

**ANÁLISIS SEDIMENTOLÓGICO E  
ICNOLÓGICO DE LA SECCIÓN BASAL DE LA  
FORMACIÓN PICÚN LEUFÚ (TITHONIANO-  
BERRIASIANO) EN SU LOCALIDAD TIPO,  
CUENCA NEUQUINA, ARGENTINA**



Universidad Nacional  
de **Río Negro**

*Autor:* **Martín Nazareno Parada**

*Director:* **Dr. Juan José Ponce**

*Codirectora:* **Dra. Nerina Canale**

General Roca, 2019

**ANÁLISIS SEDIMENTOLÓGICO E ICNOLÓGICO  
DE LA SECCIÓN BASAL DE LA FORMACIÓN  
PICÚN LEUFÚ (TITHONIANO-BERRIASIANO) EN  
SU LOCALIDAD TIPO, CUENCA NEUQUINA,  
ARGENTINA**

**Trabajo Final de Grado**

Licenciatura en Geología

Universidad Nacional de Río Negro

General Roca. 2019

*Autor:* **Martín Nazareno Parada**

*Director:* **Dr. Juan José Ponce**

*Codirectora:* **Dra. Nerina Canale**

ÍNDICE	3
AGRADECIMIENTOS	4
RESUMEN	7
ABSTRACT	8
1. INTRODUCCIÓN	9
2. MARCO GEOLÓGICO	11
3. MATERIALES Y MÉTODOS	14
4. SEDIMENTOLOGÍA E ICNOLOGÍA	15
4.1. Asociación de facies de <i>offshore</i>	15
4.2. Asociación de facies de <i>shoreface</i>	21
4.3. Asociación de facies de bahía	24
5. DISCUSIÓN	29
5.1. Paleogeografía de la cuenca: implicancias en el desarrollo de procesos mareales	29
5.2. Reconocimiento de niveles con Estructuras Sedimentarias Inducidas por Actividad Microbiana (ESIAM): implicancias en la interpretación paleoambiental	30
5.3. Modelo depositacional	33
6. CONCLUSIONES	37
BIBLIOGRAFÍA	39

## **AGRADECIMIENTOS**

Por darme la confianza y permitirme desarrollar este trabajo, quiero agradecer en primer lugar a mis directores los Dres. Juan José Ponce y Nerina Canale, quienes no solo me guiaron y acompañaron durante la elaboración de esta tesis, sino también me transmitieron su pasión por la geología y en particular por la sedimentología e icnología.

A la Universidad Nacional de Río Negro, que prometo honrar y defender ya que me permitió ser uno de los primeros universitarios de mi familia.

A Don Seguel y su hijo Pablo, y a Tina y Lalo Painemilla. Maravillosas personas que tuve la suerte de conocer y a quienes les estoy enormemente agradecido por el afecto y por haberme abierto las puertas de su hogar durante las campañas geológicas.

A Juan Ponce, Nerina Canale, Marcelo Merlo, Débora Campetella, Leonel Saavedra, Maxi Paz, Claudio García y Fabio Díaz, gracias por su predisposición al acompañarme durante las tareas de campo.

También quisiera expresar un enorme agradecimiento a Osvaldo Carbone, Darío Orts y Claudia Zaffarana por sus enriquecedoras discusiones sobre los procesos tectónicos que afectaron a la cuenca Neuquina y por las recomendaciones en cuanto a la escritura de este trabajo.

Al Laboratorio de Microscopia y Difractometría de Rayos X del Instituto de Investigación en Paleobiología y Geología (UNRN-CONICET) por permitirme usar el microscopio electrónico de barrido y el microscopio óptico, equipos fundamentales para el desarrollo de este trabajo.

Al grupo de Nodocentes de la oficina de alumnos de la Universidad Nacional de Río Negro. Gracias Leandro, Lucía, Samuel, Victoria, Agustina y Guille, por la buena onda y predisposición de siempre.

También quiero agradecer a los profesores que tuve durante el cursado de la carrera, a quienes siempre tengo muy presentes, aunque algunos ya no estén en esta universidad, por la calidad humana, profesional y la humildad hacia la enseñanza de cada uno de ellos, por transmitir la vocación, la pasión y la predisposición: gracias Silvio Casadío, Pablo González, Cecilia Cabana, Maisa Tunik, Josefina Pons, Alberto Caselli, Víctor García, Fernando Archuby, Marien Beguelin, Raúl Giacosa, María Diez, Juan Ponce, Noelia Carmona, Darío Orts, Claudia Zaffarana, Marianella Talevi, Marcelo Krause y Florencia Bechis.

A Juan y Noelia, a quienes admiro y les tengo un profundo respeto y cariño. Gracias a ambos por ser de esos amigos de momentos felices y momentos difíciles, por el afecto y el respeto, por tenerme siempre presente, por tantas palabras de aliento y consejos, y por estar siempre dispuestos a ayudarme.

También quiero brindar un profundo agradecimiento al Dr. Silvio Casadío, por quien siento un gran aprecio y admiración por su calidad humana y profesional. Gracias Silvio por haber sido tan considerado, bondadoso y generoso conmigo desde que llegué a Roca.

A mis amigos de Catriel, Marcos, Mariela y Maxi por el afecto y el apoyo incondicional de siempre y por estar presentes durante todo este proceso, aún en la distancia.

A mis amigos de Roca, Nerina, Lucho, China, Javi, Leandro, Lechu, Romi, Mariana, Lucia, Yami, Ale, Maxi, Stefi y Fabio, por tantos momentos compartidos de charlas, veranos, juntadas y viajes.

A Juanita y Mijal quienes me han apoyado y alentado constantemente para ser una mejor persona desde el principio de esta carrera, gracias por su hermosa amistad.

A Débora, por su compañía, su apoyo incesante y su paciencia durante todo este tiempo. Gracias también a su familia por abrirme las puertas de su hogar y aceptarme como un hijo más.

A mi familia, a mis papás Néstor y Alicia, a mis hermanos Analía, Sara, Facundo y Fernanda por demostrarme todo el tiempo el sentirse orgullosos de mí, por acompañarme y apoyarme siempre.

Por ultimo quiero agradecer a mi mejor amigo Toby, por su incondicional amistad y compañía.

## RESUMEN

El análisis sedimentológico, icnológico y geobiológico de los depósitos que conforman la sección basal de la Formación Picún Leufú, permitió reconocer dieciocho facies sedimentarias, agrupadas en tres asociaciones de facies correspondientes a depósitos de *offshore*, *shoreface* y bahía. El patrón de apilamiento que muestran las asociaciones de facies conforman un arreglo progradante en su sección basal y media, y uno retrogradante en su tramo cuspidal. Se pudo reconocer la presencia de varios niveles con tapetes microbiales que muestran evidencias de exposición subaérea (*e.g.* grietas de desecación, edafización y rizolitos) en depósitos de planicies fangosas y mixtas de la asociación de facies de bahía. La presencia de una icnofacies sustrato controlada en el tramo cuspidal de la sección analizada sugiere la acción combinada de procesos erosivos y de diagénesis temprana de carbonatos originados durante la transgresión. Estos estudios permiten refinar el modelo depositacional de esta unidad, el cual corresponde a un sistema de rampa con depósitos de *offshore*, *shoreface* y bahía. Estos resultados permiten mejorar el entendimiento de la distribución de facies, el patrón de apilamiento y el modelo depositacional de una de las unidades que conforma el sistema petrolero más importante de la cuenca Neuquina.

## **ABSTRACT**

The sedimentological, ichnological and geobiological analyses of the deposits that integrate the basal section of the Picún Leufú Formation, allowed to recognize eighteen sedimentary facies, grouped in three facies associations related to offshore, shoreface and bay deposits. The stacking pattern shown by the three facies associations indicates a prograding arrangement in its basal and middle section, and a retrograding arrangement in the cuspidal section. In addition, several levels with microbial mats show evidence of subaerial exposure (*e.g.* mud cracks, edaphization and rhizolites) and they are interpreted as formed in muddy and mixed plains bay deposits. The presence of a substrate-controlled ichnofacies at the top of the analyzed section suggests the combined action of erosive processes and early diagenesis of carbonates that occurred during transgression. These studies allowed refining the depositional model for this unit, which was formed in a ramp system with offshore, shoreface and bay deposits. In addition, these results help to understand and refine the sedimentary facies distribution, stacking pattern and depositional model of one of the most important unconventional oil systems of the Neuquén basin.



## 1. INTRODUCCIÓN

Muchas de las sucesiones sedimentarias preservadas en el registro estratigráfico corresponden a depósitos que muestran una mezcla entre calizas, areniscas y fangolitas. El cambio entre una depositación química de carbonatos a una dominada por rocas silicoclásticas resulta de la acción individual o en conjunto de controles tectónicos, climáticos y de fluctuaciones del nivel del mar (Rankey, 1997; Nichols, 2009). Estas sucesiones, denominadas mixtas, son frecuentes en una gran variedad de ambientes marginales con buen desarrollo de zona fótica (Pratt y James, 1992; James y Kendall, 1992; Nichols, 2009). Si bien los controles alogénicos resultan claves para comprender la distribución litológica y de facies sedimentarias de estos paleoambientes, los estudios sedimentológicos e icnológicos resultan clave para lograr el refinamiento de las interpretaciones paleoambientales. En los últimos años se han realizado numerosas contribuciones que documentan y caracterizan ambientes de bahía, permitiendo diferenciarlos del relleno sedimentario de un estuario (*e.g.* MacEachern y Gingras, 2007; Gingras *et al.*, 1998, 2007; MacEachern *et al.*, 1998, 1999, 2007a-b; Pemberton *et al.*, 2001; Spila *et al.*, 2005; Buatois *et al.*, 2007, 2011; Desjardin *et al.*, 2010; Weleschuk y Dashtgard, 2019).

Los depósitos de la Formación Picún Leufú representan un excelente ejemplo de sistemas con sedimentación mixta, que han sido ampliamente analizados desde una perspectiva regional y de detalle. Spalletti *et al.* (2000) realizaron un estudio regional de la unidad, concluyendo que el intervalo Tithoniano Medio-Berriasiano en el sur de la cuenca Neuquina se desarrolló sobre una rampa marina somera de suave pendiente, con facies que reflejan un entorno parcialmente restringido con procesos de oleaje y marea, de moderada a

baja energía, que evoluciona a facies típicas de laguna restringida de baja energía. Armella *et al.* (2007) realizaron un estudio detallado de los afloramientos de la Fm. Picún Leufú en su localidad tipo en el cual sugieren que los depósitos se acumularon sobre el borde de una extensa plataforma dominada por marea, reconociendo una plataforma interna representada por facies de barras progradantes, disectadas por canales mareales y facies de *lagoon*. Por otra parte, Leanza *et al.* (2011) reconocieron en esta unidad un contenido faunístico con predominio de trigónidos asociados con frecuencia a equinodermos, corales, vermes y escasos amonites, que junto al contenido litológico, denotan un ambiente marino bentónico de aguas templadas, poco profundas, oxigenadas y de baja energía. Zeller *et al.* (2015) realizaron un análisis estratigráfico secuencial detallado de estos depósitos, reconociendo ciclos progradantes y hem Ciclos retrogradantes con proporciones crecientes de carbonatos, ambos de escala métrica. Estos autores sugieren que la parte superior de los ciclos regresivos y el límite de la secuencia están representados por un horizonte de exposición bien desarrollado sobre los depósitos de carbonato puro que se convierte en un *hardground* poblado por esponjas silíceas.

En esta contribución, las observaciones sedimentológicas, icnológicas y geobiológicas relevadas en la sección basal de la Fm. Picún Leufú en su localidad tipo, permitieron realizar una revisión sedimentológica, icnológica y geobiológica de esta unidad, a fin de aportar información que permita refinar el modelo depositacional de este intervalo estratigráfico.

## 2. MARCO GEOLÓGICO

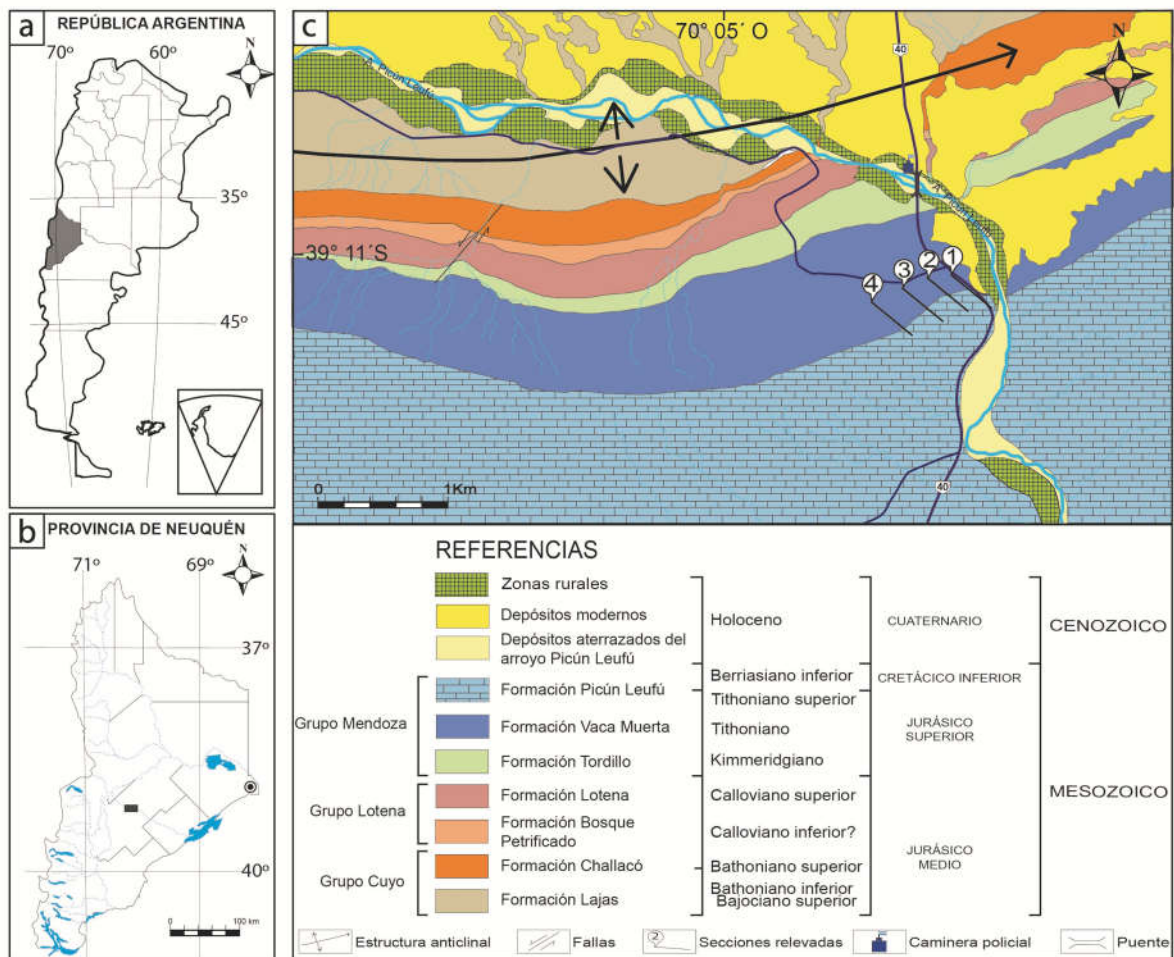
La cuenca Neuquina se localiza en el centro-oeste de la República Argentina, abarcando un área mayor a los 200.000 km<sup>2</sup> (Yrigoyen, 1991) y se compone de una columna sedimentaria de más de 6.000 metros de espesor que incluye rocas marinas y continentales con edades desde Triásico Superior a Neógeno (Howell *et al.*, 2005; Arregui *et al.*, 2011). Esta cuenca fue definida por Mpodozis y Ramos (1989) como una cuenca de retroarco multiepisódica, desarrollada sobre corteza continental en el margen oeste de la placa de América del Sur debido a procesos termo-tectónicos ocurridos a fines del Triásico, asociados con el desmembramiento de Pangea (Ramos, 1989). Los depósitos de la cuenca Neuquina fueron acumulados en tres etapas principales. Durante la primera etapa (Triásico Tardío-Jurásico Temprano), los procesos tectónicos extensionales posibilitaron el desarrollo de un sistema de hemigrábenes de rumbo noroeste-sureste ubicado detrás de un arco magmático estacionario (Gulisano, 1981; Gulisano *et al.*, 1984; Uliana y Biddle, 1988; Mpodozis y Ramos, 1989; Uliana *et al.*, 1989; Franzese y Spalletti, 2001; Cristallini *et al.*, 2009; Pángaro *et al.*, 2009). Durante esta etapa se desarrollaron sucesiones de sin-*rift* que contienen eventos volcánicos y depósitos epiclásticos pertenecientes al Grupo Precuyo (Gulisano *et al.*, 1984). El inicio de la segunda etapa (Jurásico Temprano-Jurásico Tardío), se ve reflejado por el restablecimiento de un sistema de subducción en el sector occidental de Gondwana, desarrollando el primer arco magmático del Mesozoico y la formación de cuencas de intraarco y retroarco (Franzese *et al.*, 2003; Howell *et al.*, 2005). El relleno sedimentario de esta etapa estuvo influenciado por la topografía heredada de los sistemas de *rift* previos, y se compone por depósitos mayormente marinos con un gran aporte de material de origen clástico, que da lugar a la acumulación de las sedimentitas que integran

los grupos Cuyo y Lotena (Bracaccini, 1970; Gulisano, 1981; Carbone, 1988; Burgess *et al.*, 2000; Freije *et al.*, 2002). La tercera etapa corresponde a la culminación de la sedimentación ocurrida durante el Mesozoico (Jurásico Tardío- Cretácico Tardío), que da paso a una sucesión marina y continental correspondiente a los grupos Mendoza, Rayoso y Neuquén (Legarreta y Uliana, 1991, 1999; Vergani *et al.*, 1995). A finales del Mesozoico (Cenomaniano), un cambio en el régimen de subducción en el margen continental activo produjo el levantamiento andino generando la desconexión final de la cuenca con el océano paleo-Pacífico (Veiga *et al.* 2005), y una progresiva transformación de una cuenca de retroarco hacia una de antepaís (Ramos, 1999; Ramos y Folguera, 2005; Spalletti *et al.*, 2005; Tunik *et al.*, 2010).

Dentro de este contexto evolutivo, el área de estudio se ubica en el Anticlinal de Picún Leufú (Fig. 1), ámbito denominado subcuenca de Picún Leufú (Hogg, 1993), o depocentro Picún Leufú (Ramos *et al.*, 2011), que forma parte de la región morfoestructural denominada Dorsal de Huincul (ver Howell *et al.*, 2005; Arregui *et al.*, 2011). En este sector, el registro sedimentario se encuentra excelentemente expuesto y abarca unidades que representan a los grupos Cuyo, Lotena y Mendoza (Fig. 1). Aquí, el Gr. Mendoza (Jurásico Superior-Cretácico Inferior), se encuentra conformado por las formaciones Vaca Muerta y Picún Leufú (Weaver, 1931; Leanza, 1973), unidades que constituyen en la actualidad el sistema petrolero más importante de la cuenca Neuquina.

En el área de estudio, el Gr. Mendoza aflora representado por una sucesión sedimentaria que comienza con depósitos de conglomerados, areniscas y pelitas de la Formación Tordillo, correspondientes a depósitos eólicos, fluviales y lacustres que alcanzan los 65 metros de espesor (Zavala y Freije, 2002). Suprayacen a estos depósitos de manera concordante más de 350 metros de pelitas negras de la Formación Vaca Muerta (Tithoniano

inferior, tardío y medio) (Zavala, 2002), evidenciando así el restablecimiento de la conexión marina con el paleo-Pacífico (Armella *et al.*, 2008). Posteriormente, en el Tithoniano medio a Berriasiano, las condiciones de sedimentación se habrían modificado, produciendo la acumulación de facies mixtas de la Fm. Picún Leufú (Leanza *et al.*, 1978; Armella *et al.*, 2007, 2008), siendo interpretadas como el resultado de la depositación en un régimen de mar alto (*highstand systems tract*) por Leanza y Hugo (1997), Armella *et al.* (1999, 2007), Spalletti *et al.* (2000) y Leanza *et al.* (2011).



**Figura 1.** a. Mapa de la República Argentina con la ubicación de la Provincia de Neuquén sombreada. b. Mapa de la Provincia de Neuquén con la ubicación del área de estudio en recuadro negro. c. Mapa geológico del sector relevado con la ubicación de las secciones de detalle medidas y referencias.

### **3. MATERIALES Y MÉTODOS**

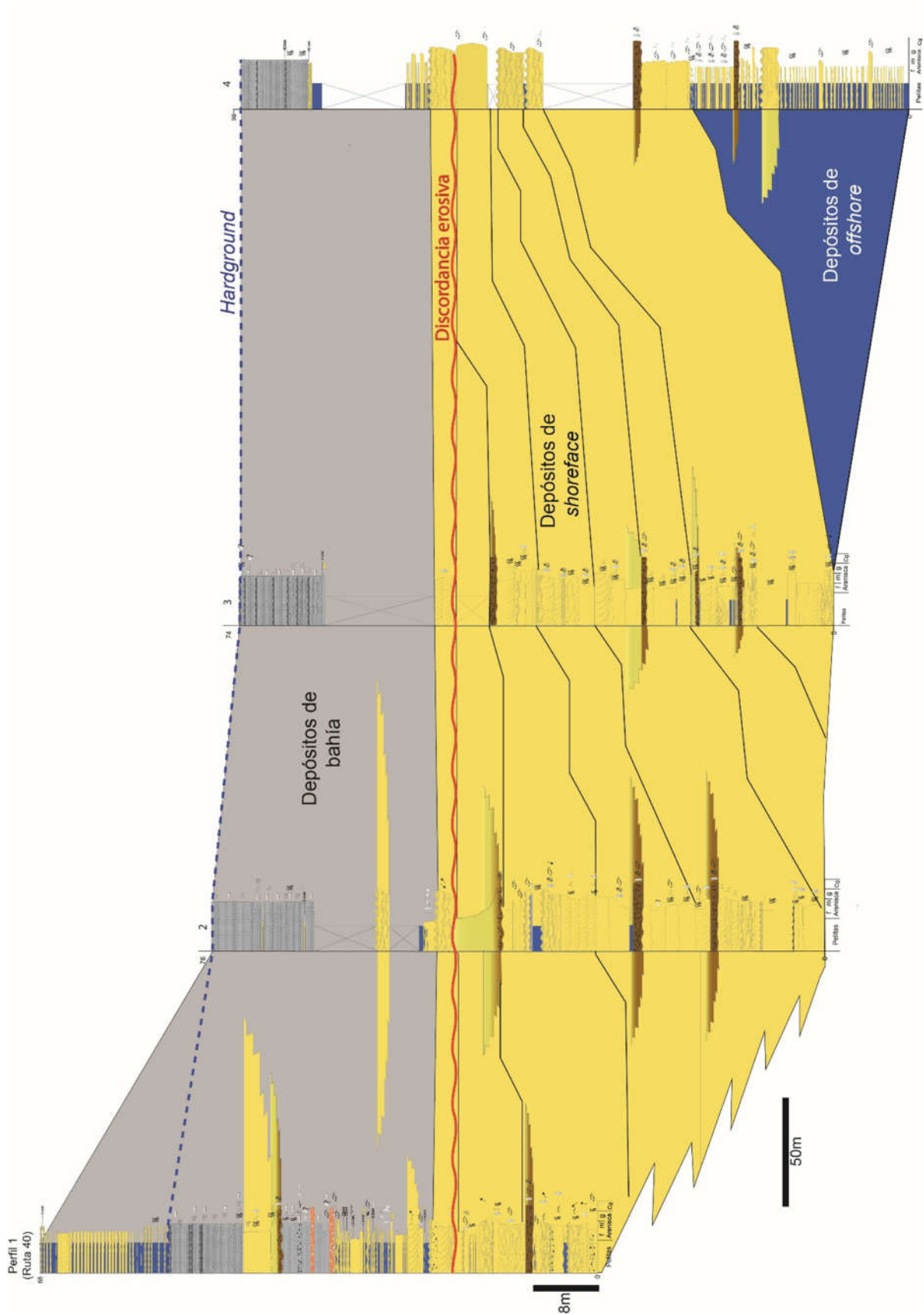
El presente trabajo comprende el análisis sedimentológico, icnológico y geobiológico de la sección basal de la Formación Picún Leufú a partir del relevamiento de cuatro perfiles sedimentológicos de detalle y de la realización del panel de correlación correspondiente (Figs. 1 y 2). Las secciones fueron medidas utilizando báculo de Jacob y su estudio comprendió la descripción detallada de las principales características primarias de los cuerpos de roca como litología, estructuras sedimentarias, geometría, vectores de paleocorrientes y contenido fosilífero e icnológico. En algunos niveles se recolectaron muestras orientadas para realizar estudios petrológicos, poniendo especial énfasis en aquellos niveles con evidencias de estructuras sedimentarias inducidas por actividad microbiana (ESIAM). Los trabajos de campo fueron complementados con estudios y análisis de laboratorio y gabinete consistentes en la observación de secciones delgadas bajo microscopio óptico marca ZEISS modelo AXIO Imager A2m, y con la observación de muestras de mano bajo microscopio electrónico de barrido (MEB) marca ZEISS modelo EVO 15. La descripción y análisis de facies siliciclásticas se basaron en la clasificación de Wentworth (1922), mientras que para la descripción de rocas carbonáticas se tuvo en cuenta la clasificación de Dunham (1962), modificada por Embry y Klovan (1971), Flögel (1982) y Lokier y Junaibi (2016).

#### 4. SEDIMENTOLOGÍA E ICNOLOGÍA

La sucesión sedimentaria correspondiente a la sección basal de la Formación Picún Leufú en el flanco sur del anticlinal homónimo se encuentra a 40 km al sur de la localidad de Zapala (provincia de Neuquén) y está caracterizada por sedimentos mayormente siliciclásticos de granulometría fina a media, que alternan con niveles carbonáticos que alcanzan un espesor promedio de 100 metros. La medición de cuatro secciones de detalle en el área y la confección del panel de correlación correspondiente permitieron el reconocimiento de dieciocho facies para estos depósitos, a partir de las cuales se interpretó el modelo paleoambiental aquí propuesto (Figs. 1-3. Tabla 1). Las facies reconocidas fueron agrupadas en tres asociaciones de facies: *offshore*, *shoreface* y bahía, que son descritas e interpretadas a continuación.

##### 4.1. Asociación de facies de *offshore*

Esta asociación de facies se compone por una alternancia rítmica y recurrente de capas centimétricas integradas por fangolitas con laminación paralela (**Cl**) o masivas (**Cm**) y areniscas finas con laminación paralela (**Sfml**) o masivas (**Sfmm**), dispuestas en cuerpos de geometrías predominantemente tabulares que conforman potentes sucesiones de heterolitas fangosas (Fig. 4). Estos niveles intercalan cuerpos de areniscas medias y excepcionalmente gruesas que muestran bases erosivas y espesores de hasta 50 centímetros. Internamente las areniscas medias a gruesas son masivas (**Sfmm**) y presentan abundante concentración de fragmentados de bivalvos (**Rm-Rct**). En algunos niveles la bioturbación oblitera por completo las estructuras físicas primarias; presentando en otros casos baja diversidad y abundancia en bioturbación, sin poder diferenciarse icnotaxones.



**Figura 2.** Panel de correlación de los perfiles relevados en la sección basal de la formación Picún Leufú, área del anticlinal Picún Leufú. Ver referencias en Figura 3.



Facies	Litología	Estructuras sedimentarias	Trazas fósiles	Geometría	Origen	Observaciones	Ocurrencia	
							Bahía	Shoreface Offshore
Cm	Fangolitas	Masivas	Bioturbación indiferenciada	Tabular	Floculación desde una pluma hipopícnica	MO ESIAM		
Cl	Fangolitas	Laminación Paralela	<i>Planolites</i>	Tabular	Decantación desde una pluma hipopícnica	ESIAM		
Sfw	Areniscas finas	Óndulas simétricas	---	Tabular	Retrabajo por acción de oleaje	---		
Sfr	Areniscas finas	Óndulas asimétricas	---	Tabular	Depositadas a partir de flujos tractivos unidireccionales	---		
Sfmm	Areniscas finas a medias	Masivas	Rizolitos	Tabular	Depositadas a partir de flujos tractivos unidireccionales Masivas por bioturbación	ESIAM		
			<i>Thalassinoides</i> Bioturbación indiferenciada	Lenticular Cuneiforme	Bivalvos en posición de vida			
Sfml	Areniscas finas a medias	Laminación paralela	<i>Planolites</i> Bioturbación indiferenciada	Tabular	Depositadas a partir de flujos tractivos unidireccionales	---		
Smct	Areniscas medias	Estratificación entrecruzada tangencial	<i>Skolithos</i> <i>Ophiomorpha</i>	Tabular	Migración de óndulas de crestas sinuosas a partir de un flujo unidireccional	En ocasiones son de gran escala		
Smt	Areniscas medias	Estratificación entrecruzada en artesa	---	Tabular Cuneiforme	Migración de óndulas de crestas sinuosas a partir de un flujo unidireccional	En ocasiones son de gran escala		
Scs	Areniscas medias	Estratificación entrecruzada <i>Swalley</i>	---	Tabular	Acción de tormentas	---		
Smch	Areniscas medias	Estratificación entrecruzada tipo <i>hummocky</i>	Bioturbación indiferenciada	Tabular	Acción de tormentas	MO Fragmentos de conchillas		
Smgw	Areniscas gruesas	Óndulas simétricas	---	Tabular	Retrabajo por acción de oleaje	---		
CGm	Conglomerados	Masivos	---	Tabular	Depositados por flujos unidireccionales de alto régimen de flujo	---		

MO: Materia Orgánica  
ESIAM: Estructuras Sedimentarias Inducidas por Actividad Microbiana

Muy frecuente  
 Frecuente  
 Ausente

**Tabla 1.** Facies sedimentarias reconocidas, contenido icnológico y ambientes depositacionales en los que se las encuentra.

Facies	Litología	Estructuras sedimentarias	Trazas fósiles	Geometría	Origen	Observaciones	Ocurrencia	
							Bahía	Shoreface Offshore
Mc	<i>Mudstones</i> cristalinos	Masivos	---	Tabular	Precipitación de carbonatos en condiciones de baja energía	<i>Hardground</i> con equinodermos y esponjas silíceas		
Gm	<i>Grainstones</i> oolíticos	Masivos	Rizolitos	Tabular	Precipitación de carbonatos en aguas agitadas	Abundantes <i>pellets</i> fecales Grietas de desecación		
GI	<i>Grainstones</i> oolíticos	Laminación paralela	Rizolitos	Tabular	Precipitación de carbonatos en aguas agitadas Reordenamiento por corrientes unidireccionales	Abundantes <i>pellets</i> fecales Grietas de desecación		
Gct	<i>Grainstones</i> oolíticos	Estratificación entrecruzada tangencial	<i>Thalassinoides</i> <i>Ophiomorpha</i>	Tabular	Precipitación de carbonatos en aguas agitadas Migración de óndulas de crestas sinuosas	Abundantes <i>pellets</i> fecales Ostras y poliquetos en posición de vida		
Rm	<i>Rudstones</i> bioclásticos	Masivos	---	Tabular	Depositados por flujos unidireccionales de alto régimen de flujo	---		
Rct	<i>Rudstones</i> bioclásticos	Estratificación entrecruzada tangencial	---	Tabular	Migración de óndulas de crestas sinuosas	---		

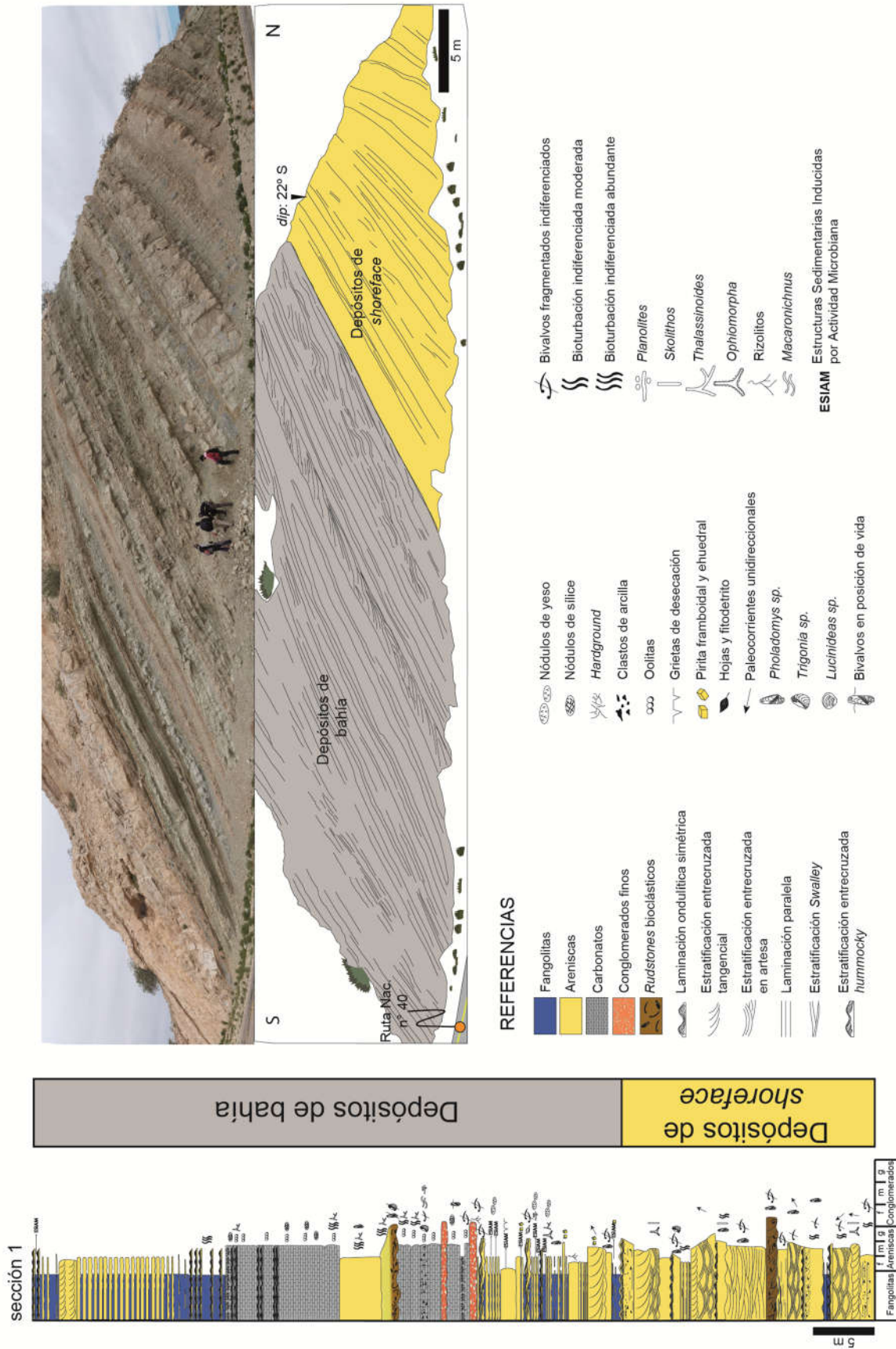
MO: Materia Orgánica

ESIAM: Estructuras Sedimentarias Inducidas por Actividad Microbiana

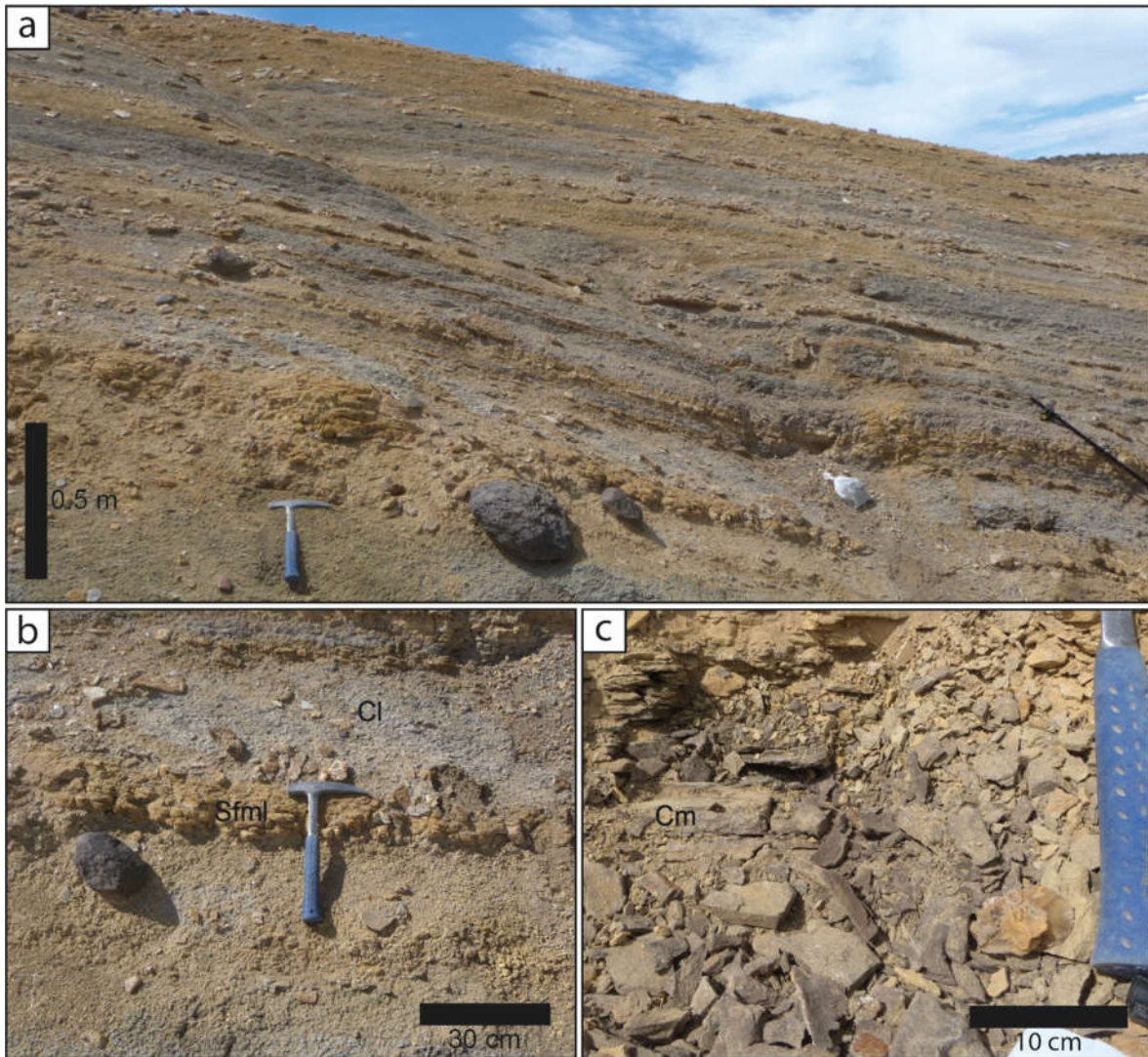
Muy frecuente  
 Frecuente  
 Ausente

**Tabla 1.** Continuación. Facies sedimentarias reconocidas, contenido icnológico y ambientes deposicionales en los que se las encuentra.

# Perfil Ruta Nacional nº40



**Figura 3.** Perfil esquemático con interpretación de los paleoambientes, foto panorámica y redibujo de la sección basal de la Formación Picún Leufú relevado a la vera de la Ruta Nacional Nº40 en la zona del anticlinal homónimo. Ver ubicación de sección 1 en la Figura 1.



**Figura 4.** Asociación de facies de *offshore*. **a.** Vista panorámica de depósitos heterolíticos. **b.** Vista en sección de fangolitas laminadas (Cl) con un nivel de tormenta integrado por areniscas finas a medias con laminación paralela (Sfml) o tipo *Swalley* (Smcs). **c.** Vista en sección de niveles de fangolitas masivas (Cm).

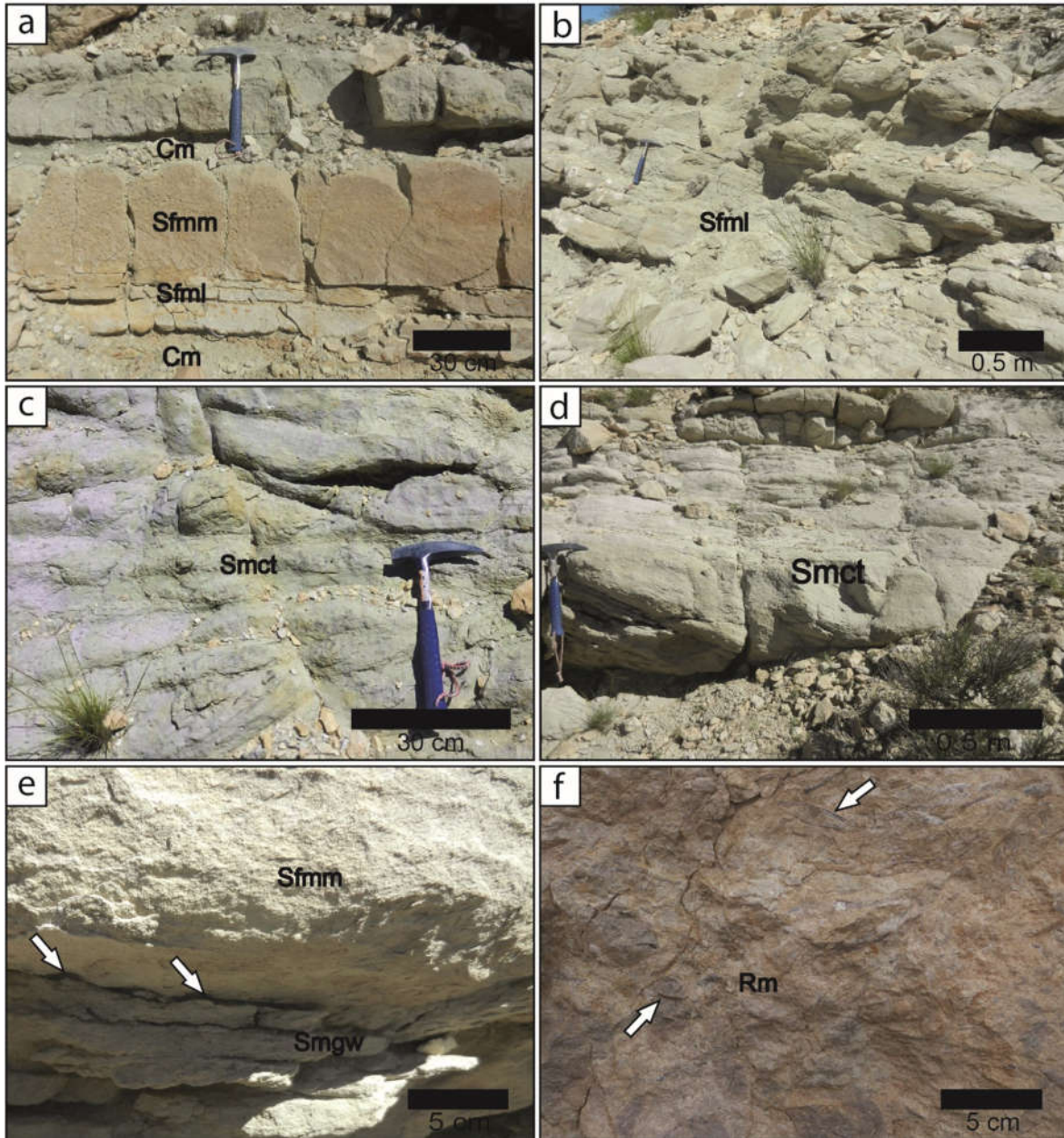
**Interpretación.** Esta asociación de facies corresponde a sedimentos depositados entre el nivel de base de olas de buen tiempo y el nivel de olas de tormenta, donde predominan los procesos de decantación por sobre los de tracción, situación que se sustenta en la presencia dominante de heterolitas fangosas, las que se encuentran intensamente bioturbadas en intervalos de depositación normal del sistema. Bajo estas condiciones se habría favorecido el establecimiento de organismos depositívoros que retrabajaron los sedimentos,

obliterando por completo las estructuras físicas primarias. Los cuerpos de arena media y gruesa masivos con abundantes fragmentos de bioclastos se vinculan a eventos de tormenta asociados a la sedimentación normal del *offshore*.

#### **4.2. Asociación de facies de *shoreface***

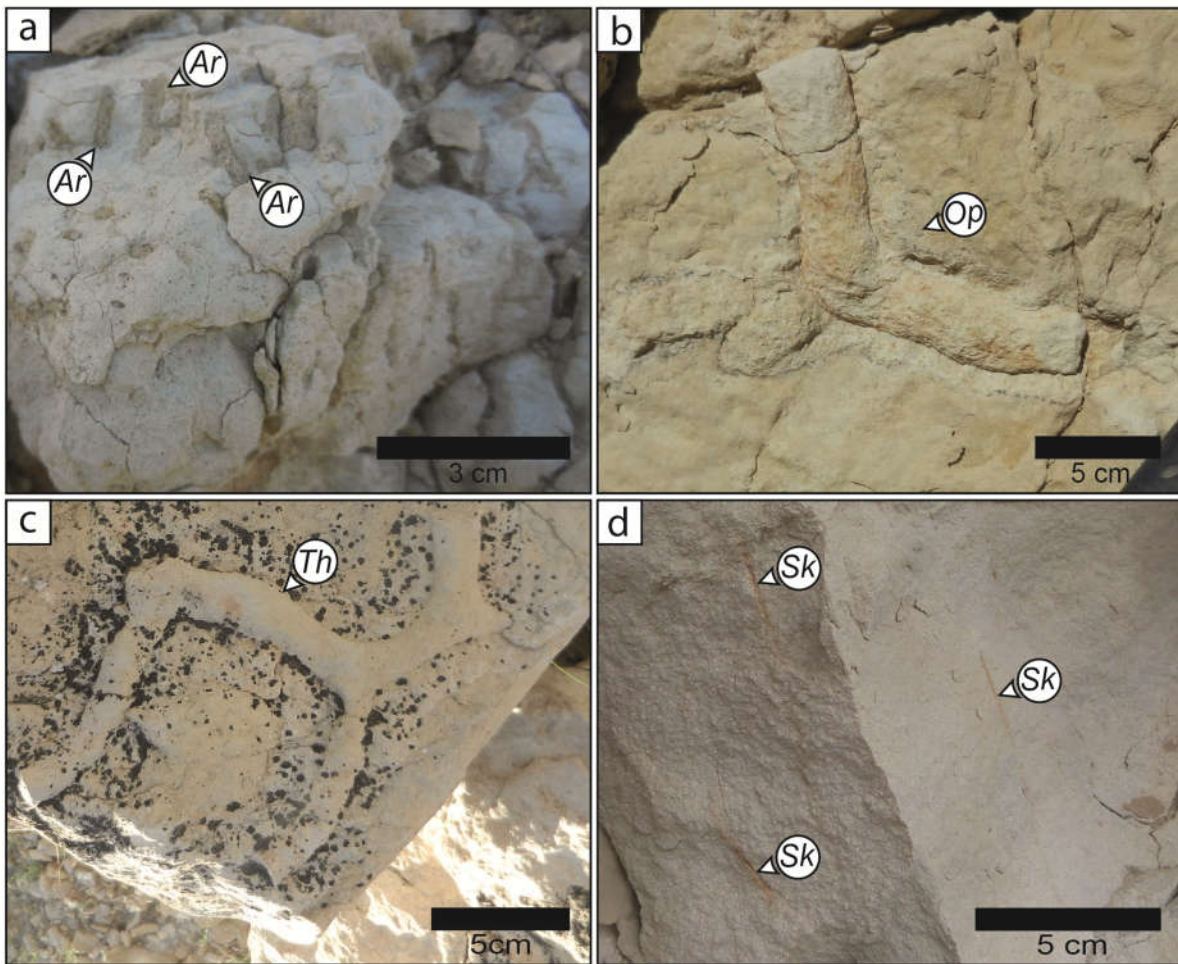
Esta asociación de facies está representada por niveles de fangolitas, areniscas finas, medias y gruesas y *rudstones* bioclásticos. Las facies de fangolitas se presentan en delgados cuerpos tabulares e internamente masivos (**Cm**) que se intercalan con niveles centimétricos de areniscas finas masivas con bases erosivas, conformando así sucesiones rítmicas dominadas por areniscas que, en ocasiones, superan los dos metros de espesor (Fig. 5a). Las areniscas finas a gruesas se disponen en cuerpos de geometría tabular y cuneiforme de escala métrica. Internamente estos cuerpos contienen estratificación entrecruzada en artesa (**Smt**), tangencial (**Smct**) y de tipo *Swalley* (**Smch**), lámina paralela (**Sfml**), óndulas simétricas (**Sfw**) o pueden presentarse masivas (**Sfmm**) (Fig. 5b-e). En toda la secuencia arenosa es considerable el contenido de clastos de fango y bioclastos de trigonias, *Pholadomya* y *Lucinideas* enteras o fragmentadas. Se observó además *Pholadomya* sp. en posición de vida. Las facies de *rudstones* bioclásticos son de escala métrica e internamente se presentan masivos (**Rm**) o con estratificación entrecruzada tangencial de gran escala (**Rct**) (Fig. 5f). Además de los organismos esqueléticos, se observó matriz-cemento micrítico y, en algunos casos, una matriz fango-arenosa con cemento carbonático. Estos paquetes pasan transicionalmente a areniscas medias masivas (**Sfmm**). En lo que respecta al contenido icnológico, se encontraron estructuras interpretadas como producidas por organismos suspensívoros y/o depositívoros como *Arenicolites* (Fig. 6a), *Ophiomorpha*

(Fig. 6b), *Thalassinoides* (Fig. 6c) y *Skolithos* (Fig. 6d). Esta asociación icnológica muestra intervalos con moderada diversidad y alta abundancia de estructuras biogénicas.



**Figura 5.** Asociación de facies de *shoreface*. **a.** Vista general de niveles de areniscas finas a medias masivas (**Sfmm**) o con laminación paralela (**Sfml** y **Sfmm**) que intercalan delgados niveles de fangolitas masivas (**Cm**). **b.** Areniscas finas a medias con laminación paralela (**Sfml**). **c.** Areniscas medias con estratificación entrecruzada en artesas (**Smct**). **d.** Cuerpo cuneiforme compuesto de areniscas medias con estratificación entrecruzada tangencial de bajo ángulo (**Smct**). **e.** Cuerpos centimétricos tabulares de areniscas medias con retrabajo de oleaje (**Smgw**) al techo -ver flechas-, que pasan en transición a un banco de areniscas finas a medias masivas. **f.** *Rudstone* bioclástico masivo (**Rm**). Note en esta última la presencia de conchillas articuladas de bivalvos -ver flechas-.

**Interpretación.** Esta asociación de facies comprende sedimentos depositados bajo un régimen de energía moderadamente alto, debido a la abundante presencia de bioclastos y trazas de organismos suspensívoros. Algunas estructuras sedimentarias evidencian la migración de barras 2D-3D, mientras que el desarrollo de *rudstones* bioclásticos, en algunos casos con estructuras sedimentarias tractivas de gran escala, estarían indicando el desarrollo de canales subácueos. La presencia de óndulas simétricas en el techo de las capas



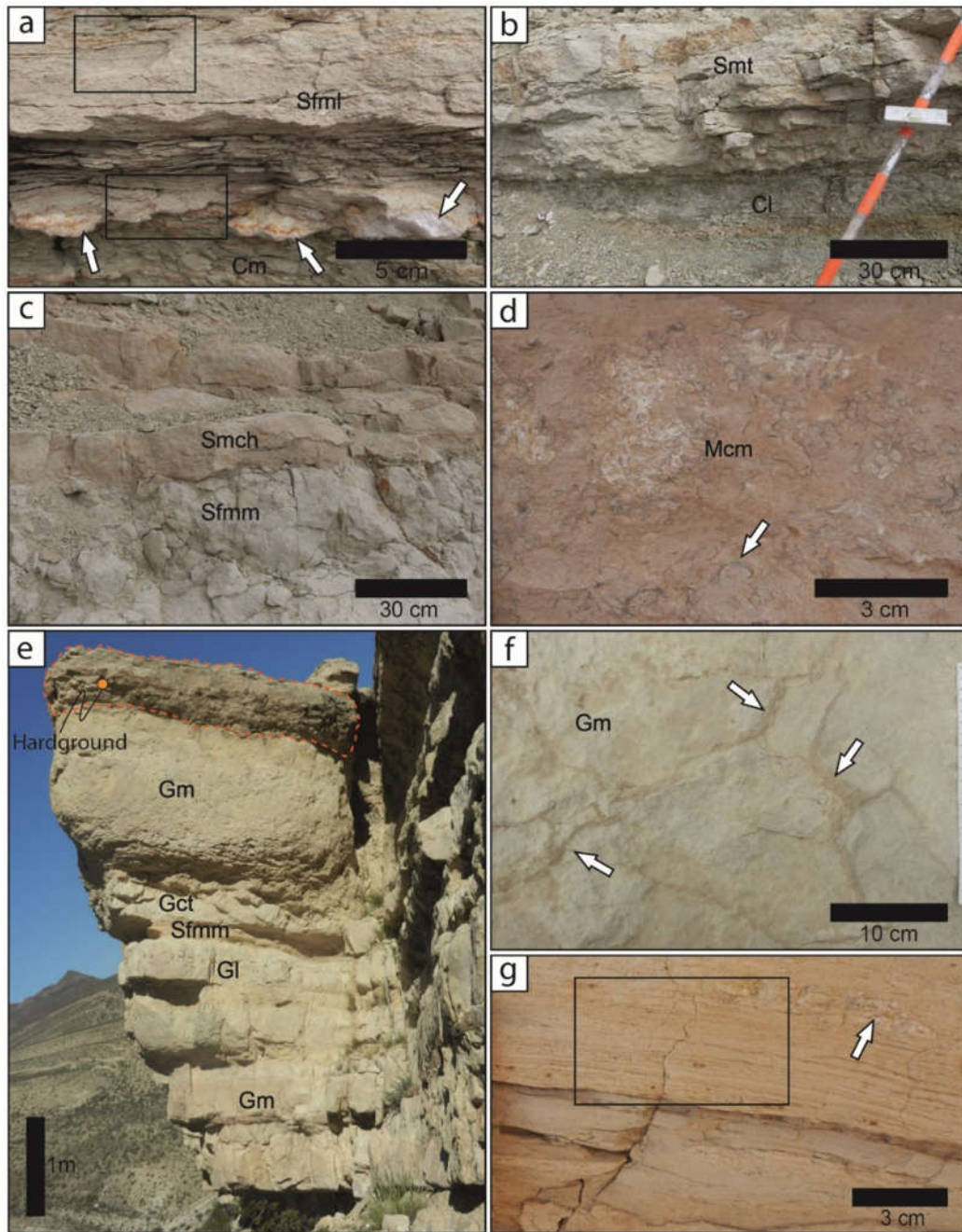
**Figura 6.** Icnología correspondiente a la asociación de facies de *shoreface*. **a.** Vista en sección de areniscas finas a medias con ejemplares de *Arenicolites* (*Ar*). **b.** Vista en planta de areniscas finas a medias con ejemplares de *Ophiomorpha* (*Op*). **c.** Vista en planta de areniscas medias con un ejemplar de *Thalassinoides* (*Th*). **d.** Vista en sección de areniscas finas a medias con ejemplares de *Skolithos* (*Sk*).

resulta del retrabajo de los sedimentos depositados por acción de oleaje. Algunos cuerpos arenosos con laminación *Swalley* permiten inferir eventos de tormenta asociados al proceso de sedimentación normal del *shoreface*. La baja icnodiversidad podría estar relacionada a condiciones de estrés debido a la alta energía en el medio (Buatois y Mángano, 2011).

#### 4.3. Asociación de facies de bahía

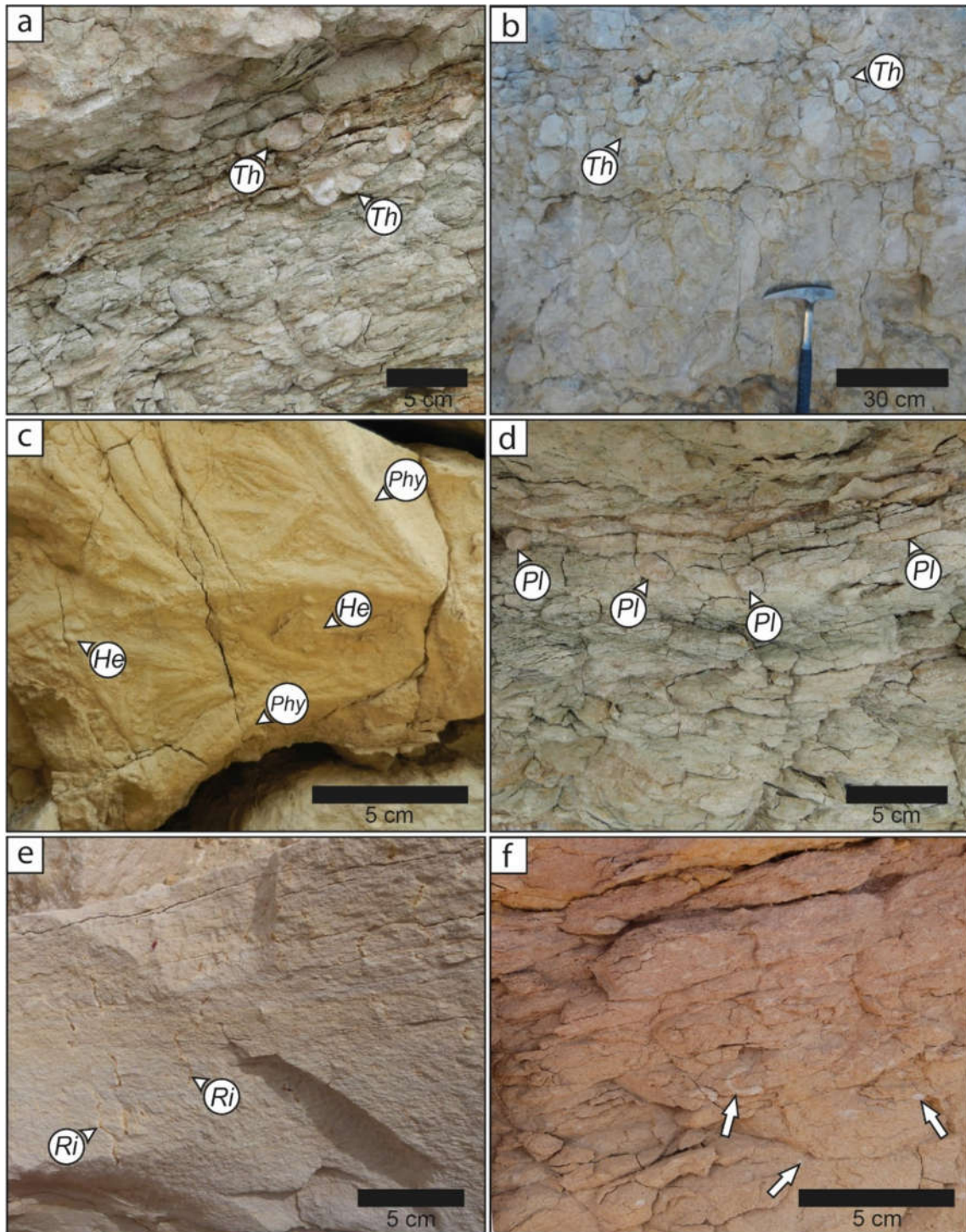
Está conformada por fangolitas, areniscas finas, medias y gruesas, conglomerados finos, *mudstones*, *grainstones* oolíticos y *rudstones* bioclásticos. En esta asociación de facies la sucesión se caracteriza por ser fango-arenosa con intercalaciones de paquetes arenosos y carbonáticos. Las fangolitas son masivas o laminadas (**Cm-CI**) y de geometría tabular, mientras que las areniscas finas y finas-medias son masivas (**Sfmm**) o con óndulas simétricas (**Sfw**), que desarrollan geometrías tabulares y, en algunos casos, lenticulares. Estos cuerpos son de escala centimétrica y se desarrollan como sucesiones de intercalaciones rítmicas en las que se observan algunos niveles con nódulos de yeso (Fig. 7a). Por otra parte, las areniscas medias y gruesas poseen matriz fangosa y se disponen como capas de escala métrica, aunque en algunos casos, no llegan a superar los 50 centímetros de espesor. Estas capas presentan geometrías tabulares y cuneiformes, generalmente con bases erosivas, que internamente son masivas (**Sfmm**) o desarrollan estructuras de tipo *hummocky* (**Smch**), estratificación entrecruzada en artesa (**Smt**) y tangencial de media y gran escala (**Smct**) (Fig. 7b-c). Se observa además abundante contenido de fitodetrito, clastos de fango, fragmentos de invertebrados indiferenciados y bioclastos de gasterópodos y bivalvos. Los conglomerados finos son escasos, de estructura





**Figura 7.** Asociación de facies de bahía. **a.** Vista en sección de intercalaciones de areniscas finas a medias laminadas (**Sfml**) y fangolitas masivas (**Cm**) con la presencia de ESIAM (recuadros) y nódulos de yeso (flechas). **b.** Vista en sección de fangolitas laminadas (**Cl**) que pasan en transición a areniscas medias con estratificación entrecruzada tangencial de gran escala (**Smt**). **c.** Vista en sección de areniscas finas a medias masivas (**Sfmm**) y, en contacto erosivo, areniscas medias con estratificación de tipo *hummocky* (**Smch**). **d.** Vista en planta de *mudstones* cristalino masivo (**Mcm**) con colonias de poliquetos y ostras en posición de vida (flecha). **e.** Vista en sección de sucesión de *grainstone* oolítico masivo (**Gm**), laminado (**Gl**) o con estructura entrecruzada tangencial de gran escala (**Gct**) con intercalaciones de algunos niveles de areniscas finas a medias (**Sfmm**). Note al tope de la sección el desarrollo de un *hardground*. **f.** Vista en planta de un depósito de *grainstone* oolítico masivo (**Gm**) con desarrollo de grietas de desecación (flechas). **g.** Vista en sección de un *grainstone* oolítico con ESIAM (recuadro) y nódulos de yeso (flecha).

masiva (**Cgfm**) y se desarrollan como niveles con bases erosivas que no superan los 50 centímetros de espesor. Los *mudstones* son de geometría tabular e internamente masivos (**Mcm**), en estos se observaron colonias de ostras y poliquetos en posición de vida (Fig. 7d). Los *grainstones* oolíticos poseen matriz fangosa con abundante contenido de peloides. Estos paquetes de escala métrica presentan geometría tabular y bases erosivas. Internamente son masivos (**Gm**) o poseen estructuras de estratificación entrecruzada en artesa de mediana escala (**Gct**), laminación paralela (**Gl**) y ondulas simétricas al techo; algunos niveles presentan grietas de desecación (Fig. 7e-f). Los *rudstones* bioclásticos son de escala métrica y se presentan masivos (**Rm**) o con estratificación entrecruzada tangencial (**Rct**) y en algunos casos pasan transicionalmente a areniscas medias masivas. Contienen, además de los organismos esqueléticos, matriz-cemento micrítico. Es destacable mencionar que se reconocieron asociados a las facies de fangolitas y *grainstones* oolíticos, numerosos niveles con desarrollo de estructuras sedimentarias inducidas por actividad microbiana (ESIAM), las cuales presentan abundante pirita framboidal alineada a los planos de estratificación o diseminada (Fig. 7a y g). Respecto de la icnología, si bien algunos paquetes se encontraban obliterados por bioturbación indiferenciada, se reconocieron estructuras de organismos depositívoros y suspensívoros asignadas a *Thalassinoides* (Fig. 8a-b), *Helicodromites* (Fig. 8c), *Asterosoma*, *Phymatoderma* (Fig. 8c), *Planolites* (Fig. 8d), *Ophiomorpha*, *Macaronichnus*, *Skolithos* y rizolitos (Fig. 8e), además de bioturbación indiferenciada (Fig. 8f).



**Figura 8.** Icnología asociada a la asociación de facies de Bahía. **a.** Vista en sección de heterolitas arenosas con ejemplares de *Thalassinoides* (**Th**); **b.** Vista en sección de *grainstones* oolíticos muy bioturbados por *Thalassinoides*; **c.** Vista basal de *grainstones* oolíticos con ejemplares de *Helicodromites* (**He**) y *Phymatoderma* (**Phy**); **d.** Vista en sección de la intercalación entre areniscas finas con laminación difusa y fangolitas masivas con ejemplares de *Planolites* (**Pl**); **e.** Vista en sección de areniscas finas masivas con rizolitos (**Ri**); **f.** Vista en sección de areniscas finas a medias obliteradas por bioturbación indiferenciada.

**Interpretación.** Esta asociación de facies corresponde a sedimentos depositados en un ambiente marino marginal o de bahía. El desarrollo de heterolitas fangosas con estructuras biogénicas producidas por organismos detritívoros y depositívoros, indican acumulación en ambientes de baja energía, mientras que la presencia de conglomerados finos y las areniscas masivas o con estructuras de tipo *hummocky* que contienen abundante fitodetrito y fragmentos de conchillas indiferenciadas, se interpretan como tempestitas. Las areniscas medias con estratificación entrecruzada de media a gran escala junto a los *rudstones* bioclásticos evidencian el desarrollo y migración de barras 2D y 3D en complejos de canales. Los niveles con *grainstones* oolíticos evidencian el desarrollo de barras con retrabajo por oleaje al techo de las capas. La presencia de organismos sésiles como ostras y colonias de serpúlidos encontrados en los *mudstones*, indicarían periodos con muy baja tasa de sedimentación, mientras que en algunos niveles de *grainstones* oolíticos, se observa el desarrollo de un *hardground* bioturbado por *Thalassinoides*. El reconocimiento de numerosos niveles con desarrollo de estructuras sedimentarias inducidas por actividad microbiana, grietas de desecación y rizolitos indican periódicos eventos de exposición subaérea, lo que en conjunto con la presencia de nódulos de yeso, estaría evidenciando la presencia de aguas salobres durante la formación de estos depósitos.

## 5. DISCUSIÓN

### 5.1. Paleogeografía de la cuenca Neuquina: implicancias en el desarrollo de procesos mareales.

Durante el Jurásico Temprano-Medio se inicia un régimen de subducción a lo largo del borde occidental de Gondwana (Franzese *et al.* 2003). Esta situación generó el establecimiento de un arco magmático en el ámbito de la cuenca Neuquina, el cual estaba desarrollado desde el Jurásico Tardío (Franzese *et al.*, 2003; Howell *et al.*, 2005). Esta evolución tectónica permitió comprender que durante el Jurásico y gran parte del Cretácico, la cuenca Neuquina se comportó como una cuenca de retroarco, conectada al paleo-Pacífico a través de estrechos pasajes ubicados entre los arcos de islas volcánicas (Spalletti *et al.* 2000, Vicente, 2005; Macdonald *et al.* 2003; entre otros). Este mecanismo de subducción fue responsable del desarrollo de un frente de deformación compresivo, ubicado en el sector sur de la cuenca y con una dirección de propagación hacia el norte, que dio lugar a la generación de la dorsal de Huincul (Pángaro *et al.*, 2006; Silvestro y Zubiri, 2008). Si bien la estructuración del frente de deformación compresivo estuvo activa desde el Aaleniano hasta el Cretácico Tardío, fue durante el Tithoniano-Berriasiano cuando experimentó un pulso de mayor deformación (Pángaro *et al.*, 2009). Estas condiciones habrían favorecido el establecimiento de un arco magmático mucho más desarrollado al sur de la cuenca que al norte de la misma, situación que habría generado que el depocentro de Picún Leufú tuviese un marcado control en su conexión con el paleo-Pacífico, atenuando o inhibiendo el desarrollo de procesos mareales significativos. Esta situación fue previamente discutida por Canale *et al.* (2015, en prensa) para explicar la ausencia de estructuras sedimentarias físicas

y biogénicas generadas por procesos de difusión mareal en los depósitos de la Formación Lajas. Dichos autores sugieren que durante la transgresión del Jurásico Medio la acción de la marea era severamente atenuada al atravesar los archipiélagos ubicados a lo largo del arco magmático. Los estudios realizados en esta contribución confirmarían estas afirmaciones, ya que no se han reconocido estructuras sedimentarias físicas originadas por procesos de difusión mareal (*e.g.* bandas mareales, cortinas de fango, ritmitas) (Boyd *et al.*, 2006; Dalrymple *et al.*, 2012), ni tampoco estructuras sedimentarias biogénicas como las tidalitas tubulares, las cuales se consideran diagnósticas de la acción de procesos mareales (Boyd *et al.*, 2006; Wetzel *et al.*, 2014), a pesar de la gran abundancia de *Thalassinoides* que presentan los depósitos de *offshore* y *shoreface* aquí analizados. Estas observaciones se contraponen con las interpretaciones previamente presentadas en estudios realizados en el área del Anticlinal de Picún Leufú por Spalletti *et al.* (2000), Armella *et al.* (2008) y Zeller *et al.* (2015), quienes sugieren la acción de procesos de marea activos en el registro de los depósitos de las formaciones Vaca Muerta y Picún Leufú en el área de estudio.

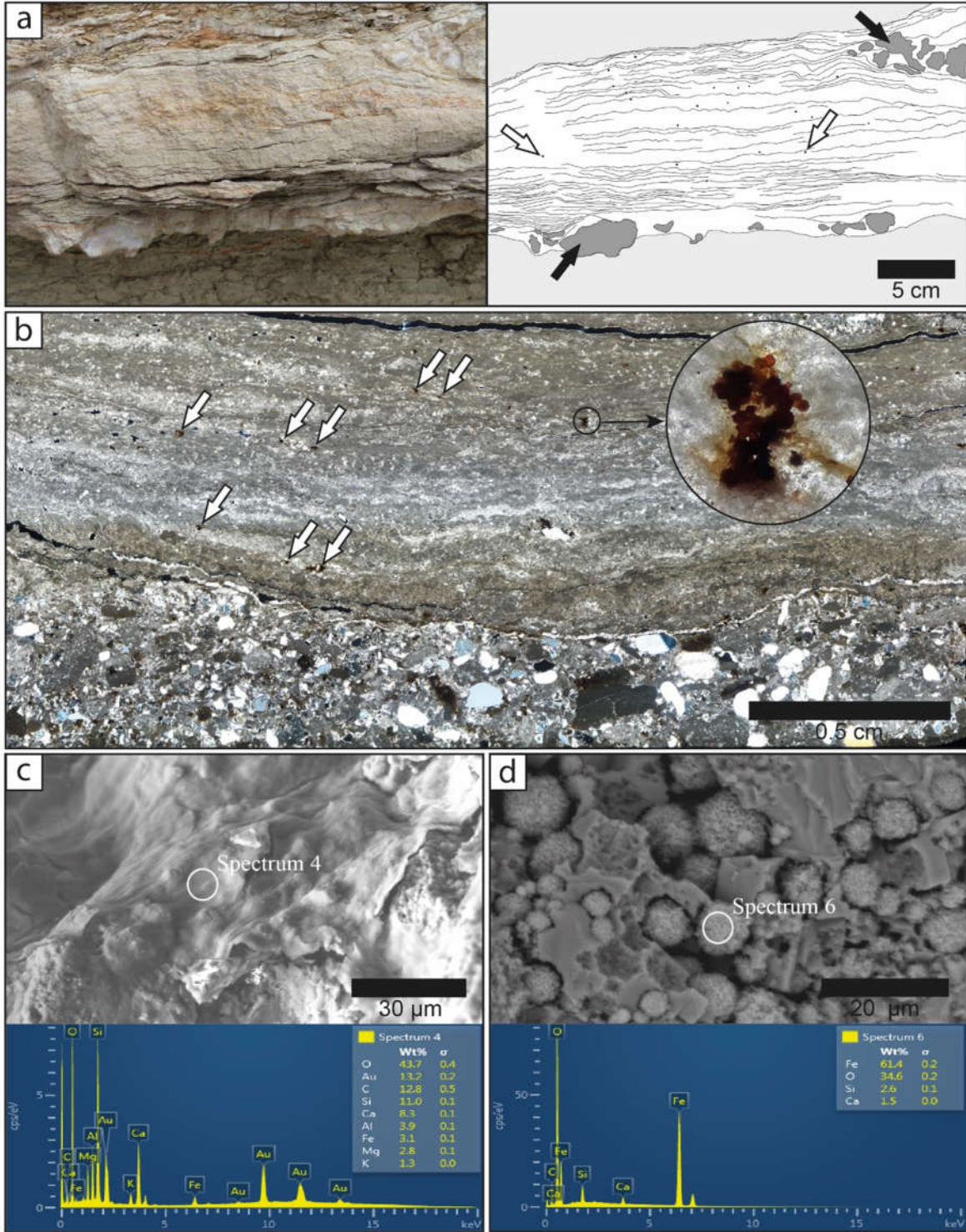
## **5.2. Reconocimiento de niveles con Estructuras Sedimentarias Inducidas por Actividad Microbiana (ESIAM): Implicancias en la interpretación del paleoambiente.**

Un aspecto interesante de la sección estudiada es el reconocimiento de numerosos niveles con ESIAM formadas a partir del desarrollo de matas o tapetes microbiales. Las matas microbiales son comunidades de microorganismos bentónicos (procariotas y eucariotas) que generalmente colonizan ambientes sedimentarios extremos (Stal, 2001, 2010; Kremer *et al.*, 2008; Noffke, 2010; Seckbach y Oren, 2010). En este sentido, el desarrollo de niveles con matas microbiales está relacionado a las características físicas y

químicas del ambiente, en donde las condiciones extremas de temperatura, salinidad, pH, gases disueltos, exposición atmosférica, desecación, energía de olas y corrientes, limitan la distribución de los organismos y su impacto en la sedimentación (Browne *et al.*, 2000). En estos ambientes, muchos microorganismos, en particular las bacterias y las diatomeas, desarrollan una alta tolerancia a estas condiciones ambientales y pueden convertirse en la principal fuerza biótica que interactúa y modifica los procesos hidrodinámicos, sedimentológicos y químicos dominantes durante la sedimentación (Browne *et al.*, 2000). En el caso de ambientes silicoclásticos, las matas microbiales interactúan con el sedimento, originando una serie de estructuras sedimentarias que permiten inferir su presencia tanto en ambientes actuales como fósiles (Noffke *et al.*, 1996; Bournod *et al.*, 2014). Algunas de estas estructuras han sido reconocidas en los depósitos de la Fm. Picún Leufú. Noffke *et al.*, (2003) y Noffke (2010) sugieren que los tapetes microbiales son sumamente frecuentes en ambientes supramareales e intermareales, preferencialmente en planicies mareales o ambientes sedimentarios de circulación restringida, con tasa de sedimentación baja a nula.

En la sección basal de la Fm. Picún Leufú, se reconocieron cuatro niveles de tapetes microbiales que se encuentran asociados a grietas de desecación, rizolitos y crecimiento de nódulos de yeso intrasedimentario (Fig. 9). El análisis de seis secciones delgadas y de microscopía electrónica de los niveles con tapetes microbiales permitió identificar la presencia de biolaminaciones (Fig. 9a-b), con características similares a las descritas por Bournod *et al.* (2014) en matas microbiales actuales del estuario de Bahía Blanca.

Las biolaminaciones son creadas por la secreción de Sustancias Poliméricas Extracelulares (SPE) que terminan comportándose como un gel plástico que une los granos de sedimentos (Fig. 9c). Esta biolaminación (o biolaminitas de Bournod *et al.*, 2014) fueron observadas en capas de granos silicoclásticos, en niveles carbonáticos y mixtos. En estas



**Figura 9.** Imágenes de afloramiento, secciones delgadas y estudios de microscopía de estructuras sedimentarias inducidas por actividad microbiana. **a.** Biolaminación observada en afloramiento y redibujo. Las flechas blancas indican pirritas alineadas y las flechas negras indican nódulos de yeso. **b.** Biolaminación desarrollada sobre arenisca fina observada en corte delgado. Las flechas blancas indican presencia de pirritas framboidales alineadas. En el margen derecho de la imagen se observa un detalle de un racimo de pirritas framboidales. **c.** SPE observado en el MEB. **d.** Pirritas framboidales observadas en el MEB.



litologías, los tapetes microbiales presentaban intercrecimiento de nódulos de yeso (Fig. 9a, flechas negras) y niveles de piritas framboidales alineadas a los planos conformados por las biolaminaciones (Fig. 9a-b y d, flechas blancas). La presencia de pirita framboidal, es producto de la anoxia causada por la reducción en la difusión del oxígeno que ocurre por el efecto conjugado de la biolaminación, el agua intersticial y el SPE (Paerl *et al.*, 2000). De esta manera, la formación de minerales autigénicos constituye un proceso frecuente asociado a la diagénesis temprana que contribuye a la preservación de las ESIAM en el registro fósil (Noffke, 2007).

Los tapetes microbiales reconocidos en la Fm. Picún Leufú se encuentran en depósitos de planicies de un sistema de bahía y el crecimiento intrasedimentario de nódulos de yeso indica condiciones temporales de hipersalinidad en el ambiente, producto de la alternancia entre etapas de exposición e inmersión de los sedimentos. Esta interpretación es consistente con la presencia de grietas de desecación. La presencia de rizolitos asociados a depósitos de calizas oolíticas con matriz fangosa y cemento micrítico, indica procesos de edafización incipiente dentro del sistema de planicie.

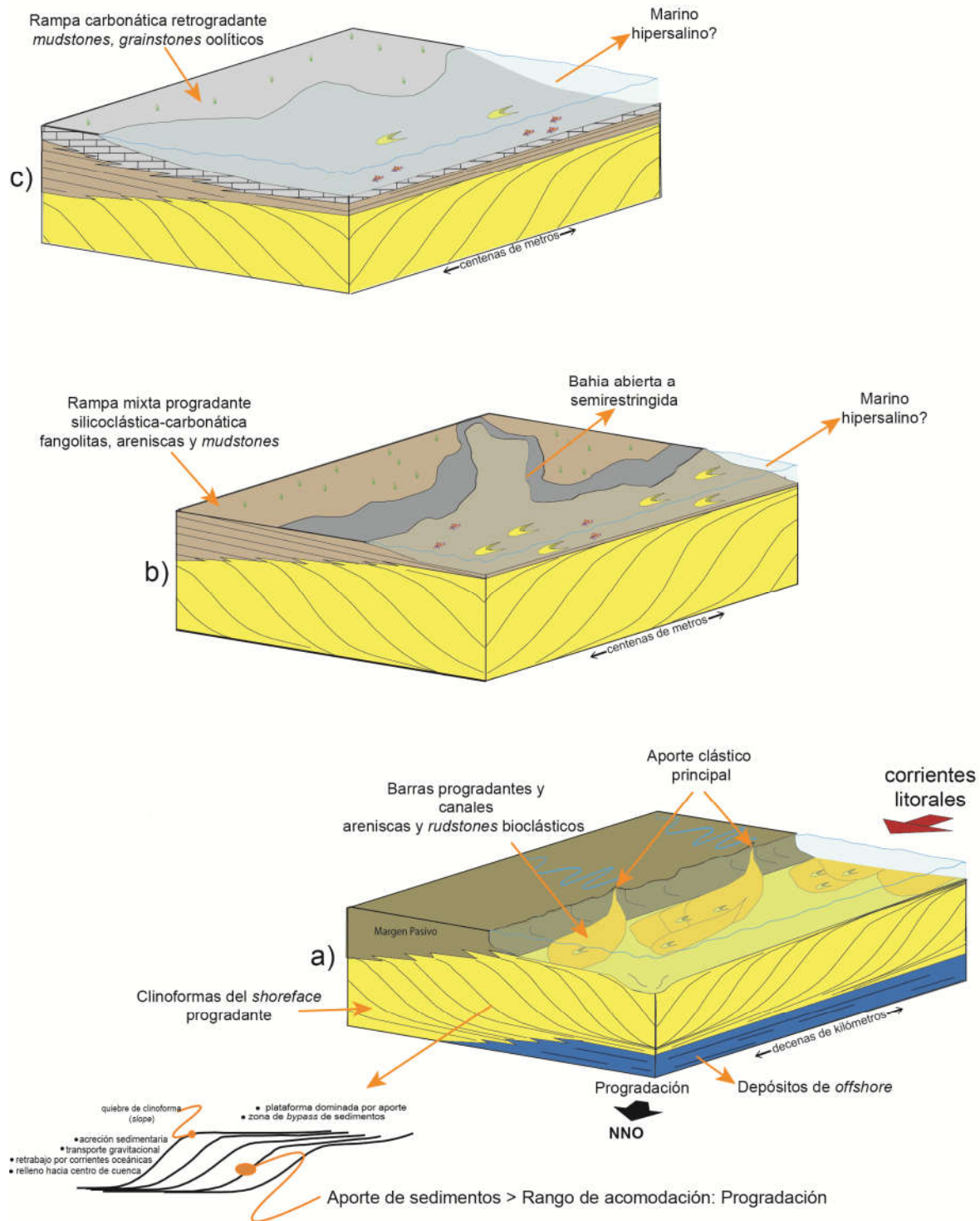
### **5.3. Modelo depositacional**

La integración de los datos sedimentológicos e icnológicos a partir de la medición de cuatro secciones estratigráficas de detalle, permitió reconocer la presencia de asociaciones de facies sedimentarias e icnofacies propias de ambientes de *offshore*, *shoreface* y bahía (Figs. 2 y 3). La realización de un panel de correlación de las cuatro secciones relevadas permitió establecer las principales geometrías de los cuerpos y su patrón de apilamiento, el cual corresponde a un sistema de clinofomas progradantes con dirección dominante N-NO

en la sección basal y media, y un arreglo retrogradante en la sección superior (Fig. 2). Las sucesiones basal y media se encuentran separadas por una superficie erosiva de carácter regional (Fig. 2). El desarrollo de esta superficie erosiva es coincidente con uno de los pulsos compresivos propuestos por Freije *et al.* (2002), vinculado al desarrollo del sistema de discordancias progresivas que dio lugar a la estructura anticlinal de Picún Leufú.

En la Figura 10 se presentan una serie de diagramas 3D que muestran el modelo depositacional surgido de este trabajo y su evolución a través del tiempo, para los depósitos que conforman la sección basal de la Formación Picún Leufú en el área de estudio. La sección comienza con depósitos de *offshore* que, de manera transicional, son reemplazados por sucesiones de *shoreface* (Fig. 10a). De acuerdo a la geometría que muestran los depósitos, se interpreta que durante esta etapa tuvo lugar la construcción y migración de los *sets* de clinofomas que definen el carácter progradante de este intervalo estratigráfico. Estas clinofomas estuvieron controladas por procesos alogénicos y autigénicos.

Los controles alogénicos habrían sido de carácter tectónico, principalmente relacionados con la última etapa de deformación compresiva asociada a la evolución del sistema de discordancias progresivas definido por Freije *et al.*, (2002). Por su parte, los procesos autigénicos fueron los responsables de la construcción del frente de avance de los *set* de clinofomas, las cuales se encuentran mayormente integradas por sistemas de canales y barras, reelaborados por procesos de acción de oleaje tanto normal como de tormenta. Estos depósitos muestran desarrollo de icnofacies de *Skolithos* en posiciones de *shoreface* (*foreset* y *topset* de las clinofomas). El carácter mixto de los depósitos se vincula con la reelaboración del material carbonático (areniscas calcáreas y *rudstones* bioclásticos) previamente acumulado en la cuenca. Los depósitos de *offshore-shoreface* son reemplazados progresivamente por depósitos de bahía desde la sección media (Fig. 10b).



**Figura 10.** Modelo paleoambiental para la Formación Vaca Muerta y sección basal de la Formación Picún Leufú en el área de estudio.

Estos depósitos muestran un patrón de apilamiento progradante a levemente agradante, situación que también fue observada por Zeller *et al.*, (2015).

Los depósitos de bahía se encuentran integrados por areniscas finas, fangolitas y fangos carbonáticos, siendo las sucesiones heterolíticas de espesor variable los arreglos más recurrentes. En estos depósitos es frecuente la presencia de niveles con tapetes microbiales, nódulos de yeso intrasedimentarios, grietas de desecación y rizolitos. Esto, en conjunto con la ausencia de trazas fósiles, sugiere etapas alternantes de emersión e inmersión que dieron lugar a variaciones significativas de salinidad. La abundancia de materiales finos en este tramo de la sección sugiere que la turbidez habría sido también un factor de estrés para el establecimiento del bentos, en particular de los organismos suspensívoros. Estos depósitos heterolíticos están intercalados con depósitos de barras y niveles de carbonatos.

Hacia el techo de la sucesión analizada se produce un cambio en el tipo de sedimentación, pasando de un sistema mixto a uno carbonático (Fig. 10c). Esta etapa se vincula con un ascenso del nivel de base relativo donde se produce una gran acumulación de fangos calcáreos y *grainstones* oolíticos. En estos niveles se reconoce el desarrollo de una superficie sustrato controlada, colonizada por crustáceos productores de *Thalassinoides*. El desarrollo de este tipo de superficies es sumamente frecuente en las rocas carbonáticas, ya que este tipo de depósitos experimentan procesos de diagénesis temprana que generan sustratos firmes. Contrariamente a lo propuesto por Zeller *et al.*, (2015), quienes relacionan estas superficies firmes a una exhumación erosiva por exposición subaérea, en este trabajo se interpretan a estas superficies como el producto de la combinación entre procesos erosivos y diagénesis temprana de los carbonatos generada durante la transgresión.

## 6. CONCLUSIONES

1. Los depósitos que conforman la sucesión analizada de la Formación Picún Leufú muestran en su sección basal y media un patrón de apilamiento progradante con desarrollo de un sistema de clinofomas que migra hacia el N-NO, el cual es reemplazado por un arreglo retrogradante en su tramo superior.
2. El análisis sedimentológico e icnológico detallado de los depósitos permitió reconocer dieciocho facies sedimentarias agrupadas en asociaciones de facies de *shoreface*, *offshore* y bahía. La asociación de facies de *offshore* preserva la laminación primaria, salvo en pequeños intervalos estratigráficos afectados por bioturbación, y se encuentran afectados por depósitos de tormenta. La asociación de facies de *shoreface*, está representada principalmente por formas de lecho de gran escala (dunas 2D y 3D). Estos depósitos muestran mayor abundancia y una diversidad moderada de trazas fósiles correspondientes a la icnofacies de *Skolithos*. Finalmente la asociación de facies de bahía, se encuentra dominada por depósitos de planicie fangosa y mixta, con trazas de rizolitos, grietas de desecación y tapetes microbiales. Esta asociación de facies muestra la mayor restricción ambiental.
3. La evolución del arco magmático durante el Jurásico-Cretácico restringió la conexión de la cuenca con el océano paleo-Pacífico, lo cual habría inhibido el desarrollo de procesos mareales significativos, ya que no se han reconocido estructuras sedimentarias físicas originadas por procesos de difusión mareal (e.g. bandas tidales), ni tampoco estructuras sedimentarias biogénicas diagnósticas de la

acción de procesos mareales (*e.g.* tidalitas tubulares), a pesar de la gran abundancia de trazas fósiles asignadas a *Thalassinoides* en posiciones de *offshore* y *shoreface*.

4. En los depósitos de bahía se reconocieron cuatro niveles con desarrollo de tapetes microbiales, asociados a grietas de desecación, rizolitos y crecimiento de nódulos de yeso intrasedimentario. El análisis de seis secciones delgadas y de microscopía electrónica de estos niveles permitió identificar la presencia de biolaminaciones en depósitos silicoclásticos, carbonáticos y mixtos, que muestran intercrecimiento de nódulos de yeso y niveles de piritas framboidales alineadas a los planos de estratificación.
5. El desarrollo de superficies con icnofacies sustrato-controladas asociadas a niveles carbonáticos en el tramo cuspidal de la sección, se interpreta como el producto de la combinación entre procesos erosivos y de diagénesis temprana de los carbonatos, ocurrida durante la transgresión.
6. El análisis sedimentológico e icnológico de la sección basal de la Formación Picún Leufú (Cretácico Temprano), permitió refinar el modelo depositacional para esta unidad, reconociendo el desarrollo de depósitos con tapetes microbiales con evidencias de exposición subaérea temporal y una marcada ausencia de procesos de difusión mareal como proceso dominante.

## BIBLIOGRAFÍA

- Armella, C., Cabaleri, N. y Leanza, H.A. 1999. Paleoambientes de la Formación Picún Leufú (límite Jurásico-Cretácico) en su localidad tipo, Cuenca Neuquina, Argentina. 5° Simposio sobre o Cretáceo do Brasil. 1° Simposio sobre el Cretácico de América del Sur., Actas: 357-358. Brasil.
- Armella, C., Cabaleri, N. y Leanza, H.A. 2007. Tidal dominated, rimmed-shelf facies of Picún Leufú Formation (Jurassic/Cretaceous boundary) in southwest Gondwana, Neuquén Basin, Argentina. *Cretaceous Research* 28, 6: 961-979.
- Armella, C., Cabaleri, N. y Leanza, H.A. 2008. Facies de patch reefs en la Formación Picún Leufú (límite Jurásico/Cretácico) en la región de Zapala, Cuenca Neuquina. *Revista del Museo Argentino de Ciencias Naturales* 10, 1: 63-70.
- Arregui, C., Carbone, O. y Martínez, R. 2011. El Grupo Cuyo (Jurásico temprano-medio) en la Cuenca Neuquina. 18° Congreso Geológico Argentino. Relatorio: 77-89, Neuquén.
- Bournod, C.N., Cuadrado, D.G., Carmona, N.B., Ponce, J.J. y Pan, J. 2014. Estructuras sedimentarias inducidas por actividad microbiana (ESIAM) en la planicie de marea de Puerto Rosales, estuario de Bahía Blanca. *Revista de la Asociación Geológica Argentina* 71:331-344.
- Boyd, R., Dalrymple, R.W. y Zaitlin, B.A. 2006. Estuarine and incised valley facies models. In: *Facies Models Revisited* (ed.) Walker, R.G. & Posamentier, H. Special Publication Society of Economic Paleontologists and Mineralogists, 84: 171-235. Tulsa.
- Bracaccini, C.I. 1970. Rasgos tectónicos de las acumulaciones mesozoicas en las provincias de Mendoza y Neuquén. *Revista de la Asociación Geológica Argentina*, 25: 275-284.
- Browne, G. H., Slatt, R. M. y King, P. R. 2000, Contrasting styles of basin-floor fan and slope fan deposition: Mount Messenger Formation, New Zealand, in Bouma A. H. and Stone, C. G. eds., *Fine-grained Turbidite systems: AAPG Memoir 72/SEPM Special Publication* 68, p. 143-152.

- Buatois, L. A. y Mangano, M. G. 2011. *Ichnology, Organism- Substrate interactions in space and time*. Cambridge University Press, 358p. Cambridge.
- Buatois, L.A. Saccavino, L.L. y Zavala, C.A. 2011. Ichnologic signatures of hyperpycnal low deposits in Cretaceous river-dominated deltas, Austral Basin, southern Argentina. In *Sediment Transfer from Shelf to Deep Water: Revisiting the Delivery System* (ed.) Slatt, R.M. and Zavala, C.A. American Association of Petroleum Geologists Studies in Geology. 61.
- Buatois, L.A., Netto, R.G. y Mángano, M.G. 2007. Ichnology of Permian marginal-marine to shallow-marine coal-bearing successions: Rio Bonito and Palermo Formations, Parana basin, Brazil. In *Applied Ichnology* (ed). MacEachern, J.A., Bann, K.L., Gingras, M.K., Pemberton, S.G. Society for Sedimentary.
- Burgess, P., Flint, S. y Johnson, S. 2000. Sequence stratigraphic interpretation of turbiditic strata: an example from Jurassic strata of the Neuquén basin, Argentina. *Geological Society of America Bulletin*, 112: 1650-1666.
- Canale, N., Ponce, J. J., Carmona, N. B. Parada, M. N. y Drittanti, D. I. 2020. Sedimentology and ichnology of a river-dominated delta, Lajas Formation (Middle Jurassic) Neuquén Basin, Argentina. *Andean Geology* 47, 1 (en prensa).
- Canale, N., Ponce, J.J., Carmona, N., Drittanti, D., Olivera, D., Martínez, M.A. y Bournod, C.N. 2015. Sedimentología e Icnología de deltas fluvio-dominados afectados por descargas hiperpícnicas de la Formación Lajas (Jurásico Medio), Cuenca Neuquina, Argentina. *Andean Geology*, 42. pp. 114-138.
- Carbone, C. 1988. Sismoestratigrafía del grupo Cuyo Inferior en la Cuenca Neuquina. *Boletín de Informaciones Petroleras, Tercera Época* 16: 67-87.
- Cristallini, E. O., Tomezzoli, R., Pando, G., Gazzera, C., Martínez, J. M., Quiroga, J., Buhler, M., Bechis, F., Barredo, S. y Zambrano, O. 2009. Controles precuyanos en la estructura de la Cuenca Neuquina. *Revista de la Asociación Geológica Argentina* 65, 2: 248-264.



- Dalrymple R.W., Mackay D.A., Ichaso A.A. y Choi K.S. 2012. Processes, morphodynamics, and facies of tide-dominated estuaries. In: Principles of tidal sedimentology. (ed.) Davis R.A.J., Dalrymple R.W., New York (USA): Springer; p. 79–108.
- Desjardins, P.R., Buatois, L.A., Mángano, M.G. y Limarino, C.O. 2010. Ichnology of the latest Carboniferous – earliest Permian transgression in the Paganzo Basin of western Argentina: The changing ecology of sea-level rise during postglacial times in Gondwana. In Late Paleozoic Glacial Events and Postglacial Transgressions in Gondwana, (ed.) Lopez Gamundi, O., Buatois, L.A. Geological Society of America Special Paper , 468 : 175 –192.
- Franzese, J.R. y Spalletti, L.A. 2001. Late Triassic-early Jurassic continental extension in southwestern Gondwana: tectonic segmentation y pre-break-up rifting. *Journal of South American Earth Sciences*, 14: 257-270.
- Freije, H., Azúa, G., González, R., Ponce, J.J. y Zavala, C.A. 2002. Actividad tectónica sinsedimentaria en el Jurásico del sur de la Cuenca Neuquina. 5° Congreso de Exploración y Desarrollo de Hidrocarburos, Actas: 17 pp. Mar del Plata, Argentina.
- Gingras, M.K., MacEachern, J.A. y Pemberton, S.G. 1998. A comparative analysis of the ichnology of wave- and river-dominated allomembers of the Upper Cretaceous Dunvegan Formation: *Bulletin of Canadian Petroleum Geology*, 46: 51–73.
- Gingras, M.K., Bann, K.L., MacEachern, J.A., Waldron, W. y Pemberton, S.G. 2007. A conceptual framework for the application of trace fossils. In: MacEachern, J.A. et al., (ed.) *Applied ichnology*. Society of Economic Paleontologists and Mineralogists. Short Course Notes 52: 1-25.
- Gulisano, C.A. 1981. El Ciclo Cuyano en el norte del Neuquén y sur de Mendoza. 8° Congreso Geológico Argentino, Actas 3: 579-592. Buenos Aires.
- Gulisano, C.A., Gutiérrez Pliemling, A.R. y Digregorio, R.E. 1984. Esquema estratigráfico de la secuencia jurásica del oeste de la provincia del Neuquén. 9° Congreso Geológico Argentino, Actas: 236-259. San Carlos de Bariloche.

- Hogg, S.L. 1993. Geology and hydrocarbon potential of the Neuquén Basin. *Journal of Petroleum Geology*, 16: 383-396.
- Howell, J. A., Schwarz, E., Spalletti, L. A., Veiga, G. D. 2005. The Neuquén Basin: an overview. From: Veiga, G. D., Spalletti, L. A., Howell, J. A. y Schwarz, E. (ed.).2005. *The Neuquén Basin, Argentina: A Case Study in Sequence Stratigraphy and Basin Dynamics*. Geological Society of London, Special Publications 252: 1-14.
- James, N.P. y Kendall, A.C. 1992. Introduction to carbonate and evaporite facies models. In: Walker, R.G., James, N.P. (eds.): *Facies models. Response to sea level change*. Geological Association of Canada: 265-276.
- Kremer, B., Kazmierczak, J. y Stal, L.J. 2008. Calcium carbonate precipitation in cyanobacterial mats from sandy tidal flats of the North Sea. *Geobiology* 6: 46-56.
- Leanza, H.A. 1973. Estudio sobre los cambios faciales de los estratos limítrofes Jurásico-Cretácicos entre Loncopué y Picún Leufú, provincia del Neuquén, República Argentina. *Revista de la Asociación Geológica Argentina* 28, 2: 97-132.
- Leanza, H.A. y Hugo, C.A. 1997. Hoja Geológica 3969-III, Picún Leufú. Geología. Subsecretaría de Minería de la Nación. Boletín 218: 121 pp.
- Leanza, H. A., Marchese, H. G. y Riggi, J. C. 1978. Estratigrafía del Grupo Mendoza, con especial referencia a la Formación Vaca Muerta, entre los paralelos 35° y 40°1. s. Cuenca Neuquina-Mendocina. *Revista de la Asociación Geológica Argentina* 32:190-208.
- Leanza, H.A., Sattler, F., Martínez, R.S. y Carbone, O. 2011. La Formación Vaca Muerta y Equivalentes (Jurásico Tardío-Cretácico Temprano) en la cuenca Neuquina. 18° Congreso Geológico Argentino. Relatorio: 113-129.
- Legarreta, L. y Uliana, M.A. 1991. Jurassic-Cretaceous marine oscillations and geometry of back arc basin fill, Central Argentine Andes. In: Macdonald, D.I.M. (ed.) *Sedimentation, Tectonics and Eustasy - Sea-level Changes at Active Margins*.

International Association of Sedimentologists, Special Publications 12: 429-450.

Legarreta, L. y Uliana, M.A. 1999. El Jurásico y Cretácico de la Cordillera Principal y la Cuenca Neuquina. En: R. Caminos (ed.). Geología Argentina. Servicio Geológico Minero Argentino, Anales 29: 399-416.

Macdonald, D., Gómez-Perez, I., Franzese, J., Spalletti, L., Lawver, L., Gahagan, L., Dalziel, I., Thomas, C., Trewin, N., Hole, M. y Paton, D. 2003. Mesozoic breakup of SW Gondwana: implications for regional hydrocarbon potential of the southern South Atlantic. *Marine and Petroleum Geology* 20: 287–308.

MacEachern, J.A. y Gingras, M. 2007. Recognition of brackish-water trace fossil assemblages in the Cretaceous western interior seaway of Alberta. In *Sediment-Organism Interactions: A Multifaceted Ichnology*, (ed.). Bromley, R., Buatois, L.A., Mángano, M.G., Genise, J. and Melchor, R. Society for Sedimentary Geology Special Publication, 88: 149–194.

MacEachern, J.A., Zaitlin, B.A. y Pemberton, S.G. 1998. High resolution sequence stratigraphy of early transgressive deposits, Viking Formation, Joffre Field, Alberta, Canada. *American Association of Petroleum Geologists, Bulletin*, 82: 729–756.

MacEachern, J.A. y Zaitlin, B.A., Pemberton, S.G. 1999. A sharp based sandstone of the Viking Formation, Joffre Field, Alberta, Canada: criteria for recognition of transgressively incised shoreface complexes. *Journal of Sedimentary Research*, 69: 876–892.

MacEachern, J.A., Pemberton, S.G. y Bhattacharya, J.P. 2007a. Ichnological and sedimentological evaluation of the Ferron Sandstone Cycles in Ivie Creek Cores #3 and #11. In: *Ichnological Applications to Sedimentological and Sequence Stratigraphic Problems*. (ed) MacEachern, J.A., Gingras, M.K., Bann, K.L., Pemberton, S.G. Society for Sedimentary Geology Research Conference Abstract Volume: 144–174.

- MacEachern, J.A., Bann, K.L., Pemberton, S.G. y Gingras, M.K. 2007b. The Ichnofacies paradigm: High-resolution paleoenvironmental interpretation of the rock record. In *Applied Ichnology*. (ed) MacEachern, J.A., Bann, K.L., Gingras, M.K. and Pemberton, S.G. Society for Sedimentary Geology Short Course Notes, 52: 27 –64.
- Mpodozis, C. y Ramos, V. 1989. The Andes of Chile y Argentina. En: *Geology of the Andes and its relation to hydrocarbon and mineral resources*; (ed.) Ericksen, G.E., Cañas M.T. and Reinemund, J.A., Circum-Pacific Council for Energy and Mineral Resources, Earth Sciences series volume1, Houston, Texas, USA.
- Nichols, G. 2009. *Sedimentology and Stratigraphy*. Wiley- Blackwell, 419 pp. Oxford.
- Noffke, N. 2007. Microbially induced sedimentary structures in Archean sandstones: a new window into early life. *Gondwana Research* 11: 336-342.
- Noffke, N. 2010. *Geobiology: Microbial Mats in Sandy Deposits from the Archaean Era to Today*. Berlin: Springer-Verlag.
- Noffke, N., Gerdes, G. y Klenke, T. 2003. Benthic cyanobacteria and their influence on the sedimentary dynamics of peritidal depositional systems (siliciclastic, evaporitic salty and evaporitic carbonatic), *Earth-Science Reviews* 12: 1-14.
- Noffke, N., Gerdes, G., Klenke, T. y Krumbein, W.E. 1996. Microbially induced sedimentary structures – examples from modern sediments of siliciclastic tidal flats. *Zentralblatt für Geologie und Paläontologie Teil 1, 1/2*: 307 –316.
- Paerl, H.W., Pinckney, J.L. y Steppe, T.F. 2000. Cyanobacterial-bacterial mat consortia: examining the functional unit of microbial survival and growth in extreme environments. *Environmental Microbiology* 2: 11-26.
- Pángaro, F., Pereira, D. y Micucci, E. 2009. El sinrift de la dorsal de Huincul, Cuenca Neuquina: evolución y control sobre la estratigrafía y estructura del área. *Revista de la Asociación Geológica Argentina*, 65, 2: 265-277.
- Pángaro, F., Pereira, M., Silvestro, J.L., Raggio, F., Pioli, O., Zubiri, M. y Gonzalez, G. 2006. Tectonic inversion of the Huincul high, Neuquén Basin, Argentina: An endangered species. *Stratigraphic Evidences of its Disappearance*. 9° Simposio

Bolivariano Petroleum Exploration in the Subandean Basins (Cartagena), Actas en CD: 9 p.

- Paz, M., Ponce, J. J., Buatois, L. A., Mángano, M. G., Carmona, N. B., Pereira, E. y Desjardins, P. R. 2019. Bottomset and foreset sedimentary processes in the mixed carbonate-siliciclastic Upper Jurassic-Lower Cretaceous Vaca Muerta Formation, Picún Leufú Area, Argentina. *Sedimentary Geology* 389: 161–185.
- Pemberton, S.G., Spilla, M., Pulham, A.J., Saunders, T., MacEachern, J.A. y Robbins, D., Sinclair, I.K. 2001. Ichnology and Sedimentology of shallow to marginal marine systems: Ben Nevis and Avalon Reservoirs, Jeanne d'Arc Basin. Geological Association of Canada. Short Course, Volume 15: 343 pp.
- Ponce, J.J., Montagna, A.O., Carmona, N.B. y Canale, N. (Eds) Guía de Campo. Escuela de Verano 2015. Sedimentología e Icnología de los Sistemas Petroleros no Convencionales de la Cuenca Neuquina (Los Molles-Lajas y Vaca Muerta-Quintuco). Universidad Nacional de Río Negro-Fundación YPF. pp. 112.
- Pratt, B. R., James, N. P. 1982. Cryptalgal-metazoan bioherms of early Ordovician age in the St George Group, western Newfoundland. *Sedimentology*, 29, 4: 543–569.
- Ramos, V. A. 1989. The Birth of Southern South America. *American Scientist*, 77, 5: 444-458.
- Ramos, V.A. 1999. Plate tectonic setting of the Andean cordillera. *Episodes* 22: 183-190.
- Ramos, V.A. y Folguera, A. 2005. Tectonic evolution of the Andes of Neuquén: Constraints derived from the magmatic arc and foreland deformation. En: Spalletti, L. et al (ed.) *The Neuquén Basin: A case study in sequence stratigraphy and basin dynamics*, Geological Society, Special Publications 252: 15-35.
- Ramos, V., Folguera, A. y García Morabito, E. 2011. Las Provincias Geológicas del Neuquén. En: Leanza, H.A, Arregui, C., Carbone, O., Danieli, J.C., Vallés, J.M. (ed.), *Geología y Recursos Naturales de la Provincia del Neuquén*. 18° Congreso Geológico Argentino, Relatorio: 317-326. Neuquén.

- Rankey, E.C. 1997. Relations between relative changes in sea level and climate shifts: Pennsylvanian–Permian mixed carbonate–siliciclastic strata, western United States. *Geological Society of America Bulletin* 109: 1089–1100.
- Seckbach, J. y Oren, A. 2010. Microbial mats: modern and ancient microorganisms in stratified systems. *Cellular origin, life in extreme habitats and astrobiology* 14, Springer, 606 p, Dordrecht.
- Silvestro, J y Zubiri, M. 2008 Convergencia oblicua: modelo estructural alternativo para la Dorsal Neuquina (39°S), Neuquén. *Revista Asociación Geológica Argentina*, 63: 49-64.
- Spalletti, L.A., Franzese, J., Mateos, S.D. y Schwarz, E. 2000. Sequence stratigraphy of a tidally dominated carbonate siliciclastic ramp; the Tithonian-Early Berriasian of the Southern Neuquén Basin, Argentina. *Journal of the Geological Society* 157: 433-446.
- Spalletti, L.A., Franzese, J.R., Veiga, G.D. y Schwarz, E. 2005. The Mesozoic evolution of the Neuquén Basin and its relationship with the history of Western Gondwana. 12° Gondwana Conference, Abstracts: 343pp. Mendoza.
- Spila, M.V., Pemberton, S.G. y Sinclair, I.K. 2005. Comparison of marine and brackish/stressed ichnological signatures in the Ben Nevis and Avalon Formations, Jeanne d'Arc Basin. In *Petroleum Resources and Reservoirs of the Grand Banks, Eastern Canadian Margin*, (ed.) Hiscott, R.N., Pulham, A.J. Geological Association of Canada Special Paper, 43: 73–94.
- Stal, L.J. 2001. Coastal microbial mats: the physiology of a small-scale ecosystem. *South African Journal of Botany* 67: 399-410.
- Stal, L.J. 2010. Microphytobenthos as a biogeomorphological force in intertidal sediment stabilization. *Ecological Engineering*, 36: 236-245.
- Tunik, M.A., Folguera, A., Naipauer, M., Pimentel, M. y Ramos, V. 2010. Early uplift and orogenic deformation in the Neuquén basin: Constraints on the andean uplift from U-Pb and Hf isotopic data of detrital zircons. *Tectonophysics*, 489. 257-273.

- Uliana, M.A. y Biddle, K.T. 1988. Mesozoic-Cenozoic paleogeographic and geodynamic evolution of Southern South América. *Revista Brasileira de Geociencias*, 48: 172-190.
- Uliana, M.A., Biddle, K.T. y Cerdan, J. 1989. Mesozoic extension and the formation of Argentine sedimentary basin. In: Tankard, A.J., Balkwill H.R. (ed.). *Extensional Tectonics and Stratigraphy of the North Atlantic Margins*. American Association of Petroleum Geology Memoirs, 46: 509- 614.
- Veiga, G.D., Howell, J.A. y Strömbäck, A., 2005. Anatomy of a mixed marine/non-marine lowstand wedge in a ramp setting. The record of a Barremian/Aptian complex relative sea-level fall in Central Neuquen Basin, Argentina. In: Veiga, G.D., Spalletti, L. A., Howell J.A. and Schwarz, E. (ed.), *The Neuquen Basin: A Case Study in Sequence Stratigraphy and Basin Dynamics*. Geological Society, London, Special Publications, volume 252: 139–162.
- Vergani, G.D., Tankard, A.J., Belotti, H.J. y Welsink, H.J. 1995. Tectonic evolution and paleogeography of the Neuquen Basin, Argentina. In Tankard, A. J., Suarez, R., Welsink, H. J. (ed.). *Petroleum Basins of South America*. American Association of Petroleum Geologists Memoir 62: 383-402.
- Vicente, J-C. 2005. Dynamic paleogeography of the Jurassic Andean Basin: pattern of transgression and localisation of main straits through the magmatic arc. *Revista de la Asociación Geológica Argentina*, 60. pp. 221-250.
- Weaver, C. 1931. Paleontology of the Jurassic and Cretaceous of west central Argentina. University of Washington, Memoir 1: 1-469. Seattle.
- Weleschuk, Z.P. y Dashtgard, S.E. 2019. Evolution of an ancient (Lower Cretaceous) marginal-marine system from tide-dominated to wave-dominated deposition, McMurray Formation. *Sedimentology*, 66: 2354-2391.
- Wetzel, A., Carmona, N.B. y Ponce, J.J. 2014. Tidal signature recorded in burrow fill. *Sedimentology*, 61, 5: 1198–1210.
- Yrigoyen, M.R. 1991. Hydrocarbon resources of Argentina. World Petroleum Congress. *Petrotecnia Special Issue 13: 38-54*. Buenos Aires.

- Zavala, C.A. 2002. El contacto entre los Grupos Cuyo y Lotena (Jurásico) en la Sierra de la Vaca Muerta. Cuenca Neuquina, Argentina. En: Cabaleri, N. et al. (Eds.). 15° Congreso Geológico Argentino, Actas 1: 711-715. El Calafate.
- Zavala, C.A. y Freije, H. 2002. Cuñas clásticas jurásicas vinculadas a la Dorsal de Huíncul. Un ejemplo del área de Picún Leufú. Cuenca Neuquina, Argentina. 5° Congreso de Exploración y Desarrollo de Hidrocarburos. Mar del Plata.
- Zavala C.A., Franzese J., Spalletti L., Gómez Pérez I. y Macdonald D. 2003. Tectonic and paleoenvironmental evolution of Mesozoic sedimentary basins along the Andean foothills of Argentina (32-54°S). *Journal of South American Earth Sciences* 16: 81-90.
- Zeller, M., Verwer, K., Eberli, G. P., Massaferro, J. L., Schwarz, E. y Spalletti, L. 2015. Depositional controls on mixed carbonate–siliciclastic cycles and sequences on gently inclined shelf profiles. *Sedimentology*, 62: 2009-2037.