía, como lo indica el contenido de matriz calcárea, oncolitos, envolturas de micrita y bioclastos; que sin embargo mantienen su carácter oolítico, razón por la cual se considera que estos sedimentos se acumularon asociados a las facies de grainstone oolíticos. Algunos rasgos de los grainstone de oolitas, junto con los depósitos de packstone oolíticos, de la Formación El Porvenir permiten interpretarlos como depósitos de *shoreface*. Estos rasgos son la

bioturbación (aunque escasa), la estratificación cruzada tabular (figura 8C y D), la presencia de bioclastos de fauna marina normal (gasterópodos, figura 9C; bivalvos, equinodermos, foraminíferos, algas y ocasionalmente corales solitarios), así como la presencia de abundantes peloides y de granos micritizados (figuras 9 y 10).

#### - Facies de Wackestone de Radiolarios

La composición de la facies de wackestone de radiolarios y su contenido microfaunístico indica que fue depositada en condiciones más profundas que las facies oolíticas, sin embargo, la ausencia de fauna pelágica típica (calpionélidos, por ejemplo) restringe la profundidad. La presencia de laminaciones peletíferas en estos wackestone, con foraminíferos bentónicos muy pequeños y granos envueltos, son muy semejantes a las laminaciones de packstone peletífero descritas por D'Argenio *et al.* (1997) como eventos originados por tormentas. Por otro lado, hacia la parte media baja de la formación, como se mencionó en la descripción de esta facies, los wackestone presentan escasos horizontes delgados de concentración de terrígenos (arenas gruesas a gravas muy finas), además de rizaduras y marcas de partículas, lo que representa que ocasionalmente las condiciones fueron relativamente menos profundas durante el depósito de esta facies. Por las consideraciones mencionadas, los wackestone de radiolarios acumulados en la parte baja y media de la Fm. El Porvenir son interpretados como depósitos de submarea profunda (*offshore*), como parte de eventos transgresivos en la plataforma (figuras 7, 12 y 13).

#### MODELO DE FACIES

La Formación El Porvenir presenta rasgos que permiten asociarlos con variaciones en el nivel relativo del mar, como son el paso abrupto de los depósitos de *shoreface* a depósitos de *offshore*, facies laminares de tormenta (dentro de los depósitos de *offshore*) que indican fluctuaciones del nivel base de oleaje, normal y

de tormenta, así como baja tasa de sedimentación en los depósitos transgresivos (*offshore*).

Los depósitos de la Fm. El Porvenir, presentan rasgos semejantes a los llamados ciclos de submarea (Osleger, 1991); pero poseen atributos propios que le dan un carácter particular, como la asimetría en los espesores de los depósitos de *shoreface* con respecto a los de *offshore*, lo cual se interpreta aquí como una respuesta a la alta tasa de sedimentación presente durante la acumulación de *shoreface*. Esta acumulación no permitió que los posibles ascensos en el nivel del mar (de menor orden) se reflejaran en el tipo de depósito, manteniendo un espacio de acomodo somero, en un estilo *keep up* (en el sentido de Kendall y Schlager, 1981) del sistema carbonatado en la zona de plataforma somera.

La interpretación que se ofrece en el presente trabajo está igualmente relacionada con la tasa de sedimentación, además de que se ha considerado una estabilidad tectónica regional para el tiempo de acumulación de esta formación (Ortuño y Ruiz, 1985), razones por las que durante descensos relativamente rápidos del nivel del mar se provocaría la exposición subaérea de los depósitos oolíticos (de lo cual no se encontró evidencia), mientras que durante los ascensos subsecuentes, el sistema carbonatado se repondría rápidamente estableciendo la tasa de sedimentación de manera altamente prolífica. Por otra parte, los ciclos de submarea desarrollan una sucesión de facies típica, iniciando con wackestone de submarea profunda, seguidos de packstone bioclásticos y cubiertos por bancos oolíticos (Osleger, 1991); sucesión que no está representada por los depósitos de la Fm. El Porvenir. En estos, los depósitos de *offshore* (wackestone de radiolarios) infrayacen a las facies de oolíticas, mismas que no son propiamente ni packstone bioclásticos ni muchas veces bancos oolíticos *sensu estricto*, sino más bien representan una sedimentación con abundantes oolitas, oncolitos (en menor proporción) y bioclastos mezclados, que en ocasiones contienen matriz, reflejando quizá las condiciones netamente locales de sedimentación, e influenciados seguramente de manera importante por la alta tasa de sedimentación y por el aporte terrígeno., constante en general, pero intenso en ocasiones. Asimismo podría considerarse la cuestión de la influencia del oleaje por tormentas en los

ciclos de submarea, pero como se discutió en la interpretación de las facies, ese mecanismo no tuvo un lugar preponderante en el desarrollo de los depósitos de *shoreface* de la Fm. El Porvenir.

La Formación El Porvenir representa un sistema de facies oolíticas con rasgos muy particulares. El depósito de esta formación ocurrió durante el Jurásico Tardío (Kimmeridgiano Tardío-Titoniano Temprano), una época de invernadero, que favoreció el desarrollo de rampas carbonatadas (Bádenas y Aurell, 2000). De acuerdo con algunas clasificaciones de rampas carbonatadas (Read, 1985; Burchette y Wright, 1992), los depósitos oolíticos pueden encontrarse en una variedad de escenarios dentro de un sistema de rampa, desde cuerpos de arenas carbonatadas de línea de costa, hasta complejos mayores de bancos de barrera o bancos depositados en altos estructurales en submarea, hacia la rampa externa. Por otra parte, los wackestone acumulados en la parte baja y media representan depósitos de submarea profunda, como parte de eventos transgresivos en la rampa.

Los distintos autores que han trabajado la Fm. El Porvenir interpretan que esta formación, y el Grupo Zacatera al cual pertenece, se depositó en una rampa carbonatada (Quezada, 1975, citado en Meneses, 1977; Quezada, 1984; Ortuño y Ruiz, 1985). Este trabajo confirma esas interpretaciones y se concluye que la Fm. El Porvenir representa un ambiente de rampa interna somera con el desarrollo de depósitos de *shoreface* y *offshore*.

#### MARCO DE ESTRATIGRAFIA DE SECUENCIAS

La Fm. El Porvenir está compuesta por depósitos oolíticos de *shoreface* y depósitos transgresivos de submarea profunda (*offshore*) en un sistema de rampa carbonatada. La facies de *shoreface* está constituida por grainstone oolíticos y, hacia la parte media y superior de la formación, por packstone y packstone-grainstone de oolitas; la facies de *offshore*, presente en la porción inferior y media de la formación, consiste de depósitos transgresivos esporádicos constituidos por wackestone de radiolarios, calciesferas y bioclastos de grano fino.

La Formación El Porvenir representa ocho ciclos transgresivos-regresivos, de espesor variable (figura 15). El análisis de la evolución de facies y los espesores de estos ciclos reflejan la dinámica de las interacciones entre la tasa de sedimentación, la subsidencia y las variaciones en el nivel relativo del mar, factores considerados por Strasser (1991) como controles de la ciclicidad en una secuencia sedimentaria carbonatada. En el presente trabajo, la Fm. El Porvenir se ha dividido en tres secuencias (figura 15); con base en el esquema de clasificación de secuencias estratigráficas de Vail (1987), las secuencias de la Fm. El Porvenir corresponden a secuencias de tercer orden, dentro de las cuales se reconocieron *secuencias de alta frecuencia*, bajo el esquema definido por Mitchum y Van Wagoner (1990) para ciclicidad de orden mayor. A continuación se describen cada una de las secuencias diferenciadas en la Fm. El Porvenir.

La Secuencia I de la Formación El Porvenir tiene un espesor aproximado de 35 m y está representada únicamente por facies oolíticas que corresponden a un sistema de *highstand* (HST, figura 15). Considerando los patrones de apilamiento de parasecuencias propuestos por Van Wagoner *et al.* (1988), la Secuencia I de la Fm. El Porvenir indicaría un carácter progradante, mostrando hacia la parte media-baja la transición de grainstone oolítico a packstone de oolitas y nuevamente a grainstone oolítico, lo que reflejaría el avance del depósito hacia el mar.

La Secuencia II tiene un espesor aproximado de 360 m, está compuesta de un sistema transgresivo (TST) y un sistema de *highstand* (HST, figura 15). El sistema transgresivo presenta un patrón de apilamiento de parasecuencias retrogradacional en general. El TST termina con un depósito de aproximadamente 2 m de espesor de un depósito de grainstone oolítico conglomerático (figura 13), que podría representar un conglomerado de rezago derivado del material subyacente; este tipo de depósitos se llegan a encontrar en sistemas transgresivos en el interior de plataforma (Handford y Loucks, 1993). Dentro del TST de la Secuencia II, se puede distinguir una serie de parasecuencias o *secuencias elementales* (en el sentido de Strasser *et al.* 1999; D'Argenio, 1997; Vail *et al.* 1991), es decir, el ciclo más corto reconocible de cambio ambiental; que en el caso de la formación estudiada, representa el cambio de *offshore* a

*shoreface*. Dentro de estas parasecuencias que constituyen a la Secuencia II, la secuencia más superior, estratigráficamente, representaría la máxima superficie de inundación (mfs, ver figura 15).

El depósito que representa la máxima superficie de inundación se encuentra sobreyacido por el grainstone oolítico conglomerático con abundantes clastos terrígenos de hasta 65 cm de diámetro, que refleja la importancia del aporte terrígeno, y no un depósito de *lowstand* del nivel relativo del mar. Debido a que no se encontraron evidencias de exposición subaérea, se interpreta que el nivel ligeramente erosionado fue provocado probablemente por el proceso de transporte que depositó el conglomerado.

Estas parasecuencias, de la Secuencia II, presentan superficies de erosión muy discretas dentro de los depósitos transgresivos, sobreyacidas por laminaciones de packstone peletífero. Strasser (1991) ha reconocido rasgos semejantes en secuencias lagunares, mismos que asocia a procesos autocíclicos; mientras que D'Argenio *et al.* (1997) interpreta ese tipo de laminaciones con bases ligeramente erosivas, en sedimentos cretácicos, como originadas por eventos de tormentas, interpretación que se comparte en este trabajo para las laminaciones peletíferas presentes en la facies transgresivas de wackestone de radiolarios y calciesferas.

El HST de la Secuencia II inicia con un patrón de apilamiento de parasecuencias agradacionales, en el que se puede apreciar el paso de facies de grainstone oolítico a facies de packstone oolítico y continúa con un patrón de apilamiento progradacional constituido por facies exclusivamente de grainstone de oolitas (figura 15). Este patrón progradante es más evidente en la porción media del HST como lo indica la presencia de estratificación cruzada (ver figura 8c y d), la cual además de indicar una dirección de paleocorrientes hacia el NW, registra un avance del depósito hacia el N, es decir, en la dirección del echado regional de la cuenca.

Cabe mencionar que a pesar del carácter progradante de estas facies oolíticas, no se observó el paso vertical a facies más costeras (*foreshore-backshore*).





Esto puede explicarse por la baja tasa de progradación que Lloyd *et al.* (1987; en Handford y Loucks, 1993) atribuye a depósitos oolíticos de shoreface, sin embargo no se descarta la posibilidad de que simplemente no afloren tales facies costeras (*foreshore*), o bien que afloren en otra área.

La Secuencia III está constituida por un sistema transgresivo y un sistema de *highstand*, y abarca un espesor aproximado de 260 m en total. De acuerdo con Van Wagoner *et al.* (1988) los sistemas transgresivos (TST) están caracterizados por conjuntos de parasecuencias retrogradacionales. Sin embargo, el sistema transgresivo (TST) de la Secuencia III presenta un patrón de apilamiento de parasecuencias discretamente progradacional; esto podría explicarse como el resultado de una alta tasa de sedimentación que logró contrarrestar el efecto del ascenso en el nivel relativo del mar. El TST de la Secuencia III contiene dos parasecuencias que a su vez representarían la superficie transgresiva y la máxima superficie de inundación (figura 15). El HST de la Secuencia III está conformado en la parte inicial como un patrón de apilamiento de parasecuencias de tipo progradacional (con algunos ciclos esporádicos de menor orden, figura 15), mientras que hacia la parte superior tiene un patrón de tipo agradacional, es decir, parasecuencias que representan cambios verticales rápidos de grainstone oolíticos a packstone y packstone-grainstone de oolitas, que correspondería a la *fase tardía de highstand* (Van Wagoner, *et al.*, 1988; Vail *et al.* 1991), mostrando quizá la interacción entre la alta tasa de sedimentación y el nivel relativo del mar (figura 15).

Considerando los criterios de Sarg (1988) y Strasser (1991) en el sentido de que los factores principales que controlan las variaciones en el nivel relativo del mar son la eustasia, la subsidencia tectónica y la tasa de sedimentación, y teniendo en mente que las secuencias estudiadas de la Formación El Porvenir son de tercer orden, como máximo, es posible interpretar que durante su depósito las variaciones en el nivel relativo del mar estuvieron sujetas al control de la subsidencia y la tasa de sedimentación. La subsidencia tectónica, por un lado, puede considerarse como relativamente constante, dado que durante una etapa

tardía de subsidencia termal en un marco de margen continental, las tasas de subsidencia son muy constantes (D'Argenio *et al.* 1997).

Por otro lado, la tasa de sedimentación fue lo suficientemente alta como para acumular un gran espesor de depósitos oolíticos; esto sugiere que la rampa carbonatada sostuvo su crecimiento a pesar de a los cambios en el nivel relativo del mar (el estilo *keep up* de Kendall y Schlager, 1981), lo cual se infiere a partir de que no se formaron rasgos que denotaran un ahogamiento de la plataforma (como superficies endurecidas, o mineralizaciones ferrosas, por ejemplo), de tal manera que la fábrica de carbonatos estuvo siempre activa.

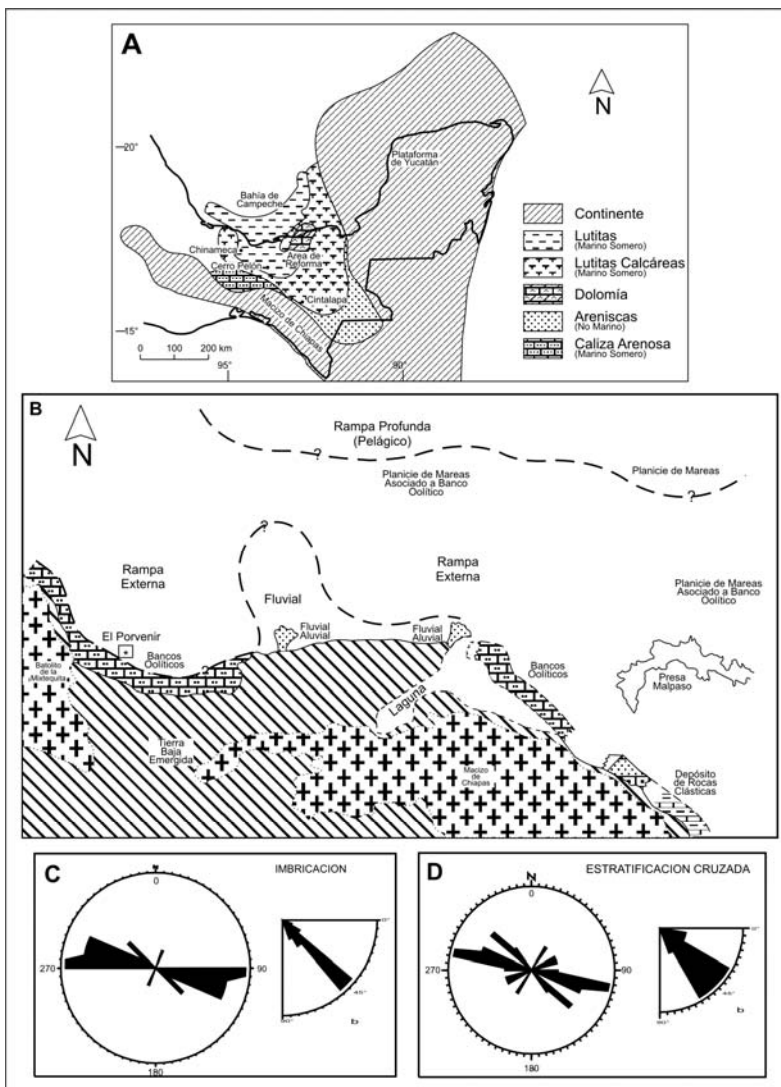
La interacción de estos factores dio como resultado el establecimiento de secuencias de HTS, con delgadas acumulaciones de TST.

El paso de la Formación El Porvenir a la Formación Brecha Barbosa sobreyacente podría representar un descenso mayor en el nivel relativo del mar, dado que el ambiente de depósito interpretado para esta última formación es de fandelta (Ortuño y Ruiz, 1985).

## PALEOGEOGRAFIA

En el sureste de México, se postula un ambiente de mar abierto durante todo el Jurásico Tardío, excepto en las áreas que bordean la Plataforma de Yucatán y el Macizo de Chiapas (Salvador, 1991). De acuerdo con algunos autores (Ortuño y Ruiz, 1985; Salvador, 1991), en la cuenca del Golfo de México la tendencia hacia condiciones de aguas más someras que inició durante el Oxfordiano Tardío continuó durante el Kimmeridgiano Temprano. Después de un breve periodo de somerización y retroceso del mar, la transgresión del Jurásico Tardío continuó durante el Kimmeridgiano, generando un clima húmedo (Weissert y Mohr, 1996). La franja de rocas marinas del Kimmeridgiano que ocurren que ocurren a lo largo de la margen continental del Macizo de Chiapas, fueron depositadas en un ambiente marino somero, muy próximos a la línea de costa (Salvador, 1991). Durante el Titoniano, en la región de La Zacatera-El Porvenir, localizada dentro de la misma franja, se depositaron sedimentos clásticos terrígenos y grainstone, tales como las facies de la Fm. El Porvenir. En las facies de *shoreface* de esta

formación, se desarrollaron estructuras sedimentarias que registraron el carácter hidrodinámico del ambiente sedimentario, como son imbricación de partículas y estratificación cruzada tabular, mismas que nos permitieron realizar mediciones de direcciones de paleocorrientes (figura 16c y d). Las paleocorrientes muestran una orientación general hacia el NW, mientras que algunos conjuntos de estratificación cruzada presentan un claro avance hacia el N (ver figuras 8c-d, y 16d). Considerando que el echado regional de la cuenca de depósito es hacia el norte, es posible establecer una progradación del depósito de los sedimentos de la Fm. El Porvenir en esa dirección.



**Figura 16.** Paleogeografía del Jurásico Superior (Kimmeridgiano).

**A)** Paleogeografía del sur de México, modificado de Salvador (1990).

**B)** Paleogeografía de la región Istmica, modificado de Meneses (1987).

**C)** Roseta de rumbos de paleocorrientes medidas en estructuras de imbricación de partículas, en la Fm. El Porvenir (ver texto).

**D)** Roseta de rumbos de paleocorrientes medidas en estratificación cruzada, en la Fm. El Porvenir (ver texto).

## ANALISIS DIAGENETICO

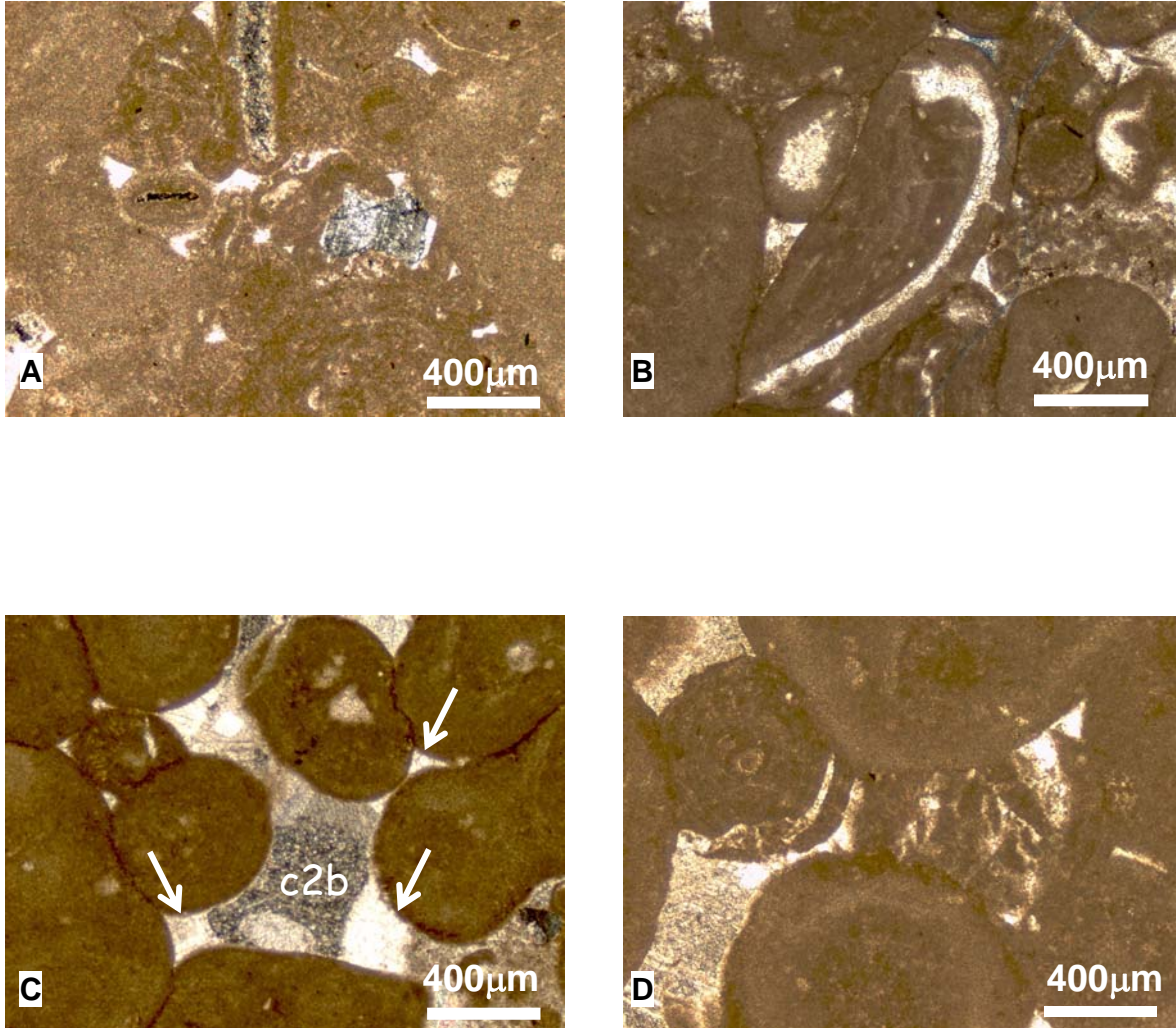
La diagénesis es todo aquel cambio que sufren los sedimentos desde el momento de su depósito y a través de la historia de sepultamiento y/o de levantamiento, hasta la actualidad.

En la secuencia sedimentaria de la Formación El Porvenir, se pueden distinguir rasgos diagenéticos tempranos y tardíos. También se puede interpretar que los procesos diagenéticos afectaron de forma distinta a las facies someras, compuestas por grainstone y packstone oolíticos, que a las facies de submarea profunda, que consisten de wackestone de radiolarios y calciesferas (figura 17). De esta forma, a continuación se describen por separado los eventos diagenéticos de estas dos facies.

### - Secuencia Paragenética de las Facies de Submarea Somera (*Shoreface*)

El evento diagenético más temprano reconocido en los packstone y grainstone de oolitas parece haber sido la calcitización de los radiolarios (*car*). Considerando la inestabilidad del sílice opalino que constituye el esqueleto de estos microorganismos, el ópalo debió recrystalizar a calcedonia para preservar la estructura del esqueleto aún después de la calcitización. Se reconoce también un proceso de intensa micritización (*mg*), en ocasiones a manera de envolturas de micrita (*micrite envelopes*) y en otras la micritización fue prácticamente total (figura 18A). Durante la diagénesis temprana algunos de los bioclastos aragoníticos (moluscos) sufrieron disolución parcial (*da*), y/o total, en este caso se precipitó en la porosidad creada calcita en bloque (figura 18B). El siguiente evento diagenético fue un primer evento de cementación por calcita en bloque. Este cemento se encuentra irregularmente en los contactos entre los granos y desarrolló un cemento *tipo* menisco, por lo que se interpreta como una posible cementación (*cv*) en ambiente vadoso (figura 18C). Este cemento se encuentra a lo largo de toda la sección (fue observado en todas las muestras de grainstone y packstone de oolitas), sugiriendo que formó parte aún de la diagénesis temprana.





**Figura 18.** Diagénesis de los depósitos de *shoreface* de la Fm. El Porvenir. **A)** Grainstone oolítico micritizado, se aprecia un bioclasto envuelto por micrita en la parte superior (Muestra EP-3, XN). **B)** Disolución de bioclastos aragoníticos (fragmento de molusco como núcleo de un grano envuelto al centro de la foto), en cuya porosidad móldica precipitó calcita en bloque (Muestra EP-25, LN). **C)** Grainstone oolítico en el que se aprecia relictos de la primer etapa de cementación en estas facies (flechas), constituido probablemente por cemento vadoso (calcita en bloque, cv) como parte de la diagénesis temprana y la segunda etapa de cementación de sepultamiento, por calcita en bloque (c2b), ver texto y figuras 17 y 18 (Muestra EP-42, XN). **D)** Compactación mecánica en los grainstone oolíticos; se aprecia la separación de las láminas que conforman los ooides y la completa disgregación de estos granos (Muestra EP-6, XN).

El hecho de que esta cementación vadosa tomara parte en toda la secuencia puede implicar que pudo estar asociado a un proceso de disolución, de tal manera que el carbonato de calcio generado por la disolución de las oolitas y oncolitos fue la fuente del fluido para esta cementación. Halley y Harris (1979) consideran que la disolución-precipitación (cementación) es un mecanismo autóctono producido por agua meteórica, y proponen que parte del carbonato de calcio disuelto precipita a unos cuantos metros de la zona de disolución, y consideran que esa es la razón para que la cementación en zona vadosa esté restringida al cemento de tipo menisco.

Por otra parte, Hird y Tucker (1988), en un estudio diagenético en depósitos oolíticos del sur de Gales, encuentran también una asociación de cementos de primera generación representados por “anillos no isopacos de espatita equigranular” y “esparita equigranular en los contactos entre granos”, a lo largo de toda la Oolita Brofiscin, y los interpretan como de origen meteórico vadoso.

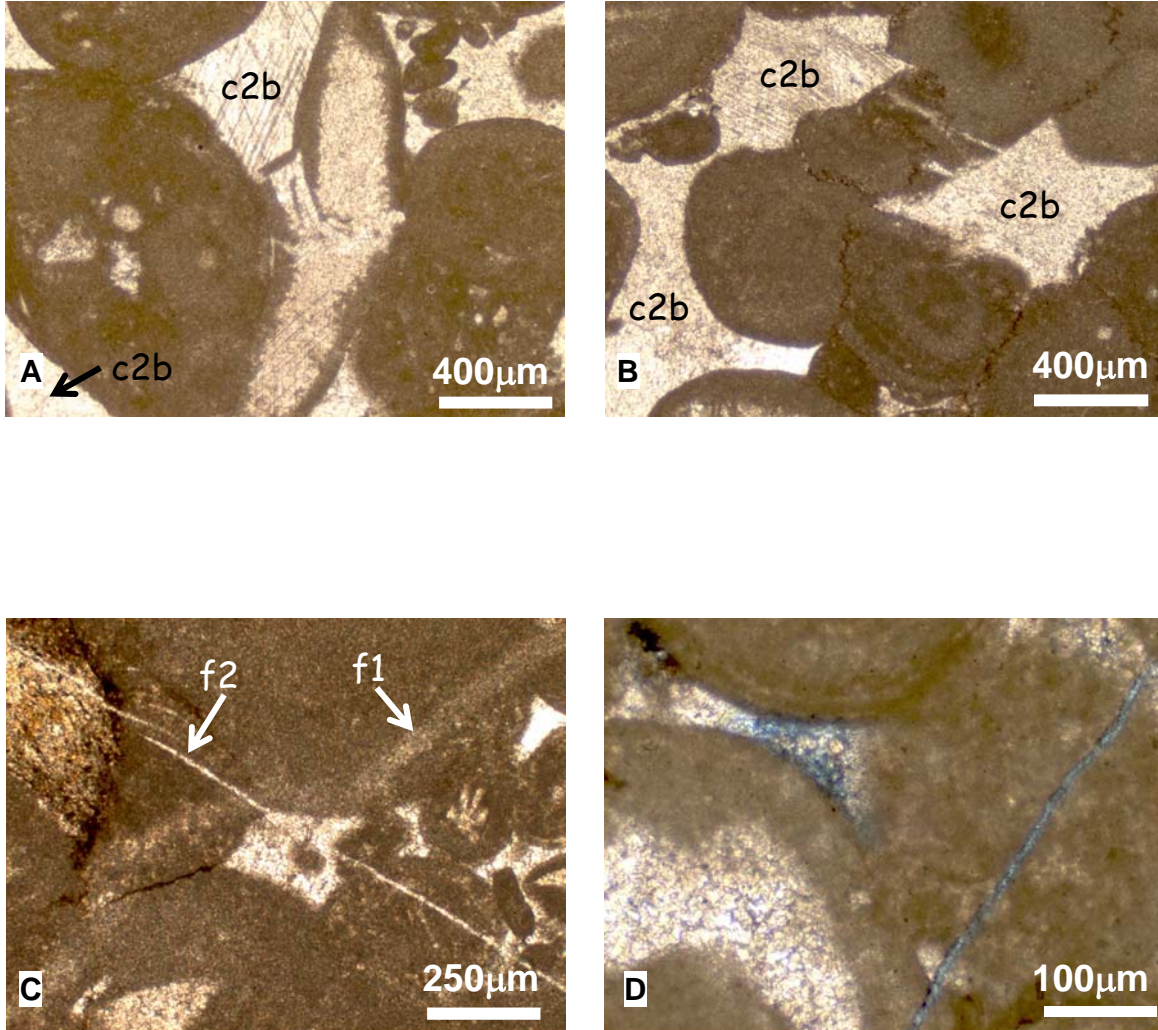
Los sedimentos de *shoreface* (grainstone y packstone oolíticos) de la Fm. El Porvenir sufrieron una compactación mecánica (*com*) importante que se refleja en la deformación de algunos granos, así como fracturamiento y disgregación de los granos, lo que dio origen a la formación de seudomatriz en algunos casos (figura 18D). La compactación provocó recristalización (*re*) en la matriz micrítica del packstone y packstone-grainstone, así como un intenso proceso de disolución por presión. Posteriormente, se produjo un evento incipiente de disolución selectiva (*ds1*) que afectó principalmente al cemento calcítico vadoso. La segunda etapa de cementación corresponde a un cemento de calcita en bloque (*c2b*, figura 19A). Las evidencias texturales tales como envolturas de micrita envueltas en la calcita en bloque (figura 19A), contactos cóncavo-convexos y suturados con microestilolitas anteriores a esta cementación (figura 19B) y granos disgregados o fracturados entre el cemento (figura 18D) indican que se trata de una cementación por sepultamiento (Tucker y Wright, 1990). Este evento de cementación es el más ampliamente representado en estas facies. Posteriormente estas rocas sufrieron tres eventos de fracturamiento (*f1*, *f2* y *f3*) muy moderados (las fracturas son



relativamente escasas, ver figura 19C), rellenos de calcita (*rf1*, *rf2* y *rf3*). Después del primer fracturamiento, ocurrió un evento de disolución por presión (*dp2*) que generó, principalmente en el packstone, ocasionales suturas de disolución, ahora impregnadas por hidrocarburos pesados (*hc*). Las fracturas del segundo evento fueron ocasionalmente ensanchadas por disolución. La porosidad, resaltada por la resina teñida, es en promedio de 2-3%, no se aprecia interconexión entre los poros; la porosidad es por disolución (*ds2*) en microestilolitas parcialmente abiertas, en vugulos muy pequeños (0.06 mm de diámetro) dentro del cemento calcítico en bloque, en algunas fracturas parcialmente abiertas (figura 19D), y en algunos clastos terrígenos que sufrieron una disolución incipiente. Es importante mencionar que de acuerdo con Halley y Harris (1979) la cementación vadosa, o *cementación autóctona*, no reduce la porosidad de la roca, de tal manera que la porosidad original fue preservada y la oclusión del espacio poroso es el resultado de la cementación originada en el ambiente de sepultamiento.

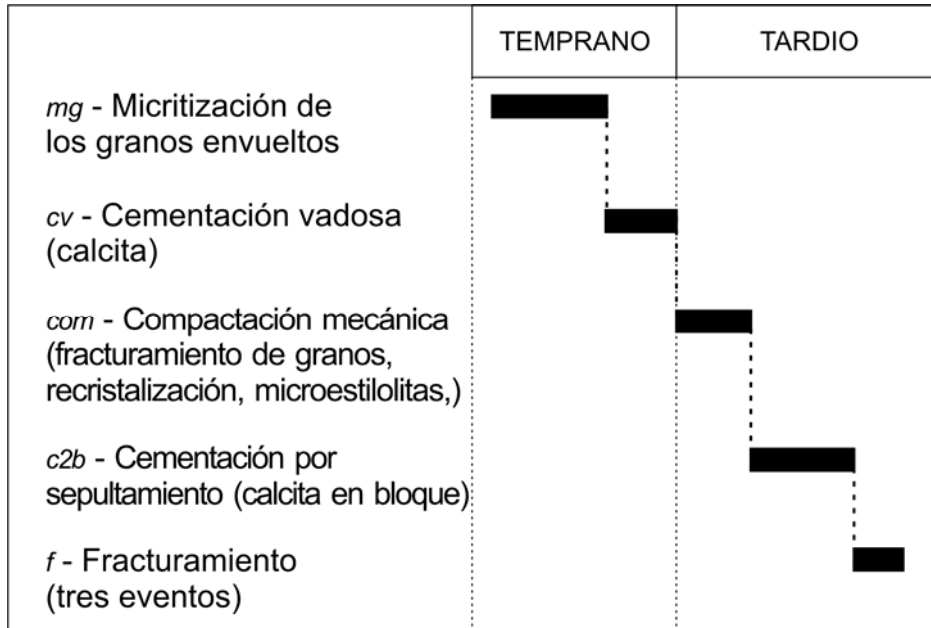
También se observa una incipiente dolomitización (*do*) parcial asociada con el cemento de calcita y en las fracturas ensanchadas por disolución. Sin embargo, esta dolomitización no fue suficiente para generar una porosidad adecuada para almacenar fluidos.

De cualquier modo, como se verá en capítulos posteriores la diagénesis de esta facies es en general menos compleja, y con un carácter más destructivo de las características almacenadoras, que la diagénesis acaecida en los sedimentos del campo Cantarell, en la zona marina de Campeche.



**Figura 19.** Diagénesis de los depósitos de *shoreface* de la Fm. El Porvenir. *Continuación.* **A)** Grainstone oolítico, se muestra la segunda etapa de cementación, por sepultamiento, de calcita en bloque (*c2b*) cementando un bioclasto envuelto por micrita (*micrite envelop*, ver texto) (Muestra EP-1, LN). **B)** Grainstone oolítico, se muestra la segunda etapa de cementación por calcita en bloque (*c2b*) de sepultamiento, posdatando contactos suturados entre granos por microestilolitas (Muestra EP-9, LN). **C)** Grainstone de oolitas, se aprecian el primer (*f1*) y segundo (*f2*) eventos de fracturamiento (ver texto y figura 17), ambos rellenos por calcita (Muestra EP-2, LN). **D)** Packstone de oolitas, se aprecia la escasa porosidad por disolución incipiente (resaltada por la resina teñida azul), en fracturas y en el cemento de sepultamiento (Muestra EP-25, LN).

La figura 20 resume de manera esquemática la secuencia paragenética generalizada de las facies de *shoreface* de la Formación El Porvenir.



**Figura 20.** Secuencia paragenética generalizada de los depósitos de *shoreface* de la Fm. El Porvenir

- Secuencia Paragenética de las Facies de Submarea Profunda (*Offshore*)

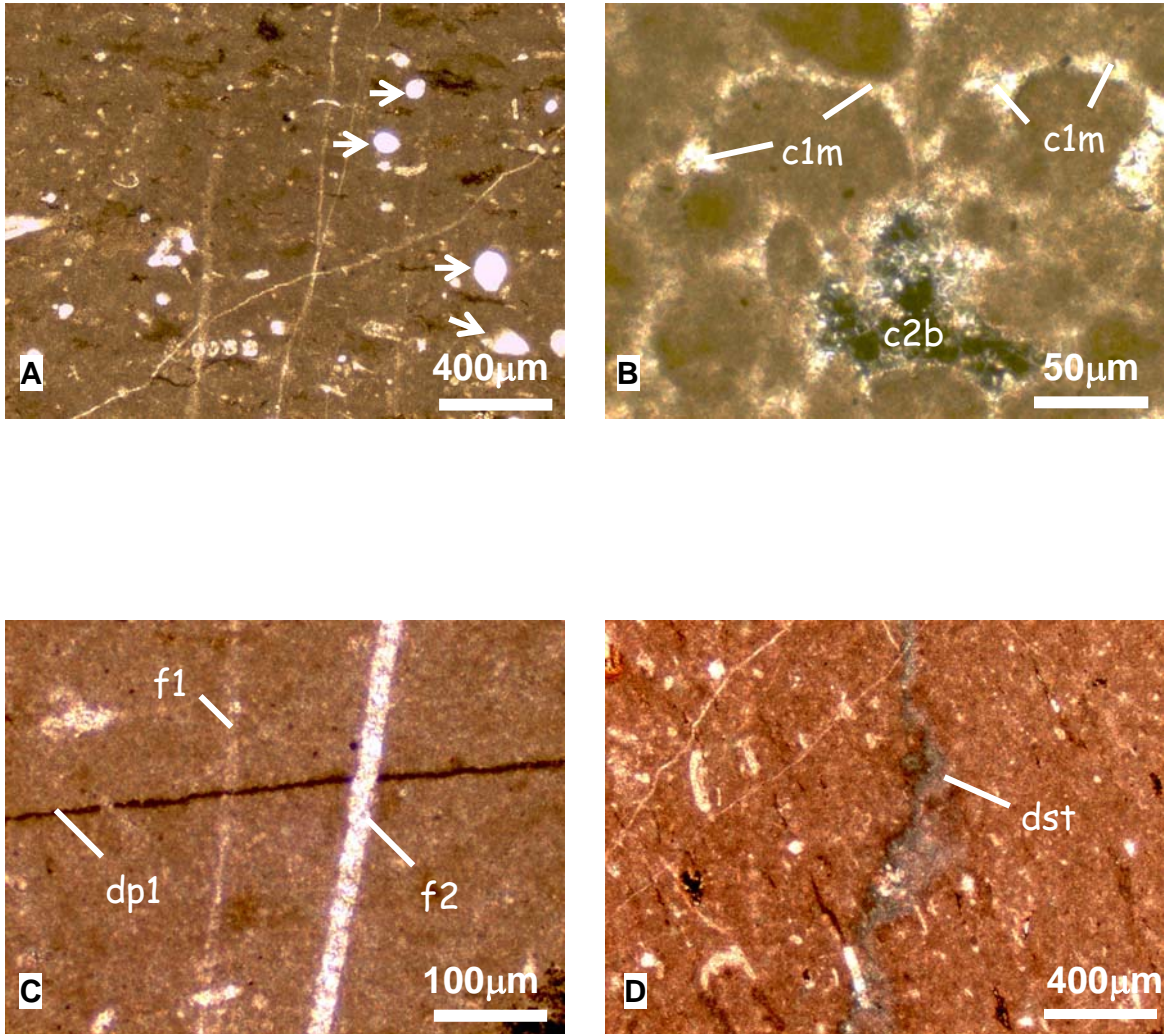
En las facies de wackestone de radiolarios y calciesferas la diagénesis temprana inició con el remplazamiento por calcita de los radiolarios (*car*), la cual debido al carácter inestable del ópalo del esqueleto de los radiolarios, debió ocurrir en un tiempo muy cercano al depósito, de tal forma que se preservó su estructura (figura 21A). Asimismo, se generó una etapa de cementación marina temprana (*c1m*) por calcita en bloque en las laminaciones peletíferas de estos sedimentos, inhibiendo en parte los efectos de compactación sobre ellos (figura 21B).

Posteriormente, ocurrió una compactación mecánica (*com*), que produjo efectos de disolución por presión (*dp1*) que dieron lugar a microestilolitas poco

desarrolladas, paralelas a la estratificación (figura 21C). Estas microestilolitas se encuentran impregnadas de hidrocarburos (*hc*) pesados. Asimismo, la compactación tuvo como efecto una moderada recristalización (*re*) de la matriz de lodo calcáreo. En la porosidad intercrystalina de la matriz recristalizada, se observa una escasa impregnación de hidrocarburos (*hc2*) ligeros. La porosidad interpartícula en las laminaciones peletíferas fue a su vez cementada por calcita en bloque (*c2b*, ver figura 21B).

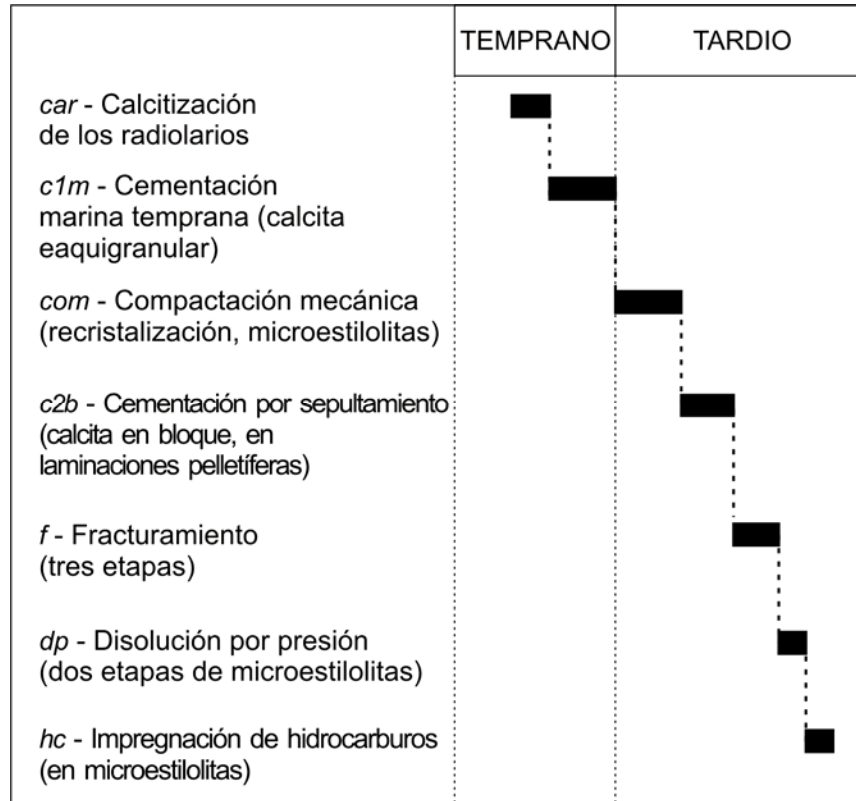
El fracturamiento fue moderado a intenso. Se observan tres eventos de fracturas (*f1*, *f2* y *f3*). Todas las fracturas tienen relleno de calcita (*rf1*, *rf2* y *rf3*). El primer evento de fracturamiento (*f1*) está representado por fracturas muy delgadas con apariencia difusa, que cortan a algunas microestilolitas (del primer evento, *dp1*) pobremente desarrolladas. El segundo evento de disolución por presión (*dp2*) generó microestilolitas perpendiculares a la estratificación, anteriores al segundo evento de fracturamiento (*f2*), su relación con el primer evento de fracturas no se observó; estas microestilolitas fueron impregnadas a su vez por hidrocarburos (*hc3*) pesados. El segundo evento de fracturamiento (*f2*) consta de fracturas semiparalelas a la estratificación, ensanchadas por disolución (*ds*).

Ocasionalmente, el relleno de las fracturas ensanchadas por disolución (correspondientes al segundo evento, *f2*) presenta una dolomitización (*do1*) del relleno calcítico (*rf2*), pero es muy incipiente, apenas distinguible con la tinción de alizarina roja. El tercer evento de fracturamiento (*f3*) es posterior al segundo proceso de generación de microestilolitas (*dp2*), las cuales son las más desarrolladas y llegaron a generar suturas de disolución. Posteriormente, se produjeron estilolitas paralelas a la estratificación (*dp3*), las cuales fueron impregnadas igualmente por hidrocarburos (*hc4*) pesados. La tinción con resina azul revela que algunas fracturas se encuentran disueltas, aportando escasa porosidad a la muestra (figura 21D), lo que representa una disolución selectiva tardía (*dst*).



**Figura 21.** Diagénesis de los depósitos de *offshore* de la Fm. El Porvenir. **A)** Wackestone de radiolarios y calciesferas, con fragmentos de ostrácodo, de equinodermo y de molusco y foraminíferos bentónicos. Se muestra la calcitización de radiolarios (flechas) (Muestra EP-11, XN). **B)** Wackestone de radiolarios y calciesferas, se muestra la cementación temprana por calcita en bloque (*c1m*) en las laminaciones peletíferas, así como el cemento tardío (en posición de extinción) de calcita en bloque (*c2b*), ver texto y figura 17 (Muestra EP-10, XN). **C)** Wackestone de radiolarios y calciesferas, se muestran las relaciones entre el primer evento de disolución por presión (*dp1*), y los dos primeros eventos de fracturamiento (*f1* y *f2*) ver texto y figura 17 (Muestra EP-11, LN). **D)** Wackestone de radiolarios y calciesferas, se muestra la escasa porosidad por disolución selectiva tardía (*dst*), resaltada por la resina teñida de azul (Muestra EP-17, LN).

La figura 22 presenta un resumen esquemático de la secuencia paragenética generalizada de las facies de *offshore* de la Formación El Porvenir.



**Figura 22.** Secuencia paragenética generalizada de los depósitos de *offshore* de la Fm. El Porvenir.

Los datos presentados indican que los procesos diagenéticos que sufrió la Formación El Porvenir fueron diferentes en cada facies, reflejando la respuesta diferenciada de los sedimentos al mismo ambiente diagenético.

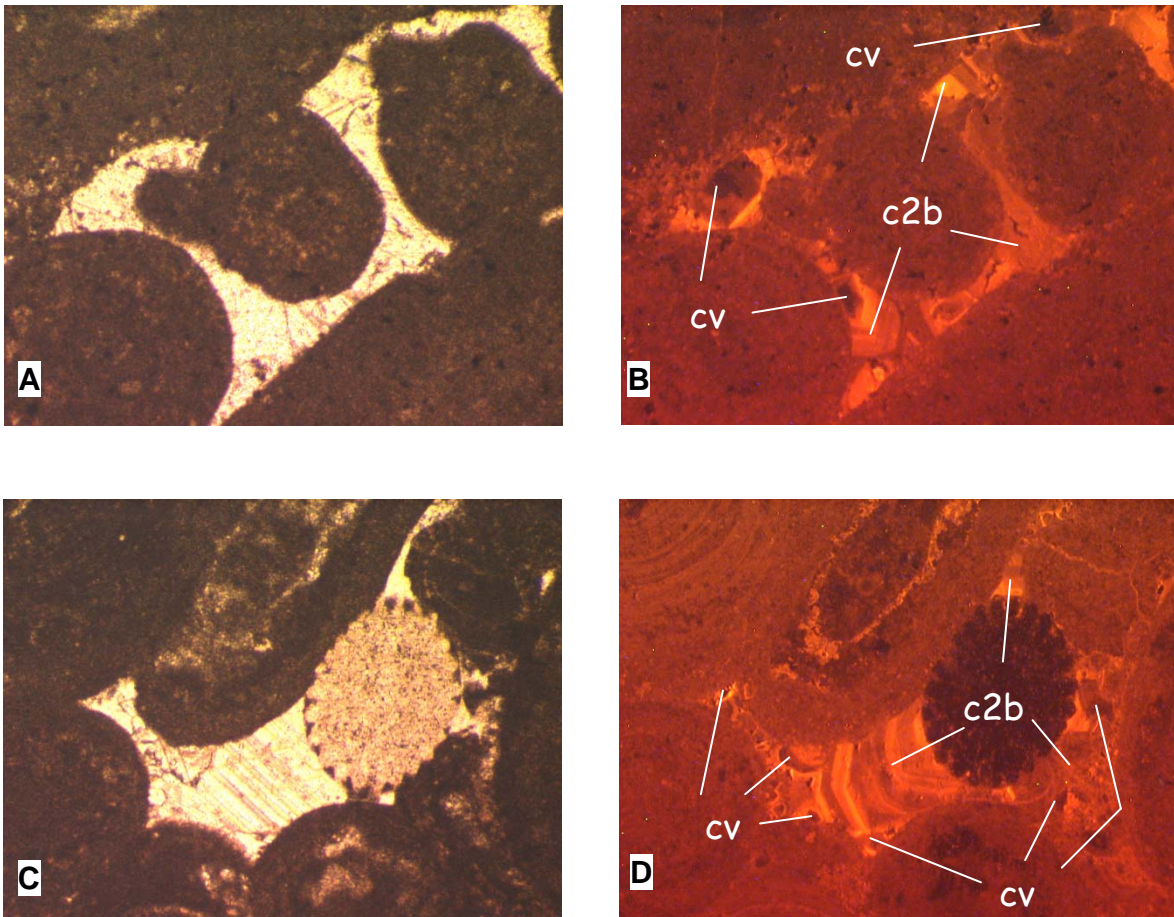
- Ambiente Diagenético de la Fm. El Porvenir

Las facies oolíticas de *shoreface* sufrieron cementación de los poros intergranulares por calcita en bloque, que se interpreta como un posible cemento de origen vadoso (figura 18C). Hird y Tucker (1988) establecen que el extenso desarrollo de cementación vadosa puede atribuirse a una eficiente recarga

meteórica de aguas subterráneas como resultado de un clima húmedo, y que la ausencia de rasgos cársticos puede deberse a la remoción del posible horizonte cárstico por los depósitos transgresivos (facies de *offshore* en El Porvenir) o bien que no hubo tiempo suficiente para el desarrollo de ellos. El cemento de calcita en bloque en las facies de *shoreface* de la Formación El Porvenir (figuras 18C-D y 19A-B), que claramente posdata la compactación mecánica, permite establecer que esta cementación se llevó a cabo en un ambiente diagenético de sepultamiento. Asimismo, este cemento de sepultamiento también se desarrolló sintaxialmente en torno a los fragmentos de equinodermo. El análisis de catodoluminiscencia de los cementos presentes en las facies de *shoreface* muestra un evento de disolución parcial del cemento de calcita vadosa, y un crecimiento posterior del cemento de sepultamiento que tomó como núcleo a cristales que no fueron disueltos (figura 23A-D). El cemento vadoso no es luminiscente, lo que sugiere un origen meteórico, y en algunas ocasiones preserva aún relictos de la morfología original tipo *bladed* o *espada*.

En las facies transgresivas de *offshore* de la Fm. El porvenir tuvo lugar la calcitización de los radiolarios que contiene, por lo tanto se interpreta un ambiente diagenético marino durante la diagénesis temprana. En las laminaciones peletíferas que contienen los wackestone de las facies de *offshore* se observó evidencia de cementación por calcita en bloque que posdata la compactación mecánica, lo que permite determinar que esta cementación ocurrió en un ambiente diagenético de sepultamiento.

El estudio de inclusiones fluidas, de acuerdo con la técnica de Goldstein y Reynolds (1995), en una muestra de las facies de *shoreface*, indica que los cementos de carbonato de calcio de baja temperatura, precipitados en un ambiente vadoso, contienen inclusiones fluidas con proporciones variables vapor/líquido y por lo tanto aportan temperaturas de homogenización variables, que no reflejan la temperatura de entrapamiento del cristal. También se encontraron inclusiones fluidas de una sola fase, gas o vapor que indican una temperatura baja de entrapamiento (por ejemplo Goldstein, 1986; Barker y Halley, 1988).



**Figura 23.** Diagénesis de los depósitos de *shoreface* de la Fm. El Porvenir. **A)** Imagen en luz natural de la foto B (Muestra EP-5, 5X-LN). **B)** Imagen de catodoluminiscencia de los cementos vadoso (cv) y de sepultamiento (c2b) en un grainstone de oolitas; note las zonas de crecimiento del cemento tardío a partir de relictos de calcita vadosa (Muestra EP-5, 5X-CL). **C)** Imagen en luz natural de la foto D (Muestra EP-5, 5X-LN). **D)** Imagen de catodoluminiscencia de los cementos vadoso (cv) y de sepultamiento (c2b) en un grainstone oolítico; note el complejo patrón de las zonas de crecimiento del cemento tardío a partir de relictos de calcita vadosa (no luminiscente) (Muestra EP-5, 5X-CL).

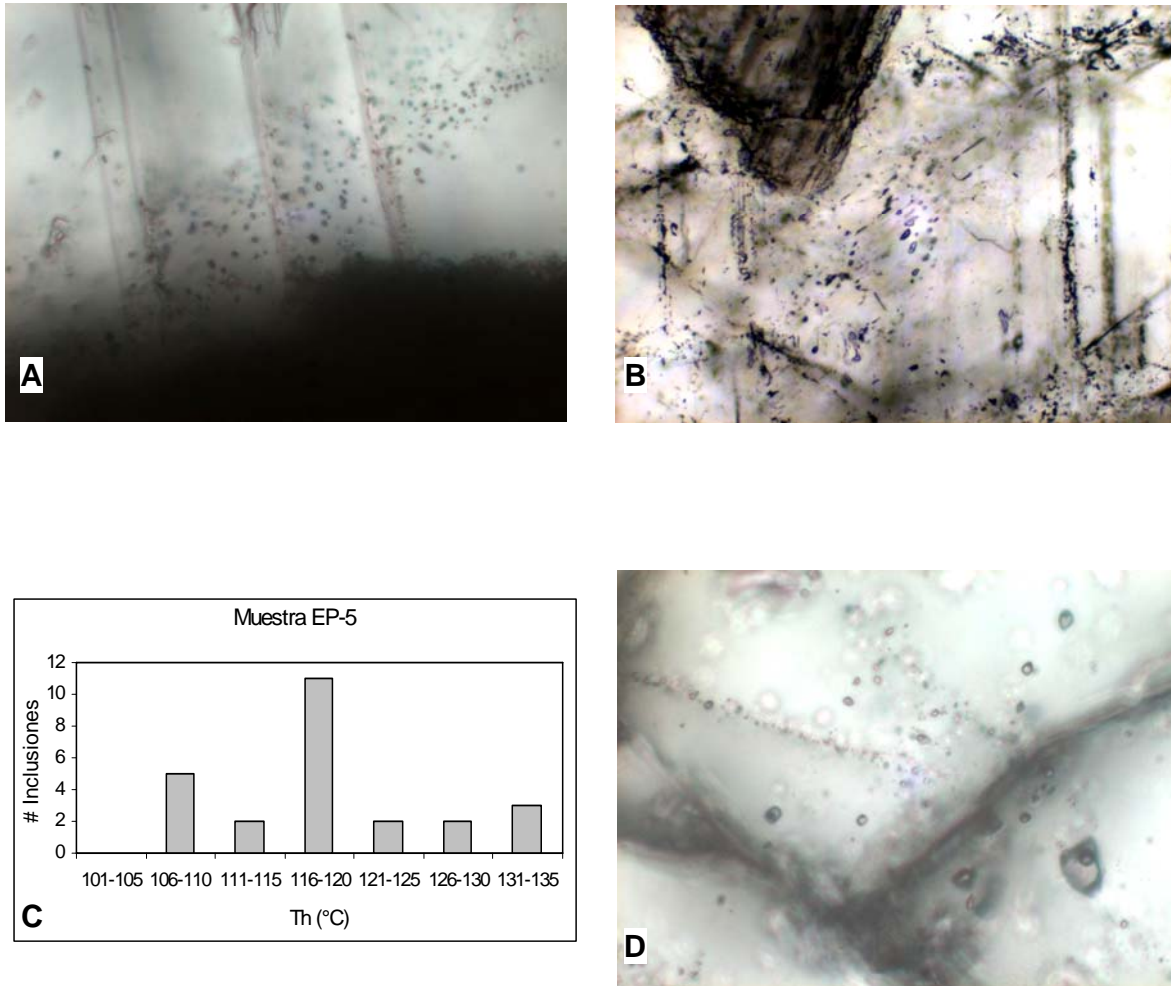
En el cemento vadoso de la muestra analizada de la Formación El Porvenir se observan inclusiones fluidas de una sola fase, líquida dado su color claro (figura 24A). Estas inclusiones de una sola fase sugieren que la precipitación tomó lugar a baja temperatura, menos de 40-50 °C, debido a que no se formó una burbuja de vapor mediante la contracción térmica del líquido durante el enfriamiento natural



hasta la temperatura superficial (Goldstein *et al.*, 1990). Estos datos apoyan la interpretación del ambiente diagenético vadoso de estas rocas, durante la diagénesis temprana. Estas inclusiones de una sola fase se eligieron para determinar su salinidad, mediante la temperatura de fusión del hielo ( $T_m$ ), debido a que al ser dominantes en el campo en que se observaron, se puede establecer que no fueron producto de cambio de forma o *necking down* de inclusiones de dos fases (Goldstein *et al.*, 1990). Las inclusiones se calentaron inicialmente hasta 120°C para provocar la formación de una burbuja de vapor y así congelarla y obtener la  $T_m$ , según el procedimiento de Barker y Halley (1988) y Goldstein *et al.* (1990). De acuerdo con Goldstein (1986) y Barker y Halley (1988), una  $T_m=0$  °C es característica de agua meteórica, aunque las inclusiones analizadas en este trabajo no nuclearon burbuja.

Se escogió una muestra de calcita en bloque de sepultamiento para estudiar las inclusiones fluidas que son de tipo secundario, debido a que frecuentemente muestran características de haber sufrido cambio de forma o *necking down* (figura 24B). Los datos de temperatura de homogenización obtenidos de inclusiones fluidas secundarias se presentan en la figura 24C.

Por otro lado, algunas inclusiones fluidas presentes en este cemento, que probablemente son primarias (figura 24D), aportaron temperaturas de fusión ( $T_m$ ) variables, muy por debajo de los 0°. Esto pudiera considerarse como indicador de que el cristal precipitó a partir de una solución salina. Sin embargo, una misma inclusión ofrecía valores de  $T_m$  distintos; por lo tanto, se congeló la inclusión fluida hasta -180 °C al suponerse que podría contener metano; el comportamiento de la inclusión fluida concordó con tal suposición. De esta manera a los -70 °C el metano se separó del agua, mientras que a los -166 °C el metano se separó en la fase de vapor y líquido; evidenciando de esta manera su presencia en las inclusiones. De acuerdo con Martínez (com. pers.) el contenido de este gas en una inclusión fluida inhibe su estudio, en función de que los datos de  $T_h$  y  $T_m$  que aportan no son confiables.



**Figura 24.** Inclusiones fluidas en los depósitos de *shoreface* de la Fm. El Porvenir. **A)** Familia de inclusiones fluidas primarias de una sola fase, presumiblemente líquida, en cemento de calcita probablemente vadosa; note el maclado desarrollado (Muestra EP-5, 40X-LN, tomada con condensador). **B)** Cambio de forma (*necking down*) en inclusiones fluidas secundarias en cemento de calcita en bloque; lo oscuro de éstas puede indicar que preservaron solamente la fase vapor (Muestra EP-5, 20X-LN). **C)** Temperaturas de homogenización (Th) medidas en inclusiones fluidas secundarias contenidas en una muestra de rocas oolíticas de los depósitos de *shoreface* de la Formación El Porvenir. Note el rango tan amplio de Th, indicando la posible presencia de metano (ver texto). **D)** Inclusión fluida secundaria en cemento de calcita en bloque; la *T<sub>m</sub>* medida en ella indicó la presencia de metano, ver texto (Muestra EP-5, 40X-LN, tomada con condensador).

## CAPITULO III. ANALISIS DE FACIES Y DIAGENESIS DE LAS ROCAS OOLITICAS JURASICAS DEL CAMPO CANTARELL

El estudio sedimentológico de las rocas oolíticas de edad Kimmeridgiano de la Sonda de Campeche (figura 1) representa un intento por determinar las condiciones sedimentológicas bajo las cuales se depositaron estas rocas, teniendo en consideración que se encuentran dolomitizadas casi en su totalidad; por lo cual se tomó como base de referencia el análogo de superficie representado por la Fm. El Porvenir, que aflora en el Istmo de Tehuantepec. Este estudio sedimentológico parte del concepto de análisis de facies de Walker (1984), tal como se hizo para la Fm. El Porvenir.

### FACIES DE LAS ROCAS OOLITICAS KIMERIDGIANAS DEL CAMPO CANTARELL

En el presente trabajo se divide a las rocas oolíticas kimeridgianas del campo Cantarell en tres facies sedimentarias (tabla 2), de acuerdo con su composición litológica y estructuras sedimentarias: 1) facies de grainstone oolíticos; 2) facies de packstone oncolítico-bioclásticos; y 3) facies de wackestone de bioclastos. Las dos primeras facies son muy semejantes en muestra de mano, sin embargo el análisis petrográfico permitió dividir las de acuerdo con sus diferencias litológicas.

Tabla 2. Características generales de las facies que constituyen a las rocas oolíticas del Kimmeridgiano del Campo Cantarell, en la Sonda de Campeche (ver texto).

FACIES	LITOLOGIA	ESTRUCTURAS
Grainstone oolítico	Grainstone y packstone oolítico dolomitizado. Los grainstone oolíticos contienen fantasmas de oolitas, pellets, peloides y arenas de cuarzo muy finas a gruesas. Los packstone oolíticos contienen pellets, fantasmas de bioclastos, arenas finas de cuarzo y escasos clastos de limolita cuarcítica y de wackestone arcilloso; en ocasiones la dolomitización afectó sólo a la matriz.	Estructura masiva.
Packstone oncolítico-bioclástico	Packstone oncolítico-bioclástico dolomitizado y packstone oncolítico. Los packstone oncolítico-bioclásticos presentan fantasmas de fragmentos de molusco y de equinodermo. En los packstone oncolíticos solamente la matriz se encuentra dolomitizada, presentan escasos <i>lumps</i> , bioclastos y escaso cuarzo detrítico.	Estructura masiva.
Wackestone de bioclastos	Wackestone dolomitizados de bioclastos, con escasos limos gruesos de cuarzo.	Estructura masiva. Posible bioturbación.

### 1) Facies de Grainstone Oolítico

#### - Litología y estructuras sedimentarias

Esta facies es la menos abundante, está compuesta de grainstone y packstone oolíticos dolomitizados color pardo intermedio, son masivos, moderadamente clasificados y presentan un empaque abierto (figura 25A), con una porosidad que varía entre 5-10%, aunque ocasionalmente llega a 30-50% (figura 25B).

Esta facies está representada en todos los núcleos de los pozos estudiados: núcleos 4 y 5 del pozo Cantarell-3001, núcleo 9 del pozo Cantarell-1065D, núcleo 4 del pozo Cantarell-1025 y en los núcleos 2 y 3 del pozo Taratunich-74.

#### - Petrografía

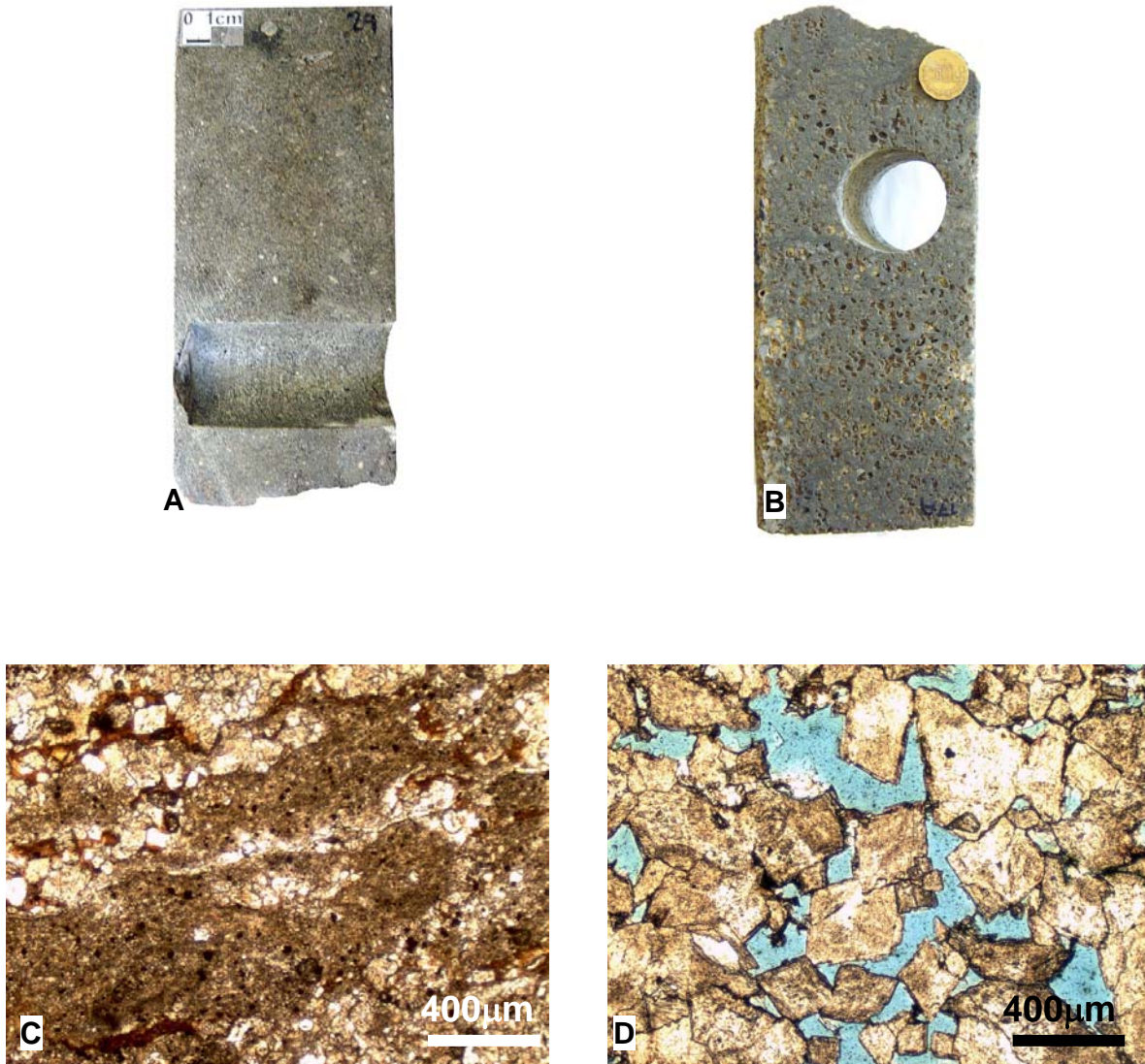
La facies de grainstone oolítico está constituida por dolomías de grano grueso que preservan en mayor o menor grado la textura original de grainstone y packstone oolíticos.

En los núcleos 4 y 5 del pozo Cantarell-3001 (figura 26), algunas oolitas tienen núcleos constituidos por detritos de feldspatos y cuarzo monocristalino y policristalino; los grainstone presentan escasos oncolitos, ocasionalmente contienen fragmentos de limolita cuarcítica y de wackestone arcilloso (figura 25c), asociados con suturas de arcilla, en las que es frecuente la impregnación de hidrocarburos pesados.

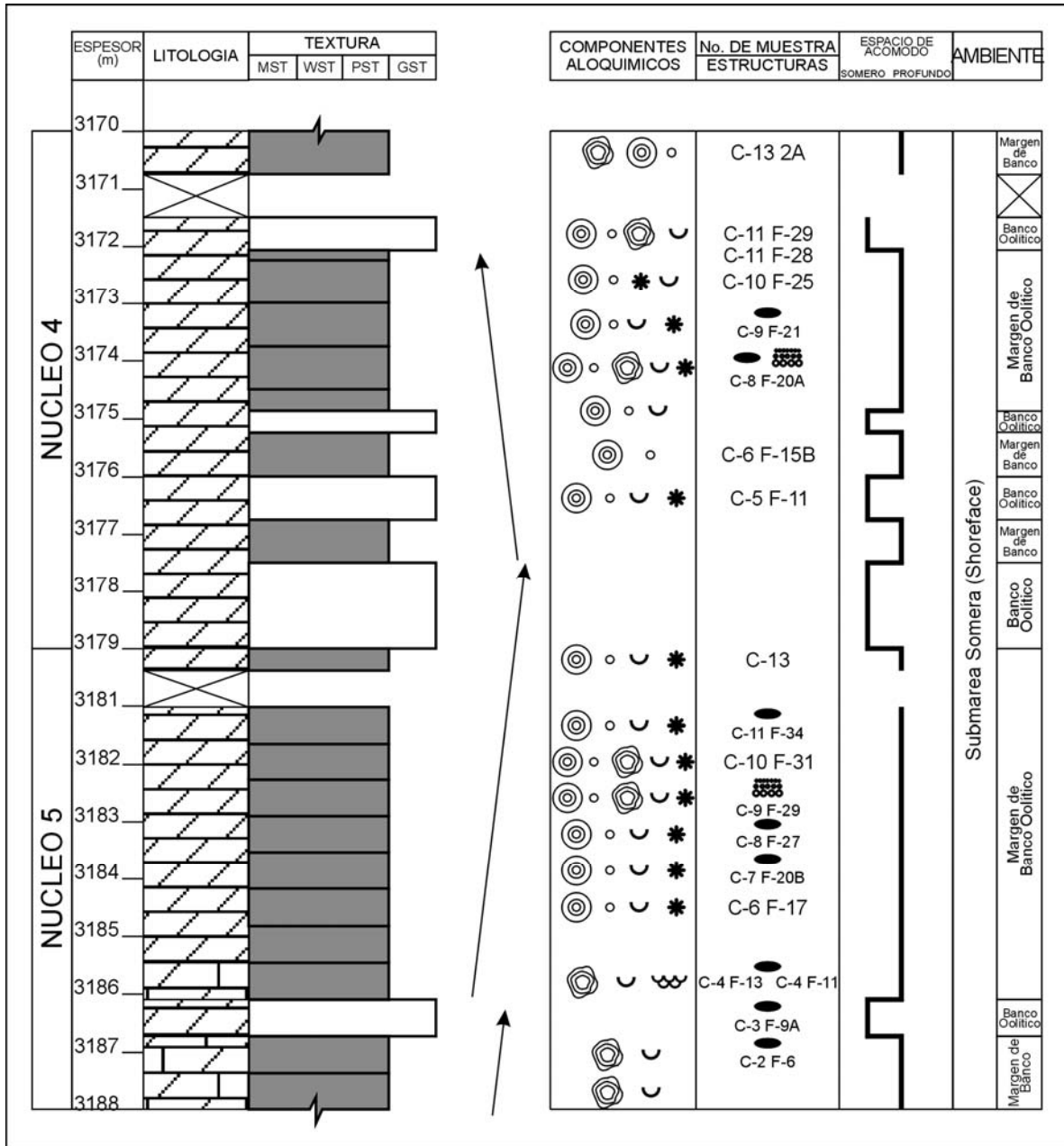
En el núcleo 9 del pozo Cantarell-1065D (figura 27), esta facies es más abundante y presenta algunas diferencias, como la presencia de pellets, bioclastos y cuarzo detrítico muy escaso (arenas muy finas a finas), además la compactación es moderada, lo que implica que los sedimentos oolíticos fueron cementados tempranamente, a pesar de que no se encuentra evidencia directa de ello debido a la dolomitización.

En el núcleo 4 del pozo Cantarell-1025 (figura 28) la facies es muy escasa, los grainstone oolíticos contienen fantasmas de oolitas, peloides, cuarzo y feldespato potásico detríticos (arenas muy finas a gruesas); la dolomitización permite apreciar fantasmas o relictos de la microestructura de las oolitas, de tipo concéntrica, constituida por varias capas, lo que ha sido considerado por varios autores como reflejo de un ambiente de alta energía; la compactación se refleja en el dislocamiento de las capas oolíticas y fracturamiento de las oolitas, por otro lado, la porosidad por disolución es muy alta (figura 25D).

En los núcleos 2 y 3 del pozo Taratunich-74 la facies presenta una fábrica con empaque cerrado y algunas zonas con empaque abierto y mayor presencia de cemento (dolomita). La dolomitización no preservó la microestructura de las oolitas, es escasa la presencia de fantasmas de bioclastos, cementación escasa por anhídrita, no se observan rasgos de compactación, la porosidad es pobre, de tipo intercrystalina y por disolución, algunas oolitas presentan sílice microcristalino en el núcleo; la presencia de fracturas y microestilolitas es escasa.



**Figura 25.** Facies de grainstone oolítico de la Sonda de Campeche. **A)** Dolomía derivada de grainstone oolítico de grano fino, con fantasmas de bioclastos y oncolitos; de aspecto masivo, mal clasificada y generalmente con empaque abierto (Muestra C-3001 N-4 C-11 F-29). **B)** En la parte media inferior del núcleo, la dolomía tiene una gran porosidad (~30%) y el empaque es más abierto; las zonas color ocre corresponden a material arcilloso (Muestra C-3001 N-5 C-5 F-17). **C)** Dolomía derivada de grainstone oolítico con lentes de wackestone arcilloso, se aprecia la impregnación de hidrocarburos en suturas de disolución y en la microporosidad intercrystalina (Muestra C-3001 N4 C10 F25, LN). **D)** Se muestra la alta porosidad vugular (~50%) por disolución de esta dolomía de grano grueso; la muestra fue impregnada con resina teñida de azul (Muestra C-1025 N-4 C-12 F-26, LN).



**Figura 26.** Columna estratigráfica de los núcleos 4 y 5 de las rocas oolíticas de edad Kimmeridgiano en el pozo C-3001.

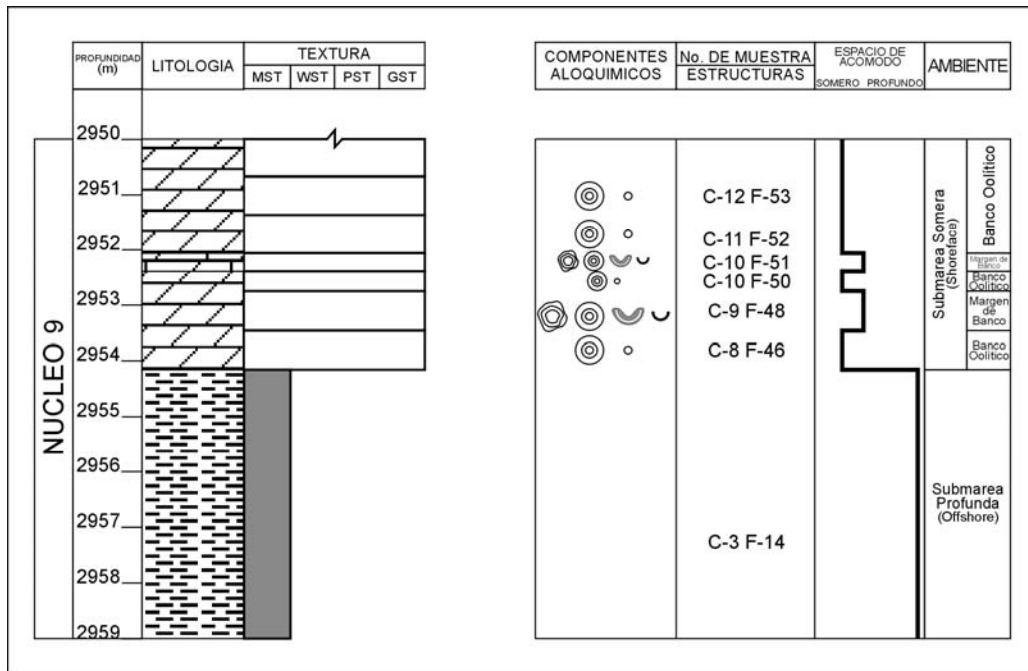


Figura 27. Columna estratigráfica del núcleo 9 de las rocas oolíticas de edad Kimmeridgiano en el pozo C-1065D

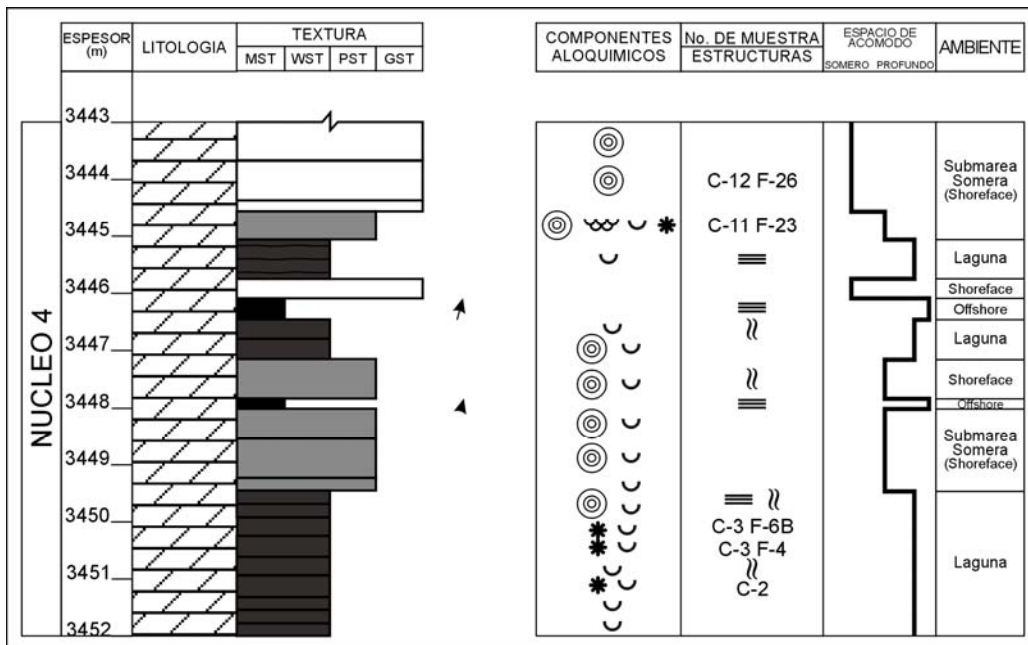


Figura 28. Columna estratigráfica del núcleo 4 de las rocas oolíticas de edad Kimmeridgiano en el pozo C-1025



---

---

## 2) Facies de Packstone Oncolítico-Bioclástico

### - Litología y estructuras sedimentarias

Esta facies es la más abundante, está constituida por packstone oncolítico-bioclástico dolomitizado y por packstone oncolítico parcialmente dolomitizados. Los packstone oncolítico-bioclásticos contienen abundantes bioclastos (figura 29A), aunque los oncolitos llegan a representar hasta 20% de la roca; son masivos, con porosidades de 5-10%, de tipo móldica y vugular. Los packstone de oncolitos son masivos, contienen escasos bioclastos y presentan escasa porosidad (figura 29B).

### - Petrografía

Esta facies está constituida por dolomías de grano grueso y por packstone oncolíticos parcialmente dolomitizados. Las dolomías preservan su textura original de packstone oncolítico-bioclástico (ver figuras 26-28), con frecuencia se aprecian en estas rocas escasos fantasmas de fragmentos de equinodermo y posiblemente de molusco. Los fantasmas de oncolitos miden hasta 2.5 mm de diámetro, mientras que los fantasmas de oolitas miden en general 0.75 mm; no se observa ya el núcleo de estos granos, ni la microfábrica de las capas debido al grado de alteración que los afectó. Es común observar una capa micrítica dolomitizada y disolución selectiva de los núcleos; no se observan contactos entre oolitas y oncolitos, lo que indica una cementación temprana.

En los packstone oncolíticos (figura 26) solamente la matriz se encuentra dolomitizada, mientras que los oncolitos se encuentran constituidos aun por la mineralogía original (figura 29C), esto se debe a que la materia orgánica que contiene el lodo calcáreo conforma una película orgánica que inhibe la dolomitización. Estos packstone presentan escasos *lumps* de hasta 3 mm de diámetro y escasos bioclastos (moluscos y briozoarios); los oncolitos tienen diámetros de 1 a 3.5 mm, sus núcleos están constituidos por fragmentos de rudistas y otros bivalvos y en menor proporción por fragmentos de equinodermo, de coral, de algas, briozoarios y otros bioclastos indeterminados. Ocasionalmente se encuentran bivalvos y gasterópodos completos formando el núcleo. De manera

muy escasa se observa cuarzo detrítico en el núcleo de los oncolitos y aún en la matriz.

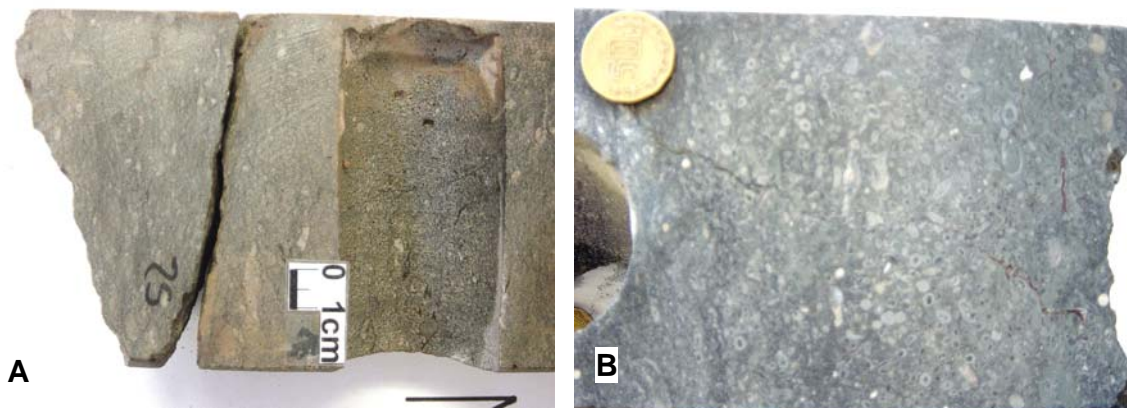
### 3) Facies de Wackestone de Bioclastos

#### - Litología y estructuras sedimentarias

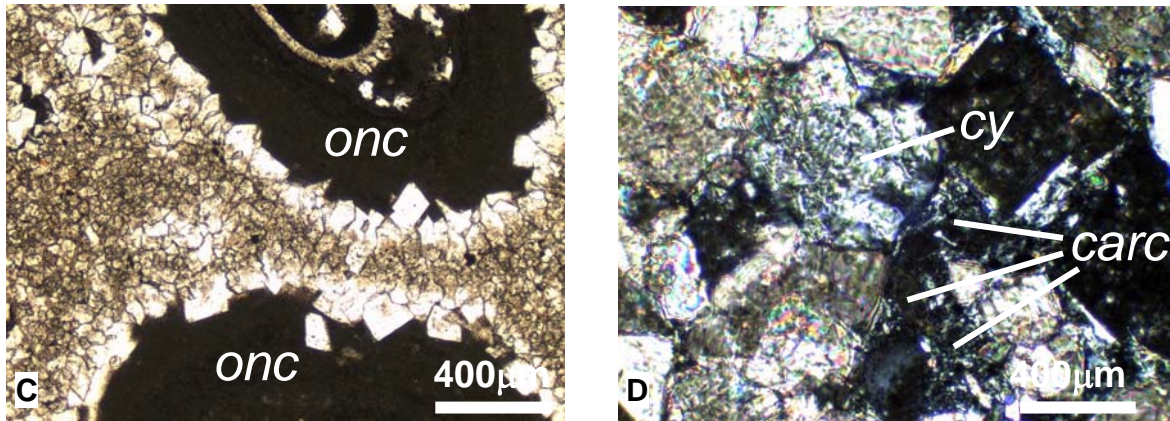
Esta es la facies está constituida por wackestone de bioclastos dolomitizados, de grano fino color gris medio, con estructura masiva y aparentemente bioturbados.

#### - Petrografía

Petrográficamente la facies consiste de dolomías de grano fino, en las que se aprecia la textura original de wackestone de bioclastos. Dentro de los bioclastos ocasionalmente se aprecian fragmentos de equinodermo recristalizados, además de escaso cuarzo detrítico, cemento de yeso y de arcillas (figura 29D).



**Figura 29.** Facies de packstone oncolítico-bioclásticos y wackestone de bioclastos de la Sonda de Campeche. **A)** En la porción media superior de este núcleo, los bioclastos son más frecuentes y los granos envueltos más escasos; además presenta suturas de disolución (F-25, a la izquierda) (Muestra C-3001 N-4 C-10 F-26-25). **B)** Hacia la porción inferior del núcleo, desaparece la dolomitización y la roca consiste de un packstone de oncolitos con escasa porosidad y mayor contenido de bioclastos (Muestra C-3001 N-5 C-4 F-11).



**Figura 29** (Continuación). Facies de packstone oncolítico-bioclásticos y wackestone de bioclastos de la Sonda de Campeche. **C)** Packstone oncolítico-bioclástico parcialmente dolomitizado, sólo la matriz fue dolomitizada, mientras que la micrita que constituye a los oncolitos (*onc*) inhibió el reemplazamiento (ver texto) (Muestra C-3001 N-5 C-4 F-11, LN). **D)** Cemento de yeso (*cy*) y de arcillas (*carc*) en dolomía de grano fino originada de wackestone de bioclastos; la presencia de estos cementos es escasa (Muestra C-1025 N-4 C-2, XN).

Los granos de cuarzo son angulosos, del tamaño de limo grueso (0.05 mm de diámetro en promedio). Los fantasmas de bioclastos probablemente son de fragmentos de molusco, de acuerdo con la morfología que se presentan. Al parecer la roca fue bioturbada y el relleno de esas estructuras fue igualmente reemplazado por dolomita de grano medio a grueso, con tamaños de cristales de 0.075-0.275 mm. El cemento de arcillas se encuentra en la porosidad intercrystalina de la dolomita y aparentemente se trata de caolinita. La dolomitización fue penetrativa, afectando incluso a los fragmentos de equinodermo, sin embargo estos preservaron el carácter óptico que los caracteriza, lo que representa una dolomitización mímica (en el sentido de Tucker y Wright, 1990).

## ASOCIACION DE FACIES

Las rocas estudiadas del Kimmeridgiano del Complejo Cantarell, constituyen tres facies: 1) facies de grainstone oolíticos; 2) facies de packstone oncolítico-bioclásticos; y 3) facies de wackestone de bioclastos, afectados en diferente grado por procesos de dolomitización. Con base en las características composicionales originales y texturales de estas facies, se considera que las facies de grainstone y packstone oolítico y las facies de packstone oncolítico-bioclástico y wackestone bioclástico conforman una asociación de facies de bancos de arenas carbonatadas y depósitos lagunares. La asociación de facies observada presenta un carácter relativamente cíclico que pasan de una sucesión que se someriza hacia la cima, reflejando una cierta progradación de los depósitos de alta energía (bancos oolíticos), a una sucesión que se profundiza hacia la cima, completando de esta manera el ciclo sedimentario (figuras 26 y 27). El carácter dinámico de las condiciones de sedimentación en esta facies se releja igualmente en la alternancia de grainstone oolítico con grainstone oncolítico-bioclástico, al intercalarse depósitos de alta energía (oolíticos) con depósitos protegidos por estos (oncolítico-bioclástico, ver figura 27).

## MODELO E INTERPRETACION DE FACIES

### INTERPRETACION DE FACIES

#### - Facies de Grainstone y Packstone Oolítico

Estas facies se interpretan como depósitos de bancos oolíticos, acumulados bajo condiciones de alta energía. Como se mencionó en el apartado anterior, la alternancia entre los packstone de oncolitos y los grainstone oolíticos (en la parte inferior del núcleo 5 del pozo C-3001, por ejemplo; ver figura 26), reflejan cierta ciclicidad en los depósitos, los cuales varían verticalmente desde facies lagunares oncolíticas, hasta las facies adyacentes de bancos oolíticos; estas alternancias podrían deberse posiblemente a variaciones de alta frecuencia en el nivel relativo del mar.

Analizando comparativamente estas facies de grainstone y packstone oolítico de la Sonda de Campeche, con las facies de grainstone y packstone oolítico de la Fm. El Porvenir (facies de *shoreface*), podemos establecer diferencias primordiales. Por un lado, la facies de *shoreface* de la Fm. El Porvenir se depositó muy cerca de la línea de costa, como lo refleja la gran influencia terrígena que contiene. Por otro lado, los packstone oncolíticos de la facies de grainstone y packstone oolítico de la Sonda de Campeche son el resultado de una sedimentación en condiciones de muy baja energía, en un ambiente lagunar; este tipo de depósitos oncolíticos lagunares no se encuentran en la Fm. El Porvenir, lo que permite interpretar que las condiciones ambientales y sedimentológicas fueron distintas en la Región Istmica (Fm. El Porvenir) y en la Sonda de Campeche. El hecho de que en esas localidades se hayan depositado facies oolíticas no implica necesariamente que correspondan al mismo ambiente de depósito, debido a que los sedimentos oolíticos pueden depositarse en distintos sitios dentro de una plataforma carbonatada (Tucker y Wright, 1990).

- Facies de Packstone Oncolítico-bioclástico

Esta facies es interpretada como depósitos protegidos por los bancos oolíticos, acumulados en los márgenes de estos, en condiciones lagunares. Estos depósitos de margen de banco representan condiciones de baja energía como lo indica el contenido de oncolitos, bioclastos y envolturas de micrita (*micrite envelopes*). Se considera que estos sedimentos se acumularon bajo la protección de los bancos oolíticos y asociados a ellos.

En la Fm. El Porvenir, por otra parte, no se depositaron facies de este tipo asociadas a las facies oolíticas, es decir, a diferencia de la Sonda de Campeche, en el Kimmeridgiano en la Región Istmica no se desarrollaron facies lagunares detrás de las oolíticas, como ocurrió en la Sonda de Campeche durante la misma edad. Los depósitos asociados a las facies oolíticas en la Fm. El Porvenir corresponden solamente a packstone de oolitas.

- Facies de Wackestone de Bioclastos

Con base en la composición litológica y rasgos texturales de los wackestone de bioclastos, como son: el contenido de fragmentos (fantasmas) de equinodermo recristalizados, escasos limos gruesos de cuarzo anguloso, además de bioturbación, esta facies se interpreta como depósitos lagunares protegidos por los bancos oolíticos.

### MODELO DE FACIES

La literatura publicada o disponible sobre la sedimentología de la Sonda de Campeche no es abundante. Santiago (1980) reporta la estratigrafía del Jurásico Superior (Kimmeridgiano) y registra 500 m de espesor, en los que la parte superior es predominantemente arcillosa con algunas calizas oolíticas, en tanto que la parte inferior es una secuencia de lutitas, dolomías y bentonitas, con algunas anhidritas intercaladas. En el mismo año Meneses de Gyves (1980) reporta que el Kimmeridgiano está representado por rocas calcáreas de ambientes de plataforma. Posteriormente, Santiago *et al.* (1984) considera que durante el Kimmeridgiano, en la porción que ocupa la Sonda de Campeche, se depositó una sección de carbonatos con alternancias de terrígenos finos, de ambientes someros que propiciaron condiciones favorables para generar el magnesio de las microdolomías que se tienen en esta secuencia sedimentaria y que las condiciones de sedimentación más profundas del Kimmeridgiano, deben localizarse hacia el occidente de la plataforma mencionada. Doce años después, Angeles (1996) establece un modelo sedimentario para el Kimmeridgiano, en el que considera una plataforma carbonatada con el desarrollo de una barrera de arenas carbonatadas (oolíticas) con pequeños deltas de marea asociados a una laguna, es decir que propone un sistema sedimentario litoral para las rocas de esa edad en la Sonda de Campeche.

Durante el presente estudio no se analizaron líneas sísmicas tomando en consideración que el horizonte estratigráfico del Kimmeridgiano, al igual que todo el Jurásico en conjunto, están fuera de la resolución sísmica, y solamente se aprecia un delgado horizonte de reflectores horizontales. Sin embargo, el activo de la Región Marina Noreste de PEMEX ha logrado caracterizar los bancos oolíticos en algunas líneas sísmicas y los interpretan como depósitos desarrollados en altos estructurales preexistentes en un ambiente de rampa interna. Con base en esta información, en esta tesis se interpreta que los grainstone oolíticos dolomitizados depositados como arenas carbonatadas corresponden a facies de bancos oolíticos de plataforma interna. Las facies de packstone oncolítico-bioclástico representan, por su parte, depósitos lagunares de margen de banco oolítico, y de acuerdo con sus características texturales y composicionales, son depósitos acumulados detrás de los bancos, protegidos por estos. El carácter alternante de estos depósitos denota muy posiblemente una fuerte influencia de las variaciones de alta frecuencia en el nivel relativo del mar. Por otra parte, los wackestone dolomitizados de bioclastos constituyen sedimentos lagunares acumulados en condiciones ligeramente más profundas, muy ricos en material micrítico, debido a que constituyeron depósitos protegidos por los altos estructurales en los que nuclearon los bancos oolíticos.

La arquitectura de facies observada en las rocas oolíticas estudiadas de la Sonda de Campeche es semejante a los llamados *ciclos de submarea*, en condiciones de rampa somera (Osleger, 1991). En esta tesis se considera que la somerización del espacio de acomodo no llevó a los depósitos de la Sonda de Campeche a condiciones de intermarea. Por otro lado, de acuerdo con las características de los *ciclos de submarea*, estos no llegan a presentar exposición subaérea, sino que se mantienen sumergidos a lo largo de su “historia depositacional”; en términos generales, estos *ciclos de submarea* se forman en rampa somera mediante la migración de bancos de arenas bioclásticas sobre wackestone bioturbados, seguidos de una amplia progradación de bancos oolíticos, como respuesta a corrientes generadas por tormenta, oleaje o mareas (Osleger, 1991). De acuerdo

con ese mismo autor, las oscilaciones eustáticas en el nivel del mar, junto con la fluctuación de las zonas de retrabajo por oleaje, normal y de tormenta, serían los mecanismos que controlan el desarrollo de las potentes sucesiones de ciclos carbonatados de submarea. Ahora bien, de acuerdo con los datos obtenidos en este trabajo, con el modelo sísmico de PEMEX, con los trabajos antecedentes y con el estudio presentado de la Fm. El Porvenir, en esta tesis se propone como modelo sedimentario para las rocas oolíticas de la Sonda de Campeche, el desarrollo de bancos oolíticos nucleados sobre altos estructurales que dieron lugar a depósitos lagunares protegidos (packstone oncolítico-bioclástico y wackestone bioclástico) por estos. Este modelo difiere del propuesto en el capítulo anterior para la Fm. El Porvenir, debido a las diferentes condiciones ambientales y estructurales en que se formaron. Además, la arquitectura estratigráfica de las rocas oolíticas del Kimmeridgiano en la Sonda de Campeche presenta semejanzas con los llamados *ciclos de submarea* (Osleger, 1991), ciclicidad no observada en la Fm. El Porvenir.

#### ANALISIS DIAGENETICO

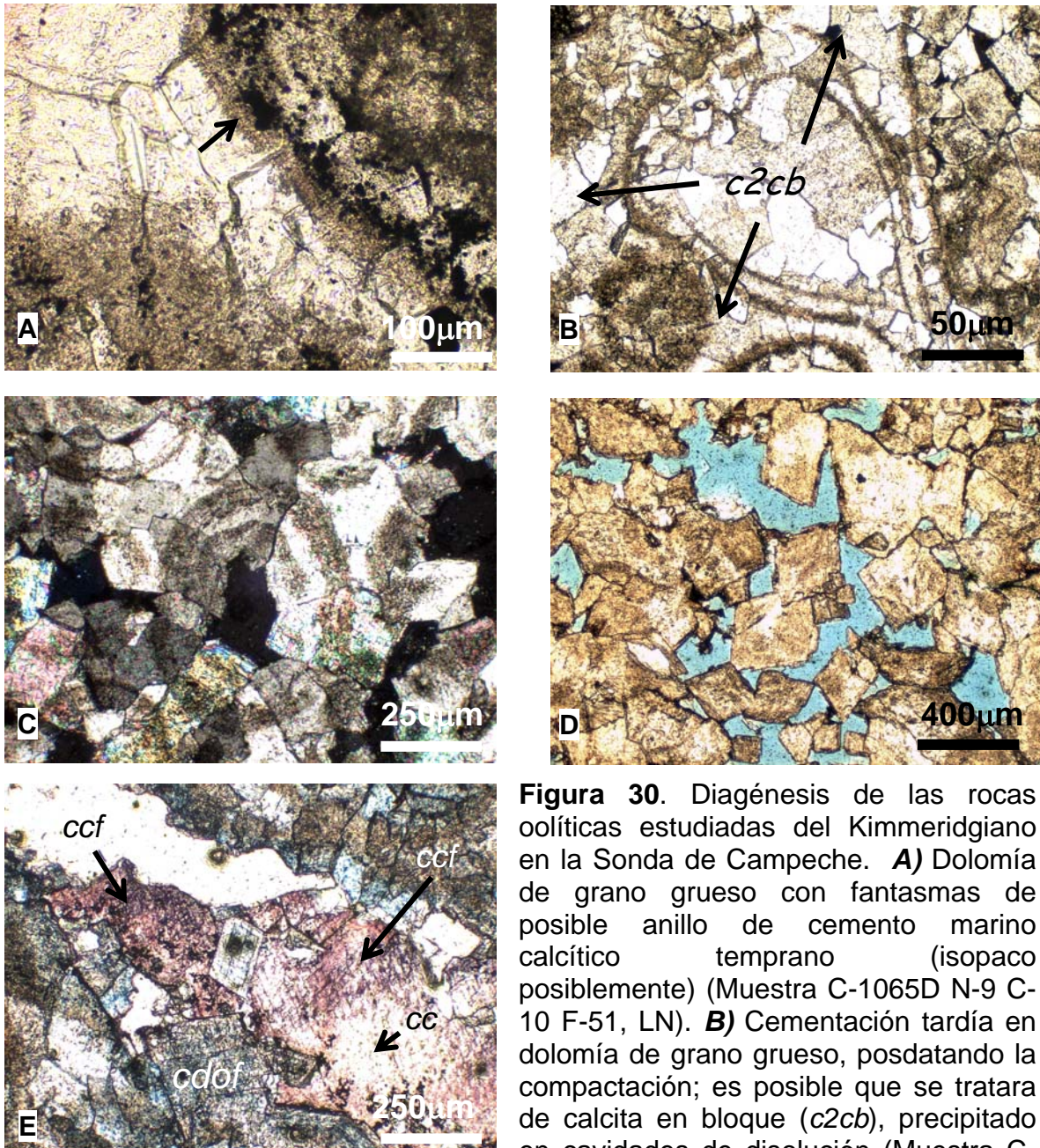
Las rocas oolíticas del Kimmeridgiano en la Zona Marina de Campeche sufrieron una diagénesis compleja e intensa. Entre los procesos diagenéticos más importantes se encuentra la cementación temprana por calcita de los sedimentos oolíticos, así como la dolomitización penetrativa que destruyó, en algunas zonas, la textura original de estas rocas y la disolución parcial de éstas.

- Secuencia Paragenética de las Rocas Oolíticas Kimeridgianas del Campo Cantarell

La secuencia paragenética de las rocas oolíticas dolomitizadas se estudió en los pozos C-3001, C-1065D y C-1025 del Campo Cantarell, así como del pozo T-74 del Campo Taratunich.

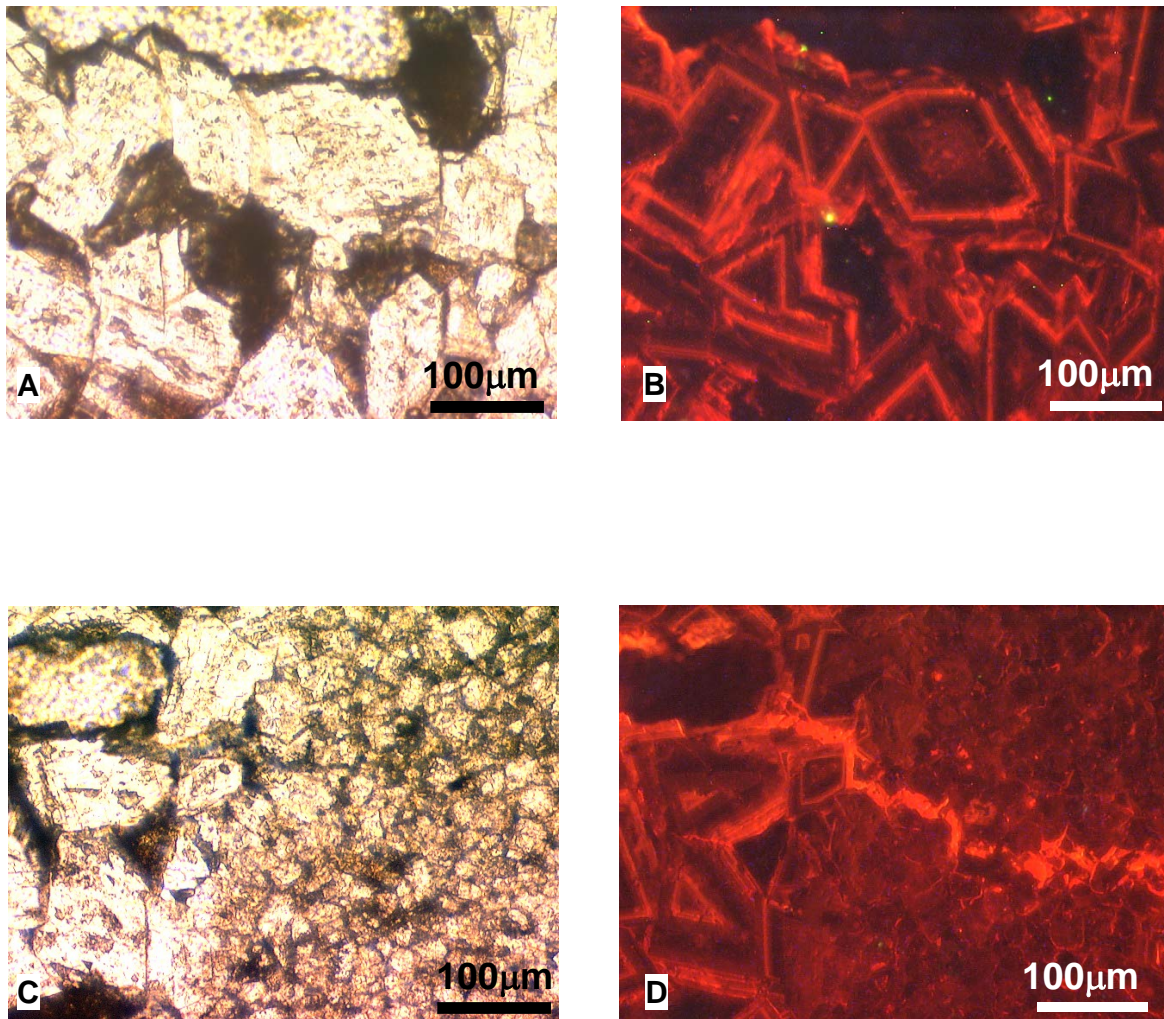


El primer evento diagenético que se reconoce es la cementación temprana de los sedimentos oolíticos, por un cemento de calcita isopaca (*c1ca*; figura 30A), que inhibió una deformación mayor de los granos y la reducción del espacio poroso por compactación. Posteriormente estos sedimentos sufrieron una moderada compactación mecánica (*com*), que provocó recristalización (*re*) en estas rocas, así como un proceso de disolución por presión (*dp1*), que formó microestilolitas poco desarrolladas. Subsiguientemente se produjeron dos eventos leves de fracturamiento (*f1* y *f2*). Posdatando la compactación, se tiene una segunda etapa de cementación, probablemente por calcita en bloque (*c2cb*), en la que puede apreciarse algunos sobres de micrita fracturados y disgregados (figura 30B). Posteriormente estas rocas sufrieron el evento diagenético más intenso y ampliamente distribuido en estos sedimentos oolíticos, una dolomitización penetrativa (*do1*), que reemplazó tanto a los cementos calcíticos como a los aloquímicos (figura 30C). El análisis petrográfico de esta dolomita muestra que sufrió un microfracturamiento a escala cristalina, que afectó esporádicamente algunos de los cristales. Los análisis de catodoluminiscencia de esta dolomita indican que se tienen múltiples etapas de crecimiento cristalino (figura 31).



**Figura 30.** Diagénesis de las rocas oolíticas estudiadas del Kimmeridgiense en la Sonda de Campeche. **A)** Dolomía de grano grueso con fantasmas de posible anillo de cemento marino calcítico temprano (isopaco posiblemente) (Muestra C-1065D N-9 C-10 F-51, LN). **B)** Cementación tardía en dolomía de grano grueso, posdatando la compactación; es posible que se tratara de calcita en bloque (*c2cb*), precipitado en cavidades de disolución (Muestra C-1065D N-9 C-8 F-48, LN).

**C)** El proceso diagenético más intenso y distribuido en las rocas oolíticas estudiadas de Cantarell fue la dolomitización penetrativa, que reemplazó tanto cementos como granos (Muestra C-1065D N-9 C-8 F-48, XN). **D)** Se muestra la alta porosidad (5-30%) por disolución de esta dolomía de grano grueso; la muestra fue impregnada con resina teñida de azul (Muestra C-1025 N-4 C-12 F-26, LN). **E)** Calcita ferrosa (*ccf*, en morado) y calcita no ferrosa (*cc*, en rojo), además de dolomita ferrosa (*cdof*), relleno parcialmente un vugulo en una dolomía de grano grueso (Muestra C-1065D N-9 C-8 F-48, LN).



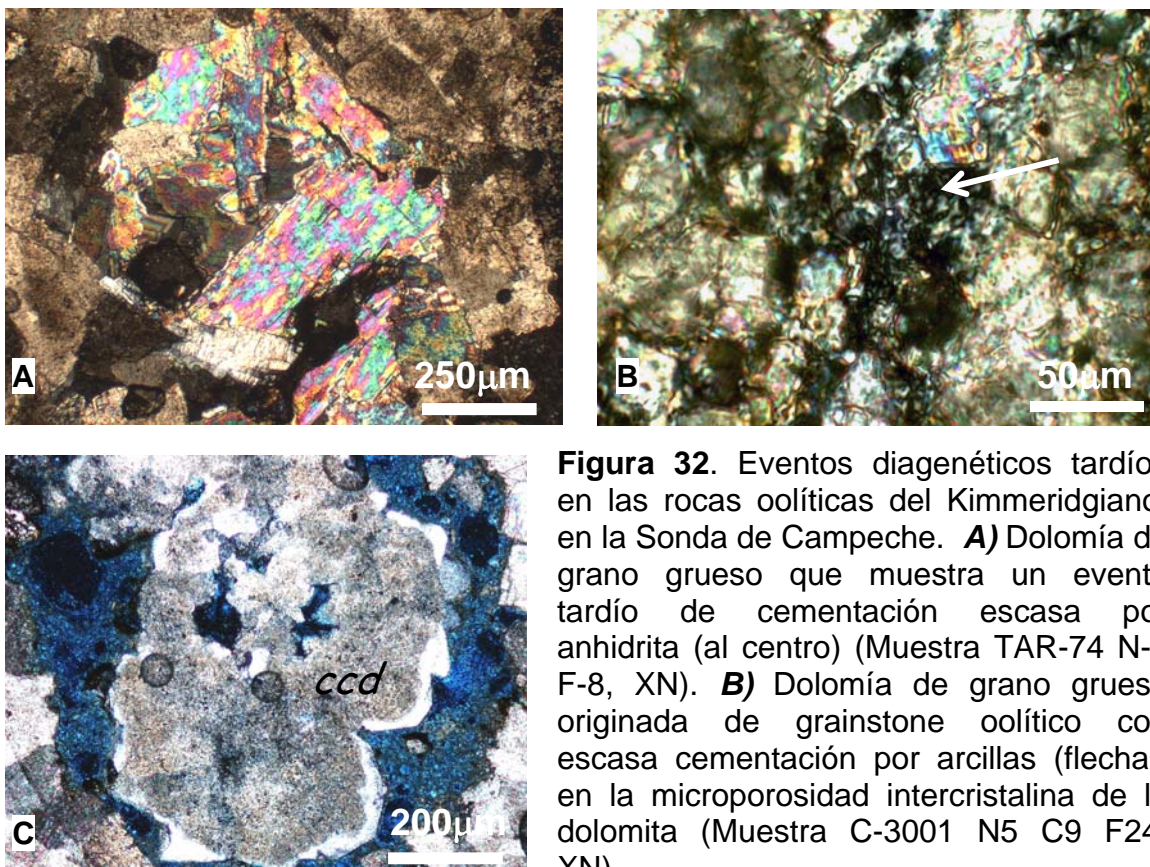
**Figura 31.** Imágenes de catodoluminiscencia de los cementos de las rocas oolíticas del Kimmeridgiano, en la Sonda de Campeche. **A)** Imagen en luz natural de la foto B. (Muestra C-3001 N-5 C-7 F-20B, LN). **B)** Esta imagen muestra el patrón de luminiscencia del cemento de dolomita en el núcleo de una oolita (packstone oolítico). Note la diversidad en el patrón en la parte superior izquierda y central (Muestra C-3001 N-5 C-7 F-20B, CL). **C)** Imagen en luz natural de la foto D. Note que la fractura por la que entró el fluido dolomitizante no se aprecia en petrografía simple. (Muestra C-3001 N-5 C-7 F-20B, LN). **D)** Imagen que muestra una etapa posterior de dolomitización. Note la diferencia en la luminiscencia entre la dolomita más tardía con la dolomita de la matriz remplazada (derecha) y la dolomita en el núcleo de la oolita (izquierda) (Muestra C-3001 N-5 C-7 F-20B, CL).

El siguiente evento en la historia diagenética de estas rocas fue una disolución por presión tardía, que generó microestilolitas y suturas de disolución que fueron impregnadas por hidrocarburos pesados (*dp2*). Subsecuentemente se presentó un proceso de disolución tardía de estas rocas (*ds*) que generó porosidad vugular y oomóldica, entre 5 y 30% aproximadamente (figura 30D). Esta porosidad vugular fue parcialmente ocluida por cemento tardío de calcita (*ct*), ferrosa y no ferrosa, y dolomita ferrosa (figura 30E). La porosidad de las microestilolitas, vugular, oomóldica, intercrystalina y la porosidad en las suturas de disolución fue ocupada por hidrocarburos (*hc*), ligeros y pesados, probablemente durante varias etapas de migración.

Durante el análisis diagenético de estas rocas, también se observaron tres eventos de cementación de menor intensidad. Uno de estos eventos de cementación corresponde a anhidrita (*can*), el cual se encuentra muy escasamente en la porosidad oomóldica (figura 32A). Los otros dos cementos corresponden a arcillas (probablemente caolinita, *cka*; figura 32B) y muy escasamente a sílice y calcedonia (*ccd*; figura 32C), aunque esto se observó solamente en una de las muestras estudiadas.

La cementación por caolinita (*c3k*) se interpreta como el resultado de precipitación a partir de fluidos diagenéticos, como material arcilloso residual. El cemento de caolinita rellena parcialmente la porosidad intercrystalina de la dolomita, posdatando la dolomitización. Es probable que la cementación de anhidrita (*can*) esté ligada también a la dolomitización, dado que la precipitación de minerales evaporíticos está asociada con los procesos de precipitación de dolomita, mediante la liberación de iones de calcio (Morrow, 1990); este cemento de anhidrita se encuentra presente tanto en la porosidad intercrystalina como en la porosidad relicta de los núcleos de las oolitas (oomóldica). La cementación por sílice (incluyendo la calcedonia) ha sido observada en rocas carbonatadas del Campo Cantarell de la Sonda de Campeche, como parte de la secuencia paragenética más tardía, representando generalmente el último evento de cementación (Martínez *et al.*, 2003).

El análisis de catodoluminiscencia de la dolomita que reemplaza a las rocas oolíticas de la Sonda de Campeche indica que la dolomitización ocurrió en varias etapas, generando varias zonas o anillos de crecimiento en los cristales, lo que resultó en un patrón complejo; desde el centro del cristal, hacia la periferia del mismo: 1) no luminiscencia, 2) luminiscencia opaca, y 3) luminiscencia brillante, típico de sepultamiento (figura 31A). Este patrón refleja diferencias composicionales en la dolomita, (presencia variable de Fe y Mn), posiblemente originadas a partir de salmueras emplazadas en un ambiente de sepultamiento. La luminiscencia que presenta la dolomita que reemplazó la matriz de los packstone oncolíticos es un tanto más uniforme que la luminiscencia del cemento de dolomita que se encuentra en el núcleo de los oncolitos, la cual muestra varias zonas de crecimiento (figura 31C), es decir, diferencias composicionales.



**Figura 32.** Eventos diagenéticos tardíos en las rocas oolíticas del Kimmeridgiano, en la Sonda de Campeche. **A)** Dolomía de grano grueso que muestra un evento tardío de cementación escasa por anhidrita (al centro) (Muestra TAR-74 N-3 F-8, XN). **B)** Dolomía de grano grueso originada de grainstone oolítico con escasa cementación por arcillas (flecha), en la microporosidad intercrystalina de la dolomita (Muestra C-3001 N5 C9 F24, XN).

**C)** Dolomía de grano grueso; la imagen muestra una cementación muy escasa por calcedonia (*ccd*, ver texto), un evento local y tardío, en la porosidad del núcleo de algunas oolitas (Muestra TAR-74 N-3 F-13-4, XN).

La figura 33 muestra de manera esquemática los eventos de la secuencia paragenética de las rocas oolíticas dolomitizadas del Kimmeridgiano de la Sonda de Campeche, estudiadas en los pozos C-3001, C-1065D y C-1025 del Campo Cantarell y en el pozo T-74 del Campo Taratunich.

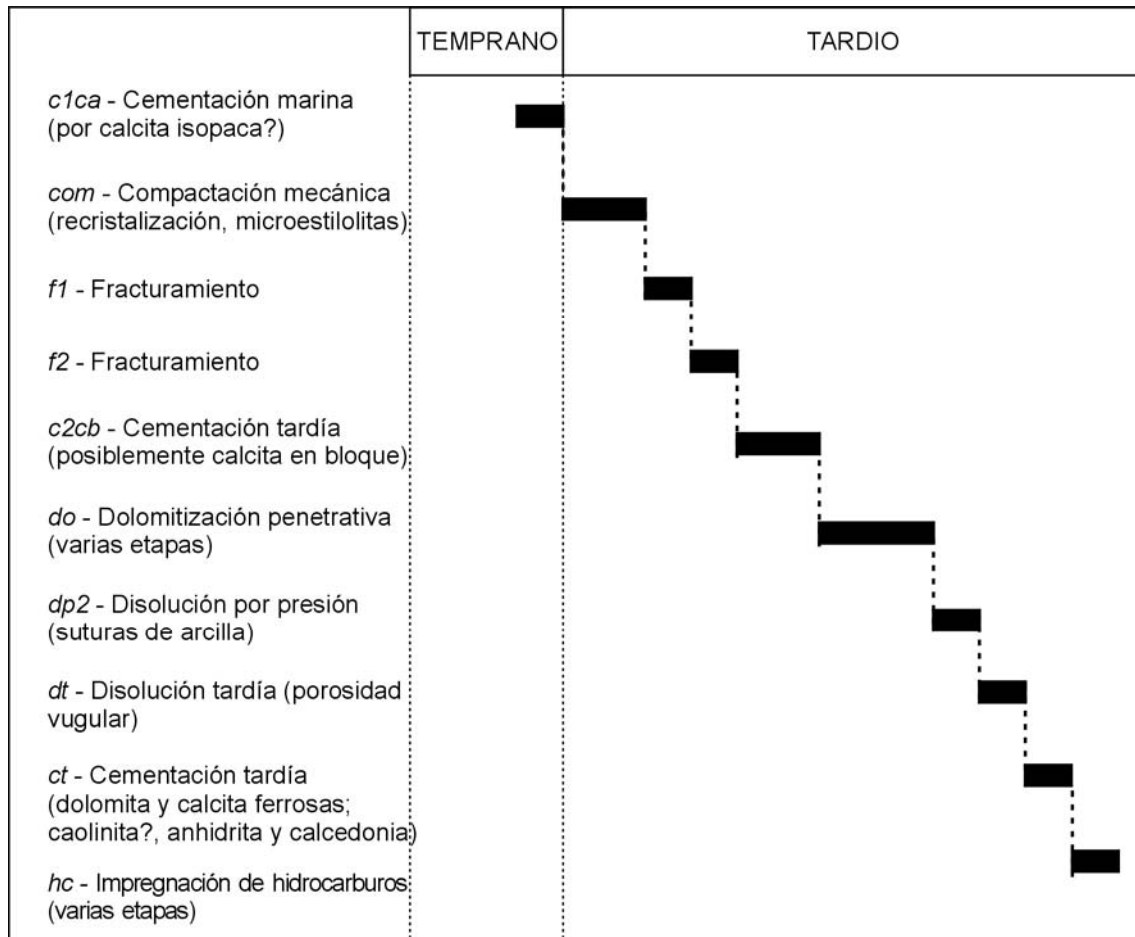


Figura 33. Secuencia paragenética de las rocas oolíticas estudiadas del Kimmeridgiano, en la Sonda de Campeche

Cabe mencionar que las muestras estudiadas del Campo Taratunich presentan una luminiscencia más uniforme, sin mostrar diferencias aparentes en la composición de la dolomita (figura 34A-B).

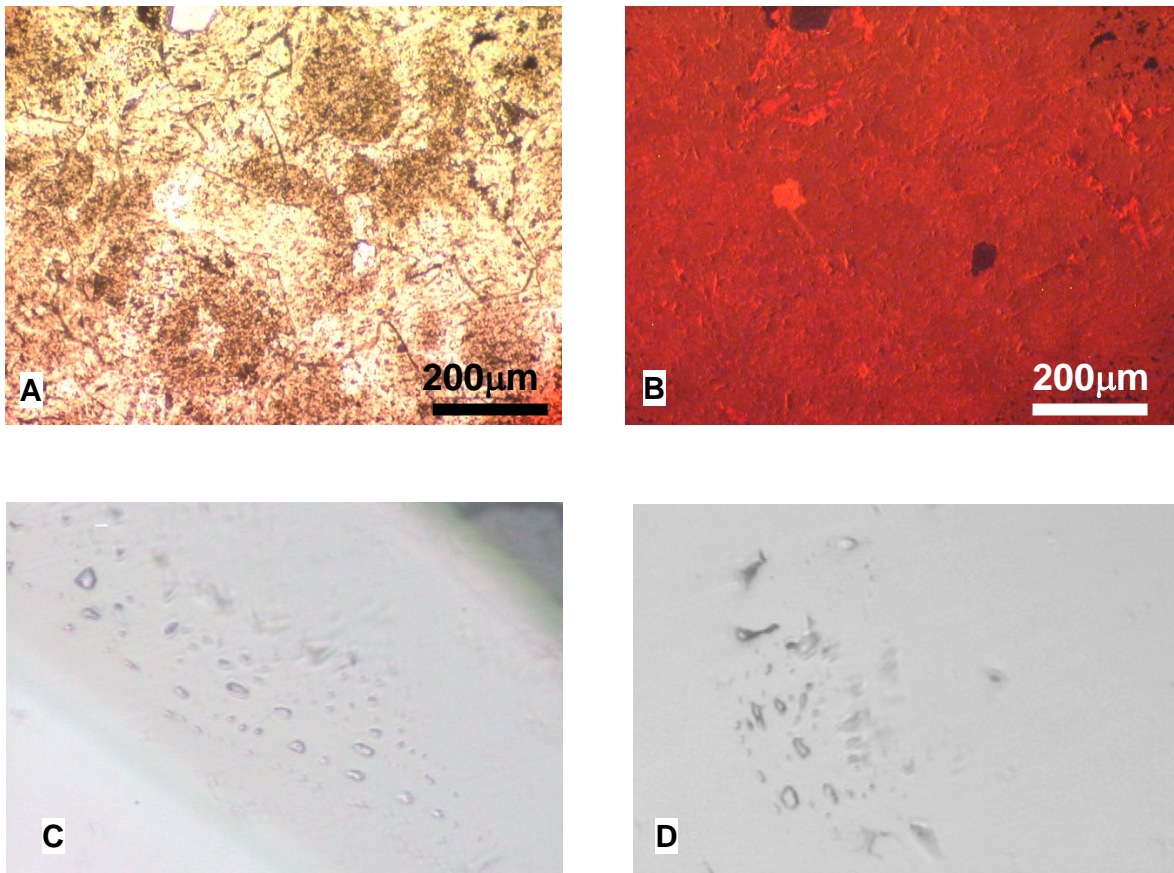
#### - Inclusiones Fluidas

Se seleccionaron 5 muestras de núcleo para el estudio de inclusiones fluidas, de acuerdo con la técnica de Goldstein y Reynolds (1995). Las inclusiones fluidas observadas en las muestras estudiadas son demasiado pequeñas para ser adecuadamente estudiadas. Por otra parte, muchas inclusiones presentan cambio de forma (*necking down*), proceso mediante el cual se forman inclusiones fluidas secundarias que no son adecuadas para calcular temperaturas de formación y salinidad (Goldstein y Reynolds, 1995). También se observaron inclusiones secundarias en microfracturas observables petrográficamente sólo a partir de los trenes de estas inclusiones (figura 34C). Únicamente se encontraron inclusiones fluidas primarias en una fractura cementada por calcita, en el núcleo 5 del pozo C-3001 (figura 34D). Las temperaturas de homogenización (Th) que presentan tales inclusiones están en el rango de 63 °C hasta 72 °C. Esta fractura que contiene las inclusiones primarias predata la dolomitización, de tal manera que la dolomitización penetrativa pudo haberse formado a una temperatura mayor a los 72 °C. Los rangos de Th de las inclusiones fluidas primarias y secundarias se presentan en la figura 35.

#### - Ambiente Diagenético

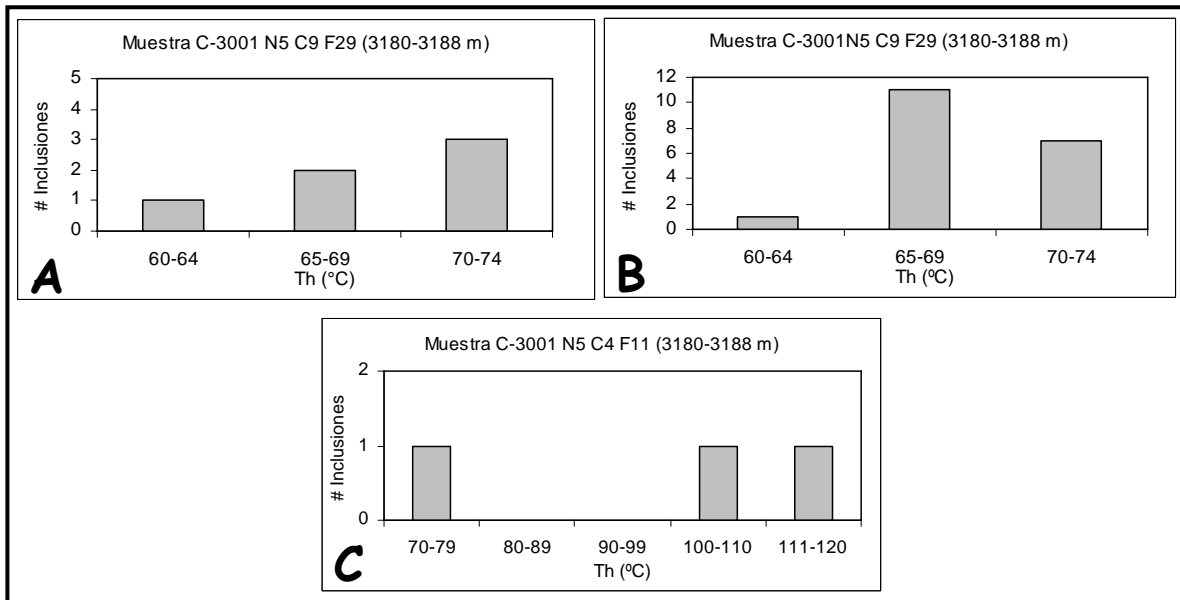
Los datos obtenidos del ambiente diagenético permiten interpretar que las rocas oolíticas dolomitizadas han pasado por al menos dos ambientes diagenéticos distintos; el primero ocurrió en una etapa temprana que fue de tipo marino somero, evidenciado por el cemento de calcita isopaca (figura 30A). El segundo evento ocurrió probablemente en un ambiente diagenético de sepultamiento, como lo indica la compactación de estas rocas, la cementación que posdata la compactación y la dolomitización, cuya luminiscencia es típica de un ambiente de sepultamiento (figura 31), originada probablemente por salmueras en condiciones profundas. Además las temperaturas de homogenización (Th) de las inclusiones fluidas primarias encontradas en una fractura que predata la dolomitización (figura 35), permite corroborar el ambiente diagenético de sepultamiento para los procesos de dolomitización, los cuales pudieron haberse formado a una

temperatura mayor a los 72 °C, es decir, a una profundidad de sepultamiento mayor a 2 km, considerando el gradiente geotérmico promedio de 33°C/km. Por otra parte, los eventos tardíos de cementación por anhidrita, caolinita y sílice apoyan también la interpretación de un ambiente diagenético de sepultamiento.



**Figura 34.** Catodoluminiscencia e inclusiones fluidas en las rocas oolíticas estudiadas del Kimmeridgiano, en la Sonda de Campeche. **A)** Imagen en luz natural de la foto B. Note el carácter penetrativo de la dolomitización y la presencia de fantasmas de oolitas (Muestra T-74 N-2 32-4, LN). **B)** La imagen muestra el carácter uniforme de la catodoluminiscencia de la dolomita que reemplazó penetrativamente las rocas oolíticas estudiadas del Campo Taratunich (Muestra T-74 N-2 32-4). **C)** Inclusiones fluidas secundarias, note la alineación de las microfracturas que dieron origen a estas inclusiones (C-3001 N5, 40X-LN). **D)** Inclusiones fluidas primarias en una fractura, note la relativamente uniforme relación vapor/líquido, ver texto (C-3001- N5-C9-F29, 40X-LN).





**Figura 35.** Temperaturas de homogenización (Th) medidas en las muestras de rocas oolíticas del Campo Cantarell. **A:** Inclusiones fluidas primarias en una fractura cementada por calcita (ver texto). **B:** Inclusiones fluidas Secundarias en la misma fractura que **A**. **C:** Inclusiones fluidas secundarias. Note el rango relativamente estrecho de Th en **A** y **B**, comparado con el amplio rango en **C**.

---

---

## CAPITULO IV. CONCLUSIONES

La comparación de las litofacies del Jurásico Superior de la Sonda de Campeche y de la Formación El Porvenir, permitió establecer semejanzas y diferencias entre ambos depósitos sedimentarios.

La Formación El Porvenir de edad Kimmeridgiano-Titoniano Inferior está constituida por tres facies sedimentarias: 1) facies de grainstone oolíticos; 2) facies de packstone oolíticos; y 3) facies de wackestone de radiolarios. Esta asociación de facies sugiere un ambiente de rampa interna somera, con depósitos de shoreface (grainstone y packstone oolíticos) y un ambiente de rampa externa con depósitos de offshore (wackestone de radiolarios).

En términos de estratigrafía de secuencias, la Formación El Porvenir representa ocho ciclos de magnitud variable, transgresivos-regresivos, cuya evolución de facies y espesor reflejan la dinámica de las interacciones entre la tasa de sedimentación, la subsidencia y las variaciones en el nivel relativo del mar. Esta formación se ha dividido en tres secuencias de tercer orden, compuestas por secuencias de alta frecuencia o parasecuencias. La interacción de los factores mencionados dio como resultado el establecimiento de secuencias potentes de HTS, con acumulaciones delgadas de TST.

La Formación El Porvenir estuvo sometida a tres ambientes diagenéticos distintos: marino (caracterizado por la calcitización de radiolarios), vadoso (evidenciado por la presencia de cemento de calcita de probable origen vadoso) y de sepultamiento (reflejado en la deformación de granos por compactación y disolución por presión). Las rocas oolíticas de edad Kimmeridgiano en la Sonda de Campeche se dividieron en tres facies sedimentarias: 1) facies de grainstone oolíticos; 2) facies de packstone oncolítico-bioclásticos; y 3) facies de wackestone de bioclastos. Esta asociación de facies sugiere que corresponden a bancos oolíticos de rampa interna (grainstone y packstone oolíticos), los cuales fueron acumulados sobre altos estructurales, con facies lagunares adyacentes (packstone oncolítico-bioclásticos y wackestone de bioclastos).

Los análisis petrográfico, de catodoluminiscencia y de inclusiones fluidas indican que las rocas oolíticas de edad Kimeridgiano estudiadas en la Sonda de Campeche estuvieron sometidas a cuando menos dos ambientes diagenéticos: marino somero, interpretado a partir de la presencia de fantasmas de anillos de cemento de calcita isopaca en los grainstone oolíticos, y un ambiente de sepultamiento, evidenciado por procesos de compactación, disolución por presión, y dolomitización de sepultamiento, entre otros. La dolomitización de sepultamiento dio lugar a pérdida y generación de propiedades petrofísicas, es decir de la característica almacenadora de las rocas oolíticas. La pérdida de porosidad se dio por procesos de compactación y cementación. Incluso una parte de la porosidad intercrystalina generada por la dolomitización fue rellenada parcialmente por cementos tardíos de arcillas (probablemente caolinita), anhidrita y sílice; no obstante, estas rocas preservan una porosidad importante que es suficiente para ser considerada como roca almacenadora.

El modelo sedimentario propuesto en este trabajo para ambas localidades es una rampa carbonatada. Sin embargo, para la Sonda de Campeche se interpreta un complejo de bancos oolíticos asociados a una laguna. En contraste, para la Formación El Porvenir se interpretan ambientes de shoreface y offshore, el primero de ellos con abundante influencia terrígena. En el trabajo de campo de la secuencia de El Porvenir, Oaxaca no se identificaron plenamente litofacies que representen un sistema de barrera con laguna por lo que se les considera distintos a los de la Sonda de Campeche. No obstante, aunque el modelo de depósito sea ligeramente diferente, es obvio que los estudios de afloramiento de secuencias sedimentarias depositadas en ambientes semejantes y contemporáneos son importantes para visualizar los distintos escenarios sedimentológicos del Jurásico Tardío en el sureste de México, y de esta manera interpretar mejor el modelo sedimentológico de las diferentes unidades de interés económico en el la Sonda de Campeche.

---

---

## BIBLIOGRAFIA

- AHR, W. 1985. Limestone depositional sequences on shelves and ramps: modern and ancient. *Geology Today*, p. 84-89.
- ANGELES, A. F. J. 1996. Estratigrafía del Jurásico Superior del Subsuelo en la Sonda de Campeche (Golfo de México). Tesis de Maestría. IPN. 93 p.
- BADENAS, B. and Aurell, M. 2001. Proximal-distal facies relationships and sedimentary processes in a storm dominated carbonate ramp (kimmeridgian, northwest of the Iberian Ranges, Spain. *Sedimentary Geology*. V. 139, p. 319-340.
- BARKER, C. E., and Halley, R. B. 1988. Fluid Inclusions in Vadose Cement with Consistent Vapor to Liquid Ratios, Pleistocene Miami Limestone, Southeastern Florida. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, V. 52, p. 1019-1025.
- BLAIR, T. C. and McPherson, J. G. 1999. Grain-size and Textural Classification of Coarse Sedimentary Particles. *Journal of Sedimentary Research*, v. 69, no. 1. p. 6-19.
- BURCHETTE, T. P. and Wright, V. P. 1992. Carbonate ramp depositional systems. *Sedimentary Geology*. V. 79, p. 3-57.
- D'ARGENIO, B. Ferreri, V., Amodio, S. and Pelosi, N., 1997. Hierarchy of high-frequency orbital cycles in Cretaceous carbonate platform strata. *Sedimentary Geology*, V. 113, p. 169-193.
- GOLDSTEIN, R. H. 1986. Reequilibration of Fluid Inclusions in Low-temperature Calcium-carbonate Cement. *Geology*, V. 14, p. 792-795.

- 
- 
- GOLDSTEIN, R. H. 1986. Petrographic and Geochemical Evidence for Origin of Paleospeleothems, New Mexico: Implications for the Application of Fluid Inclusions to Studies of Diagenesis. *Journal of Sedimentary Petrology*, V. 60, No. 2, p. 282-292.
  - GOLDSTEIN, R. H., and Reynolds, J. T. 1995. Systematics of Fluid Inclusions in Diagenetic Minerals. *SEPM*. 199 p.
  - GOLDSTEIN, R. H., Franseen, E. K., and Mills, M. S. 1990. Diagenesis Associated with Subaerial Exposure of Miocene Strata, Southeastern Spain: Implications for Sea-level Change and Preservation of Low-temperature Fluid Inclusions in Calcite Cement. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, V. 54, p. 699-704.
  - HALLEY, R. B. and Harris, P. M. 1979. Fresh-water cementation of a 1,000-year-old oolite. *Journal of Sedimentary Petrology*, V. 49, No. 3, p. 0969-0988.
  - HANDFORD, C. R. and Loucks, R. G. 1993. Carbonate depositional sequences and systems tracts - responses of carbonate platforms to relative sea-level changes. In Loucks, R. G., Sarg, J. F. (Eds.), *Carbonate Sequence Stratigraphy*. *Mem. Am. Assoc. Pet. Geol.* 57, p. 3-41.
  - HIRD, K. and Tucker, M. 1988. Contrasting diagenesis of two Carboniferous Oolites from South Wales: a tale of climatic influence. *Sedimentology*, V. 35, p. 587-602.
  - JONES, B. and Desrochers, A. 1992. Shallow platform carbonates. *In*: Walker, R. G., and James, N. P. (Eds.). *Facies Models: Response to sea level change*. Geological Association of Canada. p. 277-301.

- 
- 
- KENDALL, C. G. and Schlager, W. 1981. Carbonates and relative changes in sea level. *Marine Geology*, V. 44, p. 181-212.
  
  - LLOYD, R. M., Perkins, R. D., and Kerr, S. D. 1987. Beach and shoreface ooid deposition on shallow interior banks, Turks and Caicos Islands, British West Indies; In: HANDFORD, C. R. and Loucks, R. G. 1993. Carbonate depositional sequences and systems tracts - responses of carbonate platforms to relative sea-level changes. In Loucks, R. G., Sarg, J. F. (Eds.), *Carbonate Sequence Stratigraphy*. Mem. Am. Assoc. Pet. Geol. 57, p. 3-41.
  
  - MARTINEZ, I. R., Tritlla, J., Cedillo, P. E., Grajales, N. J. M., and Murillo, M. G. 2003. Brine and hydrocarbon evolution during the filling of the Cantarell Oil Field (Gulf of Mexico). *Journal of Geochemical Exploration*. 78-79. p. 399-403.
  
  - MENESES, R. J. J. 1977. *Estratigrafía, Petrografía y Diagénesis de Rocas del Jurásico Superior en Afloramientos de Tehuantepec, Oax.* Tesis Profesional. UNAM. p. 1-113.
  
  - MENESES, de G. J. 1980. Geología de la Sonda de Campeche. *Boletín de la Asociación Mexicana de Geólogos Petroleros*. V. XXXII, No. 1. p. 1-26.
  
  - MITCHUM, R. M. Jr. and Van Wagoner, J. C. 1990. High-Frequency Sequences and Eustatic Cycles in the Gulf of Mexico Basin. GCSSEPM Foundation Eleventh Annual Research Conference Program and Abstracts. p. 257-267.
  
  - MORROW, D. W. 1990. Dolomite – Part 1: The Chemistry of Dolomitization and Dolomite Precipitation. In: McIlreath, I. A., and Morrow, D. W. (eds.) *Diagenesis*. Geoscience Canada, Reprint Series 4. p. 113-123.

- 
- 
- MORROW, D. W. 1990. Dolomite – Part 2: Dolomitization Models and Ancient Dolostones. In: McIlreath, I. A., and Morrow, D. W. (eds.) Diagenesis. Geoscience Canada, Reprint Series 4. p. 125-139.
  
  - MURILLO, M. G. 1994. Petrologic and Geochronologic Study of Grenville-Age Granulites and Post-Granulite Plutons from the La Mixtequita Area, State of Oaxaca in Southern Mexico, and their Tectonic Significance. Thesis Master of Science. University of Southern California. p. 91-123.
  
  - ORTUÑO, A. S. y Ruiz, V. A. 1985. Estudio estratigráfico-sedimentológico del Jurásico Superior-Cretácico Inferior en el prospecto Zacatera, Oaxaca. Reporte interno del proyecto C-3004-IMP, 101 p.
  
  - OSLEGER, D., 1991. Subtidal carbonate cycles: Implications for allocyclic vs. Autocyclic controls. *Geology*, V. 19, p. 917-920.
  
  - QUEZADA, M. J. M. 1975. prospecto Cintalapa-La Ventosa, Chiapas/Oaxaca. *En* Meneses, R. J. J. 1977. Estratigrafía, Petrografía y Diagénesis de Rocas del Jurásico Superior en Afloramientos de Tehuantepec, Oax. Tesis Profesional. UNAM. p. 1-113.
  
  - QUEZADA, M. J. M. 1984. El grupo Zacatera del Jurásico Medio/Cretácico Inferior de la Depresión Istmica, 20 km al Norte de Matías Romero, Oax. *Memorias de la VII Convención Nacional, Sociedad Geológica Mexicana*, p. 40-59.
  
  - READ, J. F., 1985. Carbonate platform facies models. *The American Association of Petroleum Geologists Bulletin*, V. 69, No. 1, p. 1-21.

- 
- 
- SALVADOR, A. 1991. Triassic-Jurassic. In: Salvador, A. (Ed.). The Gulf of Mexico Basin. Geological Society of America. The Geology of North America. v. J. p. 131-180.
  
  - SANDBERG, 1983. An oscillating trend in Phanerozoic non-skeletal carbonate mineralogy. Nature, 305, p.19-22. In Tucker, M. E. and Wright, V. P. 1990. Carbonate Sedimentology. Blackwell Science. 482 p.
  
  - SANTIAGO, A. J. 1980. Giant Fields of the Southern-Zone Mexico. In: Halbouty, M. T. (Ed.) Giant Oil and Gas Fields of the decade: 1968-1978. AAPG Memoir 30. p. 339-385.
  
  - SANTIAGO, A. J., Carrillo, B. J., y Martell, B. 1984. Geología petrolera de México. En: Marmissolle, D. D. (Coord.). Evaluación de Formaciones en México. Schlumberger.
  
  - SARG, J. F. 1988. Carbonate Sequence Stratigraphy. In: Wilgus, C. K., Hastings, B. S., Kendall, C. G. St. C., Posamentier, H. W., Ross, C. A. and Van Wagoner, J. C. (Eds.). Sea Level Changes: an integral approach. SEPM Special Publication No. 42. p. 155-181.
  
  - STRASSER, A., 1991. Lagoonal-Peritidal Sequences in Carbonate Environments: Autocyclic Processes. In: Einsele, G., Ricken, W., Seilacher, A. (Eds.). Cycles and Events in Stratigraphy, Springer-Berlin, p. 709-721.
  
  - STRASSER, A., Pittet, B., Hillgärtner, H. and Pasquier, J. B. 1999. Depositional Sequences in Shallow Carbonate-Dominated Sedimentary Systems: Concepts for a High-Resolution Analysis. Sedimentary Geology. v. 128. p. 201-221.
  
  - TUCKER, M. E. and Wright, V. P. 1990. Carbonate Sedimentology. Blackwell Science. 482 p.



- 
- 
- VAIL, P. R. 1987. Seismic Stratigraphy Interpretation Using Sequence Stratigraphy, Part I: Seismic Stratigraphy Interpretation Procedure. In: Bally, A. W. (Ed.), Atlas of Seismic Stratigraphy. Am. Assoc. Pet. Geol. Mem. 27 (1). p. 1-10.
  - VAIL, P. R., Audemard, F., Bowman, S. A., Eisner, P. N. and Perez-Cruz, C., 1991. The Stratigraphic Signatures of Tectonics, Eustasy and Sedimentology – an overview. In: Einsele, G., Ricken, W., Seilacher, A. (Eds.). Cycles and Events in Stratigraphy, Springer-Berlin, p. 617-659.
  - VAN WAGONER, J. C., Posamentier, R. M., Mitchum, R. M., Vail, P. R., Sarg, J. F., Loutit, T. S. and Hardenbol, J. 1988. An Overview of the Fundamentals of Sequence Stratigraphy and Key Definitions. In: Wilgus, C. K., Hastings, B. S., Kendall, C. G. St. C., Posamentier, H. W., Ross, C. A. and Van Wagoner, J. C. (Eds.). Sea Level Changes: an integral approach. SEPM Special Publication No. 42. p. 39-45.
  - WALKER, R. G. 1984. General Introduction: Facies, Facies Sequences and Facies Models. In: Walker, R. G. (Ed.). Facies Models. Geoscience Canada. p. 1-9.
  - WEISSERT, H. and Mohr, H. 1996. Late Jurassic Climate and its Impact on Carbon Cycling. Paleogeography, Paleoclimatology, Paleoecology. v. 122. p. 27-43.

## ANEXO I. Descripción a Detalle de la Sección Compuesta Medida en la Formación El Porvenir

La sección se inició en el punto localizado en las coordenadas 1891328 y 293657, al este del poblado del mismo nombre (figura 2 y 4). La sección termina sobre un arroyo (orientado N-S) localizado al norte del poblado El Porvenir (Figuras 2 y 5). A continuación se describe detalladamente la sección El Porvenir, durante la descripción se hace continuamente referencia a la granulometría de los clastos terrígenos, de tal manera que el diámetro menor se refiere como  $dm$ , el diámetro mayor es  $dM$ , el diámetro promedio es  $d\sigma$ , y el diámetro máximo observado (aunque siempre representa un solo clasto, es decir, nunca llega a ser siquiera escasa su presencia) se denota como  $dr$ . La escala granulométrica utilizada es la modificada de Wenworth (Blair y McPherson, 1999).

- 4.12 m: Grainstone oolítico gris claro a intermedio con tonos rosados de intemperismo y gris intermedio al fresco; en estratos gruesos (este intervalo es un solo estrato). Contiene material terrígeno (gravas finas) disperso y concentrado (gravas finas a medias) en horizontes delgados (6 cm de espesor), en los que se aprecia imbricación discreta y gradación inversa. Dan la impresión de una cierta ciclicidad (grainstone "puro" -sin terrígenos o con muy escasos; de hasta 45 cm de espesor- y horizontes de abundantes terrígenos). El aumento en la granulometría y en el contenido de terrígenos es gradual, pero el decremento es más abrupto. En las zonas de menor presencia terrígena:  $dm=1mm$ ;  $dM=1.5-2cm$ ;  $d\sigma=3-4 mm$ . En los horizontes de concentración de terrígenos:  $dm=1mm$ ;  $dM=5cm$ ;  $d\sigma=1.5-1.7cm$ ;  $dr=12cm$ . Muestra EP-1.
- 6.62 m: Grainstone oolítico muy semejante al intervalo anterior. En los horizontes de concentración de terrígenos:  $dm=1mm$ ;  $dM=4cm$ ;  $d\sigma=2mm$ . En las zonas de packstone más puro:  $dm=<1mm$ ;  $dM=2.5cm$ ;  $d\sigma=8mm$ ;  $dr=8cm$ . Presenta gradación inversa e imbricación, discretas. Los horizontes de concentración de terrígenos están remarcados por estilolitas. Muestra EP-2 (en la base). Hacia la cima pasa a un packstone-grainstone oolítico con escasa influencia terrígena, semejante a la muestra EP-2. Muestra EP-3.
- 0.89 m: Cf.
- 1.99 m: Grainstone oolítico con concentraciones de terrígenos (arenas gruesas a gravas finas) en laminaciones delgadas. No se aprecia ya gradación ni imbricación de partículas. Las laminaciones de concentración de terrígenas son de 6 cm aproximadamente, y las de grainstone "puro" son de 10 cm. En los horizontes de concentración de clastos:  $dm=<1mm$ ;  $dM=4cm$ ;  $d\sigma=1.5cm$ . En las zonas de grainstone "puro":  $dm=<1mm$ ;  $dM=2.5cm$ ;  $d\sigma=0.8cm$ ;  $dr=8cm$ . Muestra EP-4 (en la base).
- 2.74 m: Grainstone cf., con menor contenido de terrígenos, continúan los horizontes con gran influencia terrígena (arenas a gravas finas), aunque son más discretos; sin embargo están resaltados por superficies estilolíticas. Estos horizontes tienen 8 cm de espesor, mientras que las zonas más puras llegan a 35 cm. Muestra EP-5 (en la parte media).
- 4.46 m: Grainstone semejante al grainstone anterior; los terrígenos (arenas gruesas a gravas finas) están distribuidos con una fábrica caótica, sin mostrar estructura alguna. Es masivo, pero con influencia terrígena:  $dm=<1mm$ ;  $dM=4cm$ ;  $d\sigma=1.5-2cm$ .

6.86 m: Grainstone semejante al intervalo anterior, con horizontes discretos de terrígenos (arenas gruesas a gravas finas):  $d_m < 1\text{mm}$ ;  $d_M = 4\text{cm}$ ;  $d_\sigma = 1.5\text{-}2\text{cm}$ . Muestra EP-6 (en la base).

1.82 m: Grainstone semejante a EP-2; en los horizontes de terrígenos:  $d_m < 1\text{mm}$ ;  $d_M = 7\text{cm}$ ;  $d_\sigma = 2\text{cm}$ . Muestra EP-7 (en la base).

Espesor total del intervalo: 29.53 m (figura 7).

Continuación de la Sección (ver figura 2)

1.68 m: Grainstone semejante a EP-7, con abundante material terrígeno (arenas gruesas a cantos). Los clastos son angulosos, están mal clasificados, y representan el 20-30% del total de la muestra (Figura 8a);  $d_m = 1\text{mm}$ ;  $d_M = 4\text{cm}$ ;  $d_\sigma = 1\text{cm}$ ;  $d_r = 21\text{cm}$ . Muestra EP-8 (a los 80 cm de la base).

2.43 m: Grainstone semejante al grainstone anterior; pero disminuye el contenido de terrígenos (arenas gruesas a gravas finas), representando un 10-15% del sedimento; cuando hay clastos tabulares dan el aspecto de laminaciones, dado que son paralelos a la estratificación.

1.47 m: Grainstone semejante a EP-8; con abundantes clastos (arenas gruesas a gravas finas) terrígenos (20-30%). Muestra EP-9.

0.54 m: Wackestone laminado, sin influencia terrígena aparente, en estratos delgados de 15 cm de espesor; las laminaciones son de 6-9 cm de espesor. Muestra EP-10 (en la cima).

3.15 m: Grainstone, semejante a EP-8.

1.85 m: Grainstone semejante al anterior; raramente se observan cantos de hasta 25 cm de diámetro (Figura 8b).

5.20 m: Grainstone semejante al anterior, en estratificación masiva, con 20-30% de clastos terrígenos (arenas gruesas a gravas finas) concentrados en horizontes delgados.

4.07 m: Wackestone laminado en estratos delgados de 10-15 cm, con capas muy escasas sin laminaciones de 6 cm de espesor. Muestra EP-11 (en la base) y EP-12 (en la cima). Figura 14a.

2.22 m: Grainstone semejante a los grainstone anteriores.

0.75 m: Wackestone semejante al wackestone laminado anterior.

0.34 m: Grainstone semejante a los grainstone anteriores.

4.38 m: Wackestone semejante a EP-12. Muestra EP-13.

3.02 m: Wackestone semejante a EP-12; presenta plegamientos locales por compactación. Hay pequeños y escasos horizontes con concentración de terrígenos (arenas gruesas a gravas muy finas):  $d_m = 1\text{mm}$ ;  $d_M = 2\text{cm}$ ;  $d_\sigma = 7\text{mm}$ . En todo este intervalo se observan rizaduras (en las superficies de estratificación) y marcas de partículas, aunque se encuentran enmascaradas por la disolución. Muestra EP-14 (en la base). Figura 10d.

7.24 m: Wackestone semejante a EP-14. El plegamiento asociado a la compactación en capas incompetentes está concentrado en todo este paquete. Muestra EP-15 (en la parte superior).

1.82 m: Grainstone semejante al grainstone anterior.

0.99 m: Packstone-grainstone semejante a los grainstone anteriores, con intercalaciones muy delgadas del wackestone y grainstone descritos, y pasa nuevamente al wackestone descrito. Muestra EP-16 (en la cima).

1.20 m: Wackestone semejante al wackestone anterior.

0.78 m: Semicubierto.

3.02 m: En la base, wackestone semejante al wackestone anterior. Pasa a un grainstone oolítico conglomerático (tipo brecha) con clastos del wackestone descrito, de hasta 65 cm de longitud. El contacto con el wackestone es claramente erosivo. El grainstone conglomerático es masivo, con clastos angulosos de areniscas y conglomerados de la Formación Todos Santos, de la Andesita Pueblo Viejo y del wackestone descrito:  $d_m=2-3\text{mm}$ ;  $d_M=5\text{cm}$ ;  $d_\sigma=2-25\text{cm}$ ;  $d_r=65\text{cm}$ . La matriz es calcárea, pero la reacción al HCl es moderada. Muestra EP-18 (en la base) y EP-18' (clasto del wackestone).

Espesor total del intervalo: 46.29 m (figura 7).

Continuación de la Sección (ver figura 2)

1.64 m: Grainstone semejante a los grainstone anteriores, pero laminado; presenta laminación cruzada muy discreta; la influencia terrígena es escasa (arenas gruesas a gravas finas). Muestra EP-19 (en la base).

2.47 m: Grainstone semejante a los grainstone anteriores; desaparecen las laminaciones; contiene escasa influencia terrígena (arenas gruesas a gravas finas).

2.74 m: Grainstone semejante al grainstone anterior; se observa gradación inversa e imbricación discreta en algunos horizontes (6-10 cm de espesor) con concentración de terrígenos (gravas finas), además de porosidad vugular (se aprecian vugulos desde unos milímetros hasta unas cuantas decenas de cm de diámetro).

4.11 m: Grainstone semejante al grainstone anterior; presenta gradación inversa e imbricación discreta en algunos horizontes, además de porosidad vugular; con un 15% de clastos terrígenos angulosos (gravas muy finas a medias); en los horizontes de concentración de terrígenos:  $d_m=2-3\text{mm}$ ;  $d_M=5\text{cm}$ ;  $d_\sigma=0.8\text{cm}$ ;  $d_r=21\text{cm}$ . Orientaciones de imbricación (paleocorrientes): NW62°, NW68°, NW70°, NW78°. Muestra: EP-20.

2.73 m: Grainstone semejante a los grainstone anteriores; es masivo, de grano fino, la influencia terrígena se vuelve muy escasa (arenas gruesas a gravas muy finas).

35.64 m: Cubierto.

4.12 m: Grainstone semejante al grainstone anterior.

0.54 m: Packstone-grainstone semejante a EP-16, con intercalaciones del wackestone semejante a EP-11. Muestra EP-21 (en la base) y EP-22 (en la cima).

21.07 m: Grainstone semejante al grainstone anterior; con abundante influencia terrígena (arenas gruesas a gravas finas a medias).

0.41 m: Grainstone semejante al grainstone anterior, pero con laminaciones del wackestone descrito, de 3-6 cm.

2.91 m: Grainstone semejante al grainstone anterior.

Espesor total del intervalo: 78.47 m (figura 7).

Continuación de la Sección (ver figura 2)

3.29 m: Grainstone semejante al grainstone anterior. Los terrígenos (arenas gruesas a gravas finas) se encuentran en horizontes de concentración de clastos (de 80 cm de espesor, y en éstos los clastos representan 20% del sedimento), alternando con zonas de grainstone más "puro" (de 60 cm de espesor, con 5% de clastos). Muestra EP-23.

- 10.68 m: Gradación a grainstone masivo semejante a los grainstone anteriores, pero sin horizontes de concentración de terrígenos, con estratificación masiva. Muestra EP-24.
- 4.11 m: Grainstone semejante al grainstone anterior.
- 8.24 m: Packstone semejante a los grainstone anteriores.
- 12.36 m: Packstone semejante al packstone anterior. Presenta horizontes de concentración de terrígenos (arenas gruesas a gravas medias) de menos de 20 cm de espesor:  $d_r=10\text{cm}$ . Continúa la alternancia de horizontes con concentración de terrígenos y horizontes de packstone "puro". Muestra EP-25 (en la base).
- 4.12 m: Packstone-grainstone semejante a EP-21; pasa a packstone semejante a EP-25, y nuevamente a packstone-grainstone. Muestra EP-26 (en la cima).
- 9.61 m: Grainstone semejante al grainstone anterior.
- 1.92 m: Grainstone semejante al grainstone anterior, pero hay menos del 5% de clastos (arenas gruesas a gravas finas).
- 2.54 m: Grainstone semejante al grainstone anterior, pero los clastos (gravas muy finas a medias) llegan a un 15%; parece haber una gradación inversa, pero es muy discreta;  $d_m=2\text{mm}$ ;  $d_M=5-6\text{cm}$ ;  $d_\sigma=1.5-2.5\text{cm}$ ;  $d_r=15\text{cm}$ . Presenta además estratificación cruzada de ángulo alto, y superficies erosivas (Figura 8c). Direcciones de orientaciones de la estratificación cruzada:  $NW47^\circ, 18^\circ E$ ;  $NW42^\circ, 22^\circ E$ ;  $NW52^\circ, 48^\circ N$ .
- 4.11 m: Grainstone semejante al grainstone anterior.
- 4.12 m: Grainstone semejante al anterior, no presenta estructuras; los clastos (gravas finas a medias) constituyen 10-15% del total del sedimento;  $d_m=2\text{mm}$ ;  $d_M=5\text{cm}$ ;  $d_\sigma=1\text{cm}$ ;  $d_r=10\text{cm}$ . Muestra EP-27 (en la parte media).
- 4.12 m: Grainstone semejante al anterior, presenta horizontes con concentración de terrígenos (20% de clastos).
- 3.29 m: Grainstone semejante al anterior, zonas de concentración de terrígenos (arenas gruesas a gravas finas) de hasta 65 cm de espesor, pero los clastos no son muy abundantes.
- 2.54 m: Grainstone semejante al anterior; los clastos (arenas gruesas a gravas finas) representan menos del 10%:  $d_m=1\text{mm}$ ;  $d_M=5.5\text{cm}$ ;  $d_\sigma=2\text{cm}$ . Es marcado el contacto entre el grainstone anterior, con terrígenos comunes, y este grainstone con menor contenido de terrígenos. Muestra EP-28.
- Espesor total del intervalo: 75.21 m (figura 7).

Continuación de la Sección (ver figura 2)

- 3.94 m: Grainstone semejante al anterior, con 10-15% de clastos (arenas gruesas a gravas finas); los clastos alargados están distribuidos de manera paralela a la estratificación. Se observa imbricación de partículas;  $d_m < 2\text{mm}$ ;  $d_M=5\text{cm}$ ;  $d_\sigma=0.7-1\text{cm}$ . Se observan además clastos del wackestone (semejante a EP-11), de hasta 20 cm de largo y 4 cm de ancho, paralelos a la estratificación. Hacia la cima, los clastos disminuyen en contenido y en granulometría (arenas gruesas a gravas muy finas), llegando a representar <3% del total del sedimento;  $d_m=1\text{mm}$ ;  $d_M=1.7\text{cm}$ ;  $d_\sigma=5\text{mm}$ . Nuevamente aparecen las zonas de concentración de terrígenos, en las que aparentemente hay una gradación normal, aunque muy discreta, y hacia la base se observa imbricación. Orientaciones de imbricación (paleocorrientes):  $SW25^\circ, 55^\circ E$ ;  $NW50^\circ, 27^\circ N$ ;  $NW44^\circ, 56^\circ N$ . Muestra EP-29. Haciendo un desplazamiento de la sección a rumbo de capa, 280 m hacia el NW, que representa un espesor aproximado de 30 m en línea recta,

se encuentra un pequeño afloramiento de grainstone muy semejante, con estratificación cruzada discreta, de bajo ángulo (cuyas orientaciones son: SE77°, 42°N; SE70°, 45°N; SE69°, 37°N) e imbricación de partículas (con las siguientes orientaciones: NW86°, 54°N, ángulo de reposo (Ar)=40°; NW73°, 48°N, Ar= 10°; NW78°, 43°N, Ar=45°; NW70°, 40°N, Ar=32°; NW84°, 32°N, Ar= 13°), indicando que las paleocorrientes van hacia el NW, en general, y que los sets de estratificación cruzada avanzaban hacia el norte.

Espesor total del intervalo: 3.94 m (figura 7).

Continuación de la Sección (ver figura 2)

1.57 m: Grainstone semejante al anterior, pero presenta intercalaciones de zonas de concentración de clastos (arenas gruesas a gravas finas) y zonas de grainstone "puro" (con escasos clastos). En las zonas de concentración el porcentaje de clastos es del 15-20%;  $d_m < 2\text{mm}$ ;  $d_M = 2\text{cm}$ ;  $d_\sigma = 8\text{mm}$ ;  $d_r = 15\text{cm}$ . No presenta estructuras.

2.64 m: Cubierto.

5.76 m: Grainstone semejante al anterior, con 10-15% de clastos (gravas muy finas), sin estructuras; sólo presenta concentraciones laminares con un espesor de 4-8 cm; con clastos de 2-8 mm. La distribución de los clastos en zonas de concentración es más discreta. Muestra EP-30.

0.24 m: Capa de packstone-grainstone semejante a EP-26, de grano muy fino con <1 % de clastos (arenas gruesas);  $d \sim 1\text{mm}$ . Sus contactos son abruptos (ambos). Con intercalación de horizontes de concentración de terrígenos y packstone-grainstone "puro". Muestra EP-31.

6.31 m: Grainstone semejante a los anteriores, con zonas de concentración de terrígenos (gravas finas a medias) en horizontes de aproximadamente 15 cm y en laminaciones de 2 cm. En general la granulometría aumenta dentro de este intervalo. Se observa imbricación de partículas. Los horizontes de concentración de clastos presentan bases ligeramente erosivas, donde la granulometría va de 0.5-7cm con un  $d_\sigma = 1-3\text{cm}$ ; el resto de estas zonas u horizontes se vuelve uniforme, con un porcentaje de clastos del 5-10%, un  $d_\sigma = 0.5-1\text{cm}$  y un  $d_r = 3\text{cm}$ ; además se observa imbricación.

4.12 m: Grainstone semejante al anterior. Presenta zonas delgadas de concentración de clastos (gravas finas), aproximadamente de 5 a 15 cm de espesor y zonas de menor concentración de terrígenos con ~35 cm de espesor.

5.75 m: Grainstone semejante al anterior, pero aumenta la concentración de clastos (gravas finas a medias);  $d_r = 25\text{cm}$ . Presenta una ligera gradación, aunque muy discreta. Muestra EP-32 (en la cima).

Espesor total del intervalo: 26.44 m (figura 7).

Continuación de la Sección (desplazamiento a rumbo, ver figura 2)

11.33 m: Grainstone semejante a los anteriores; presenta zonas delgadas de concentración de terrígenos (arenas gruesas a gravas finas), de aproximadamente 15 cm de espesor, y zonas de menor concentración de terrígenos de ~25 cm de espesor. Se aprecia una gradación muy discreta de los terrígenos. Muestra EP-33 (en la parte superior).

Espesor total del intervalo: 11.33 m (figura 7).

Continuación de la Sección (ver figura 2)

- 4.05 m: Grainstone semejante a los anteriores, con zonas de concentración de clastos (arenas gruesas a gravas muy finas) de 8 a 15 cm de espesor; los clastos tienen  $d_m < 1\text{mm}$ ,  $d_M = 8\text{mm}$ ,  $d_\sigma = 2\text{mm}$ ,  $d_r = 2.5\text{mm}$ . Raramente presenta clastos de hasta 33 cm de la Formación Todo Santos. Haciendo un desplazamiento en la sección a rumbo de capa, de 106 m en línea recta hacia el oeste, se encuentra un afloramiento muy pequeño de grainstone semejante, con estratificación cruzada muy bien definida (cuyas orientaciones son: SW 57°, 33° N; SW 83°, 63° N; NE 63°, 33° N; NW 63°, 52° N; NW 86°, 55° N; NW 80°, 59° N) e imbricación de partículas (con orientaciones NW 72°, 46° N, Ar=20°; SW 86°, 38° N, Ar=16°; NW 86°, 60° N, Ar=20°; NW 74°, 43° N, Ar=25°; NW 87°, 65° N, Ar=5°) indicando que las paleocorrientes van hacia el NW, mientras que los sets de estratificación cruzada avanzaban hacia el norte. (Figura 8d).
- 12.14 m: Grainstone semejante a los anteriores. Los horizontes con concentración de clastos (arenas gruesas a gravas finas) presentan en ocasiones superficies ligeramente erosivas; los diámetros de los clastos son  $d_m = 1\text{mm}$ ,  $d_M = 1.5\text{cm}$ ,  $d_\sigma = 4\text{mm}$ ,  $d_r = 9\text{cm}$ . Muestra EP-34 (en la parte media).
- 4.05 m: Grainstone semejante al anterior, los clastos tienen diámetros:  $d_m = 1\text{mm}$ ,  $d_M = 2\text{cm}$ ,  $d_\sigma = 5\text{mm}$ ,  $d_r = 5\text{cm}$ .
- 16.24 m: Cubierto.
- 32.40 m: Grainstone semejante a los anteriores. El grainstone se vuelve más o menos homogéneo en el contenido de clastos (arenas gruesas a gravas finas), estos constituyen aproximadamente el 5%.
- 2.71 m: Grainstone semejante al anterior. Es compacto y masivo; los clastos constituyen < 5%.

Espesor total del intervalo: 71.64 m (figura 7).

Continuación de la Sección (ver figura 2)

- 40.59 m: Gradación del grainstone (semejante a los anteriores) al packstone (semejante a EP-25) y al packstone-grainstone (semejante a EP-26); es una zona muy fracturada y con intensa disolución que enmascara la estratificación. Se observa con cierta frecuencia clastos del wackestone semejante a EP-11. Muestra EP-35 y EP-35A.

Espesor total del intervalo: 40.59 m (figura 7).

Continuación de la Sección (ver figura 2)

- 1.09 m: Wackestone semejante a EP-12; con color de intemperismo gris claro y gris oscuro al fresco, ligeramente laminado (las laminaciones se aprecian como cambios de coloración), en capas delgadas de 10 a 15 cm, fracturados y ligeramente plegados. Muestra EP-36.
- 0.27 m: Wackestone semejante a EP-12, con abundantes laminaciones. Muestra EP-37 (Figura 14b).
- 0.82 m: Wackestone semejante a EP-12, con laminaciones.
- 3.70 m: Grainstone semejante al grainstone anterior. En todo este intervalo el porcentaje de clastos (arenas gruesas y gravas muy finas) es < 1%, con un  $d_M = 0.5\text{cm}$ . Muestra EP-38.
- 0.82 m: Wackestone semejante al wackestone anterior.
- 1.51 m: Grainstone semejante al grainstone anterior, con laminación cruzada (NE70°, 65° N; Figura 14c).
- 5.75 m: Grainstone semejante al grainstone anterior, pero sin laminación cruzada.

Espesor total del intervalo: 14.01 m (figura 7).

Continuación de la Sección (ver figura 2)

16.45 m: Grainstone semejante al grainstone anterior, se observa laminación cruzada muy discreta de ángulo bajo. Muestra EP-39.

20.57 m: Grainstone semejante al grainstone anterior, pero sin laminación cruzada; hay un incremento en el contenido de clastos (arenas gruesas a gravas medias), llegando a <10%;  $d_m < 1\text{mm}$ ,  $d_M = 2.5\text{cm}$ ,  $d_\sigma = 4\text{mm}$ ,  $d_r = 10.5\text{cm}$ . En la parte baja presenta intraclastos del wackestone descrito de hasta 50 cm de longitud y 3 cm de espesor, los más pequeños son de 1.5 cm. Presenta una gradación inversa muy discreta. Muestra EP-40 (en la base).

Espesor total del intervalo: 37.02 m (figura 7).

Continuación de la Sección (ver figura 2)

4.15 m: Grainstone semejante al grainstone anterior, con escasos intraclastos del wackestone descrito.

12.50 m: Cubierto.

12.45 m: Grainstone semejante al grainstone anterior, con escasos terrígenos (arenas gruesas a gravas muy finas), aproximadamente 15%;  $d_m < 1\text{mm}$ ,  $d_M = 5\text{mm}$ ,  $d_\sigma = 1\text{mm}$ ,  $d_r = 2.5\text{cm}$ .

2.78 m: Grainstone semejante al grainstone anterior. < 3% de clastos.

0.10 m: Wackestone semejante a EP-12, <3% de clastos (arenas finas). Muestra EP-41 (Figura 14d).

5.49 m: Grainstone semejante al grainstone anterior. <3% de clastos en la parte baja (Figura 14d); hacia la parte alta contiene aproximadamente 20% de clastos (arenas gruesas y gravas finas). Muestra EP-42 (en la base) y EP-43 (en la cima).

Espesor total del intervalo: 37.50 m (figura 7).

Continuación de la Sección (ver figura 2)

8.44 m: Grainstone semejante al grainstone anterior, muy fracturado. Muestra EP-44 (en la cima).

4.22 m: Grainstone semejante a los grainstone anteriores, nuevamente los clastos (arenas gruesas a gravas medias) son más notorios (8-10%). No se observan estructuras;  $d_m = 0.6\text{mm}$ ,  $d_M = 5.5\text{cm}$ ,  $d_\sigma = 1\text{cm}$ ,  $d_r = 11\text{cm}$ .

4.22 m: Grainstone semejante al grainstone anterior, en la cima:  $d_m = 2\text{mm}$ ,  $d_M = 4\text{cm}$ ,  $d_\sigma = 1\text{cm}$ ,  $d_r = 8\text{cm}$ ; en la parte alta la zona de concentración de terrígenos (arenas gruesas a gravas finas) tiene 60 cm de espesor, también hay un horizonte de 45 cm sin clastos, de grainstone "puro". Muestra EP-45.

4.18 m: Grainstone semejante al grainstone anterior. Los clastos (gravas finas a medias) llegan al 15-20% y tienen una mayor granulometría, no se observan estructuras. El paso a este grainstone es abrupto y está marcado por un incremento en el tamaño de los clastos;  $d_m = 4\text{mm}$ ,  $d_M = 8\text{cm}$ ,  $d_\sigma = 2.5\text{cm}$ .

Espesor total del intervalo: 21.08 m (figura 7).

Continuación de la Sección (desplazamiento a rumbo, ver figura 2)

7.03 m: Grainstone semejante a los grainstone anteriores, presenta una intensa disolución que enmascara los rasgos.

1.40 m: Cubierto.

4.18 m: Packstone-grainstone semejante a EP-26; masivo, sin estructuras, con un contenido de clastos terrígenos (arenas gruesas a gravas finas) de 5-10%. No presenta zonas de concentración de clastos;



la granulometría de los clastos es:  $d_m=1\text{mm}$ ,  $d_M=2\text{cm}$ ,  $d_\sigma<1\text{cm}$ ,  $d_r=8\text{cm}$ . Muestra EP-46 (en la parte baja).

5.62 m: Grainstone semejante al grainstone anterior. Con menos de 3% de clastos terrígenos (arenas gruesas a gravas finas).

2.81 m: Contacto abrupto con grainstone cf., de grano muy fino con un gran contenido de clastos (20-25%);  $d_m=2\text{mm}$ ,  $d_M=7\text{cm}$ ,  $d_\sigma=2.5\text{cm}$  y  $d_r=27\text{cm}$ . Frecuentes clastos de  $>20\text{cm}$  de longitud. Muestra EP-47.

4.22 m: Cf., disminuye la granulometría y el contenido de clastos de forma gradual (esto último no es muy claro). El contacto es ligeramente abrupto con el grainstone de la cima.

5.90 m: Grainstone semejante al grainstone anterior, contiene menos de 3% de clastos;  $d_r=7\text{cm}$ .

0.54 m: Grainstone semejante al grainstone anterior, aproximadamente 1% de clastos;  $d_M=3\text{cm}$ .

Espesor total del intervalo: 31.76 m (figura 7).

Continuación de la Sección (ver figura 2)

4.22 m: Packstone semejante a EP-25, con menos de 3% de clastos, es masivo y presenta intensa disolución.

33.76 m: Grainstone semejante a los grainstone anteriores. Muestra EP-49 (en la parte media) y EP-50 (en la parte superior).

Espesor total del intervalo: 38.01 m (figura 7).

Continuación de la Sección (ver figura 2)

7.92 m: Grainstone semejante a los grainstone anteriores, pero aparentemente no contiene clastos del tamaño de las gravas, éstos son menores a 2mm y conforman un 5% de la roca. Muestra EP-51 (en la parte inferior).

7.92 m: Packstone semejante a los packstone anteriores. Muestra EP-52 (en la parte inferior).

2.64 m: Cubierto.

5.28 m: Packstone semejante a los packstone anteriores, escaso contenido de terrígenos (5-10%) cuya granulometría es:  $d_m=2\text{mm}$ ,  $d_M=1-2\text{cm}$ ,  $d_\sigma=3-4\text{cm}$ . Muestra EP-53 (en la parte inferior).

2.64 m: Packstone semejante a EP-53, pero aparentemente los clastos (gravas finas) son menores al 1% (la disolución enmascara los rasgos);  $d_M=1\text{cm}$ .

5.28 m: Cubierto.

2.64 m: Grainstone semejante a los grainstone anteriores. Contiene 3-5 % de clastos con  $d_M=1-2\text{cm}$ . Muestra EP-54 (en la cima).

1.57 m: Packstone-grainstone semejante a EP-26, con un contenido de 1-3 % de clastos (arenas gruesas a gravas muy finas), con  $d_M=2\text{mm}$ . Muestra EP-55 (en la cima).

1.78 m: Cambio abrupto a packstone-grainstone semejante a EP-26 con horizontes de 15-30 cm con concentración de clastos (arenas gruesas a gravas medias) intercalados con horizontes de packstone-grainstone "puro" de 40 cm de espesor. El contacto está marcado por una zona discreta de concentración de clastos. En este intervalo los horizontes de concentración tienen menor espesor y granulometría hacia la cima; también hay imbricación discreta y gradación normal (no es muy clara). En el horizonte de concentración en el contacto:  $d_m=2\text{mm}$ ,  $d_M=5\text{cm}$ ,  $d_\sigma=5\text{mm}-2\text{cm}$ ,  $d_r=23\text{cm}$  (conglomerado de Todos Santos). En la parte media del intervalo, dentro de una zona de concentración de clastos:  $d_m=1\text{mm}$ ,  $d_M=4\text{cm}$ ,  $d_\sigma=4-7\text{cm}$ .

- 0.89 m: Packstone-grainstone semejante a EP-26, pero el contenido de clastos (arenas gruesas) es menor al 1%;  $dM=1-2mm$ .
- 1.06 m: Semicubierto.
- 3.81 m: Grainstone semejante a los grainstone anteriores, con horizontes de concentración de clastos de 15-20 cm de espesor, intercalados con horizontes de grainstone "puro" (con escasos terrígenos) de 30-40 cm de espesor. En las zonas de concentración el contenido de clastos es menor a 5%; contiene clastos de wackestone (semejante a EP-11) de 10 a 20 cm de longitud y clastos de packstone (semejante a EP-25) de aproximadamente 5 cm; con cierta frecuencia se observan clastos de packstone mayores a 15 cm. Contiene de manera escasa restos de posibles bivalvos de hasta 6 cm de longitud. La granulometría en los horizontes de concentración de clastos es de gravas finas a medias y gravas gruesas:  $d_m=3mm$ ,  $dM=15cm$ ,  $d\sigma=1-2cm$ . Muestra EP-56 (a los 20 cm de la base).
- 7.65 m: Cubierto.
- 6.35 m: Grainstone (semejante a los grainstone anteriores) "puro", es decir sin concentración de clastos; el contenido de clastos es de 1-3 %;  $d_m=3mm$ ;  $dM=3cm$ ;  $d\sigma=1-1.5cm$ .
- 2.26 m: Packstone semejante a EP-25, con menos de 1% de terrígenos.
- 3.50 m: Packstone semejante a los packstone anteriores, el contenido de clastos (gravas muy finas a finas) es menor a 3%;  $d_m=2-4mm$ ;  $dM=5cm$ ;  $d\sigma=1-2cm$ . Muestra EP-57 (en la parte superior).
- 1.75 m: Semicubierto, bloques movidos.
- 18.12 m: Packstone semejante a EP-25, masivo, con 5-10 % de clastos (gravas finas a medias);  $dM=17cm$ ;  $d\sigma=2-5cm$ . Muestra EP-58 (en la parte superior).
- 0.89 m: Packstone semejante al anterior., con 10% de clastos;  $d_m=2mm$ ;  $dM=2cm$ ;  $d\sigma=5mm$ .
- 1.99 m: Packstone semejante al anterior, con menos de 5% de clastos.
- 4.14 m: Grainstone semejante a los grainstone anteriores, con menos de 5% de clastos. Muestra EP-59 (en la parte superior).
- 0.82 m: Packstone semejante a EP-25, con 5% de clastos. Contiene clastos de wackestone (semejante a EP-11) laminado y sin laminaciones (6-18 cm de longitud). La granulometría de los clastos terrígenos es:  $d_m=2mm$ ;  $dM=8-10cm$ ;  $d\sigma=1-2cm$ .
- 5.00 m: Packstone semejante al anterior. Contiene frecuentes gasterópodos (de 3-7 cm de longitud) y escasos estromatolitos (de hasta 3 cm de diámetro). Muestra EP-60 (en la parte media). Figura 9c.
- 17.48 m: Cubierto.

Primer afloramiento franco de la Formación Brecha Barbosa.

Espesor total del intervalo: 113.53 m (figura 7).

Espesor total de la Sección Compuesta: 680 m (figura 7).

## ANEXO II. Petrografía de la Sección Compuesta El Porvenir

### **Muestra: EP-1**

Grainstone de oolitas con influencia terrígena, comunes pellets, escasos intraclastos y bioclastos. Los granos envueltos están mal clasificados, son principalmente ooides, pero son frecuentes los oncolitos, y ocasionalmente lumps, cuyos diámetros llegan hasta 2.5 mm; tienen formas circulares y elipsoidales; los núcleos están constituidos por fragmentos de molusco, de equinodermo y de algas (?), y en ocasiones carecen de núcleo.

Los clastos terrígenos están constituidos por fragmentos de la andesita Pueblo Viejo, del intrusivo granodiorítico, y raramente de areniscas de la Formación Todos Santos; con una granulometría de 0.25-3.25 mm; son angulosos y subangulosos.

Los intraclastos son de grainstone de grano fino peletífero con peloides y granos envueltos pequeños. Los bioclastos están constituidos por fragmentos y espinas de equinodermo, fragmentos de molusco, y escasos foraminíferos bentónicos (textuláridos).

La muestra presenta intensa compactación, y disolución por presión en los granos envueltos, con pérdida de material de hasta un 50%; además de deformación de estos granos.

Se aprecian tres etapas de cementación: la primera de ellas es un anillo delgado en torno a los granos, calcita no isopaca; la segunda etapa está constituida por calcita equigranular en los contactos entre los granos y ocasionalmente en forma de menisco (cemento vadoso); la tercer etapa de cementación fue posterior a un evento de disolución selectiva que afectó principalmente al cemento de la segunda etapa, este tercer cemento es calcita poikilotópica. Se observan dos eventos de fracturamiento rellenos de calcita.

### **Muestra: EP-2**

Grainstone oolítico con influencia terrígena, muy semejante a EP-1. En ocasiones se aprecia matriz recristalizada muy escasa. Los clastos terrígenos tienen una granulometría de 0.3-7 mm; son angulosos y subangulosos. Entre los bioclastos se encuentran además de los reportados en EP-1, fragmentos de ostrácodo y escasos radiolarios.

### **Muestra: EP-3**

Packstone a grainstone de oolitas con escasa influencia terrígena, frecuentes bioclastos, escasos intraclastos y frecuentes pellets. Es muy semejante a la muestra EP-2, aunque aquí se observa un cierto contenido de matriz micrítica, distribuida de manera errática.

Los ooides en general están bien clasificados, y presentan una microestructura concéntrica y combinada (concéntrica-radial), moderadamente preservada. Los oncolitos son subesféricos a elipsoidales, de hasta 2.75 mm de diámetro; algunos de ellos contienen núcleos múltiples y dan la apariencia de ser intraclastos. Los intraclastos son muy escasos, tienen textura grainstone de grano fino peletífero con peloides y granos envueltos pequeños. Los terrígenos tienen la misma procedencia; la granulometría va de 0.125-4 mm y son angulosos.

La muestra está ligeramente recristalizada. En esta muestra no se aprecia claramente la presencia del cemento vadoso, solamente se observa un anillo de calcita que bordea parcialmente a los granos envueltos, y el cemento de calcita poikilotópica. Estas dos etapas de cementación son claras también en una estructura

geopetal en una concha de gasterópodo, que sirve de núcleo a un oncolito. La compactación fue moderada a intensa, con pérdida de material por disolución del 5% y llegando hasta un 50% ocasionalmente; se observan superficies microestilíticas, impregnadas por hidrocarburos. Estos hidrocarburos aparentemente impregnaron a esta roca en al menos dos etapas, una anterior al fracturamiento y una más posterior a éste, impregnándose en la microporosidad intercrystalina del relleno de las fracturas. Se observa muy escasamente una incipiente dolomitización parcial en el cemento calcítico y en las fracturas ensanchadas por disolución. La porosidad, resaltada por resina teñida, es menor a 2%, no se aprecia interconexión entre los poros; la porosidad es por disolución en microestilolitas parcialmente abiertas, en vugulos muy pequeños (0.06 mm de diámetro) dentro del cemento calcítico en bloque, en la microporosidad intercrystalina de la dolomita que cementa las porciones ensanchadas por disolución de las fracturas, en algunas fracturas parcialmente abiertas, y en algunos clastos terrígenos que sufrieron una disolución incipiente.

**Muestra: EP-4**

Grainstone de oolitas con influencia terrígena, frecuentes pellets y escasos intraclastos y bioclastos. En ocasiones se aprecia matriz recristalizada, pero muy escasa. Muy semejante a la muestra EP-2. La roca es de grano fino, pero hacia la parte media contiene un horizonte en el que aumenta el tamaño de grano (hasta 3 mm los oncolitos), y está compuesto casi exclusivamente por oncolitos; además en este horizonte (de 1 cm de espesor) crece el tamaño de los poros rellenos completamente por cemento calcítico en bloque; el horizonte pasa nuevamente al grainstone de grano fino de la base, sin embargo registra una ligera disminución en el tamaño de grano, siendo más fino que en la parte inferior de la muestra. La granulometría de los terrígenos va desde 0.125-5.3 mm. Los intraclastos son de grainstone de grano fino pelotífero con peloides y pequeños granos envueltos. Se observan escasos radiolarios.

Los procesos diagenéticos son los observados en las muestras anteriores. Sin embargo, aquí se aprecia raramente algunos núcleos de ooides que fueron disueltos y el molde fue relleno por espatita, antes de que los sedimentos sufrieran compactación (ambiente vadoso).

**Muestra: EP-5**

Grainstone de oolitas con escasa influencia terrígena, y escasos pellets, intraclastos (packstone lagunares con abundantes fragmentos de algas verdes) y bioclastos (fragmentos de equinodermo principalmente, de molusco y raramente de algas verdes y fragmentos de peces?), con una cubierta micrítica. Es muy semejante a las muestras anteriores. La granulometría de los granos envueltos va desde 0.75-3.5 mm, y la de los terrígenos de 0.2-2.75 mm. Presenta escasa bioturbación, el sedimento que la relleno es un grainstone oolítico (ooides tempranos, cubiertas micríticas, y algunos agregados), pellets y peloides, de grano fino, bien clasificado.

Los granos menos estables (probablemente fragmentos de molusco) que conforman el núcleo de los granos envueltos, fueron disueltos y la porosidad móldica producida fue rellena por espatita. Se aprecia una porosidad menor a 2%, principalmente en algunos granos envueltos, como microporosidad intercrystalina en la micrita de estos granos, y muy escasamente porosidad por disolución parcial (muy incipiente) en el cemento poikilotópico de calcita.

**Muestra: EP-6**

Grainstone de oolitas moderadamente a bien clasificado, con moderada influencia terrígena (~ 5%), bioclastos escasos de equinodermo, escasos pellets y muy raramente intraclastos de packstone lagunares. Semejante a las muestras anteriores, pero la granulometría es más fina (0.5 mm los ooides, 0.47-2.5mm los oncolitos y 0.3–5.75 mm los terrígenos). Se observa comúnmente granos envueltos rotos y disgregados.

**Muestra: EP-7**

Grainstone oolítico, con moderada influencia terrígena, con frecuentes intraclastos de packstone- grainstone de grano fino peletífero con peloides y granos envueltos pequeños, y de mudstone-wackestone; bioclastos escasos a frecuentes (fragmentos de equinodermo, de molusco). Es semejante a las muestras anteriores. Se observan ooides y escasamente oncolitos, además de algunos granos (fragmentos de equinodermo) con *sobres de micrita* gruesos. La granulometría de los granos envueltos es de 0.57-3.37mm (oncolitos). La granulometría de los terrígenos es de 0.5–4.75 mm.

**Muestra: EP-8**

Grainstone oolítico con influencia terrígena moderada (5%), presenta intraclastos de packstone-grainstone de grano fino constituidos por granos envueltos, peloides y pellets, bioclastos escasos (fragmentos de molusco y de equinodermo). Es muy semejante a los grainstone anteriores. La granulometría de los ooides es de 0.37-0.75 mm y la de los oncolitos es de 0.87-3.5mm. Cuando la microfábrica de los ooides está preservada, se observan dos tipos, concéntrica y combinada concéntrica-radial. La granulometría de los terrígenos aumenta, con tamaños de 0.5mm-1 cm. Los rasgos diagenéticos son muy semejantes a los rasgos comunes a las muestras anteriores.

**Muestra: EP-9**

Grainstone oolítico muy semejante a las muestras anteriores. Es moderadamente clasificado; con clastos terrígenos de hasta 1.5 cm. Frecuentemente las oolitas presentan muestras de haber sufrido micritización.

**Muestra: EP-10**

Wackestone de radiolarios con abundantes fragmentos de ostrácodos, calciesferas, y fragmentos muy pequeños de equinodermo y de molusco, y escasos foraminíferos bentónicos (hialinos y textuláridos, muy pequeños). El wackestone es de grano fino, y presenta abundantes laminaciones. Contiene abundante materia orgánica en pequeños manchones y en microestilolitas poco desarrolladas. Los radiolarios son espumeláridos principalmente, pero también se encuentran frecuentemente naseláridos. Los radiolarios fueron calcitizados. Raramente se encuentran pequeños pelecípodos y ostrácodos completos.

Las laminaciones son pequeños horizontes (0.3-1 mm de espesor) de pellets y pequeños foraminíferos bentónicos (textuláridos principalmente), ocasionalmente con oolitas de hasta 1.6 mm y ooides de hasta 0.8 mm; la porosidad intergranular en el horizonte peletífero está rellena por cemento de calcita micrítica (posiblemente se trate de pseudomatrix) y un cemento posterior de espatita en cristales muy pequeños. Se observa escasa bioturbación con el grainstone de grano fino, peletífero y con pequeños granos envueltos y peloides, como relleno.

El fracturamiento es moderado a intenso. Se aprecian al menos dos eventos de fracturas rellenos por calcita. Se encuentran microestilolitas, impregnadas por hidrocarburos pesados.

**Muestra: EP-11**

Wackestone de radiolarios con abundantes fragmentos de ostrácodos, calciesferas, filamentos algáceos y fragmentos muy pequeños de equinodermo y de molusco, y escasos foraminíferos bentónicos, muy semejante a EP-10.

El fracturamiento es moderado a intenso, con algunas fracturas ensanchadas por disolución. Se observan tres eventos de disolución por presión, impregnados por hidrocarburos pesados. También se observa una impregnación más de hidrocarburos más ligeros, que se alojan en la microporosidad intercrystalina de la matriz, en pequeños manchones. Al parecer son anteriores al fracturamiento.

**Muestra: EP-12**

Wackestone de radiolarios con abundantes fragmentos de ostrácodos y fragmentos muy pequeños de equinodermo y de molusco, calciesferas, y escasamente pequeños foraminíferos bentónicos, muy semejante a la muestra EP-11. Las laminaciones peléticas son más abundantes en esta muestra.

**Muestra: EP-13**

Wackestone de radiolarios con abundantes fragmentos de ostrácodos y fragmentos muy pequeños de equinodermo y de molusco, calciesferas y escasamente pequeños foraminíferos bentónicos, presenta abundantes laminaciones. Es muy semejante a la muestra EP-12. Contiene una influencia terrígena muy escasa, con cuarzo detrítico de 0.075 mm de diámetro, y muy raramente clastos andesíticos de 8 mm de diámetro.

Hacia la base el wackestone se encuentra bioturbado, se observa un sedimento de packstone muy fino relleno de trazas fósiles; el packstone es pelético, con frecuentes peloides, algunos foraminíferos bentónicos, comunes fragmentos de equinodermo y molusco, escasos radiolarios, y algunos ooides (0.6-1.25 mm de diámetro) y escasos terrígenos (0.05-0.37 mm).

Se aprecian las fracturas semiparalelas a la estratificación sumamente ensanchadas por disolución (probablemente ese fue su origen).

**Muestra: EP-14**

Wackestone de radiolarios con abundantes fragmentos de ostrácodos y fragmentos muy pequeños de equinodermo y de molusco, calciesferas y escasamente pequeños foraminíferos bentónicos, y presenta abundantes laminaciones y pequeños lentes peléticos con peloides y granos envueltos pequeños. Es muy semejante a la muestra EP-12. Muy raramente se observan fragmentos de pez y clastos andesíticos de 2.75 mm.

**Muestra: EP-15**

Wackestone de radiolarios con abundantes fragmentos de ostrácodos y fragmentos muy pequeños de equinodermo y de molusco, calciesferas y escasamente pequeños foraminíferos bentónicos, con abundantes laminaciones y pequeños lentes peléticos con peloides y granos envueltos pequeños. Es muy semejante a la muestra EP-12. Hacia la cima desaparecen las laminaciones. La muestra se encuentra recristalizada.

**Muestra: EP-16**

Hacia la base, packstone-grainstone oolítico (oncolitos y escasamente ooides) con escasa influencia terrígena, muy semejante a los grainstone anteriores (EP-9, por ejemplo), con bioclastos, granos con *sobres de micrita*, intraclastos lagunares, etc. La influencia terrígena tiene una granulometría bimodal, con partículas de 0.625-1.625 mm, y de 5.375-9 mm, y tiene la misma procedencia que las muestras anteriores. La granulometría de las oolitas y oncolitos va de 0.75-2.5 mm. Son frecuentes los lumps. El packstone-grainstone pasa rápidamente a un packstone oolítico; sin mayores diferencias, además de la presencia de lodo calcáreo como matriz. Entre los granos envueltos hay concentraciones de abundantes pellets. Hacia la parte media-baja pasa de manera muy transicional al wackestone de las muestras anteriores (EP-11 a EP-15), aunque aquí no presenta laminaciones peletíferas.

**Muestra: EP-17**

Wackestone de bioclastos (fragmentos de ostrácodos y fragmentos muy pequeños de equinodermo y de molusco), con radiolarios, calciesferas, pequeños foraminíferos bentónicos (hialinos y textuláridos) muy semejante a la muestra EP-11, sin embargo, la presencia de fragmentos de equinodermo y molusco es muy abundante en esta muestra.

La tinción con alizarina revela manchones dolomitizados muy pequeños en la micrita, distribuidos uniformemente en la muestra; además el relleno de las fracturas más gruesas presenta también pequeñas zonas sin teñir. No se observa otra evidencia de dolomita en la roca. La tinción de la resina revela que algunas fracturas se encuentran abiertas, dando cierta porosidad a la muestra, aunque es muy baja (<3%).

**Muestra: EP-18**

Grainstone oolítico muy semejante a la muestra EP-2. Presenta escasa bioturbación e intraclastos del grainstone fino peletífero con peloides y granos envueltos. Los clastos terrígenos llegan a un 10%, con una granulometría gruesa (1.6-5.5 mm). Se observan además fragmentos grandes de molusco, de hasta 0.5 cm. La resina teñida revela una porosidad muy escasa (~2%) en algunas fracturas muy delgadas.

**Muestra: EP-18'** (clasto de wackestone en la muestra EP-18)

Fragmento de wackestone muy semejante al de las muestras EP-11 a EP-17. El clasto se encuentra muy recristalizado, se aprecian abundantes peloides, además de abundantes fantasmas de radiolarios, foraminíferos bentónicos, fragmentos de ostrácodo y de molusco (ambos muy pequeños).

**Muestra: EP-19**

Grainstone oolítico con influencia terrígena; con bioclastos, peloides y pellets comunes. El grainstone está muy bien clasificado y es de grano muy fino. Semejante a EP-6. Con abundantes granos con *sobres de micrita*, y algunos oncolitos y lumps. La granulometría es bastante homogénea, de 0.225-0.75 mm y de 0.75-1.37 mm. Los ooides tienen formas semiesféricas y elipsoidales (siguiendo en estos casos la forma del bioclastos que actuó como núcleo). Los bioclastos comúnmente tienen *sobres de micrita*, frecuentemente gruesos (hasta 0.075 mm). Los clastos terrígenos tienen una granulometría de 0.125-1 mm.

**Muestra: EP-20**

Grainstone oolítico muy semejante a la muestra EP-2. Es moderadamente clasificado; con clastos terrígenos de hasta 1.3 cm. Frecuentemente los granos envueltos presentan muestras de haber sufrido micritización. Se aprecia porosidad escasa por disolución en el cemento más tardío, pero los poros no están intercomunicados, puesto que la resina teñida no impregnó los poros.

**Muestra: EP-21**

Grainstone oolítico muy semejante a la muestra anterior (EP-20). La influencia terrígena es muy abundante, llegando a un 15% al menos; los clastos están moderadamente bien clasificados (0.05-0.25 mm), y predominan los clastos de cuarzo monocristalino; aunque con cierta frecuencia se encuentran líticos andesíticos y granodioríticos con tamaños variables, desde 1.25 mm hasta 1.6 cm.

**Muestra: EP-22**

La parte inferior es un packstone-grainstone oolítico semejante a EP-2. La influencia terrígena es escasa, con una granulometría de hasta 1.4 cm, en el caso de clastos andesíticos. Se aprecia una dolomitización parcial en los cementos de las primeras dos etapas, con impregnación de hidrocarburos en la microporosidad intercrystalina de la dolomita. Presenta abundante pseudomatrix debido a la compactación y disgregación de los granos, sobre todo de los pellets. Pasa a un lente del packstone-grainstone de grano fino peletífero con peloides y granos envueltos pequeños, bien clasificado. Finalmente pasa al wackestone de radiolarios y calciesferas semejante al de la muestra EP-11.

**Muestra: EP-23**

Grainstone oolítico muy semejante a la muestra EP-2. La influencia terrígena es acaso del 5%.

**Muestra: EP-24**

Grainstone oolítico muy semejante a la muestra anterior. La influencia terrígena es acaso >5%. Presenta clastos andesíticos y granodioríticos que ocasionalmente alcanzan 1.5 cm de longitud.

**Muestra: EP-25**

Packstone oolítico, semejante a los grainstone anteriores (EP-2, por ejemplo), pero con matriz. Son abundantes las oolitas micritizadas (0.5-1.675 mm) y son comunes los pellets y granos con *sobres de micrita*, y escasos lumps, comúnmente micritizados. La influencia terrígena es de alrededor de 5 % en promedio, con una granulometría de 0.375 a 3 mm.

La compactación fue intensa, provocando pérdida de material en muchos granos. Ocasionalmente se observa dolomitización en el cemento calcítico. La porosidad intercrystalina de la dolomita fue impregnada por hidrocarburos pesados. La resina teñida revela una escasa microporosidad (2%) por disolución incipiente en el cemento, así como en algunas fracturas delgadas.

**Muestra: EP-26**

En la parte inferior, packstone-grainstone oolítico semejante a los grainstone anteriores; aunque presenta algunas diferencias marcadas. Hacia la base presenta mayor cantidad de material micrítico entre los granos. El espacio poroso se vuelve cada vez más pequeño, y es más abundante la presencia del cemento



interpretado como de origen vadoso. El sedimento es marcadamente bimodal, los pellets, peloides y oolitas representan la fracción más fina (0.125-0.3 mm en promedio), y algunas oolitas representan la fracción gruesa (0.625-1.375 mm). Hacia la parte media, la matriz se hace cada vez más abundante, y el espacio poroso es muy pequeño.

Hacia la parte media-superior, pasa a un horizonte en el que disminuye el tamaño de grano haciéndose granulométricamente más homogéneo el sedimento, con frecuentes oolitas de 0.5-0.75 mm. Este horizonte presenta intensa compactación. Pasa nuevamente al packstone que sobreyace, con abundante matriz y un espacio poroso muy reducido y relleno principalmente por el cemento vadoso. Este packstone, contiene oolitas, pellets y peloides cada vez más abundantes, mientras que las oolitas más grandes se vuelven cada vez más escasas. Hacia la parte más superior de la muestra, se pasa de nuevo al packstone-grainstone de la base.

**Muestra: EP-27**

Grainstone oolítico muy semejante a la muestra EP-2. La influencia terrígena es acaso del 5%.

**Muestra: EP-28**

Grainstone oolítico muy semejante a la muestra EP-2. La influencia terrígena es >5%. Presenta escasa bioturbación. Se observa un clasto de boundstone, constituido por algas rojas. Además ocasionalmente el núcleo de los oncolitos es un fragmento probablemente de coral.

**Muestra: EP-29**

Grainstone oolítico muy semejante a la muestra EP-2. La influencia terrígena es >5%.

Un rasgo distintivo en esta muestra es la presencia de una dolomitización selectiva, que afectó parcialmente a los cementos de calcita. La dolomita está constituida por rombos de hasta 0.37 mm., de aspecto sucio, brumoso, reflejando el contenido de inclusiones que adquirió al crecer. Además se aprecia una disolución incipiente de esta dolomita.

**Muestra: EP-29'A**

Clasto de wackestone de radiolarios con abundantes fragmentos de ostrácodos y fragmentos muy pequeños de equinodermo y de molusco, y escasamente pequeños foraminíferos bentónicos, presenta abundantes laminaciones de packstone peletífero. Es muy semejante al wackestone de la muestra EP-12. Además de estos clastos de wackestone, son comunes los clastos de lechos rojos (Todos Santos) en estos grainstone oolíticos.

**Muestra: EP-29'B**

Clasto de wackestone muy semejante al wackestone de la muestra EP-12.

**Muestra: EP-30**

Grainstone oolítico muy semejante a la muestra EP-2. La influencia terrígena es ~5%. Continúa la dolomitización parcial, pero es menor su distribución.

**Muestra: EP-31**

Hacia la base, packstone-grainstone de grano muy fino, constituido por ooides micritizados, pellets y peloides, con pequeños oncoides de hasta 0.4 mm, con una granulometría promedio de 0.1-0.2 mm. Pasa a un mayor dominio oolítico y aumenta la granulometría de estos; además la presencia de clastos terrígenos se vuelve frecuente. Cada vez más se vuelve bimodal el sedimento, con pellets y peloides (0.05-0.125 mm) por un lado, y oolitas por otro (0.375-1.125 mm). El sedimento bimodal pasa nuevamente al packstone-grainstone de la parte inferior, representando una serie de alternancias entre estos dos tipos de sedimento. Hacia la parte superior pasa a un grainstone semejante al de la muestras EP-2, pero el tamaño de grano es un poco más fino (0.325-1.8 mm), y el espacio poroso es más reducido.

**Muestra: EP-32**

Grainstone oolítico muy semejante a la muestra EP-2. La influencia terrígena es 5-10%. No se observa ya dolomitización.

**Muestra: EP-33**

Grainstone oolítico muy semejante a la muestra EP-2. La influencia terrígena es 5-10%.

**Muestra: EP-34**

Grainstone oolítico semejante a la muestra EP-2. La influencia terrígena es ~5%. La compactación es intensa.

**Muestra: EP-35**

Packstone oolítico, muy semejante a los grainstone anteriores (EP-34, por ejemplo), pero con matriz. Contiene clastos de los wackestone de radiolarios y bioclastos de grano muy fino semejantes a EP-11, pero sin laminaciones peletíferas. Algunos bioclastos se encuentran sumamente bioturbados.

**Muestra: EP-35A**

Grainstone oolítico muy semejante a la muestra EP-2. La influencia terrígena es 5-10%. La compactación fue intensa y el espacio poroso es reducido.

**Muestra: EP-36**

Wackestone de radiolarios con abundantes fragmentos de ostrácodos y fragmentos muy pequeños de equinodermo y de molusco, calciesferas y escasamente pequeños foraminíferos bentónicos, presenta abundantes laminaciones y pequeños lentes peletíferos con peloides y oolitas pequeñas. Es muy semejante a la muestra EP-11.

**Muestra: EP-37**

Wackestone laminado muy semejante a la muestra EP-11.

**Muestra: EP-38**

Grainstone oolítico muy semejante a la muestra EP-2. La resina teñida revela escasa porosidad en torno a los granos terrígenos, como en EP-18, pero esta puede ser inducida. Presenta dolomitización en los cementos y la porosidad intercrystalina de esta dolomita está impregnada por hidrocarburos.

**Muestra: EP-39**

Grainstone oolítico muy semejante a la muestra EP-2. La influencia terrígena es ~10%. No se aprecia dolomitización.

**Muestra: EP-40**

Grainstone oolítico semejante a la muestra EP-2. La influencia terrígena es >3%. Nuevamente se aprecia dolomitización en los cementos; la dolomitización presenta dos fábricas diferentes, la primera de ellas rellena totalmente los poros con un mosaico xenotópico de grano fino, ocasionalmente de grano medio. La segunda fábrica de la dolomitización reemplazó parcialmente al cemento calcítico, y generó rombos de grano medio, más limpios y claros. Dentro de un mismo poro llegan a coexistir estos dos tipos de dolomita. La microporosidad intercrystalina de la dolomita está impregnada por hidrocarburos.

**Muestra: EP-41**

Wackestone muy semejante a la muestra EP-11, sin laminaciones.

**Muestra: EP-42**

Grainstone oolítico muy semejante a la muestra EP-2. La presencia terrígena es menor a 3%.

**Muestra: EP-43**

Grainstone oolítico muy semejante a la muestra EP-2. Presenta escasa bioturbación e intraclastos del wackestone semejante a EP-11; son relativamente frecuentes los bioclastos de molusco de hasta 1.5 cm. El espacio poroso es más reducido debido a la compactación.

**Muestra: EP-44**

Grainstone oolítico muy semejante a la muestra EP-2. Presenta fragmentos de molusco de hasta 0.5 cm, e intraclastos del packstone-grainstone fino peletífero con peloides y oolitas.

**Muestra: EP-45**

Grainstone oolítico muy semejante a la muestra EP-2. Es de grano fino, la granulometría va de 0.375 mm hasta 2.75 mm en promedio. La influencia terrígena es ~10%. Son comunes los intraclastos, de grainstone peletífero, del wackestone semejante a EP-11 (pero sin laminaciones). Además se observa con cierta frecuencia bioturbación. Hay abundante pseudomatrix debido a la compactación mecánica de muchos pellets, peloides y algunas oolitas.

**Muestra: EP-46**

Packstone oolítico muy semejante a la muestra EP-35. El espacio poroso es muy reducido; presenta escasa bioturbación con relleno del packstone-grainstone fino peletífero.

**Muestra: EP-47**

Grainstone oolítico semejante a la muestra EP-2. Presenta dolomitización muy semejante a la observada en la muestra EP-40. La dolomitización es parcial según lo revela la tinción con alizarina roja, y afectó principalmente al cemento vadoso; el cemento de calcita en bloque está dolomitizado de manera muy

incipiente, sólo se aprecian escasos cristales rómbicos, más límpidos que los del mosaico xenotópico, de dolomita de grano medio, creciendo dentro de ese cemento.

**Muestra: EP-48**

La parte inferior es semejante a EP-46, está bien clasificado y es de grano fino (0.25-1.25 mm). Hacia la parte media pasa al packstone-grainstone de grano fino peletífero, con oolitas, peloides y granos con *sobres de micrita*; el diámetro de las oolitas es de 0.175-0.625 mm, ocasionalmente de 1.125 mm. Se observa escasa pseudomatriz. La influencia terrígena es menor a 5%, con una granulometría de 0.125 a 0.5 mm.

**Muestra: EP-49**

Grainstone oolítico muy semejante a la muestra EP-2. Está bien clasificado, la granulometría es de 0.375 a 1 mm. Los granos están casi en su totalidad micritizados. Presenta pseudomatriz por compactación. La influencia terrígena es aproximadamente 3%.

**Muestra: EP-50**

Grainstone oolítico muy semejante a la muestra EP-2. Bien clasificado, con granulometría de 0.325 a 0.875 mm. La influencia terrígena es de 5-15%. Presenta pseudomatriz, el espacio poroso es reducido.

**Muestra: EP-51**

Grainstone oolítico muy semejante a la muestra EP-2. La influencia terrígena es ~10%. Se aprecia una escasa dolomitización, principalmente del tipo de mosaico fino xenotópico. Se observa abundante pseudomatriz.

**Muestra: EP-52**

Packstone oolítico muy semejante a la muestra EP-35. La influencia terrígena es de 5-10%, con clastos de 0.125 a 4.25 mm. El espacio poroso es muy reducido. Presenta escasa bioturbación con relleno del packstone-grainstone fino peletífero.

**Muestra: EP-53**

Packstone oolítico, es semejante a los grainstone, pero presenta matriz. Se aprecia un clasto de 3 cm del wackestone semejante a EP-11, pero sin laminaciones; además de un fragmento de conglomerado polimíctico, cementado por calcita, constituido por granos de cuarzo, feldespatos, líticos andesíticos, granodioríticos, y granos envueltos, clastos calcáreos, y peloides; probablemente proviene de las capas conglomeráticas de la Fm. Mogoñé.

**Muestra: EP-54**

Grainstone oolítico muy semejante a la muestra EP-2. La granulometría de los granos es de 0.25 a 2.875 mm. Es común el fracturamiento de los granos por compactación. Presenta ensanchamiento de fracturas por disolución.

**Muestra: EP-55**

En la base, la lámina está constituida por el wackestone semejante a EP-11, sin laminaciones. Pasa mediante un contacto sumamente afectado por disolución por presión, a un packstone oolítico semejante a EP-35, con

parches de grainstone semejante a EP-2. Hacia la parte superior el packstone pasa muy transicionalmente al grainstone oolítico semejante a EP-2.

**Muestra: EP-56**

Grainstone oolítico semejante a la muestra EP-2. La granulometría de los granos es de 0.175-0.925 mm (ooides) y de 0.025-2.125 mm (oncolitos). Presenta escasa bioturbación. La influencia terrígena es apenas de 1%. Presenta suturas de disolución impregnadas de hidrocarburos, y un cierto fracturamiento ensanchado por disolución.

**Muestra: EP-57**

Packstone oolítico semejante a EP-53. La influencia terrígena es menor a 3%, y es de grano fino. La muestra está ligeramente más recristalizada que las anteriores.

**Muestra: EP-58**

Packstone oolítico muy semejante a EP-57. Presenta bioturbación escasa. El contenido de terrígenos es de aproximadamente 5%. Es moderado a bien clasificado.

**Muestra: EP-59**

Grainstone oolítico muy semejante a la muestra EP-2.

**Muestra: EP-60**

Packstone oolítico muy semejante a EP-57. Presenta bioturbación escasa. El contenido de terrígenos es de aproximadamente 5%. Es moderado a bien clasificado.

## ANEXO III. Descripción de Núcleos del Kimmeridgiano de la Sonda de Campeche

### **POZO C-3001**

- NUCLEO 4 (3170-3179): Kimmeridgiano

**Muestra: C-3001 N-4 C-11 F-29-28**

Dolomía color pardo medio, derivada de un grainstone oolítico de grano fino, con algunos bioclastos, oncolitos y otros granos envueltos; masiva, mal clasificada y con empaque abierto. Los oolitas van de 0.5 a 2 mm en tamaño, algunos granos envueltos llegan a 1.6 cm de diámetro.

Presenta porosidad móldica y vugular, los vugulos tienen tamaños desde menos de 1 mm hasta 2-3 mm.

Muestra: F-29 y F-28.

**Muestra: C-3001 N-4 C-10 F-26-24**

Dolomía pardo medio (grainstone oolítico) masiva, en la base del F-26 y el F-25 es más compacta y se observan *suturas* arcillosas. El F-24 no presenta las *suturas* de arcilla, además de que disminuye la presencia de bioclastos. La porosidad es vugular y móldica, aproximadamente entre 5 y 10%. Muestra: F-25.

**Muestra: C-3001 N-4 C-9 F-23-21**

El F-23 es semejante al F-24, con escasos granos envueltos de hasta 1 cm de diámetro. F-22 semejante a F-23. La parte superior de F-21 es semejante a F-23 y la parte inferior es semejante a F-25. Muestra: F-21.

**Muestra: C-3001 N-4 C-8 F-21-20**

El F-21 es semejante al F-21 de la caja 9. El F-20A, en la parte inferior muestra un aumento en el tamaño de los oolitas (dolomía de grano grueso) y en el contenido de matriz (o cementante). El F-20 presenta abundantes *suturas* por disolución. El diámetro de los oolitas es más uniforme, cercano a los 2 mm. La porosidad disminuye a menos de 5%. Muestra: F-20A.

**Muestra: C-3001 N-4 C-7 F-19-18A**

El F-19 representa la dolomía (grainstone oolítico) de grano grueso, con oncoides y fragmentos de molusco. El F-18B presenta un horizonte de 3 cm con *suturas* por disolución, y grada a la dolomía de grano fino (grainstone oolítico de grano fino), presenta escasos bioclastos. El F-18A es semejante a la parte inferior de F-18B.

En general los oncolitos van de 6-11 mm, y en ocasiones los núcleos de estos son obvios (fragmentos de pelecípodo). El contenido conjunto de bioclastos y oncoides llega a representar un 20% del total de la roca.

**Muestra: C-3001 N-4 C-6 F-17-15A**

Los fragmentos 17 y 16 son semejantes a la dolomía fina (grainstone oolítico) con escasos bioclastos. El F-15B presenta 10 cm de *suturas* de arcilla paralelas a la estratificación, el resto no presenta cambios. F-15A semejante a F-17. La porosidad es mínima, en F-15B vuelve a ser móldica (5-10%). En F-15A disminuye. Muestra: F-15B.

**Muestra: C-3001 N-4 C-5 F-14-11**

F-14 a F-12 no presenta cambios. La parte inferior de F-11 presenta *suturas* por disolución. La porosidad en F-14 y F-13 es de aproximadamente 5%, en F-12 disminuye. Muestra: F-11.

**Muestra: C-3001 N-4 C-4 F-10B-9**

El F-10B presenta 3 cm de *suturas* por disolución, y pasa a la dolomía fina (grainstone oolítico). En el F-10A, la dolomía fina (grainstone oolítico) presenta esporádicas *suturas* por disolución. El F-9 es una dolomía de grano fino (grainstone oolítico). En esta caja aumenta la porosidad a un 10%.

**Muestra: C-3001 N-4 C-3 F-8B-7B**

F-8B sin cambios. El F-8A presenta 5 cm con *suturas*. F-7C: esporádicos vugulos (1-5 cm) con dolomita euhedral fina, sin *suturas* por disolución. F-7B: con algunas estilolitas verticales.

**Muestra: C-3001 N-4 C-2 F-7A-5**

Los fragmentos F-7A, 6B, 6A y 5 son semejantes al F- 7B. Presentan vugulos de hasta 3 cm y estilolitas.

**Muestra: C-3001 N-4 C-1 F-2B-1**

Sin mayores cambios, solamente desaparecen los grandes vugulos. Muestra: F-2A.

**- NUCLEO 5 (3180-3188): Kimmeridgiano**

**Muestra: C-3001 N-5 C-13**

Semejante a la dolomía fina del núcleo 4. Presenta escasos bioclastos y raramente oncoides y otros granos envueltos de mayor tamaño. La porosidad es igualmente alta. Muestra: caja 13 (fragmento sin número).

**Muestra: C-3001 N-5 C-11 F-34**

Semejante a la caja 13. La porosidad es alta, con vugulos de hasta 2 cm. Muestra: F-24.

**Muestra: C-3001 N-5 C-10 F-33-31**

Los fragmentos F-33 y F-32 son semejantes a la caja 13, pero con escasos oncolitos. En el F-31 los oncolitos llegan a representar 15-20% del total de la roca. Muestra: F-31.

**Muestra: C-3001 N-5 C-9 F-29-28**

La parte superior del F-29 se vuelve más fina y en la parte inferior aumenta el tamaño de los oncoides; estos siendo un 20% del total de la roca, y llegan hasta 1.5 cm de diámetro. En el F-28, aumenta también el tamaño de los oncoides. Muestra: F-29.

**Muestra: C-3001 N-5 C-8 F-27-24**

Los fragmentos F-27 y F-26 son semejantes al F-28. F-24 es semejante a la dolomía fina (originada de grainstone oolítico). Muestra: F-27.

**Muestra: C-3001, N-5, C-7,F-23A-20A**

F-23A a F-21A semejantes a F-24. F-20B y F-20A semejantes a F-24, pero parece contener más matriz (o cemento) y el empaque es más abierto. La porosidad es alta (vugular). Muestra: F-20B.

**Muestra: C-3001 N-5 C-6 F-19-17**

F-19 y F- 18 semejantes a F-20A. El F-17 es semejante al F-20A pero es demasiado poroso, la porosidad llega hasta un 30%. Muestra: F-17.

**Muestra: C-3001 N-5 C-5 F-17A-15**

Semejante al F-17.

**Muestra: C-3001 N-5 C-4 F-14-11**

El F-14 es semejante al F-17, pero ya no está dolomitizado el grainstone oolítico. F-13: paso del grainstone oolítico muy poroso a un packstone oolítico con matriz, que pierde porosidad. F-12 y F-11 semejantes a la parte inferior de F-13 (packstone oolítico), aunque aparecen más bioclastos. Muestra: F-13 y F-11.

**Muestra: C-3001 N-5 C-3 F-10-9A**

Semejante al F-11, pero nuevamente está dolomitizado. Adquiere una mayor porosidad nuevamente. Muestra: F-9A.

**Muestra: C-3001 N-5 C-2 F-7-5**

Semejante a F-12 y 11. Muestra: F-6.

**Muestra: C-3001 N-5 C-1**

Semejante a la caja 2, con algunas estilolitas horizontales.

**POZO C-1065D**

**- NUCLEO 9 (2950-2959 m): Kimmeridgiano**

**Muestra: C-1065D N-9 C-13** (Una bolsa con pedacería).

Dolomía de grano grueso color crema oscuro, de apariencia masiva y textura sacaroide. La porosidad es del 10%, y es de tipo vugular e intercrystalina; los vugulos tiene un diámetro máximo de 2mm, algunos presentan una cubierta de cemento de dolomita euhedral de grano medio a grueso. Efervesce ligeramente al HCl.

**Muestra: C-1065D N-9 C-12 F-53** (Consiste de tres fragmentos).

Dolomía gris oscuro de grano medio a grueso, con estratificación discreta (~2° con respecto al eje mayor de la caja), denotada por fantasmas de granos carbonatados. Presenta textura sacaroide. Contiene esporádicos fantasmas de granos de arenas gruesas, blancos. La porosidad es aproximadamente de 15%, como en la Caja 13/13. Algunos vugulos tienen cemento de dolomita euhedral gruesa. Se observan suturas de disolución subparalelas y transversales a la estratificación, algunas de ellas parecen estar abiertas. Efervesce ligeramente al HCl.



**Muestra: C-1065D N-9 C-11 F-52** (Dividido en dos subfragmentos).

Dolomía gris oscuro de grano medio a grueso, semejante a la Caja 12. Con estratificación discreta (~2° con respecto al eje mayor de la caja), denotada por fantasmas de granos carbonatados. Presenta textura sacaroides. Contiene esporádicos fantasmas de granos de arenas gruesas, blancos. La porosidad es aproximadamente de 15%, como en la Caja 13/13. Algunos vugulos de hasta 9 mm, con una cubierta de cemento de dolomita euhedral gruesa. Presenta escasas suturas de disolución paralelas a la estratificación, y algunas transversales semiabiertas. Muestra: F-52.

**Muestra: C-1065D N-9 C-10 F-51-50**

Dolomía gris oscuro de grano medio a grueso con zonas de grainstone oolítico sin dolomitización en el F-51; los oolitas son de color blanco y llegan a medir hasta 1 mm de diámetro, el grainstone presenta un empaque abierto, con los oolitas flotando entre el cemento calcítico. La porosidad sigue siendo alta, con un 15%, con vugulos de mayor tamaño con cubierta de cemento de dolomita. Se observan escasas suturas de disolución. Muestra: F-50 y F-51.

**Muestra: C-1065D N-9 C-9 F-49-48**

Dolomía gris oscuro de grano medio a grueso, originada de grainstone oolítico. Se aprecian fantasmas de los granos envueltos. La porosidad es vugular, con vugulos de hasta 1 cm de diámetro. Escasas suturas de disolución. Presenta efervescencia al HCl. Muestra: F-48.

**Muestra: C-1065D N-9 C-8 F-47-46**

Grainstone de oolitas gris intermedio, parcialmente dolomitizado. Es masivo. Las oolitas son menores a 1 mm de diámetro, aparentemente algunos núcleos son fragmentos de coral; además contiene escasos bioclastos (fragmentos de molusco). La porosidad es móldica y vugular, menor a 5%. Presenta escasas fracturas verticales, parcialmente abiertas con cemento calcítico (?). Muestra: F-46.

**Muestra: C-1065D N-9 C-7 F-44-38**

Lutita gris verdoso intermedio. El F-43 contiene un horizonte delgado de mudstone gris claro con laminación cruzada. Contiene además esporádicas concreciones rojizas muy pequeñas. La muestra está muy disgregada, y presenta fractura concoidea.

**Muestra: C-1065D N-9 C-6**

Semejante a la caja 7 (lutita gris verdoso).

**Muestra: C-1065D N-9 C-5**

Semejante a la caja 7 (lutita gris verdoso).

**Muestra: C-1065D N-9 C-4**

Semejante a la caja 7 (lutita gris verdoso).

**Muestra: C-1065D N-9 C-3**

Semejante a la caja 7 (lutita gris verdoso). Muestra: F-14.

**Muestra: C-1065D N-9 C-2**

Semejante a la caja 7 (lutita gris verdoso).

**Muestra: C-1065D N-9 C-1**

Semejante a la caja 7 (lutita gris verdoso).

**POZO C-1025**

- NUCLEO 4 (3443-3452 m): Kimmeridgiano

**Muestra: C-1025 N-4 C-13 F-30-29**

Dolomía de grano muy grueso color gris claro, masiva. La porosidad es vugular, 5-10%.

**Muestra: C-1025 N-4 C-12 F-28-25**

Semejante a la caja 13. Muestra: F-26.

**Muestra: C-1025 N-4 C-11 F-24-22B**

El F-24 es semejante a la caja 13. El F-23 es un packstone de granos envueltos color pardo, dolomitizado. Presenta discreta estratificación. El paso del packstone-grainstone anterior a este packstone de granos envueltos es gradual. Los granos envueltos tienen forma ovalada. Los granos envueltos aparecen desde los fragmentos 25 y 24, con un tamaño de hasta 3.5 cm de largo. Ocasionalmente estos granos son asimétricos. También son frecuentes los fragmentos de molusco. La matriz es color pardo mientras que los bioclastos son color crema claro. La porosidad disminuye a menos de 5%, es de tipo intercrystalina y móldica. El F-22B presenta un vugulo sellado por yeso. Muestra: F-23.

**Muestra: C-1025 N-4 C-10 F-22A-20B**

Wackestone de bioclastos con horizontes (de hasta 10 cm de espesor) de concentración de fragmentos de molusco de color crema y rojizo. La porosidad disminuye hasta menos de 2%, es principalmente de tipo móldica. En los horizontes de concentración de bioclastos se observan suturas de disolución.

**Muestra: C-1025 N-4 C-9 F-20A-20**

F-20: dolomía de grano fino color pardo, que pasa a dolomudstone laminado gris intermedio. No se aprecia porosidad.

**Muestra: C-1025 N-4 C-8 F-19-18B**

El F-19 es un wackestone de bioclastos, con una aparente textura moteada (por bioturbación) con zonas gris verdoso y amarillento; contiene fragmentos de bivalvos y suturas de disolución que resaltan la bioturbación. El F-18B es un wackestone de bioclastos con granos envueltos de hasta 4 cm de diámetro.

**Muestra: C-1025 N-4 C-7 F-18A-15**

Packstone de granos envueltos y bioclastos color pardo. Los granos envueltos son más alargados y llegan hasta 3 cm de longitud. Se aprecia una posible bioturbación afectada por la compactación. La porosidad es móldica en algunos granos envueltos (por disolución del núcleo).

**Muestra: C-1025 N-4 C-6 F-14 y 12**

Semejante a la Caja 7, pero la cima del F-14 es dolomudstone laminado color gris verdoso. El resto de este fragmento presenta un aumento en el tamaño de los granos envueltos, los cuales llegan hasta 4 cm de diámetro. El F-12 es semejante a la caja 7.

**Muestra: C-1025 N-4 C-5 F-11B-11A**

Packstone de granos envueltos, posiblemente algunos de ellos son pisolitos. Presenta estratificación discreta, reflejada en la orientación que guardan los granos. La granulometría de los granos envueltos va de 1-4 cm. Estos granos tienen formas semicirculares pero principalmente son alargados; el núcleo de estos granos está constituido por fragmentos de molusco. Presenta frecuentes suturas de disolución. La porosidad es menor a 5%; es de tipo intercrystalina y vugular (los vugulos son muy pequeños). Se observa escasa pirita.

**Muestra: C-1025 N-4 C-4 F-9-7B**

El F-9 es semejante a la caja 5. El F-8 es un wackestone color gris verdoso, con laminación discreta y posible bioturbación. Contiene escasos fragmentos de molusco. La porosidad es de 5%, intercrystalina. F-7B semejante a F-8, pero contiene escasos granos envueltos de 1-2 cm de diámetro.

**Muestra: C-1025 N-4 C-3 F-7A-6B**

El F-7A es semejante al F-7B. Contiene escasos fragmentos de molusco color crema. Presenta suturas de disolución discontinuas. La porosidad es intercrystalina, menor a 2%. El F-6B es un wackestone de color verde oliva, con estratificación discreta. Muestra: F-6B.

**Muestra: C-1025 N-4 C-2 F-6A-4B**

Semejante al F-6B (wackestone verde oliva). Presenta un aumento en el contenido de bioclastos. El F-5 contiene abundantes suturas de disolución semiverticales que le dan un aspecto brechoide. Presenta un nódulo de calcita dolomitizado. Muestra: C-2 y F-4.

**Muestra: C-1025 N-4 C-1 F-4A, 3 y 1**

Semejante a la caja 2. Continúa el aspecto brechoide debido a las suturas de disolución.

---

---

## ANEXO IV. Petrografía de los Núcleos Estudiados de la Sonda de Campeche

### **POZO Cantarell-3001**

- **NUCLEO 4 (3170-3179): Kimmeridgiano**

**Muestra: C-3001 N-4 C-13 2A**

Dolomía de grano grueso, con fantasmas de la textura packstone de oncolitos y ooides original. Los fantasmas de las oncolitos llegan a medir hasta 2.5 mm de diámetro, mientras que los ooides miden en general 0.75 mm. No se observa ya el núcleo de estos granos envueltos, ni la microfábrica de las capas debido al grado de alteración que presentan. Solamente se aprecia una capa en todos estos granos; es posible que hayan sufrido micritización antes de ser dolomitizados, además de que los núcleos sufrieron disolución selectiva. Las formas de las oncolitos son elipsoidales, ovoides y en ocasiones irregulares (posibles oncolitos); los ooides son ovoides en general; no se observan contactos entre los granos. La dolomitización fue de carácter penetrativo, afectando tanto al cemento (o matriz) como a los aloquímicos. En la porosidad intercrystalina de la dolomita se observa escasamente cuarzo autigénico, que fue a su vez reemplazado posteriormente por esta, aunque de manera muy incipiente; se apreció la escasa presencia de anhidrita rellenando esta porosidad; además de impregnación de hidrocarburos ligeros. Se observa una segunda disolución selectiva que afectó a la dolomita, posterior al emplazamiento de los hidrocarburos.

**Muestra: C-3001 N-4 C-11 F-29**

Dolomía de grano medio a grueso, en la que se aprecian fantasmas de la textura grainstone oolítico original. Es semejante a la muestra de la C-13, 2A. Entre las diferencias con esta muestra, está el hecho de que los ooides son más abundantes que los oncolitos (algunos de las cuales llegan a medir hasta 2.6 mm de diámetro); los ooides son más homogéneos en tamaño (un promedio de 0.75 mm de diámetro). Los oncolitos muestran una diferencia morfológica y en la cristalinidad de la dolomita que los reemplazó, la cual es de grano más fino, estas diferencias pueden deberse a que los núcleos de estos oncolitos fueron bioclastos (posiblemente fragmentos de molusco). Otra diferencia es la mayor impregnación de hidrocarburos en esta muestra, además de que estos son más pesados (color más oscuro). Es posible que se trate de tres tipos de hidrocarburos (ligeros, pesados y residuos sólidos). Esto puede indicar que la microporosidad intercrystalina es más alta, por lo cual es mayor la presencia de cuarzo autigénico y de anhidrita rellenando esos poros. La porosidad intercrystalina entre la anhidrita y la dolomita está rellena por los hidrocarburos, posdatando tales procesos. Lo mismo sucede en el caso del cuarzo autigénico. No se observa la relación de este cuarzo con la anhidrita, por lo que no es posible establecer su posición dentro de la secuencia paragenética.

**Muestra: C-3001 N-4 C-11 F-28**

Dolomía de grano medio a grueso con fantasmas de la textura aparentemente de packstone oolítico original. Algunas diferencias con las dos muestras anteriores son el aspecto mal clasificado de los granos y la presencia de microestilolitas de origen presumiblemente tectónico (dado el carácter perpendicular que guardan con la estratificación). Es notoria la ligera disminución en el contenido de ooides cuyos núcleos estuvieron constituidos por fragmentos de molusco. Es común observar la microporosidad intercrystalina y las microestilolitas rellenas por hidrocarburos.

**Muestra: C-3001 N-4 C-10 F-25**

Dolomía de grano medio con fantasmas de ooides, lo que permite reconocer la textura packstone oolítico original. Presenta fragmentos muy escasos de limolita cuarcítica y de wackestone arcilloso (cuyos aloquímicos no son reconocibles). Es frecuente la presencia de cuarzo detrítico del tamaño de las arenas finas (0.07 mm en promedio) y fantasmas muy escasos de fragmentos de equinodermo y posiblemente de molusco. Raramente se encuentra plagioclasa autigénica que posteriormente fue deformada y es frecuente el cuarzo autigénico. Algunos ooides sufrieron disolución selectiva de su núcleo, cuya porosidad resultante fue rellena por sílice microcristalino, que a su vez fue reemplazado parcial e incipientemente por la dolomita. En ocasiones estos poros están parcialmente rellenos por anhidrita. La muestra presenta abundantes suturas de arcilla paralelas a la estratificación (originados por carga litostática). Estos bordean los cristales de dolomita, por lo que se interpretan como posteriores a la dolomitización penetrativa que sufrieron estas rocas.

**Muestra: C-3001 N-4 C-9 F-21**

Dolomía de grano medio a grueso, con fantasmas de los ooides de la textura packstone oolítico original. También se observan fantasmas de fragmentos de molusco y de equinodermo. Contiene frecuentes lentes arcillosos deformados por compactación, los cuales están asociados ocasionalmente con las abundantes suturas de arcilla que posdatan la dolomitización y la autigénesis de cuarzo. Además se aprecian abundantes zonas arcillosas en las que la dolomita presenta una cristalinidad muy fina. Es evidente la impregnación de hidrocarburos en la microporosidad intercristalina de la dolomita. Se aprecian microestilolitas posteriores a la dolomitización, asociadas a las suturas de arcilla.

**Muestra: C-3001 N-4 C-8 F-20A**

Dolomía de grano medio a grueso en la que se aprecian fantasmas de la textura packstone oolítico original. Se observan asimismo frecuentes fantasmas de fragmentos de molusco y escasamente de equinodermo. Los granos envueltos son principalmente oolitas, pero también contiene algunas oncolitos de hasta 3.3 mm de diámetro. Hacia la cima de la muestra son abundantes las suturas de arcilla y presenta pequeñas zonas a manera de lentes arcillosos, los cuales son muy escasos en el resto de la muestra. En estas zonas arcillosas son frecuentes los granos de cuarzo detrítico. En algunas oolitas se refleja la compactación que sufrieron estos sedimentos. Se observa una escasa disolución selectiva posterior a la dolomitización y a la impregnación de hidrocarburos.

**Muestra: C-3001 N-4 C-6 F-15B**

Dolomía de grano medio a grueso con fantasmas de la textura packstone oolítico original; semejante a la muestra C-11, F-29. Los ooides están bien clasificados y ocasionalmente están en contacto unos con otros, mostrando evidencias de compactación; dentro del núcleo de estas se puede apreciar frecuentemente calcita que no fue dolomitizada. Estas muestras que no presentan mayor contenido de bioclastos.

**Muestra: C-3001 N-4 C-5 F-11**

Dolomía de grano grueso con relictos de la textura packstone oolítico original. Contiene escasos fantasmas de fragmentos de equinodermo y algunos de fragmentos de molusco. La dolomitización es de carácter penetrativo. Los ooides están bien clasificados y en algunas partes están en contacto unos con otros mostrando evidencias de una cierta compactación. Se aprecia disolución selectiva de los núcleos de los

ooides, los cuales posteriormente fueron rellenados por dolomita. La porosidad intercrystalina de la dolomita presenta impregnación de hidrocarburos. Además se observa una escasa disolución selectiva en los cristales de dolomita. La muestra presenta suturas de arcilla desarrolladas posteriormente a la dolomitización.

**- NUCLEO 5 (3180-3188): Kimmeridgiano**

**Muestra: C-3001 N-5 C-13**

Dolomía de grano fino a medio con fantasmas de la textura packstone oolítico original. Los fantasmas de los ooides muestran efectos de compactación. Presenta escasos fantasmas de fragmentos de equinodermo, y escasos radiolarios (?) piritizados; es frecuente la presencia de cuarzo autigénico, además de escasa plagioclasa autigénica. La dolomitización es penetrativa y se aprecia una diferencia entre la cristalinidad de la dolomita que reemplazó a la matriz y la dolomita que rellenó los espacios porosos que dejó la disolución selectiva de los núcleos de los ooides, lo que permite suponer que se trata al menos de dos eventos de dolomitización. Se observa de manera común suturas de arcilla y en la microporosidad intercrystalina de la dolomita hay arcillas, las cuales se encuentran parcialmente cloritizadas. Además hay escasas microestilolitas asociadas a estas suturas de arcilla. Se reconocieron dos impregnaciones de hidrocarburos, ligeros y pesados, en la microporosidad intercrystalina de la dolomita; estas impregnaciones fueron posteriores al desarrollo de las suturas de arcilla. En los núcleos de los ooides se aprecia calcita remanente que no fue dolomitizada, aunque de manera escasa. Finalmente, se pudo observar escasamente una segunda disolución selectiva, que afecta a la dolomita, tanto en la que reemplazó a la matriz como en la que rellena los núcleos de los ooides.

**Muestra: C-3001 N-5 C-11 F-34**

Dolomía de grano medio a grueso con fantasmas de la textura original (packstone oolítico). Los núcleos de los ooides sufrieron disolución selectiva, cuya porosidad fue rellena por dolomita. Presenta abundantes suturas de arcilla y microestilolitas asociadas con impregnación de hidrocarburos pesados. Se observan arcillas, parcialmente cloritizadas, en la microporosidad intercrystalina de la dolomita, las cuales se alteraron a un cemento posiblemente de caolinita. Todos estos procesos diagenéticos posdatan la dolomitización. Escasamente la muestra presenta una cementación de anhidrita posterior a la dolomitización, y anterior al desarrollo de las suturas de arcilla. Se aprecian zonas en las que debió haber abundante matriz originalmente, pero que fueron dolomitizadas. Se encontró una segunda disolución selectiva, que afecta a la dolomita en general.

**Muestra: C-3001 N-5 C-10 F-31**

Dolomía de grano fino a medio con fantasmas de la textura packstone oolítico original; con escasos oncolitos. Se aprecian frecuentemente fantasmas de fragmentos de equinodermo y de molusco de hasta 4-5 mm de largo; algunos de ellos formaron el núcleo de las oncolitos, además de gasterópodos. Los núcleos de los ooides y oncolitos fueron afectados por disolución selectiva, cuya porosidad fue posteriormente rellena por dolomita. Es posible encontrar calcita escasos remanentes que no fue dolomitizada en los núcleos de los ooides. Es frecuente la presencia de suturas de arcilla, algunas de las arcillas están alteradas posiblemente a illita (?), y se aprecia una incipiente cementación por caolinita. En la microporosidad intercrystalina de la dolomita se observa una impregnación de hidrocarburos, la cual posdata los procesos diagenéticos asociados con las arcillas mencionados arriba. Se observó una cementación por anhidrita muy escasa y autigénesis de

cuarzo, posteriores a la dolomitización, aunque no fue posible determinar la relación en la secuencia paragenética entre el cuarzo y la anhidrita. Finalmente, se pudo observar escasamente nuevamente una segunda disolución selectiva.

**Muestra: C-3001 N-5 C-9 F-29**

Dolomía de grano fino a medio con fantasmas de la textura original (packstone oolítico). Presenta frecuentes fantasmas de fragmentos de equinodermo, de pelecípodo, y algunos gasterópodos, formando el núcleo de los ooides; además se observan fantasmas de oncolitos. La disolución selectiva que sufrieron los núcleos de estos granos envueltos también afectó a los bioclastos que se encontraban en la matriz. Las arcillas presentes en la matriz fueron alteradas (posiblemente a illita?), además de que se observa un cemento de caolinita que precipitó en la microporosidad intercrystalina de la dolomita. Asimismo se encuentra arcilla remanente en los núcleos de los ooides. El resto de la porosidad intercrystalina de la dolomita fue rellena por cuarzo autigénico, e impregnada por hidrocarburos pesados (en ese orden). Se observa igualmente porosidad vugular por disolución.

**Muestra: C-3001 N-5 C-8 F-21**

Dolomía de grano fino a medio con fantasmas de la textura packstone oolítico original. Se observan abundantes fantasmas de fragmentos de molusco (algunos como núcleos de oolitas) y frecuentemente de equinodermo. Contiene abundante matriz arcillosa. Presenta abundantes suturas de arcilla. Es común la presencia de cuarzo autigénico.

**Muestra: C-3001 N-5 C-7 F-20B**

Dolomía de grano fino con relictos de la textura original de packstone oolítico. Presenta abundantes fantasmas de fragmentos de molusco y de equinodermo. Disminuye el contenido de arcillas. Se observa cementación por caolinita (?) producto presumiblemente de la alteración de la matriz arcillosa. Son comunes las microestilolitas impregnadas por hidrocarburos pesados; estas microestilolitas están asociadas posiblemente al desarrollo de las suturas de arcilla.

**Muestra: C-3001 N-5 C-6 F-17**

Dolomía de grano grueso a medio con fantasmas de la textura packstone oolítico original. Presenta fantasmas de fragmentos de molusco. Nuevamente son relativamente abundantes las suturas de arcilla, con microestilolitas asociadas impregnadas de hidrocarburos pesados. Es común la porosidad vugular por disolución. Y se aprecia la presencia de calcita remanente que no fue reemplazada durante la dolomitización. En la porosidad intercrystalina de la dolomita es común la impregnación de hidrocarburos ligeros.

**Muestra: C-3001 N-5 C-4 F-13**

Packstone de oncolitos dolomitizado. Presenta escasos *lumps* de hasta 3 mm de diámetro, y escasos bioclastos (moluscos y briozoarios). Los oncolitos tienen diámetros de 1 a 3.5 mm; los núcleos están constituidos por fragmentos de rudistas (y otros bivalvos), y fragmentos de equinodermo principalmente, además de fragmentos de coral, de algas verdes, briozoarios y otros bioclastos indeterminados. Ocasionalmente se encuentran bivalvos y gasterópodos completos formando el núcleo. La matriz fue dolomitizada pero se aprecia el carácter arcilloso de ésta. El material arcilloso fue alterado a clorita, y se

produjo un cemento de caolinita posterior a la dolomitización. Se observan frecuentes suturas de arcilla con microestilolitas asociadas. La dolomitización fue selectiva; los oncolitos no fueron dolomitizados; los núcleos solamente fueron afectados cuando estos granos sufrieron fracturamiento o disolución por presión debido a la compactación, permitiendo así el paso de los fluidos dolomitizantes. Posterior a la cementación por caolinita ocurrió un proceso de autigénesis de cuarzo, pero de manera muy escasa. Así como una incipiente disolución selectiva en la dolomita.

**Muestra: C-3001 N-5 C-4 F-11**

Packstone de oncolitos dolomitizado muy semejante al F-13 de C-4.

**Muestra: C-3001 N-5 C-3 F-9A**

Dolomía de grano grueso a medio con fantasmas de la textura grainstone oolítico original. Algunos núcleos están constituidos por cuarzo detrítico monocristalino y policristalino (posiblemente fragmentos de gneis). Se observan algunas zonas arcillosas, ocasionalmente asociadas con suturas de arcilla, en las que es frecuente la presencia de cuarzo detrítico, y microestilolitas con impregnación de hidrocarburos pesados. Frecuentemente los ooides muestran contactos suturados y cóncavo-convexos por compactación; además de haber sufrido disolución por presión, en algunos casos se aprecia una pérdida de hasta un 50% del grano. Sin embargo hay zonas en las que es más abundante la matriz (dolomitizada) y en la porosidad intercrystalina de la dolomita se observa caolinita como cemento. Se observa cuarzo autigénico posterior a la cementación por arcillas. Y una escasa disolución selectiva de la dolomita. Además de una escasa porosidad vugular por disolución.

**Muestra: C-3001 N-5 C-2 F-6**

Packstone de oncolitos dolomitizado muy semejante al F-13, C-4. De manera muy escasa se observa cuarzo detrítico en el núcleo de los oncolitos y aún en la matriz.

**POZO Cantarell-1065D**

**- NUCLEO 9 (2950-2959 m): Kimmeridgiano**

**Muestra: C-1065D N-9 C-8 F-46**

Dolomía de grano grueso originada de un grainstone oolítico, con pellets y cuarzo detrítico muy escaso, del tamaño de 0.069-0.125 mm (arenas muy finas a finas). Ocasionalmente, los ooides presentan un núcleo detrítico: feldespatos potásicos de 0.35-0.6 mm, los cuales han desarrollado un borde de sobrecrecimiento cristalino, así como cuarzo de 0.175-0.297 mm (arenas finas a medias). Los ooides tienen una granulometría bimodal, con tamaños de 0.15-0.8 mm, siendo más abundantes los últimos. La microestructura de estos granos es concéntrica. La dolomita es de grano grueso, con cristales de 0.125-0.625 mm. Se observa al menos dos impregnaciones de hidrocarburos, la primera de ellas por hidrocarburos ligeros, y la segunda por hidrocarburos pesados. La compactación fue moderada, no se aprecia deformación, fracturamiento o disgregación de granos. Con frecuencia, el núcleo de los ooides se encuentra parcialmente disuelto. Escasamente se observa algunas suturas de disolución rellenas por material arcilloso, con abundante cuarzo detrítico dentro de éste, posteriores a la dolomitización. Esta disolución por presión provocó en ciertos casos pérdida de un 10-15% de pérdida de material en los ooides. Una pequeña porción de tales arcillas ha sido recristalizada, dando lugar a una muy escasa cementación posiblemente por illita?. La porosidad es de un



---

---

10%, por disolución. La tinción de la muestra con alizarina roja y ferrocianuro de potasio revela que la dolomitización es total, sin embargo, no hay dolomita ferrosa.

**Muestra: C-1065D N-9 C-9 F-48**

Dolomía de grano grueso originada a partir de un grainstone de granos envueltos, con bioclastos y moluscos que presentan *sobres de micrita*, además de escaso cuarzo detrítico (arenas finas, 0.15 mm). El cuarzo detrítico es más abundante en las zonas arcillosas, y es de grano fino (0.02 mm-0.1 mm. limos medios a arenas muy finas). Algunas zonas probablemente más arcillosas, presentan suturas de disolución rellenas por arcillas diagenéticas (posiblemente illita). Ocasionalmente, el núcleo de algunas oolitas estaba constituido por un fragmento de equinodermo, el cual fue dolomitizado por un reemplazamiento mímico. Raramente el núcleo de los granos envueltos está conformado por detritos de cuarzo policristalino de hasta 1.175 mm (arenas muy gruesas). La compactación puede apreciarse en algunas cubiertas micríticas fracturadas y disgregadas. Presenta cementación por yeso posdatando la impregnación por hidrocarburos pesados en la porosidad intercrystalina de la dolomita. Una segunda impregnación de hidrocarburos pesados tuvo lugar subsiguientemente. La dolomita es de grano grueso (0.1-0.5 mm). Aparentemente algunas zonas contenían cierta cantidad de matriz o sedimentos arcillosos, en los cuales la dolomitización generó cristales más pequeños, con un alto contenido de impurezas. Se observan suturas de disolución impregnadas por hidrocarburos pesados, posdatando la dolomitización. La porosidad es menor a 5%, por disolución. La tinción de la muestra por alizarina roja y ferrocianuro de potasio revela que la dolomita que reemplazó los cementos calcílicos es no ferrosa, mientras que la dolomita que rellena la porosidad móldica del núcleo de los granos envueltos sí lo es. Esta dolomita ferrosa también se observa constituyendo parcialmente algunos de los cristales dolomíticos de la dolomita no ferrosa. La tinción revela asimismo dos tipos de calcita que posdatan todos los eventos de dolomitización. La primera calcita es ferrosa, mientras que la segunda no lo es; ambas fueron precipitadas escasamente en algunos vugulos.

**Muestra: C-1065D N-9 C-10 F-50**

Dolomía de grano grueso originada de un grainstone oolítico, muy semejante a la muestra del F-46 de la caja 8. La presencia de pellets es más abundante aquí, y los ooides más abundantes son de 0.25 mm de tamaño, mientras que los más escasos son de 0.5 mm. La diagénesis es muy semejante a la muestra referida. La porosidad es de 5%, por disolución, principalmente en el núcleo de los ooides. La tinción de la muestra con alizarina roja y ferrocianuro de potasio revela la presencia escasa, ocasionalmente con zoneamiento ferroso-no ferroso.

**Muestra: C-1065D N-9 C-10 F-51**

Dolomía de grano grueso, originada de un grainstone oolítico, con fantasmas de bioclastos con *sobres de micrita*. Los ooides están dolomitizados y micritizados. Algunos ooides tienen bioclastos como núcleo (fragmentos de molusco y de equinodermo), además de núcleos micríticos, clastos terrígenos (cuarzo policristalino), intraclastos (packstone oolítico de grano fino, etc. Cuando el núcleo es micrítico, la dolomitización fue sólo parcial, afectando a veces sólo el borde del grano. La muestra contiene zonas en las que la dolomita es sucia y de menor cristalinidad (0.025-0.125 mm), tales zonas posiblemente estuvieron constituidas por matriz micrítica. En general, la dolomita es de grano grueso, con cristales de 0.25-0.675 mm. Se aprecian fantasmas del cemento marino temprano de calcita isopaca. Es raro encontrar cubiertas

micríticas rotas o disgregadas. El cemento posterior (presumiblemente calcita en bloque), posdata la compactación. La tinción de esta muestra con alizarina roja y ferrocianuro de potasio reveló la presencia de una etapa más tardía de dolomitización (asociada a un fracturamiento) esta dolomita es ferrosa. La porosidad intercrystalina de la dolomita no ferrosa está escasamente impregnada por hidrocarburos pesados, además de abundante pirita; la pirita se encuentra igualmente bordeando los granos envueltos. El fracturamiento es muy escaso.

**Muestra: C-1065D N-9 C-11 F-52**

Dolomía de grano grueso originada de un grainstone oolítico, es muy semejante a la muestra del F-50, de la caja 10, debido a que los pellets son abundantes, y el tamaño de grano de los ooides es más pequeño en general. La compactación sin embargo fue más intensa. Las suturas de disolución son más abundantes, las cuales predatan la impregnación de hidrocarburos, pesados y ligeros, de la porosidad intercrystalina de la dolomita. Se aprecia cemento de caolinita, además de arcillas recristalizadas a illita (?). La porosidad vugular es abundante. La tinción de la muestra (por los mismos reactivos utilizados para las muestras anteriores) revela la presencia de la dolomita ferrosa; el último borde de crecimiento en algunos cristales de dolomita ferrosa es claramente no ferroso.

**Muestra: C-1065D N-9 C-12 F-53**

Dolomía de grano grueso muy semejante a la muestra del fragmento 52, de la caja 11. Presenta igualmente cementación tardía por calcita ferrosa y no ferrosa. La porosidad vugular es de un 10% al menos.

**POZO Cantarell-1025**

**- NUCLEO 4 (3443-3452 m): Kimmeridgiano**

**Muestra: C-1025 N-4 C-2**

Dolomía de grano fino (originada de un wackestone de bioclastos) con fantasmas de bioclastos (ocasionalmente se aprecian fragmentos de equinodermo recristalizados); con escaso cuarzo detrítico, y escaso cemento de yeso y arcillas. Los granos de cuarzo son del tamaño de limos gruesos (0.05 mm de diámetro en promedio), son angulosos. Los fantasmas de bioclastos probablemente sean de fragmentos de molusco, de acuerdo con la morfología que se aprecia aun. Al parecer la muestra fue bioturbada, y el relleno de esas estructuras fue igualmente reemplazado por dolomita, aunque esta es de grano medio a grueso, con tamaños de cristales de 0.075-0.275 mm. Se observan escasas suturas de disolución rellenas por arcillas diagenéticas (probablemente illita). Asimismo, en la porosidad intercrystalina de la dolomita se encuentra un cemento de arcillas, aparentemente se trata de caolinita. Este cemento pudo haberse originado a partir de la alteración del posible material arcilloso que contenían estos sedimentos. Presenta anhidrita como relleno de fracturas y de la porosidad, tanto vugular como por disolución de bioclastos. La dolomitización es penetrativa, afectando incluso a los fragmentos de equinodermo, los cuales conservan el carácter óptico que los caracteriza, a pesar de haber sufrido el reemplazamiento por dolomita.

**Muestra: C-1025 N-4 C-3 F-4**

Dolomía de grano fino (originada de un wackestone de bioclastos) muy semejante a la muestra de la Caja 2. Contiene abundantes fantasmas de fragmentos de equinodermo dolomitizados, en un reemplazamiento mímico. También contiene escaso cuarzo detrítico del tamaño de los limos gruesos. Presenta escasas suturas

de disolución, rellenas por arcillas diagenéticas, probablemente illita (?). Se encuentran igualmente los cementos de caolinita, yeso y la anhidrita relleno por disolución selectiva tardía.

**Muestra: C-1025 N-4 C-3 F-6B**

Dolomía de grano fino muy semejante a la muestra de la Caja 2. Sin embargo es mayor la presencia de fantasmas de bioclastos.

**Muestra: C-1025 N-4 C-11 F-23**

Dolomía de grano medio (originada de un packstone oolítico), con fantasmas de posibles bioclastos (posiblemente fragmentos de briozoario, de molusco y de equinodermo) dolomitizados, y cuarzo detrítico del tamaño de limos gruesos a arenas muy finas (0.04-0.09 mm), y ocasionalmente gravas de hasta 2.25 mm. Los fantasmas de oolitas son semicirculares y elipsoidales, con tamaños de 0.25 mm hasta 1.3 cm. Son frecuentes los oomoldes de tamaño pequeño. Es frecuente que los fantasmas de oolitas de menor tamaño tengan cuarzo policristalino y pseudopolicristalino detrítico, además de fragmentos de esquisto y feldespato potásico (microclina y ortoclasa), como núcleo. Algunos granos envueltos al parecer estaban constituidos por material arcilloso-arenoso, y este material se encuentra preservado, mientras que el núcleo fue disuelto; las arenas que se encuentran entre este componente arcilloso son minerales pesados (circones detríticos). Algunos granos de este tipo carecen de núcleo, y presentan cristales aislados de dolomita bien desarrollados. La presencia de anhidrita es muy escasa. Aparentemente, el tamaño de la cristalinidad de la dolomita estuvo en función del material original al cual reemplazó. La porosidad intercrystalina de la dolomita en algunos fantasmas de oolitas presenta impregnación de hidrocarburos pesados (color oscuro) y ligeros (color claro), el entrapamiento de estos últimos fue posterior. La porosidad es de 5-10%, por disolución (vugular), con vugulos de hasta 0.5 mm. Los poros no están interconectados en su mayoría, dado que la porosidad oomóldica no se impregnó con la resina teñida.

**Muestra: C-1025 N-4 C-12 F-26**

Dolomía de grano grueso originada a partir de un grainstone oolítico, con fantasmas de oolitas, peloides, cuarzo detrítico muy escaso, del tamaño de arena muy fina a arena gruesa (0.075-0.625 mm), y raramente feldespato potásico muy intemperizado de hasta 1.175 mm. Cuando está preservada, se aprecia que la microestructura de los ooides es de tipo concéntrica, y está constituida por varias capas. La compactación de los sedimentos es evidente y se refleja en el desplazamiento de las capas oolíticas y fracturamiento anteriores a la dolomitización, además de escasas microestilolitas, como producto de disolución por presión. Los sedimentos fueron cementados probablemente de manera temprana (posiblemente por calcita) dado que a pesar de la compactación, el empaque es relativamente abierto. Se aprecia una cementación de yeso anterior a la impregnación de hidrocarburos, así como disolución tardía selectiva de la dolomita. La porosidad es de 50%, y es por disolución, los poros están interconectados.

**POZO Taratunich-74**

**- NUCLEO 2-6: Kimmeridgiano**

**Muestra: T-74 N-2-6 P/I y P/S**

Dolomía de grano grueso, se aprecia la textura original de grainstone oolítico. Se observó yeso en proporciones muy escasas. La mayoría de los ooides no tiene estructura interna, sólo en algunos se preserva

la estructura concéntrica (las láminas más externas). La textura es heterogénea: principalmente se observan zonas con empaque cerrado, donde predominan los contactos alargados, además de puntuales y cóncavo-convexos. También hay zonas, menos comunes, que presentan empaque abierto, en el que debió haber precipitado cementante temprano. La granulometría de los fantasmas de oolitas tiene un promedio de 0.1-0.6 mm. El fracturamiento observado en esta muestra es mínimo, con fracturas muy escasas y delgadas, cuyo relleno sufrió también dolomitización.

**Muestra: T-74 N-2 F-32-4**

Dolomía de grano grueso, con textura relictas de grainstone oolítico. Se observa escasa materia orgánica, yeso y escasamente anhidrita. La mayoría de los ooides no tiene estructura interna, sólo en algunos se preserva la estructura concéntrica (las láminas más externas). La granulometría de los ooides es en promedio de 0.2 mm. El empaque de la muestra es cerrado, predominando los contactos tangenciales o alargados, además de puntuales y cóncavo-convexos. Se observa una escasa porosidad intercrystalina y por disolución. La muestra presenta poca compactación. El fracturamiento es mínimo, representado por fracturas muy delgadas afectadas por la dolomitización.

**Muestra: T-74 N-2 32-4**

Dolomía de grano grueso con una textura relictas de grainstone oolítico; presenta granos de cuarzo detrítico (raramente) y materia orgánica muy escasa. Se observan fragmentos de moluscos (raros). La presencia de yeso es común. La mayoría de los ooides no tiene estructura interna, sólo en algunos se preserva la estructura concéntrica (las láminas más externas). La granulometría de los ooides llega hasta 1.66 mm. El empaque es predominantemente cerrado, los contactos son alargados, puntuales, en ocasiones cóncavo-convexos y granos flotantes. La compactación es muy poca, lo que implicaría una cementación temprana.

**- NUCLEO 3: Kimmeridgiano**

**Muestra: T-74 N-3 F-8**

Dolomía de grano grueso. En algunas partes se preserva la textura original de grainstone oolítico. Se aprecian fragmentos de equinodermo (posiblemente) muy escasos y recristalizados. Asimismo se tiene la presencia de materia orgánica y anhidrita, la cual fue afectada por la dolomitización. La mayoría de los ooides no tiene estructura interna, sólo en algunos se preserva la estructura concéntrica (las láminas más externas). En esas porciones se aprecia un empaque cerrado, con contactos alargados y puntuales; prácticamente no hay deformación por compactación, lo que hablaría de una cementación temprana. La granulometría de los ooides llega hasta 1.4 mm. Se observa cierta porosidad en microestilolitas y por disolución. Hay algunas microestilolitas con relleno de materia orgánica oscura (posiblemente hidrocarburos pesados).

**Muestra: T-74 N-3 F-8**

Dolomía de grano grueso, se preserva la textura de grainstone oolítico. Presenta anhidrita frecuente y escaso yeso. Además de fragmentos de equinodermo (?) muy escasos. La mayoría de los ooides no tiene estructura interna, sólo en algunos se preserva una estructura concéntrica (las láminas más externas). La granulometría de los ooides llega hasta 1.7 mm. El empaque es menos cerrado, los contactos entre los ooides son alargados y puntuales. La muestra presenta poca compactación, sin embargo se observan algunos ooides rotos (*disrupted*). Presenta una escasa porosidad de tipo intercrystalina, en los poros hay impregnaciones de

hidrocarburos pesados, aunque no es común. También se aprecia porosidad por disolución. Son comunes las microestilolitas con impregnaciones de hidrocarburos pesados.

**Muestra: T-74 N-3 F-13-4**

Dolomía de grano grueso, se aprecia todavía la textura original de grainstone oolítico. Presenta anhidrita. Algunos ooides son de forma irregular (oncolitos?). La granulometría de los ooides llega hasta 2.25 mm (oncolitos?). El empaque es cerrado, los contactos son tangenciales principalmente, además de puntuales. Se aprecia poca porosidad intercrystalina con hidrocarburos ligeros y pesados. Además de porosidad por disolución.

**Muestra: TAR-74 N-3 F-13-4**

Dolomía de grano grueso, se aprecia la textura original del grainstone oolítico. La granulometría de los ooides llega hasta 1.25 mm. Algunas de las oolitas están rotas (*disrupted*). Se observa material terrígeno (limolítico), pero no son clastos. Al parecer este material está conformando el núcleo de algunos de los ooides de mayor tamaño (?). El empaque es cerrado, con contactos alargados y puntuales entre las oolitas. Hay porosidad interpartícula escasa. Algunas de las oolitas presentan sílice autigénico dentro ellas, lo que pudiera representar un proceso de disolución y una posterior precipitación del sílice.