



Universidad de Oviedo

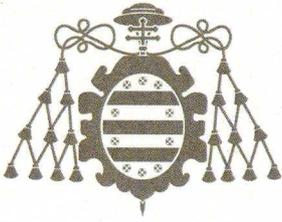
Máster en Recursos Geológicos e Ingeniería geológica

Trabajo fin de máster

Caracterización sedimentológica a partir de ripios  
de sondeo de los materiales del Grupo Cuyo  
(Cuenca de Neuquén, Argentina)

Jordi Cerezo Mármol

Julio 2016



## Máster en Recursos Geológicos e Ingeniería Geológica

Universidad de Oviedo



ASTURIAS  
CAMPUS DE EXCELENCIA  
INTERNACIONAL  
AD FUTURUM

D. Jordi Cerezo Mármol, autor del Trabajo Fin de Máster titulado “Caracterización sedimentológica a partir de ripios de sondeo de los materiales del Grupo Cuyo (Cuenca de Neuquén, Argentina)”, confirma que es un trabajo original y solicita su presentación en el Máster Universitario Recursos Geológicos e Ingeniería Geológica de la Universidad de Oviedo.

En Oviedo, a 13 de Julio de 2016

Fdo. Jordi Cerezo Mármol

El Dr. Luis Pedro Fernández González del Departamento de Geología de la Universidad de Oviedo, confirma que ha tutelado el trabajo “Caracterización sedimentológica a partir de ripios de sondeo de los materiales del Grupo Cuyo (Cuenca de Neuquén, Argentina)”, realizado por D. Jordi Cerezo Mármol, y autoriza su presentación y defensa como Trabajo Fin de Máster en el Máster Universitario en Recursos Geológicos e Ingeniería Geológica de la Universidad de Oviedo.

En Oviedo, a 13 de Julio de 2016

Fdo. Luis Pedro Fernández González

## **Agradecimientos**

Este trabajo ha sido realizado en el seno del proyecto FUO-EM-271-15 firmado entre la empresa YPF y la Fundación Universidad de Oviedo.

En primer lugar quiero agradecer a YPF por darme la ocasión de hacer el trabajo de fin de máster con datos de sus yacimientos, por proporcionar los rípos, diagráfias de sondeo y paneles sísmicos, además de por toda la ayuda que me ha sido prestada desde allí, tanto directa como indirectamente.

A David Giunta, tanto por sus prontas respuestas a las cuestiones que se le planteaban como por sus mensajes de apoyo y motivación.

También a Longhorn “Taury” Smith, de Smith Stratigraphic L.L.C., por permitir que se usara su metodología y compartir sus conocimientos para responder a todas las cuestiones que han ido saliendo por el camino.

Agradezco especialmente al director de este trabajo fin de máster, Luis Pedro Fernández por saber guiarme durante este año para realizar este trabajo, por sus esclarecedoras explicaciones y su paciencia ante mis infinitas dudas. También por todos sus consejos y las horas dedicadas a comparar resultados con el fin de mejorar los míos.

A Josep Poblet, que me ha echado una mano en las cuestiones que he necesitado. A Isabel Moriano por sus mensajes de apoyo estos últimos meses.

Agradezco al área de Estratigrafía por acogerme en el laboratorio y en salidas de campo con un ambiente acogedor y agradable.

A mis dos italianos, Simone y Fabio, con los que he compartido grandes momentos dentro pero sobretodo fuera del laboratorio. Por sus clases de geología italiana y las largas charlas sobre proyectos pasados, presentes y futuros.

No puedo olvidar a mis compañeros de viaje, con los que he estado viviendo durante casi dos años y con los que he pasado muy buenos momentos. Por todas las canciones aprendidas y las batallas electorales, pero también por los días de monte y las guerras por quién ganaba la partida.

A los amigos de toda la vida, que siempre tienen un hueco para cuando el “asturiano” vuelve a casa. También a esas nuevas amistades, mis dos asturianos favoritos, a los que he tenido el placer de conocer y que sé que siempre estarán ahí para comer un buen cachopo. Y a Gisela, con la que tengo siempre quiero compartir un café *hipster*.

A Enci, gracias por aguantar mis llamadas de crisis, por estar siempre ahí y animarme a seguir a pesar de lo difícil que pueda parecer. A mi hermana, por sus visitas fugaces, sus mensajes de apoyo, por su visión siempre positiva de los problemas, y las eternas llamadas de teléfono.

Por último, aunque sin duda no menos importantes, a toda mi familia, aunque muy especialmente a mis padres, no solo por todo su apoyo años atrás para escoger la carrera que más me gustaba, sino también por su último esfuerzo para ayudarme a terminar mi formación lejos de casa.

## Índice

Abstract.....	4
Resumen.....	6
1. Introducción.....	8
1.1. Objetivos.....	8
1.2. Situación geográfica.....	9
1.3. Contexto geológico.....	9
1.4. Estratigrafía.....	13
1.4.1. Estratigrafía del Grupo Cuyo.....	16
2. Metodología.....	19
2.1. Preparación de muestras.....	20
2.2. Estudios realizados.....	21
2.3. Diagrafías.....	24
2.4. Fiabilidad de los resultados y poder de resolución.....	27
3. Resultados.....	30
3.1. Descripción de los componentes.....	30
3.1.1. Areniscas y conglomerados.....	30
3.1.1.1. Fragmentos de areniscas.....	31
3.1.1.2. Granos sueltos.....	34
3.1.2. Limolitas.....	35
3.1.3. Lutitas y lutitas limosas.....	35
3.1.4. Lutitas y lutitas limosas ricas en materia orgánica.....	36
3.1.5. Calizas.....	37
3.1.6. Rocas volcánicas.....	37
3.1.7. Otros componentes.....	37
3.1.7.1. Bioclastos.....	37
3.1.7.2. Piritas y materia orgánica (bitumen).....	37
3.1.7.3. Cementos carbonatados.....	37
3.2. Distribución de los componentes en los dos pozos.....	38
3.2.1. Tipos de areniscas.....	38

3.2.2. Lutitas.....	38
3.3. Columna estratigráfica.....	42
3.4. Estratigrafía.....	44
3.4.1. Pozo CuMa-par.....	44
3.4.2. Pozo CuMa-impar.....	45
4. Discusión de los resultados.....	47
4.1. El encuadre en la litoestratigrafía de la cuenca.....	47
4.2. Correlación entre ambos pozos.....	47
4.3 Implicaciones sedimentológicas.....	51
5. Conclusiones.....	53
6. Bibliografía.....	56

## **Abstract**

Data over reservoir properties in E&P for hydrocarbons almost completely rely on indirect information (seismics and well logs). Direct observation of rocks is usually limited to the examination of drill cuttings by mudloggers. Well-core and outcrop data, much more complete and objective, are mostly out of reach due to lack of availability and to time and cost constrains.

In this work, a valuable and tested method developed by T. Smith (Smith Stratigraphic) is applied to the study of the cutting of two proprietary wells (YPF) from the Neuquén basin (Argentina). The method consists in studying stained thin sections from drill cuttings under the transmitted-light polarizing microscope. The data obtained are introduced in an Excel spreadsheet built with macros, which produces a series of parameters and graphics accounting for the most relevant petrographic and textural features, with the exception of porosity, poorly preserved in cuttings. The resulting textural and petrographic graphics (logs) are then compared with well logs (GR, neutron porosity, density, PEF) tested for reliability. This procedure results in a stratigraphic log with a degree of accuracy (resolution) and objectivity that makes this method unrivalled to cheaply and rapidly produce valuable data of the drilled succession. 3D data integration over a region by means of other wells and seismics would result in a fairly complete knowledge of key lithologic and stratigraphic reservoir properties.

The study has been done on the drill cuttings of two wells, 3 km apart, located in a YPF prospect of the Huincul Arch (Neuquén basin, Argentina). The stratigraphic interval selected, Jurassic in age, comprises the uppermost strata of the Precuyo Group, the Los Molles and Lajas formations (Cuyo Group) and the basal strata of the unconformable Lotena Formation. These units form a petroleum system with source rock (Los Molles) and reservoir rocks and seals (Lajas and Lotena)

The above-described method was implemented with some minor adaptations to the particular features of the rocks studied, and with the experience gained, some others can be proposed for his kind of successions. These features pertain mainly to the high abundance of feldspars and igneous (mainly volcanic) lithics in the sandstones – well averaged content of feldspars and igneous lithic is 3% and 10%, respectively. Lithic, feldspar, chert and quartz sand grains were counted separately. Also, several types of organic-rich shales were distinguished and counted separately. Other common lithologies are siltstones, shales – red and grey shales were discriminated – and scarce limestones. Due to the size of drill cuttings, very coarse sandstones and conglomerates are destroyed and not preserved.

Several units were distinguished on the basis of the data obtained. These are six units in the well CuMa-par (CuMa-even) and five units in the well CuMa-impar (CuMa-odd). Of these, the three lower units are common to both wells. These units are as follows:

Unit 1 comprises volcanics, limestones and shales and siltstones and is interpreted to belong to the lower Los Molles strata and the underlying Precuyo volcanics and vulcaniclastics.

Unit 2 is made of a coarsening-upward succession of organic-rich shales, shales, silty shales and siltstones. Some limestones and volcanics and several, thin, apparently sharp-bounded relatively coarse sandstone units were detected. This unit forms the bulk of Los Molles Formation.

Unit 3 is mainly made mostly of sandstones with a continuation of the coarsening-upward trend from below. It forms the lower Lajas strata.

Units 4–6 (CuMa-even) and 4–5 (CuMa-odd) consist of an alternation of sandstone-rich and shale-rich intervals with no clear vertical stacking patterns. These units form the middle and upper Lajas strata with the exception of the CuMa-even Unit 6 and the uppermost part of the CuMa-odd Unit 5, which belong to the Lotena Formation.

A systematic comparison between the cutting data and the well logs to produce the stratigraphic log according to the method used was not possible. The high content in lithics and feldspars often made the GR log poorly distinguish between sandstone and shale. Also, collapse of well walls also led to frequent poor density-tool readings. Therefore, composition graphics were only compared with the well logs in some selected cases.

A correlation between both wells in a seismic section, with the regional unconformities marked, was provided by YPF. The cross section shows a regional downlap of the Cuyo strata on the Precuyo beds. Above this basal unconformity, a basal seismic facies unit is defined. It consists of clinoformal, high-amplitude, continuous reflectors and features the Los Molles Formation architecture as a large-scale prodeltaic muddy wedge. These reflectors pass updip into (1) subhorizontal, discontinuous moderate- to low-amplitude reflectors with (2) some shingled-pattern units that downdip merge with the underlying progradational seismic facies. This interval corresponds to the lower Lajas strata. It would represent a delta-front to delta-plain strataset with the shingled units recording shallow-water delta units, which would finally reach the shelf edge and become a deep-water delta. Finally, the remaining succession consists of subhorizontal reflectors with variable amplitude and continuity. It accounts for the middle and upper Lajas strata and the basal Lotena beds and would largely correspond to delta plain units and, in the upper part, to fluvial deposits.

Despite the nature of the collected data does not allow for a detailed sedimentologic study, some general observations can be done to add to the type of sedimentary systems that built the succession of the Los Molles-Lajas fan-delta system. Several authors have concluded that both the delta-front and delta-plain deposits and the deep-water turbidites cropping out in the western part of the Neuquén basin, chiefly in the Las Jardineras area, show diagnostic features of having been deposited in a flood-dominated system. In this sense, the relatively coarse-grained sandstone units that are found in the Unit 2 (Los Molles Formation) could represent turbidite deposits related to these processes. Nevertheless, more data are necessary to solidly back any sedimentological interpretation.

## Resumen

La definición de la calidad y extensión de un almacén depende de la obtención de datos objetivos y precisos. En la E&P de hidrocarburos, la observación directa de las rocas, en afloramiento o en testigos de sondeo, está condicionada por la disponibilidad, el tiempo y los costos, y generalmente la información procede de ripios de sondeo, diagráfias y paneles sísmicos. En este trabajo, aplicado un intervalo estratigráfico de la cuenca Neuquina con datos propiedad YPF, se sigue una metodología, desarrollada por T. Smith (Smith Stratigraphic), para obtener la máxima información del análisis petrográfico de los ripios de sondeo combinado con los datos de diagráfias (GR, densidad, factor fotoeléctrico, neutrón, sónico y diámetro del pozo) y paneles sísmicos. A esta metodología, que proporciona un conjunto muy completo de datos, con la excepción de la porosidad, inherentemente mal representada en los ripios, se le han introducido algunas modificaciones menores para atender a las características de las sucesiones estudiadas. La experiencia ganada permite por otra parte proponer otras adiciones menores para este tipo de sucesiones.

El estudio se ha realizado en dos pozos vecinos (CuMa-par y CuMa-impar), separados 3 kms y perforados por YPF en la sucesión del Grupo Cuyo y Fm. Lotena (Jurásico; dorsal de Huincul, cuenca Neuquina, Argentina). Estas unidades constituyen un sistema petrolífero completo con rocas madre (Los Molles) y almacenes y sellos (Lajas y Lotena). Los ripios abarcan intervalos de 3 m recogidos cada 6 m y han sido estudiados en lámina delgada al microscopio petrográfico para determinar su composición petrográfica y textura. Los datos se han completado con los de las diagráfias existentes para confeccionar una columna estratigráfica sintética y se han correlacionado ambos pozos con la interpretación de un panel sísmico.

Los resultados muestran una sucesión constituida por lutitas grises, lutitas ricas en materia orgánica, limolitas y areniscas. Dada la naturaleza de los ripios, las areniscas más gruesas y los conglomerados que existen en la sucesión no pueden ser registrados. La composición de las areniscas varía entre cuarciarenitas y litarenitas con fragmentos de roca volcánicos a arcosas (el porcentaje medio de fragmentos de roca es del 10% y el de los feldespatos del 3%).

Se han distinguido diversas unidades en cada pozo en base a la composición litológica y a los modos de apilamiento vertical, seis en el caso de CuMa-par y cinco en el de CuMa-impar. Las tres primeras unidades son reconocibles en ambos pozos. La unidad basal corresponde en parte al Grupo Precuyo y consta de rocas volcánicas y calizas margosas. La segunda unidad está compuesta principalmente por lutitas ricas en materia orgánica en la base y lutitas grises con limolitas formando una secuencia granocreciente, con algunos niveles areniscosos posiblemente turbidíticos, y representaría una cuña progradante de talud deltaico constituida por la Formación Los Molles. La tercera unidad, consta fundamentalmente de areniscas y registra una tendencia granocreciente, continuación de la anterior, y representaría principalmente depósitos de frente deltaico y llanura deltaica de la Formación Lajas. El resto de las unidades, formadas por alternancias de niveles ricos en areniscas con otros más lutíticos, sin tendencias verticales definidas corresponderían a los depósitos de llanura deltaica de la Formación Lajas, con la excepción de la sexta unidad en el pozo CuMa-

par y la parte superior de la quinta en el CuMa-impar. Estos últimos intervalos formarían parte de los depósitos fluviales de la Formación Lotena.

Se han comparado diferentes diagráfias de sondeo con los datos de los ripios para obtener una columna estratigráfica sintética de un intervalo concreto de CuMa-par. La comparación sistemática de ambos conjuntos de datos prevista en el método de T. Smith se ha visto dificultada por la composición de las areniscas, ricas en fragmentos de roca volcánicos y feldespatos, que limitan el valor diagnóstico de las diagráfias, principalmente de la de emisión natural de rayos gamma (GR) así como por problemas en la estabilidad de las paredes del pozo que frecuentemente daban lugar a lecturas erróneas de la sonda de densidad.

La correlación entre ambos pozos proporcionada por YPF sobre un panel sísmico y en la que se observan varias discontinuidades, definidas a nivel regional en el subsuelo, permite observar una relación de *downlap* sobre el Grupo Precuyo, sobre la que se desarrolla un primer conjunto de carácter clinoformal, con reflectores acusados y continuos que hacia techo se vuelven horizontales, discontinuos y peor definidos con algún intervalo de escaso espesor de reflectores inclinados que enlazaran con el intervalo clinoformal basal. Este conjunto inferior correspondería a los depósitos progradantes del talud deltaico (Los Molles) y frente deltaico cubierto por las capas basales de la llanura deltaica (Lajas). Los intervalos de escaso espesor y disposición oblicua progradante representarían deltas de aguas someras que en su progradación alcanzarían el borde de la plataforma para pasar a constituirse en deltas de aguas profundas.

Por encima se extiende ya un conjunto de reflectores horizontales de amplitud y continuidad variable que representarían los depósitos esencialmente de llanura deltaica de la Formación Lajas y, en el techo, las unidades basales fluviales de la Formación Lotena.

Pese a que la naturaleza del estudio no permite obtener datos sedimentológicos de detalle, los rasgos observados permiten aventurar que los depósitos relativamente gruesos observados entre las facies finas del talud deltaico de la Formación Los Molles, podrían corresponder a depósitos turbidíticos relacionados con avenidas, como ha sido interpretado por otros autores en los afloramientos situados en la parte O de la Cuenca Neuquina, en la región de Las Jardineras. No obstante sería necesario contar con un mayor volumen de datos para poder hacer alguna precisión fiable.

## 1. Introducción

### 1.1. Objetivos

La obtención de datos para la exploración y explotación de los recursos de hidrocarburos descansa principalmente en los métodos indirectos. La sísmica de reflexión y las diagráfias son los dos conjuntos de técnicas más utilizados. Mediante estas técnicas se miden diversas propiedades físicas de las rocas que informan sobre su composición, su textura, que determina la porosidad y permeabilidad, y su contenido en fluidos (agua e hidrocarburos). La información así obtenida tiene carácter indirecto y está condicionada en su grado de exactitud por diversos factores. Los únicos datos directos y objetivos son los proporcionados por el examen de los ripios de sondeo (*cuttings*), obtenidos de modo continuo a lo largo de todo el proceso de perforación del pozo, y de los testigos de sondeo, cuya extracción se limita a intervalos seleccionados por su coste. Mientras que la información de los testigos de sondeo es completa sobre los intervalos cortados, la de los ripios es aproximada y fragmentaria, condicionada por factores como el tamaño de los ripios, la pérdida de material, la contaminación por los lodos de sondeos o la recirculación y contaminación por fragmentos de roca procedentes de otros niveles estratigráficos. Su estudio, realizado por los *mudloggers*, mediante observación macroscópica, puede completarse mediante su montaje en láminas delgadas y estudio microscópico.

En este trabajo se realiza un estudio de esta naturaleza aplicando una metodología innovadora al tratamiento de las muestras de los ripios y al procesamiento de los datos obtenidos. Esta metodología ha sido desarrollada por Longhorn (Taury) Smith de Smith Stratigraphic LLC y es aplicada por YPF en el estudio de los pozos de la cuenca de Neuquén, una de las cuencas petroleras más importantes de Argentina, en la que también se encuentra el yacimiento de la Formación Vaca Muerta, el más importante de Argentina. Esta importancia se traduce en una exploración exhaustiva y en la necesidad de obtener una comprensión lo más completa posible de la estratigrafía de la estructura del subsuelo y de la historia geológica.

El estudio se ha realizado sobre los ripios extraídos de dos pozos separados por casi 3 kms y afectan a un intervalo de serie de más de 1.500 metros de espesor, seleccionado en la sucesión de la Cuenca Neuquina. Este intervalo comprende, de muro a techo, las formaciones Los Molles y Lajas y la parte inferior de la Formación Lotena (Jurásico inferior y medio). Estas formaciones son de gran importancia en la Cuenca Neuquina, en la que contienen un nivel de rocas madre (Fm. Los Molles), formada por kerógenos de tipo II a III, con un contenido en carbono orgánico total (TOC) del 0,5 al 2%, y distintos intervalos de reservorios (Fms. Lajas y Lotena), formando el yacimiento de Cupén Mahuida. Este yacimiento se localiza en un anticlinal asimétrico de más de 40 km<sup>2</sup> de extensión de dirección E-O conocido como anticlinal de Cupén, el cual se ha situado en la ventana del gas seco.

El trabajo muestra la aplicación de aquella metodología a los ripios de los dos pozos. Si bien por motivos operativos el procedimiento seguido se adhiere a la mencionada

metodología, se proponen algunas modificaciones a la misma como respuesta a las particularidades de los pozos estudiados.

El trabajo realizado es de índole principalmente estratigráfica si bien, en función de las características de los ambientes de depósito y del grado de detalle necesario permite establecer conclusiones de índole sedimentológica, la interpretación estratigráfica obtenida a partir del estudio de los ripios de sondeo se ha complementado con la obtenida por diversos tipos de diagráfias, principalmente la emisión natural de rayos gamma (GR), el potencial espontáneo (SP), las diagráfias de neutrón (NPHI), densidad (RHOB), lito-densidad o factor fotoeléctrico (PEF) y sónico (DT).

## 1.2. Situación geográfica

La Cuenca Neuquina se encuentra al oeste de Argentina, en la Región Patagónica, más concretamente en la Provincia del Neuquén (Fig. 1). Es una cuenca con una extensión de más de 200.000 km<sup>2</sup> (Yrigoyen, 1991) y de forma triangular en planta, limitada al norte por la Sierra Pintada, de orientación NE-SO; al sur por el macizo norpatagónico, con orientación NE-SO, y al oeste por la Cordillera de los Andes, con orientación N-S (Fig. 2). Es una zona petrolera de gran extensión que abarca toda la provincia homónima, además de los sectores occidentales de las provincias de La Pampa y Río Negro y el meridional de la de Mendoza. Se encuentra entre dos zonas de geología muy diferente, al este una zona cratónica y al oeste un arco volcánico.

El área de estudio se encuentra en el yacimiento de Cupén Mahuida y los pozos de los que proceden los ripios se localizan en Sierra Barrosa, al O de la localidad de Neuquén y al S del Embalse de los Barreales.

## 1.3. Contexto Geológico

La Cuenca Neuquina (Fig. 2) es una cuenca de retroarco desarrollada sobre corteza continental. Su origen se debió al colapso termo-tectónico de un arco magmático durante el Triásico tardío y su relleno se produjo durante el Jurásico y el Cretácico (Mpodosis y Ramos, 1989). El registro sedimentario se encuentra principalmente en el subsuelo, aflorando principalmente en la parte occidental de la cuenca. Su espesor es de aproximadamente 7 km (Arregui et al, 2011), representando un lapso de casi 200 millones de años que se extiende a lo largo del Mesozoico y el Cenozoico (Vergani et al. 1995).



Figura 1 Localización de la provincia de Neuquén, Argentina.





carbonatados de la parte basal de la Formación Los Molles y en la progradación de sistemas de *fan deltas* alimentados desde S y SE (Fig. 3.2-3.4; Gómez Omil et al. 2002) que generaron la sucesión objeto de este estudio (Grupo Cuyo y su equivalente lateral, la Formación Challacó), como se detallará a continuación, culminando la sucesión con unos depósitos evaporíticos por el cierre de la cuenca (Fig. 3.5). Las discordancias indican que la sedimentación de estos depósitos estuvo controlada por la subsidencia termal provocada por las fallas distensivas infrayacentes (Leanza, 1990; Silvestro y Zubiri, 2008).

A partir de ese momento, y durante el resto del Mesozoico y el Terciario, la evolución de la cuenca estuvo controlada por la dinámica del margen convergente pacífico, pudiéndose diferenciar cuatro estadios denominados Aluk temprano, Aluk tardío, Farallón y Nazca (Fig. 3, tectónica). El primer estadio, Aluk temprano, en referencia a la placa subducente en el margen pacífico, se produjo entre el Toarciense (Lias) y el Valangiense (Cretácico inferior) y registra una inversión tectónica, con esfuerzos en dirección NNO-SSE, y con la deformación concentrada en una zona de sutura situada entre la microplaca de Patagonia y Gondwana occidental. Esta sutura dividía dos zonas de reología muy distinta: al sur el macizo norpatagónico, actuando como un contrafuerte de rocas metamórficas y plutónicas pertenecientes a la zona axial de los Gondwánides (Mosquera y Ramos, 2009, 2011), y una corteza más anisótropa y delgada al norte (Silvestro y Zubiri, 2008), en la que se producen estructuras de deformación por convergencia oblicua.

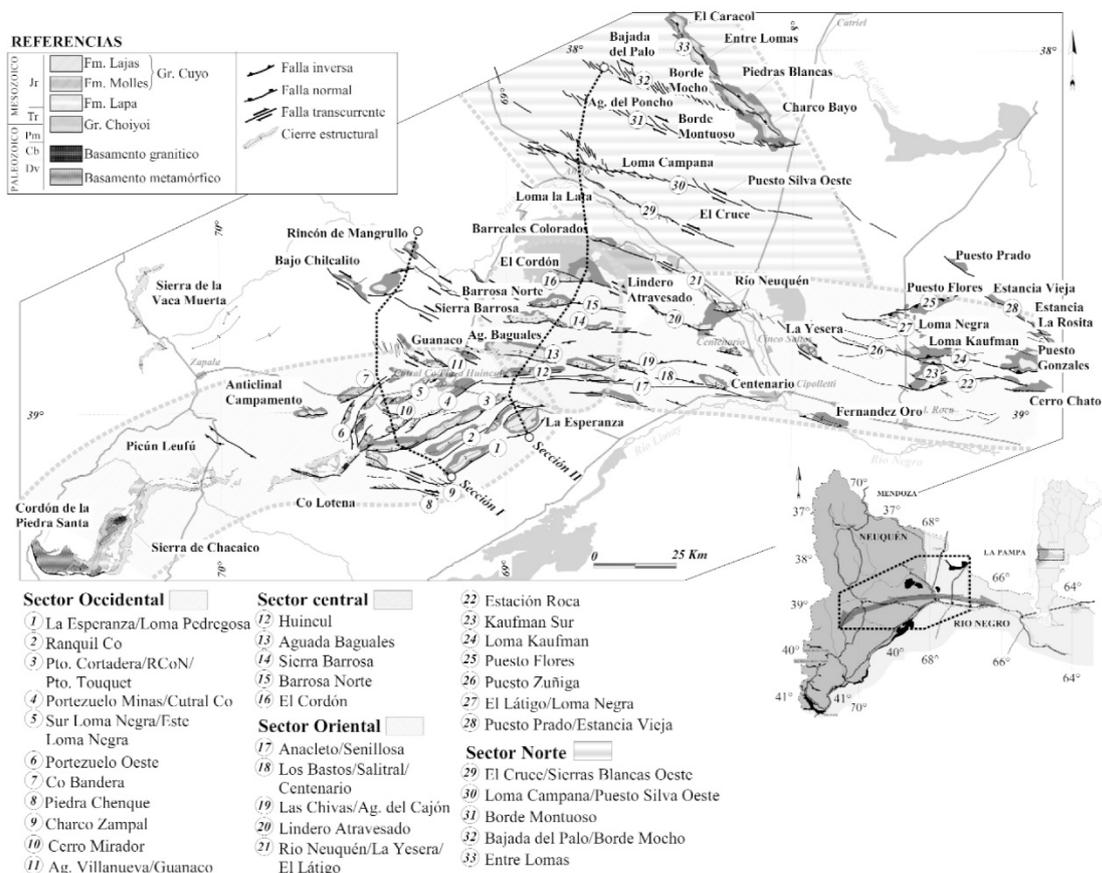


Figura. 4 Principales lineamientos estructurales del subsuelo y afloramientos relacionados a la dorsal de Huincul (Silvestro y Zubiri, 2008).

Durante este episodio compresivo también se produjeron algunas estructuras transcurrentes, con un avance del SE al NO. Asociados a este episodio de deformación intraplaca, en la dorsal de Huincul se diferencian cuatro sectores, definidos por sus diferentes estilos estructurales (Figura 4). El sector occidental se caracteriza por fallas inversas de rumbo NE-SO que pueden estar relacionadas con la reactivación de fallas gondwánicas (Silvestro y Zubiri, 2008). En el sector central, donde se encuentran la Sierra Barrosa y los pozos estudiados, existen estructuras compresivas con orientación ONO-ESE (Silvestro y Zubiri, 2008); en el sector oriental en cambio aparecen estructuras transpresivas con la misma orientación. Finalmente, la zona norte presenta estructuras transcurrentes (Silvestro y Zubiri, 2008). La orientación de estas estructuras es paralela a la de las estructuras gondwánicas del subsuelo.

Durante el estadio Aluk tardío (Fig. 3, tectónica), que se extiende entre el Valangiense y el Albiense (Cretácico inferior), se produjo un giro levógiro de la convergencia del Pacífico, cambiando levemente la dirección de los esfuerzos. Posteriormente, durante el estadio Farallón (Cretácico superior), se reactivaron las zona axial y occidental del sistema Huincul y se produjo un desarrollo incipiente del cinturón de pliegues y cabalgamientos de Agrio.

Por último, el estadio de Nazca (Fig. 3, tectónica) está relacionado con dos eventos puntuales durante el Terciario. El primero, y de mayor impacto, se produjo durante el Mioceno y se tradujo en el desarrollo del cinturón de pliegues y cabalgamientos de Agrio (Zamora Balcarce et al., 2006), junto con la exhumación de la zona oriental de la dorsal, la reactivación de estructuras en la zona axial y el levantamiento de los Andes (Groeber, 1929; Herrero Ducloux, 1946; Vergani et al., 1995; Mosquera, 2008, p. 385-396). Cabe destacar que estos esfuerzos disminuyen debido al desmembramiento de la Placa de Farallón, resultando las placas de Cocos y de Nazca (Pardo Casas y Molnar, 1987; Somoza, 1998).

Durante el Plioceno, debido al cambio en la zona de subducción y al aumento de ángulo de colisión entre la Placa de Nazca y el continente, se produce un colapso extensional (Mosquera y Ramos, 2006).

#### **1.4. Estratigrafía**

Como se señaló en el apartado anterior, la sedimentación en la Cuenca Neuquina estuvo fuertemente controlada por la actividad tectónica desde el Triásico hasta el Neógeno, como atestiguan las discordancias que se encuentran en la sucesión (Figs. 3 y 5). Estas discordancias presentan magnitudes diversas y marcan eventos tectónicos de importancia variable. Las de carácter regional permiten separar tres grandes ciclos sedimentarios tras la fase de rift triásica que son denominados ciclos Jurásico, Andino y Riográndico (Fig. 3, ciclos sedimentarios), relacionables a grandes rasgos con los estadios tectónicos Aluk temprano, Aluk tardío y Farallón. Este trabajo se centra en parte de la sucesión del Ciclo Jurásico, constituida por el Grupo Cuyo.

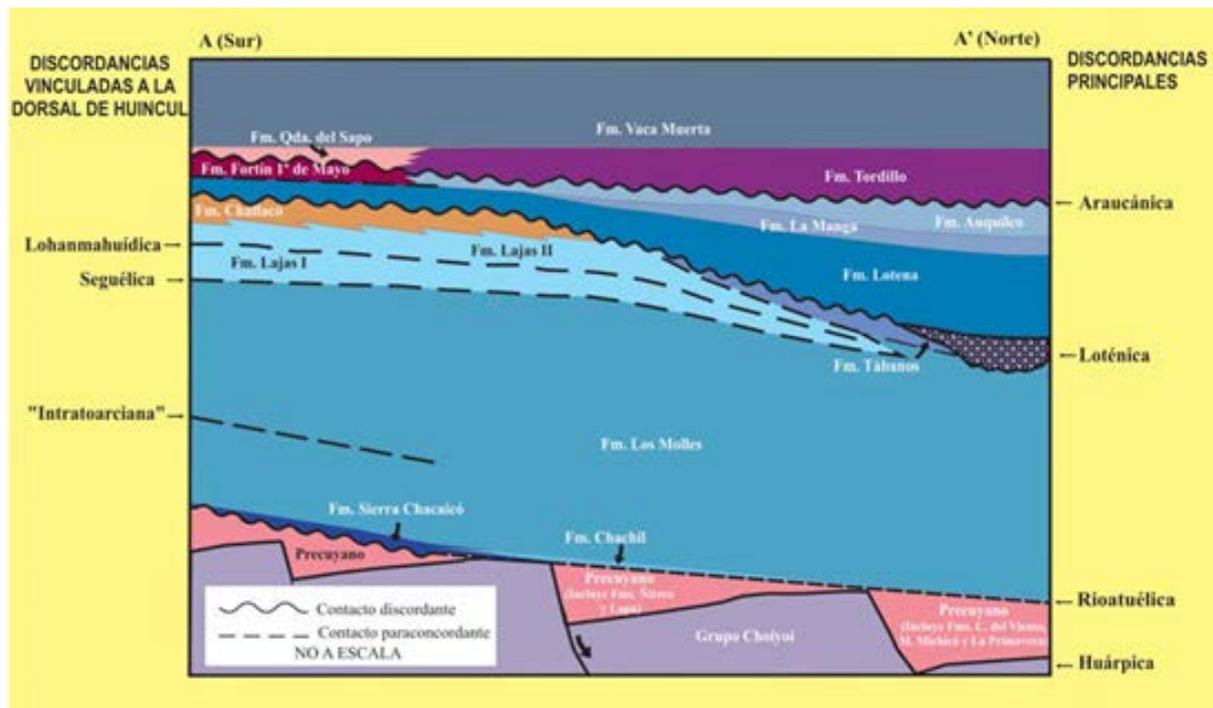


Figura 5. Esquema estratigráfico simplificado las principales discordancias en la Cuenca Neuquina a lo largo de una transecta S-N (Leanza, 2009).

La sucesión de la etapa de *rift* del Triásico que, como se avanzó en el apartado anterior, es conocida como Grupo Precuyo (Figs. 5 y 6) está limitada a su techo por la discordancia Intraliásica (Gulisano et al., 1984b). Esta sucesión se restringe a los depocentros generados durante la etapa de *rifting* y su espesor es variable quedando generalmente comprendido entre 500 y 700 metros, aunque llega a alcanzar máximos de 1500 m. Esta sucesión consta de depósitos vulcanoclásticos a volcánicos, de carácter submarino, con acusados cambios laterales de facies. Estos cambios laterales y las estructuras tectónicas determinan la existencia de numerosas trampas que hacen que el Grupo Precuyo actúe como una buena roca almacén (Gulisano, 1981; Gulisano et al., 1984a, Legarreta y Gulisano, 1989).

El ciclo Jurásico abarca una sucesión que se extiende desde el Hettangiense (201 Ma.) hasta el Oxfordiense superior (157 Ma.). A su techo está limitada por la discordancia Intramálmica y está afectada por discordancias, en general de envergadura menor. En ella se individualizan dos ciclos menores de carácter transgresivo-regresivo, los llamados subciclos Cuyano y Loteniano-Chacayano.

El subciclo Cuyano abarca desde el Hettangiense (201 Ma.) hasta el Calloviense medio (163 Ma.). Se dispone sobre los depósitos volcánicos y vulcanoclásticos del Grupo Precuyo mediante la discordancia Intraliásica (o Rioatuélica), antes mencionada, y a su techo está limitado por una discordancia de importancia regional, la discordancia Intracalloviana y está constituido por depósitos detríticos continentales (formaciones Punta Rosada y Challaco) o marinos (Grupo Cuyo).

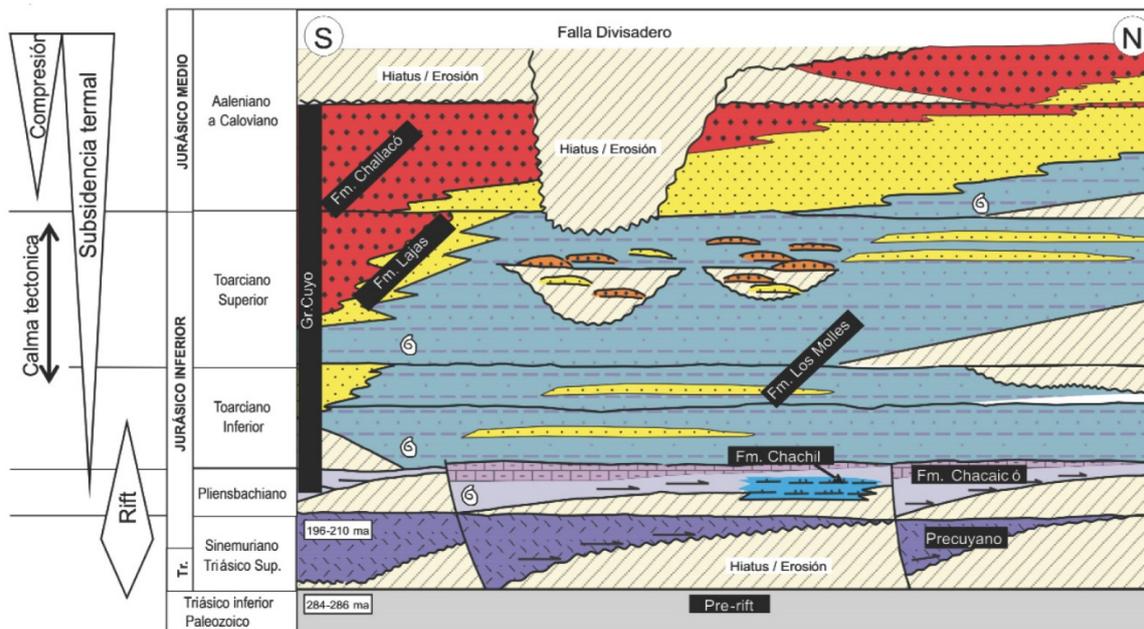


Figura 6. Síntesis litoestratigráfica de las principales formaciones y grupos en la Cuenca Neuquina y su relación con la tectónica (Pángaro et al, 2009).

El Grupo Cuyo (Dellapé et al., 1978) aflora en los sectores suroeste y oeste de la provincia, hasta el norte de la sierra de Vaca Muerta y registra la primera transgresión marina que afectó la Cuenca Neuquina, entrando desde el norte y avanzando en dirección sur (Gulisano y Gutiérrez Pleimling, 1995) y que se tradujo en el depósito de lutitas, areniscas, conglomerados y evaporitas. Su base ha sido datada gracias a su contenido fosilífero como Pliensbachense–Calloviense. En el Grupo Cuyo se distinguen, a grandes rasgos, dos unidades, una unidad transgresiva basal que se dispone sobre el Grupo Precuyo y una unidad progradante deltaica superior (Figs. 5 y 6). El episodio transgresivo está relacionado con el rift, y se dispone en solapamiento expansivo (*onlap*) rellenando primero depocentros aislados, y expandiéndose a continuación hasta cubrir toda la cuenca, alcanzando su máxima extensión durante el Toarciense y Aalenense. Posteriormente el nivel del mar disminuyó paulatinamente hasta el Bathoniense y Calloviense inferior, cuando se instaló un régimen fluvial a litoral, momento en el que se depositan sedimentos evaporíticos en la zona central de la cuenca. La cuenca marina obtiene su mayor extensión durante el Pliensbaquiense (183–191 Ma.) y posteriormente va reduciéndose tamaño hasta que la restricción consiguiente permite la sedimentación de las evaporitas de la Formación Tábanos. En base a la estratigrafía secuencial se han podido diferenciar varias unidades dentro del grupo, las más importantes son las formaciones Los Molles y Lajas (Riccardi y Gulisano, 1992; Gulisano et al., 1984; Legarreta y Gulisano, 1989; Gulisano y Gutiérrez Pleimling, 1995; Zavala, 1993; Limeres, 1996 y Legarreta y Uliana, 1996). El Grupo Cuyo es una importante unidad productora de hidrocarburos en la zona de la Dorsal de Huincul, conteniendo todos los elementos que constituyen un sistema petrolífero completo junto con la Formación Lotena suprayacente. La roca madre está situada en la parte baja de la sucesión (Formación Los Molles) y está cubierta por un conjunto de areniscas con intercalaciones de lutitas que pueden actuar como sello y

crear sucesivas trampas a lo largo de las formaciones Lajas y Lotena. Las areniscas de ambas formaciones actuarían como reservorio en zonas donde la porosidad sea mayor que en la zona de estudio, formando trampas de tipo mixto controladas por las estructuras tectónicas y por cambios laterales y verticales de facies.

El subciclo Loteniano-Chacayano, se dispone disconformemente (discordancia Intracalloviana) sobre el subciclo Cuyo y consta de muro a techo de los depósitos detríticos y carbonatados de las formaciones Lotena y Barda Negra, que representan los episodios transgresivo y regresivo del ciclo, respectivamente (Fig. 5). La sucesión en este subciclo culmina también con depósitos evaporíticos (Formación Auquilco).

Tras un episodio de fuerte deformación, registrada en forma de discordancia (discordancia Intramálmica) comienza el Ciclo Andino que incluye al Grupo Mendoza. Este ciclo consta de varios ciclos menores transgresivo-regresivos. El ciclo basal comienza con los depósitos continentales de la Formación Tordillo, a cuyo techo, debido a una transgresión que se produjo durante el Titoniense, se depositó una sucesión carbonatada de carácter somerizante. Esta sucesión somerizante consta de muro a techo de las formaciones Vaca Muerta, Loma Montosa y Quintuco. El siguiente ciclo transgresivo-regresivo está integrado por depósitos continentales detríticos (Formación Mulichinco) cubiertos por dos secuencias progradantes (formaciones Agrio y Centenario), separadas por un episodio continental (Miembro Avile). La sucesión culmina con los depósitos continentales, marinos someros y evaporíticos, de las formaciones Huitrin y Rayoso, pertenecientes al Grupo Rayoso.

Posteriormente, un nuevo evento tectónico da lugar a la discordancia Intrasenoniense sobre la que se dispone Ciclo Riográndico, que comienza con el Grupo Neuquén, de edad Cretácico Superior hasta Maastrichtiense-Paleoceno, muy influenciada por sedimentos marinos.

Por último, la cuenca siguió rellenándose desde el Terciario medio hasta el Cuaternario con materiales piroclásticos alternando con sedimentos continentales.

#### **1.4.1. Estratigrafía del Grupo Cuyo**

La Formación Los Molles (Weaver, 1931; Pliensbachense–Aaliense) constituye la parte inferior del Grupo Cuyo (Figs. 5. y 6). Aflora en los flancos del anticlinal de Chacaico, hasta el cerro de Lohan Mahuida, al suroeste de la provincia de Neuquén, en los anticlinales de Picún Leufú y Cerro Lotena y en la cordillera del Viento (Fig. 4). El espesor de esta formación es variable, llegando a superar los 2000 metros en la zona central de la cuenca (Gómez Omil et al., 2002).

Esta formación está depositada discordantemente sobre los depósitos volcánicos y piroclásticos del Grupo Precuyo mediante la discordancia Rioatúlica (Fig. 6) y consta de alternancias de lutitas grises y gris oscuras con limolitas, areniscas turbidíticas de grano fino a grueso y conglomerados relacionados con lóbulos turbidíticos (Gulisano & Gutiérrez – Pleimling, 1994; Burgess et al, 2000; Paim et al., 2008). En la parte basal, en algunos puntos, como en la zona de Catán Lil, se han observado intervalos muy silicificados demostrando que la actividad volcánica aún no había cesado. El

espesor de la formación es variable, existiendo fuertes cambios de espesor, especialmente en la zona de la dorsal de Huincul; esto ha sido relacionado con la subsidencia de depocentros aislados (Berdini et al., 2004, Pángaro et al., 2002, 2006; Gomez Omil et al., 2002; Vergani, 2005). Las lutitas de esta formación, tienen un alto contenido en materia orgánica y por tanto un potencial de producción de hidrocarburos elevado, especialmente en las regiones de engolfamiento y de la Dorsal de Huincul (Fig. 2) atestiguando un fondo marino reductor, llegando a ser anóxico en algunos puntos. Los contenidos oscilan en general entre el 1 y el 5%, llegando a valores del 9%. La variable topografía del fondo de la cuenca condicionaba en gran medida la trayectoria de los flujos, por lo que es de esperar que se encuentren cambios de importancia respecto a la cantidad de materia orgánica en las rocas. El contenido fosilífero es muy variado, rico en amonites y bivalvos (Riccardi et al., 1988a, 1988b; Riccardi, 2008), ictiosaurios y plesiosaurios (Gasparini et al. 1992) y en microfósiles (Ballent, 1987; Kielbowicz, 1987). En conjunto, la Formación Los Molles registra una sedimentación marina en un ambiente de profundidad variable, de poco profundo (Weaver, 1931) a profundo (Paim et al., 2008), de baja energía, al que episódicamente llegaban flujos de densidad que depositaban arenas.

El límite superior se conoce como discordancia Seguélica (Fig. 5) y se produce por la progradación de la Formación Las Lajas sobre la Formación Los Molles, ilustrada con la truncación de los estratos de la segunda bajo la primera (Freije et al., 2002). En algunas localidades se ha producido una fuerte erosión de los materiales que hay por encima de la Fm. Los Molles, disponiéndose sobre ella directamente el Grupo Neuquén, con un hiato de más de 70 Ma.

La Formación Lajas (Weaver, 1931; Bajociense-Calloviense temprano) aflora en la localidad de Lajas, su localidad tipo, en Cerro Lotena, en la Sierra de Chacaico y en Lohan Mahuida, entre otras. En general la Formación Lajas se dispone sobre la Formación Los Molles siendo cubierta a su vez por la Formación Challacó al Sur y por la Formación Tábanos al norte de Zapala (Figs. 5 y 6). Su espesor es variable entre 200 y casi 900 m en Cerro Lotena. Está formada por areniscas y areniscas arcósicas y en menor medida por lutitas oscuras y verdosas con abundantes restos carbonosos y por conglomerados, éstos más abundantes hacia techo. Éstas características están especialmente representadas en los últimos episodios, durante el Bajociense, en que el espacio de acomodación aumenta junto con un ascenso del aporte clástico, lo que se traduce como cuerpos arenosos de grandes dimensiones. Tiene un alto y variado contenido en fósiles (Lena y Hugo, 1997), con fauna marina de aguas templadas a cálidas como pelecípodos, trigonias, corales (Volkheimer, 1973) y amonites (Riccardi, 2008). La Formación Lajas ha sido interpretada como serie de unidades progradantes de ambientes marinos poco profundos, deltaicos y estuarios y es una de las unidades más importantes desde el punto de vista de la geología del petróleo a lo largo de la Dorsal de Huincul debido a sus buenas características como roca reservorio.

Dentro de esta formación se encuentra una discordancia importante que marca el límite entre dos subgrupos dentro de la formación Lajas. Esta discordancia, conocida como Lohanmahuídica (Fig. 5), es reconocible en muchos sectores debido a que los atributos de las rocas infrayacentes son muy parecidos a los de la Formación Los

Molles, mientras que las características de las que hay por encima son más parecidas a la Formación Challacó (equivalente continental de la Formación Lotena), de naturaleza fluviodeltaica. A pesar de ser discordancias importantes a nivel regional, tanto la discordancia Seguélica como la Lohanmahuídica tienen una continuidad limitada debido al paso de la Formación Lajas a la Formación Los Molles hacia el centro de la cuenca (como en Chacay Malahue o Agua Fría) (Figs. 5 y 6; Dellapé et al., 1979; Gulisano & Gutiérrez- Pleimling, 1995; Llambías y Leanza, 2005).

Las formaciones Challacó, Lajas y Los Molles están relacionadas genéticamente entre sí y representan los depósitos de un sistema sedimentario progradante hacia el N y NO (Figs. 3.2, 5 y 6) y compuesto por depósitos de alta energía de un fan delta (Challacó), depósitos costeros y deltaicos progradantes (Lajas) y depósitos marinos de talud deltaico, pie de talud y abanicos submarinos (Los Molles). El transporte desde las zonas continentales hasta las zonas profundas se daba a través de cañones alimentados por sistemas fluviales (Gómez Omil et al., 2002). Posteriormente la cuenca pasa a ser una cuenca marina endorreica donde sedimentan las evaporitas de la Formación Tábanos.

## 2. Metodología

Este estudio aplica un método desarrollado por Langhorne B. "Taury" Smith Jr (Smith Stratigraphic LLC) que, a través del estudio mediante microscopio petrográfico de los ripios de sondeo y de la comparación de estos datos con algunos tipos de diagráfias, principalmente de emisión natural de rayos gamma (GR), neutrón, densidad y factor fotoeléctrico, y con la sísmica de reflexión, busca obtener un conocimiento de las características petrográficas (textura y composición) de las rocas sedimentarias y de sus modos de apilamiento en la sucesión estratigráfica lo más completo y cercano posible a lo que proporcionaría el estudio directo de la roca, en afloramiento o mediante testigo de sondeo. El fin último es su aplicación a la arquitectura (geometría y conectividad) de los cuerpos sedimentarios y propiedades de los almacenes, rocas madre y sellos en un sistema petrolífero en la exploración y producción (E&P) de hidrocarburos.

Los ripios de sondeo (*drill cuttings*) son los fragmentos de roca triturada generados por el avance de la broca de perforación en un sondeo perforado por rotación, percusión o mediante barrenos. Estos fragmentos ascienden arrastrados por los lodos de perforación hasta la superficie donde son recogidos y limpiados con centrifugadoras, separadores ciclónicos o cedazos. Los lodos de perforación son un fluido de alta densidad que contiene partículas de distinta naturaleza (*lost circulation material*, LCM) para prevenir la pérdida de circulación. Los materiales usados para este fin son variados y dependen de cada caso concreto; entre ellos se encuentran fragmentos textiles, celofán, micas, fragmentos de calizas o fragmentos bioclásticos. En el proceso de limpieza, muchas de las partículas de estos materiales ajenos al pozo se separan de los ripios (ver Swanson, 1981 para más detalles).

Los ripios son tradicionalmente usados para reconstruir un registro aproximado de la sucesión de rocas cortada por el sondeo y, en el caso de una sucesión sedimentaria, permite reconocer a grandes rasgos los distintos paquetes de estratos que la constituyen. Esta tarea es realizada a pie de pozo por los *mud loggers* y usualmente permite la confección de una columna litológica general con la que se representan otras variables como porosidad de la roca, velocidad de perforación y contenido en gas (ver Swanson, 1981, entre otros). La interpretación de los ripios debe afrontar dos dificultades, las procedentes de la contaminación por recirculación y por las partículas sólidas de los lodos de sondeo (*lost circulation material*, LCM) respectivamente.

La contaminación por recirculación se produce por la mezcla de fragmentos de rocas procedentes de niveles más altos del pozo con los ripios de un determinado nivel estratigráfico cuando éstos últimos ascienden por el pozo arrastrados por los lodos de sondeo. La identificación de esta contaminación depende de las características de la sucesión y del conocimiento que sobre ella se tenga. La contaminación por las partículas LCM de los lodos de sondeo es variable y la distinción de estas partículas frente a los ripios puede ser inmediata, caso de los fragmentos textiles, o más comprometida, caso de las micas, de los fragmentos de rocas y bioclastos, o incluso del celofán, que puede ser confundido con micas al microscopio petrográfico. En el caso de los pozos estudiados, las partículas LCM han sido contabilizadas y los

fragmentos más usualmente detectados han sido partículas opacas sin reflectividad, celofán, fragmentos de calizas y fragmentos de bivalvos actuales. Estas partículas han sido distinguidas por su forma y tamaño (celofán), combinada con la ausencia de reflectividad (opacos), o por corresponder a rocas no existentes en el sondeo (fragmentos de caliza) o, en el caso de los fragmentos esqueléticos, por presentar una composición aragonítica inalterada, incompatible con la edad de las rocas y netamente distinta de la de los fragmentos esqueléticos presentes en los ripios, poseedores de un grado diagenético diferente. En el caso de las partículas opacas, se ha dado la circunstancia de que, por causas no conocidas, estas partículas fijaban la tinción de ferricianuro potásico (ver más abajo) de modo que aparecían rodeadas por halo azul de tamaño e intensidad variable.

## **2.1. Preparación de las muestras**

En la perforación de los dos sondeos estudiados (CuMa-par y CuMa-impar) los ripios están formadas por fragmentos de areniscas, de limolitas, de distintos tipos de lutitas y más raramente de calizas, además de por granos sueltos y fragmentos bioclásticos. Estas partículas presentan tamaños variables, tamaños de arena muy fina y limo, hasta mayores de un milímetro, aunque los fragmentos de dimensiones tan grandes son poco comunes.

En la perforación de los pozos los ripios han sido recogidos en intervalos de 3 metros, embolsados y etiquetados (Fig. 7). Para mantener un volumen de trabajo a realizar dentro de límites operativos, se ha seleccionado una muestra de cada dos, resultando en una frecuencia de muestreo de una muestra cada seis metros, obteniéndose un total de 492 muestras, 254 para CuMa-par y 238 para CuMa-impar. Cada una de ellas contiene una cantidad variable de ripio, lo que ha determinado que algunas muestras hayan tenido que ser utilizadas enteramente para la preparación de las láminas, mientras que en otras se ha podido reservar una porción, nunca superior a la mitad, para posibles análisis posteriores. En estos casos en los que se seleccionó una parte de la muestra, se realizó un cuarteado para asegurar la representatividad.

La fracción de cada muestra destinada a estudio ha sido embutida en una probeta utilizando resina coloreada de azul como aglutinador (Fig. 7). La razón de usar resina coloreada es poder distinguir más fácilmente la porosidad existente en los ripios que aparece revelada por la resina infiltrada en ella. Se ha utilizado el color azul por ser el estándar en los estudios estratigráficos y sedimentológicos. Este color es lo suficientemente diferente de los colores de tinción de carbonatos como para que no haya posibilidad de confusión entre ambos.



Figura 7. Aspecto de los ripios de sondeo en cada una de las fases de preparación. En primer lugar al llegar al laboratorio, posteriormente su aspecto al realizar la probeta y finalmente la lámina delgada).

A partir de cada probeta se ha confeccionado una lámina delgada al espesor estándar (30 micras), salvo en el caso de aquellas muestras con alto porcentaje de ripios de lutitas y escasos fragmentos de areniscas, en cuyo caso, se han pulido hasta un espesor de 28 micras para favorecer la observación de las texturas de las rocas lutíticas. Las láminas delgadas han sido teñidas con rojo de alizarina y ferricianuro potásico, para la discriminación de calcita frente a dolomita y de carbonato ferroso frente a no ferroso (Dickson, 1965), y con cobaltinitrito para facilitar la identificación del feldespato potásico (Bailey y Stevens, 1960).

## 2.2. Estudios realizados

Las 492 láminas delgadas han sido estudiadas con el microscopio petrográfico de transmisión determinándose los porcentajes de los distintos componentes de modo visual, con la ayuda de gráficas de porcentajes. En los casos necesarios se ha utilizado también el microscopio de reflexión para identificar las partículas opacas sueltas o formando parte de los ripios, fundamentalmente pirita y materia orgánica (restos vegetales o bitumen relleno de poros), además de las partículas de LCM. Se ha descartado la utilización de procedimientos más exactos como el conteo mediante una platina con contador de puntos o sobre fotografías de las láminas delgadas utilizando programas informáticos ad hoc debido al gran número de láminas delgadas a estudiar. Además el conteo sobre fotografías presenta inconvenientes ligados a la identificación de determinados granos, sobre todo los de menor tamaño. En las tentativas que se hicieron, este método se reveló inviable, dada la frecuencia con la que ante la incertidumbre en la identificación de granos se producía la necesidad de examinar la correspondiente lámina delgada. La determinación de porcentajes mediante estimación visual se considera que proporciona una aproximación razonablemente exacta; se ha realizado un conteo independiente del 30% de las láminas por dos personas (el autor del trabajo y el tutor del mismo), obteniéndose diferencias inferiores al 5% en los porcentajes estimados para aquellos tipos de granos de identificación clara (no se tienen en cuenta los granos de atribución dudosa, limolitas frente a lutitas limosas, o frente a areniscas formadas por la fracción más fina de la arena muy fina, pues en este caso su propio carácter habría determinado también los resultados obtenidos mediante platina con contador).

Los componentes que han sido contados son los que aparecen en la Tabla 1. Estos componentes prefijados fueron definidos en base a la composición petrográfica determinada en estudios previos de otros pozos del mismo intervalo de serie en la zona estudiada y áreas vecinas. Los datos del conteo han sido cargados en un libro Excel diseñado por el autor del método (T. Smith) que lleva incrustadas distintas macros que calculan diversos parámetros composicionales y texturales a partir de los datos introducidos y que generan las gráficas que aparecen en este trabajo, que funcionan como columnas estratigráficas que mostrando los porcentajes de los distintos componentes y su evolución vertical. El libro consta de dos hojas de cálculo, la primera está dedicada a la composición petrográfica en la que se introducen los porcentajes de cada componente (Tabla 1, Fig. 8). La segunda está enfocada a los tamaños de grano y en ella los componentes aparecen de modo simplificado. En ella se juntan los diferentes tipos de carbonatos y de cementos bajo una sola categoría para cada uno (una de carbonatos y otra de cementos) desglosan las distintas clases granulométricas como arcillas, limos y arenas, y dentro de estas las arenas muy finas, finas y medias; dado el tamaño de los ripios, las granulometrías superiores a arena media aparecen agrupadas en una sola clase (gruesa). Una vez determinados los porcentajes de los componentes se introducen en la primera hoja y las granulometrías en la segunda. Con los datos resultantes, las macros incluidas construyen automáticamente una gráfica para cada hoja, función de la composición petrográfica en la primera hoja y del tamaño de grano en la segunda.

Depth	P. Int	P. Feld	Doid/S	Wackestone/F	Bentonicos	Radiol	R. Igneas	Areniscas liticas										Cemento interparticula					Cemento fractura					Total								
								Ar. Suel	Ar. Med	Ar. F	Ar. MF	Pellet	Limolitas	Calcita	Dolomita	Siderita	Anhidrita	Arcilla	Calcita	Dolomita	Cuarzo	Pirita	Bitum	Volcánico	Lut. Lin	Lut.	Esférulas		LL MO	LMO						
1972								48	6	10			6													17	13								100	
1978								21		2	1		1														11	50		3				11	100	
1984								44		3	1		1														15	36							100	
1990								32		9	1		6		1												24	24							100	
1996								62					6														9	29							100	
2002								62		4			2		2												7	22		1					100	
2008								45		3	3		5														9	35							100	
2014								94																			2								100	
2020								61																			10	28							100	
2026								42		3			3														3	46							100	
2032								54		3			5														5	26							100	
2038								57		2																		13	26				2			100
2044								64					3														2	30							100	
2050								59					3														7	32				1				100

Depth	P. Int	P. Feld	Calizas	Limolitas (pelet/	Rocas ígneas	Grueso+	Medio	Fino	Muy fino	Limo	Cemento	Dolomita	Volcánico	Arcilla MO	Total	
1972			0				27	23	14	14,5	0	0	0	21,5	0	100
1978			0				21	0	2	8	0	0	0	55,5	12,5	100
1984			0				33	11	3	8,5	0	0	0	43,5	0	100
1990			0				29	3	9	21	1	0	0	36	1	100
1996			0				51	11	0	4,5	0	0	0	33,5	0	100
2002			0				30	29	8	5,5	2	0	0	25,5	0	100
2008			0				25	20	3	9,5	0	0	0	39,5	0	100
2014			0				42	33	13	6	4	0	0	2	0	100
2020			0				53	8	0	5	0	0	0	33	1	100
2026			0				25	20	0	4,5	0	0	0	47,5	3	100
2032			0				36	18	3	7,5	0	0	0	28,5	7	100
2038			0				20	30	9	7,5	0	0	0	32,5	1	100
2044			0				42	20	2	4	0	0	0	31	1	100
2050			0				43	13	3	4	0	0	0	35,5	1,5	100

Figura 8. Aspecto de las hojas de cálculo en las que se introducen los porcentajes.

Tabla 1. Componentes principales distinguidos.

Porosidad	Calizas	Granos sueltos de areniscas	Fragmentos de areniscas
Limolitas	Cemento de calcita	Cemento de dolomita	Matriz arcillosa
Pirita y bitumen	Lutitas y lutitas limosas	Lutitas y lutitas limosas ricas en materia orgánica	Esférulas de siderita

Las características particulares de la sucesión cortada en los pozos estudiados han aconsejado definir unos parámetros de composición adicionales a los datos prefijados en el libro Excel, que se han introducido respetando la estructura del libro Excel original. Estos parámetros permiten una determinación más completa, en lo que se refiere a algunos componentes, de la composición petrográfica de las rocas y la estratigrafía de la sucesión. Los parámetros añadidos atañen a la:

- Distinción de los principales tipos de granos de tamaño arena dentro de la categoría de “granos sueltos”: cuarzo, feldespatos, con estimación aproximada de la abundancia relativa de feldespato potásico y plagioclasa, y de los principales tipos de fragmentos de rocas, principalmente fragmentos de rocas volcánicas y fragmentos de rocas plutónicas.
- Distinción de dos tipos de areniscas en base a su contenido, bajo o alto, en cemento carbonatado
- Distinción de dos tipos de lutitas pobres en materia orgánica presentes: lutitas grises y lutitas rojizas
- Distinción de cuatro tipos de lutitas ricas en materia orgánica en función de la morfología y distribución que presentan las partículas de materia orgánica y de los organismos fósiles presentes: lutitas ricas en materia orgánica amorfa/diseminada, lutitas ricas en materia orgánica con radiolarios, lutitas ricas en materia orgánica acumulada en láminas y lutitas con masas de materia orgánica dendríticas/plumosas.

Una vez obtenidos en las hojas de cálculo se exportan a un editor de gráficos vectoriales junto a las diagramas realizadas en el mismo pozo mediante diversas técnicas de testificación geofísica para construir con ellas una columna estratigráfica sintética. Las técnicas de testificación geofísica que han sido usadas son la mayoría de las rutinariamente empleadas en la exploración de hidrocarburos y corresponden a las de emisión natural de rayos gamma (GR), total, potencial espontáneo (SP), resistividad (AT), neutrón (NPHI), densidad (RHOZ, ZDEN), sónico (DT), factor fotoeléctrico (lito-densidad –PEF, PEFZ), utilizándose como patrón de fiabilidad los logs de corrección de densidad (HDRA, ZCOR) y diámetro de pozo (CALI). Con estas técnicas se han podido construir una sección en forma de columna estratigráfica sintética.

La fiabilidad de los resultados obtenidos para los dos pozos se ha calibrado con un pequeño intervalo de un testigo de sondeo de 190 de metros de longitud, recuperado de un tercer pozo (CuM-test) que corta perpendicularmente la estratificación. Sobre la columna estratigráfica objetiva descrita a partir del testigo de este sondeo, se ha simulado el gráfico de composición petrográfica obtenido mediante el análisis de los ripios. Para realizar esto, se ha dividido el testigo de sondeo en intervalos de 6 y 3 metros, obteniéndose a continuación para cada intervalo la media de la abundancia relativa de las distintas litologías y granulometrías comprendidas en él. Finalmente, la columna estratigráfica sintética se ha reconstruido utilizando en este caso los datos

de emisión natural de rayos gamma disponibles sobre el gráfico de composición petrográfica.

### 2.3. Diagrafías

A continuación se resumen las características y aplicaciones de las principales técnicas de testificación geofísica empleadas. Más detalles sobre ellas y sobre el resto de las que aquí no se van a tratar pueden obtenerse en Serra (1984) y Schlumberger (1989) entre otros.

Emisión natural de rayos gamma (GR). Esta técnica mide la radiación gamma total emitida de modo natural por las rocas y se expresa de modo estándar en cuentas API. Dentro de ella existen dos variantes, la medida de rayos gamma total y la espectral.

La primera mide la radiación total de la roca, sin discriminar la radiación emitida por cada radionucleido (ver a continuación); esta técnica es útil para distinguir calizas y areniscas limpias, con valores de GR bajos (<20 API) de lutitas (altos) y lutitas ricas en materia orgánica (más altos: 150-200 API), pudiendo ser tomada como una aproximación del contenido en arcillas de la serie estratigráfica y dentro de ella de arcillas ricas en materia orgánica. Como limitación la presencia de glauconita, feldespatos, minerales pesados y fragmentos de roca arcillosos o ígneos pueden hacer que la señal de las areniscas sea indistinguible de la de las arcillas.

La medida espectral discrimina los rayos gamma recibidos por el detector en función de su energía, permitiendo separar las contribuciones relativas de los radionucleidos correspondientes a tres familias que aparecen en las rocas sedimentarias, del uranio (U), del torio (Th) y del potasio (K; POTA). Estos tres tipos de radionucleidos presentan la particularidad de que en las rocas ígneas en las que se encuentran originariamente, en el interior de la tierra, no sufren un fraccionamiento significativo y su comportamiento es muy similar. Sin embargo al alcanzar la superficie terrestre y pasar a un ambiente oxidante manifiestan comportamientos diferentes (Adams y Weaver, 1958). El uranio adquiere un estado oxidado ( $U^{6+}$ ), ion muy soluble, que es fácilmente lavado y transportado hasta el mar donde permanece en disolución hasta que bajo condiciones reductoras pase a  $U^{4+}$ , insoluble. En estas condiciones, ligadas a ambientes de baja energía y anóxicos o disóxicos, queda fijado a la materia orgánica o a las arcillas, siendo por tanto indicador de ambientes marinos reductores, especialmente ricos en materia orgánica. El potasio es también un elemento móvil y pasa a encontrarse por su parte en algunas sales, y, entre los minerales más comunes en las rocas sedimentarias, glauconitas y arcillas del grupo de la illita, además de hallarse en los feldespatos potásicos. Aparece por tanto en areniscas arcólicas, en depósitos glauconíticos, incluidas areniscas, y en depósitos arcillosos marinos (ricos en illita). El torio es por contrario un elemento insoluble y de difícil movilización, y queda fijado en arcillas caoliníticas, en suelos residuales (bauxitas), así como en minerales pesados estables (circón, p. ej.). Por tanto el torio tiende a aparecer concentrado en depósitos continentales, como en los ricos en caolinitas y en los minerales pesados, que suelen estar asociados principalmente a depósitos arcillosos y a acumulaciones de tipo placer en cuerpos arenosos.

Densidad (RHOZ; ZDEN). La unidad de medida es  $\text{g/cm}^3$  o  $\text{kg/m}^3$ , Esta técnica se basa en medir la radiación devuelta por la roca al ser bombardeada con rayos gamma. Esta radiación se produce al interactuar los rayos gamma de mediana energía emitidos contra los electrones de los átomos presentes en la roca (efecto Compton) y es proporcional a la densidad electrónica de la roca y por tanto a la densidad media de los elementos que la componen, resultante de la densidad de los minerales y de la de los fluidos que ocupan los poros de la roca. El resultado es tanto una medida de la densidad media como, si se conoce la composición de las rocas, de la porosidad de las mismas y de la composición de los fluidos que rellenan la porosidad. La sonda está calibrada para un contenido en fluidos de la densidad del agua. Si la porosidad está rellena de gas, cuya densidad es mucho menor que la del agua, se obtiene una medida de radiación correspondiente a una densidad media más baja que si los poros estuvieran rellenos de agua y por lo tanto una medida de densidad cuyo resultado es una porosidad sobreestimada.

Factor fotoeléctrico (PEF, PEFZ). La unidad de medida son los barns/electrón. Es una técnica similar a la de densidad, pero en este caso se mide la radiación obtenida al amortiguarse los rayos gamma de baja energía emitidos contra los núcleos de los átomos de la roca (efecto fotoeléctrico) que es mayor cuanto mayor es el número atómico (Z) de los elementos presentes en la roca; esta técnica mide el número atómico promedio de la roca. Los fluidos presentes en los poros están formados por elementos con Z bajo y tienen una menor influencia sobre el resultado. De este modo, los valores de radiación devueltos están menos influenciados por la porosidad y proporcionan una medida de la densidad de la roca. Valores comunes son de 1,8 para las areniscas, 3,1 para las dolomías, 3,3 para las lutitas y 5 para las calizas.

Neutrón (NPHI). La unidad de medida bajo la que se presenta esta técnica es la porosidad equivalente (%), Esta técnica se basa en medir la radiación emitida por la roca al ser bombardeada con neutrones. Los neutrones chocan contra los núcleos de los átomos de la roca y la deceleración es máxima cuando el choque se produce contra un núcleo de una masa similar a la del neutrón, es decir contra un núcleo de hidrógeno. La medida de radiación obtenida es inversamente proporcional a la cantidad de átomos de hidrógeno presentes en la roca. Esta técnica mide el índice de hidrógeno y, como los átomos de hidrógeno se encuentran principalmente en el agua y en los hidrocarburos, que a su vez se hallan sobre todo en los poros de las rocas, esta técnica proporciona una medida efectiva la cantidad de fluidos (agua e hidrocarburos) presentes en la roca, y el volumen de porosidad. La excepción se produce con las rocas arcillosas que contienen moléculas de agua en la red de las arcillas y que por tanto dan una porosidad sobreestimada (efecto de las lutitas: *shale effect*; Fig. 9). Por otro lado cuando la porosidad está rellena de gas, con un índice de hidrógeno menor que el agua y que los hidrocarburos sólidos y líquidos en virtud de su menor densidad, el resultado es que la porosidad está subestimada (la radiación de retorno detectada es anormalmente alta) produciéndose el denominado efecto del gas (*gas effect*, Fig. 9).

La combinación de las diagráfías del neutrón y de densidad suele ser usada para evaluar la porosidad de la roca y los fluidos en ella contenidos (Fig. 9). La representación conjunta de ambas diagráfías se realiza debido a que la densidad y la porosidad están relacionadas entre ellas: al aumentar la densidad la porosidad disminuye y viceversa. Además, esta representación permite comparar los datos de una manera mucho más visual y efectiva. Por lo tanto, cuando se encuentra una roca de baja densidad con una porosidad moderadamente elevada se tratará de una arenisca, mientras que una lutita presentará una densidad más elevada y una aparente porosidad (*shale effect*) elevada (Fig. 9). Las lutitas ricas en materia orgánica presentan un patrón de curvas muy cercanas, con una densidad mucho menor que las lutitas debido a la menor densidad de la materia orgánica.

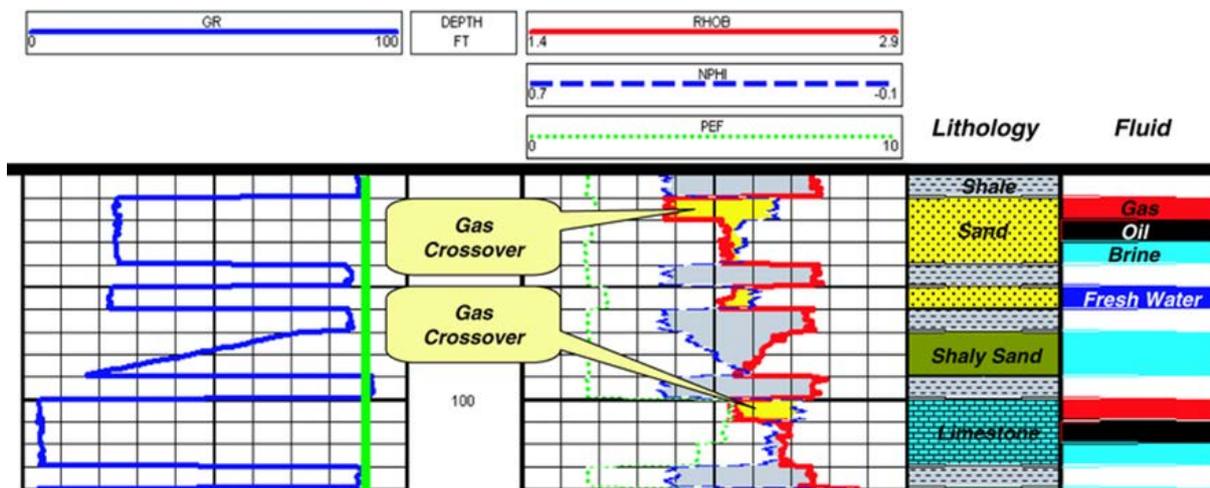


Figura 9. Diagrafía ideal de rayos gamma (GR), neutrón (NPHI), densidad (RHOB) y factor fotoeléctrico (PEF) mostrando las distintas respuestas de los escenarios más usuales de litologías (areniscas, calizas y lutitas) y contenido en fluidos (agua, petróleo y gas). Se muestran asimismo ejemplos del efecto del gas (gas effect) y del efecto de las lutitas (shale effect). En este último se produce una separación de los logs de neutrón (NPHI, línea azul) y de densidad (RHOB, línea roja); el primero se desplaza a la izquierda como consecuencia del contenido en agua estructural de las arcillas, mientras que el segundo lo hace a la derecha, producto de las mayor densidad de las lutitas (para más detalles ver el texto; tomado de [http://petrowiki.org/Neutron\\_porosity\\_logs](http://petrowiki.org/Neutron_porosity_logs)).

Sónico (DT). Esta técnica mide la velocidad a la que se transmiten las ondas del sonido en las paredes del pozo, permitiendo también una discriminación entre areniscas y lutitas, además de la presencia de agua en los poros de rocas como calizas o areniscas.

El diámetro del pozo (caliper CAL, CALI) es la técnica más elemental, pero no por ello la menos importante. Mide el diámetro del pozo. Es importante para saber en qué intervalos se han producido derrumbamientos, en cuales hay hinchamiento de arcillas y en cuales las paredes se comportan de manera normal. El comportamiento del perímetro del pozo se relaciona con algunos ensayos, como el de densidad, para conocer la fiabilidad de éste último, porque al haber un relieve positivo o negativo en las paredes afecta a la calidad de los datos tomados.

La lectura de todos estos datos no es única e inequívoca y por eso es importante contrastar las señales entre los distintos logs y los datos de los ripios, para así poder entender cada una de las señales a lo largo de los pozos (Fig. 9).

#### **2.4. Fiabilidad de los resultados y poder de resolución**

El método seguido en este trabajo y arriba descrito ha resultado ser muy útil por lo que respecta a la exactitud de la información obtenida frente a tiempo empleado y al coste del mismo. Además de ser mucho más barato y rápido que la recuperación de testigo, con él puede obtenerse una información objetiva y bastante completa de las características petrográficas (composicionales y texturales) de los distintos conjuntos de estratos y de su evolución vertical, además de proporcionar información sobre los procesos diagenéticos. La correlación de los datos obtenidos entre pozos permite hacer una correlación estratigráfica muy completa. Por otro lado, al usarse los ripios del sondeo, la decisión de estudiar un determinado pozo puede tomarse con posterioridad a su perforación.

Las limitaciones del método aparte de las inherentes a cualquier estudio basado en los ripios de sondeo –imposibilidad de observar estructuras sedimentarias, geometrías de estratos y carácter de sus contactos– atañen fundamentalmente a tres aspectos.

Por un lado, y por el hecho de estudiar ripios, no pueden obtenerse valores exactos sobre la porosidad o la permeabilidad de la roca. La porosidad va a estar infravalorada al preservarse solo unas partículas milimétricas de los cuerpos de arenisca y desaparecer por tanto los espacios entre granos. En segundo lugar, la contaminación por fragmentos procedentes de niveles estratigráficos más altos y por las partículas LCM de los lodos de sondeos, como se comentó más arriba, suponen una fuente de error en la determinación de los componentes. A este respecto, debe señalarse que las partículas LCM de los lodos de sondeo pueden llegar a contaminar la muestra de modo significativo, de modo que su abundancia en detrimento de los ripios puede hacer que la muestra no sea representativa.

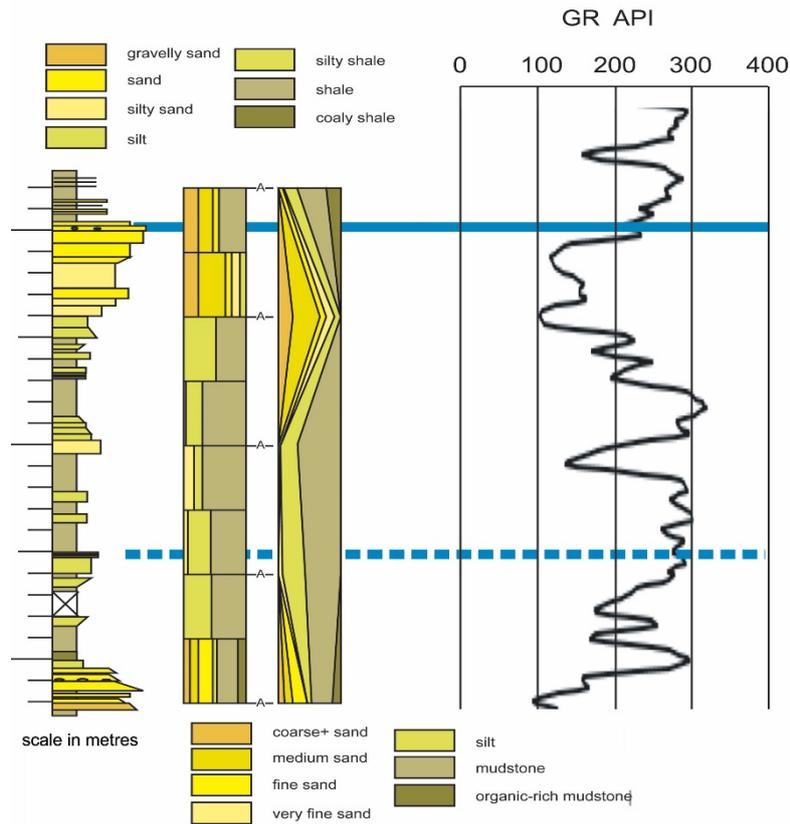
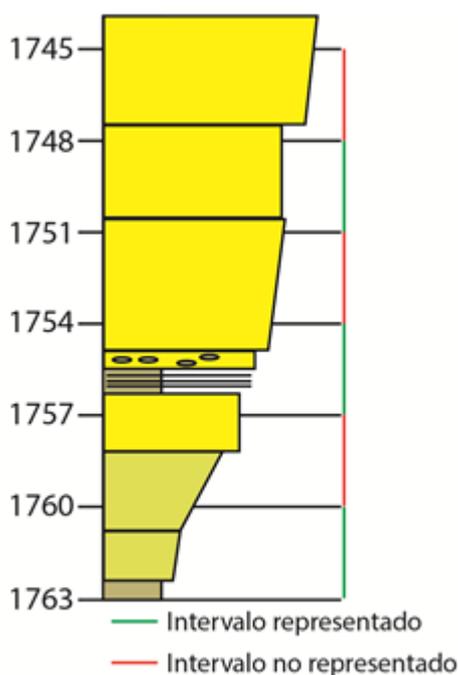


Figura 10. Ejemplo de la frecuencia de muestreo y del gráfico de componentes resultante, simulado sobre la columna estratigráfica de CuM-test. Obsérvese la distorsión producto del espaciado del muestreo y el efecto corrector que puede obtenerse aplicando (en este caso) los datos de la diagráfia de rayos gamma (GR). Las líneas azules representan sendas superficies transgresivas.

Otra fuente de imprecisión es la frecuencia del muestreo en el pozo y posteriormente en la selección de los ripios para su estudio. Cada muestra incluye el conjunto de los



ripios recogidos en los tres metros superiores de perforación y de ellos el estudio registra la composición de una muestra de las dos tomadas en los últimos seis metros, es decir que los datos a (por ejemplo) 1751 metros de profundidad corresponden a los materiales entre los metros 1748 a 1751 y son tomados como representativos de los metros 1745 a 1751 (Fig. 11). También cabe destacar que, aunque es excepcional, existen algunos intervalos en los que ha habido pérdida de recogida de ripio, lo que se expresa en las gráficas por un intervalo no visible.

Figura 11. Ejemplificación de la toma de muestras utilizando una columna estratigráfica hipotética. Los intervalos de los que se han tomado muestras están separados por seis metros, de los cuales sólo se ha recogido material de los últimos tres.

La frecuencia de muestreo, con una muestra cada 6 metros, representa también el poder de resolución del análisis de los ripios y afecta a dos aspectos de la sucesión estratigráfica. En primer lugar a la representatividad de la composición petrográfica, promediada a lo largo de cada intervalo de muestreo, de modo que unidades estratigráficas de espesor menor a 6 metros no pueden ser diferenciadas por encontrarse por debajo del poder de resolución. En realidad este espesor mínimo diferenciable puede llegar a ser mayor, pues dependiendo de la relación entre los intervalos de muestreo y los límites entre las unidades estratigráficas, la ventana de muestreo puede afectar a dos unidades consecutivas, promediando sus respectivas composiciones. En segundo lugar, afecta también a la detección de tendencias verticales. Para que exista una tendencia entre dos litologías A y B, una tercera litología de tránsito, T, debe definir la polaridad del paso (A a B o B a A). Esto implica que la detección de secuencias granocrecientes o granodecrecientes o de ciclos simétricos se producirá cuando su espesor exceda los 18 m (Figs. 10, 11 y 12). Estas limitaciones quedan eliminadas en gran medida con la utilización de las diagráfias como se puede observar en la Figura 10.

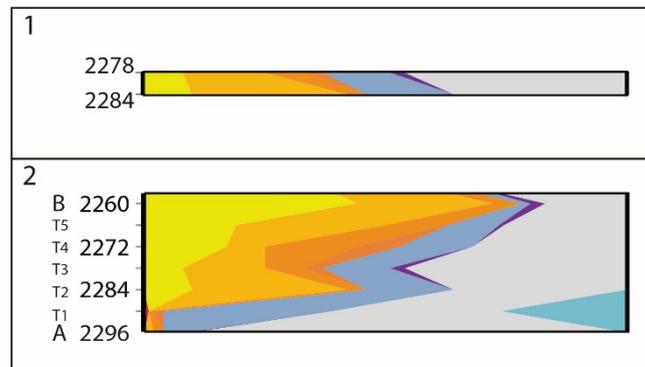


Figura 12. Ejemplo de ambos casos. En 1 se observa la aparente tendencia granodecreciente, sin embargo en 2 este ciclo está incluido en uno granodecreciente.

### **3. Resultados**

El estudio de las láminas delgadas de los ripios de los pozos CuMa-par y CuMa-impar ha proporcionado un gran volumen de información acerca de la composición petrográfica y estratigrafía de la sucesión de más de 1500 metros de espesor que abarcan las formaciones Los Molles y Lajas junto a las capas basales de la Formación Lotena suprayacente.

Los datos obtenidos a partir de los ripios presentan las limitaciones que se expusieron en el apartado de metodología, principalmente en lo relacionado al poder de resolución en la determinación de las variaciones verticales en la petrografía de las rocas y en la detección de secuencias granocrecientes y granodecrecientes. Sin embargo, su comparación con los de las diagráfias permite enmendar notablemente dichas limitaciones. En este punto es necesario precisar que la composición de las areniscas, con un alto contenido en fragmentos líticos de naturaleza ígnea y en feldespatos, unida a las características de las paredes de los pozos, en los que localmente aparecen ensanchamientos por derrumbe de las paredes, impone limitaciones a la fiabilidad de las diagráfias y por tanto a su uso.

Hay que precisar que, conforme se iba avanzando en la descripción de los pozos se iban encontrando rasgos que hubieran sido interesantes de contabilizar para así obtener un mayor conocimiento de los factores que han controlado el sistema. Algunos ejemplos que hubieran sido de interés para estos pozos en concreto son el contaje de las granulometrías correspondientes al cuarzo, los feldespatos, las rocas ígneas y el chert; o también la relación entre fragmentos de roca volcánicos y plutónicos, lo que lleva a conocer el área madre.

Los resultados que se exponen a continuación aparecen ordenados secuencialmente. En primer lugar se proporciona una descripción de los principales tipos de componentes encontrados en las muestras. A continuación se exponen las variaciones verticales en esta composición y sus implicaciones estratigráficas. En tercer lugar, se presentarán los resultados de comparar la información petrográfica de los ripios con la de las diagráfias empleadas como apoyo. Finalmente, la información se integrará a escala de la sección cubierta por los dos pozos con la ayuda de los paneles sísmicos de reflexión que permiten establecer la correlación entre ambos pozos.

#### **3.1. Descripción de los componentes**

##### **3.1.1. Areniscas y conglomerados:**

Areniscas y conglomerados aparecen con relativa abundancia en los dos tercios superiores de la sucesión de cada pozo, representados por sus fragmentos y por granos sueltos disgregados de las rocas que los contenían (Fig.11a–d). La granulometría de los ripios no permite que se preserven fragmentos de rocas ni de sus componentes mayores a 1–3 milímetros, lo que excluye la preservación de fragmentos de conglomerados y areniscas muy gruesas y de sus clastos constituyentes, salvo los de granulometría gruesas, apareciendo todos ellos triturados

a fragmentos milimétricos a submilimétricos. La existencia de estas litologías y texturas se deduce de los testigos de sondeo procedentes de intervalos seleccionados en pozos cercanos. En los pozos estudiados, todas ellas han sido reunidas en una misma clase, representada generalmente por granos sueltos. En base a la composición de los ripios de areniscas y de la composición y abundancia relativa de los granos sueltos, las areniscas y conglomerados contienen un promedio de 10% de fragmentos de roca y un 3% de feldespatos, llegando a un 49% de fragmentos de roca ígneos y un 15% de feldespatos.

#### *3.1.1.1. Fragmentos de areniscas*

Corresponden en general a fragmentos de areniscas de grano medio a muy fino, siendo muy escasos los de areniscas gruesas. Composicionalmente (Folk, 1974) corresponden a cuarciarenitas, litarenitas a sublitarenitas con fragmentos de roca ígneos, principalmente volcánicos (arenitas volcánicas y arenitas volcánicas cuarzosas), y arcosas a subarcosas, con contenidos medios en feldespatos entre el 1 y el 3–4%. En líneas generales la composición es más madura cuanto menor es el tamaño de grano. No se ha realizado un desglose de los distintos tipos por la poca representatividad que tal desglose tendría. El tamaño de los ripios impone un sesgo a los tipos de arenisca preservados, apareciendo preferentemente las de grano más fino, más cuarzosas y/o feldespáticas, pues las más gruesas, conteniendo fragmentos de roca, tienden a aparecer desintegradas en sus granos componentes.

Los fragmentos de areniscas presentan porosidad primaria interpartícula y porosidad secundaria. Ésta es debida generalmente a disolución de feldespatos, más raramente de fragmentos de roca ígneos o de granos de cuarzo. La porosidad secundaria excepcionalmente está representada por porosidad de fractura.

La porosidad aparece mayoritariamente cerrada por cementos. Los principales cementos son de carbonato (cemento granular principalmente de calcita ferrosa, con menor abundancia de dolomita ferrosa y raramente de calcita no ferrosa, Fig. 11a), y de arcillas, de difícil cuantificación al existir arcillas de alteración de feldespatos y, en las areniscas más finas, matriz arcillosa. Otros cementos más raros son cuarzo y pirita.

La porosidad abierta, principalmente de disolución de feldespatos y de fractura, y de importancia mucho menor de interpartícula, se encuentra generalmente libre e invadida por la resina aunque en algunos casos se ha verificado su ocupación por bitumen que no ha sido estudiado.

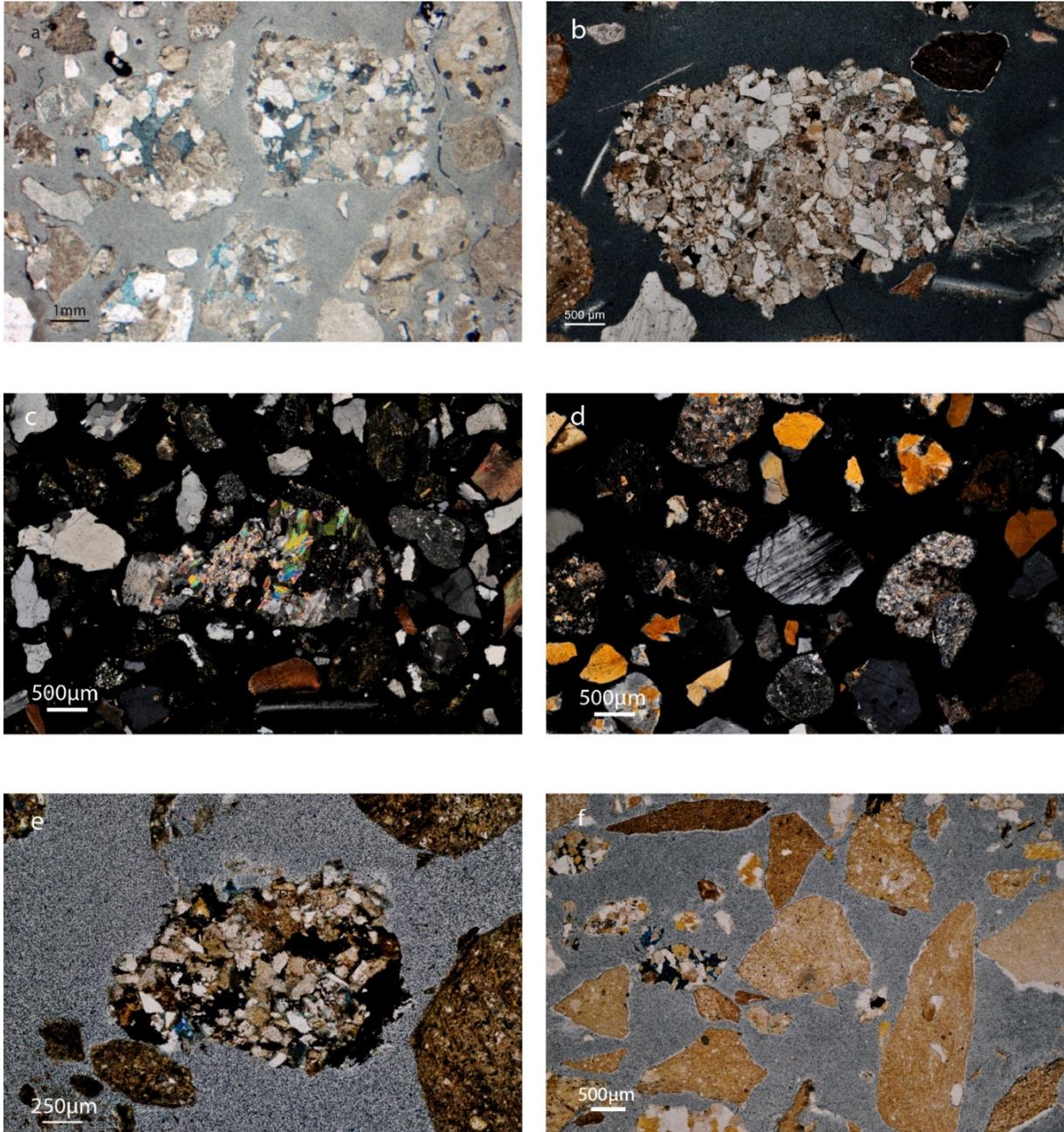


Figura 12. **a.** Areniscas (arcosas) de grano medio con abundante porosidad interpartícula rellena por cemento de calcita ferrosa (nicoses paralelos. CuMa-par-2626). **b.** Arenisca formada principalmente por granos de cuarzo y feldespato (arcosa) de grano medio con porosidad interpartícula rellena por cemento arcilloso y de calcita ferrosa. También se observan rípidos de lutitas, limolitas, granos aislados de plagioclasas y fragmentos aciculares de baja birrefringencia (quizás celofán) de LCM (nicoses paralelos. CuMa-par-1976). **c.** Fragmento de roca plutónica con feldespatos sericitizados y otros granos aislados de cuarzo, chert y fragmentos de roca volcánicos. Además se observan bioclastos aragoníticos de los LCM (nicoses cruzados. CuMa-par-2002). **d.** Granos sueltos de cuarzo, feldespatos y fragmentos de roca volcánicos (nicoses cruzados. CuMa-par-2104). **e.** Limolita con granos de cuarzo y feldespato, con matriz arcillosa y materia orgánica (bitumen) y lutitas (nicoses paralelos. CuMa-par-3088). **f.** Lutitas, la de la derecha contiene algún grano de cuarzo (nicoses paralelos. CuMa-par-2890).

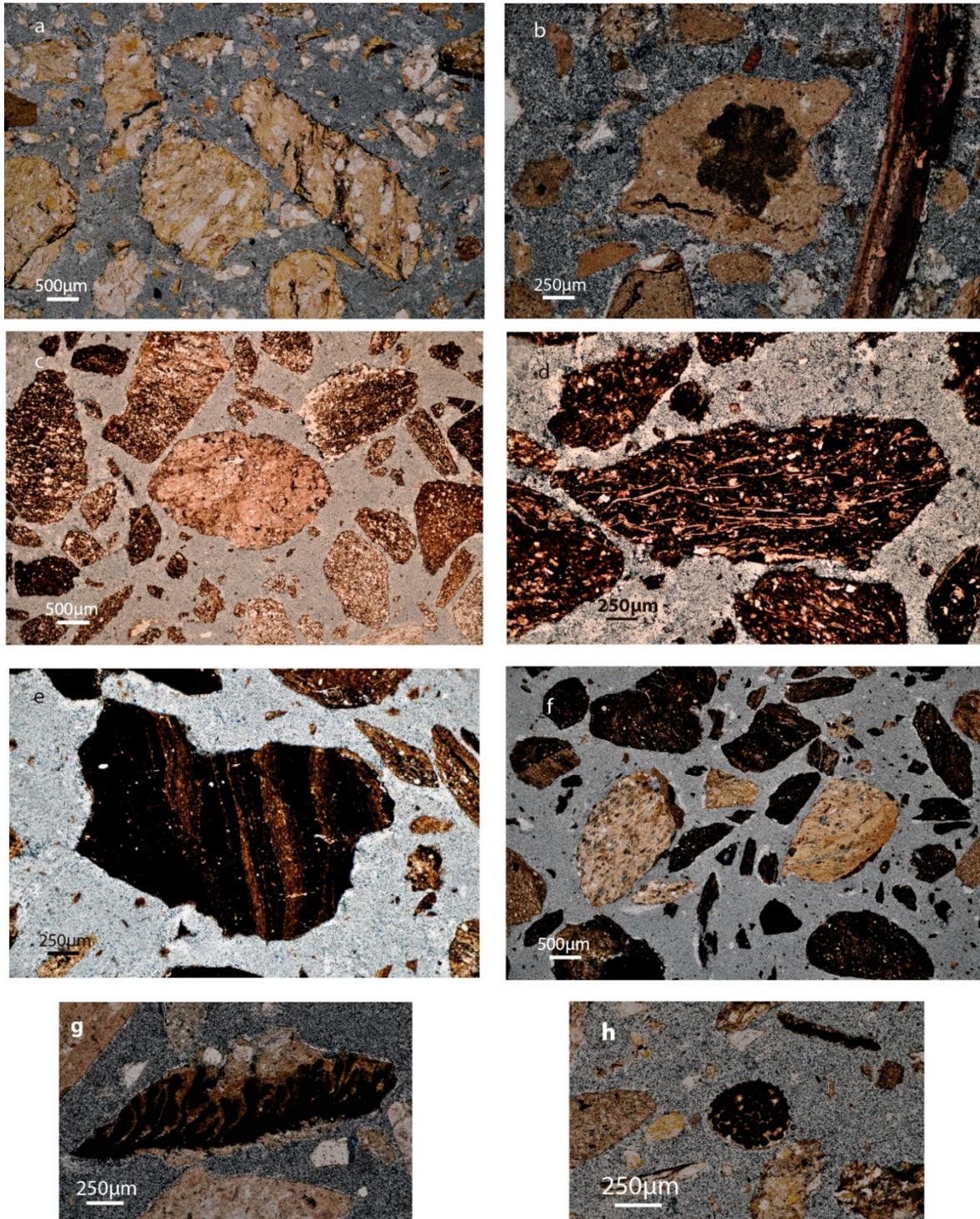


Figura 13. **a.** Lutitas limosas con granos de cuarzo y feldespato y porosidad de fractura (nicoles paralelos. CuMa-par-3040). **b.** Lutita con una esférula de siderita. A su derecha fragmento bioclástico de composición aragonítica propio de los LCM (CuMa-impar-1880). **c.** Ripio de caliza rodeada por lutitas ricas ricas en materia orgánica del tipo masivo (nicoles paralelos. CuMa-par-3466). **d.** Lutitas ricas en materia orgánica con fragmentos bioclásticos (posiblemente ostreidos), a su alrededor lutitas limosas con un alto contenido en materia orgánica (nicoles paralelos. CuMa-par-3466). **e.** Lutitas ricas en materia orgánica laminar con algunos granos de cuarzo (nicoles paralelos. CuMa-par-3380). **f.** Lutitas ricas en materia orgánica con radiolarios rellenos por cemento de calcita ferrosa. Los ripios más claros son de naturaleza volcánica/vulcanoclástica; parte baja de la Formación Los Molles (nicoles paralelos. CuMa-impar-3209). **g.** Lutita rica en materia orgánica con masas arborescentes. Rodeada por algunos fragmentos de cuarzo y lutitas (nicoles paralelos. CuMa-impar-2234). **h.** Grano redondeado conteniendo framboides de pirita (nicoles paralelos. CuMa-impar 2705).

### 3.1.1.2. Granos sueltos

Corresponden a clastos disgregados de las areniscas que los contenían y son uno de los componentes más abundantes en las láminas delgadas (Fig. 11c y d). Son de cuarzo, chert, feldespatos potásicos y plagioclasas y fragmentos de roca y su tamaño de grano oscila entre arena gruesa, excepcionalmente muy gruesa, y arena fina, muy raramente muy fina. Se clasifican en categorías generales, los granos de cuarzo policristalino se incluyen en el cuarzo, los feldespatos potásicos y las plagioclasas se catalogan conjuntamente como feldespatos y las rocas plutónicas y volcánicas como ígneas.

*Granos de cuarzo:* son generalmente de cuarzos plutónicos y policristalinos, más raramente volcánicos o metamórficos (*stretched*); excepcionalmente se han reconocido cuarzos sedimentarios (reciclados) (ver Folk, 1974, p. 69–74). Siguiendo la estructura de componentes del libro Excel y al no existir variaciones significativas no se han distinguido abundancias relativas entre ellos. Sus granulometrías oscilan entre arena gruesa, excepcionalmente muy gruesa, y fina, muy raramente muy fina.

*Feldespatos:* corresponden a fragmentos de feldespatos potásicos y de plagioclasas. Presentan grados de alteración variables, encontrándose ejemplares desde prácticamente inalterados hasta sericitizados de un modo casi completo (Fig. 11c). Sus tamaños de grano oscilan entre arena gruesa, excepcionalmente muy gruesa, y fina, muy raramente muy fina.

*Fragmentos de roca:* son principalmente fragmentos de rocas ígneas, habiendo sido detectados escasos granos de fragmentos de rocas metamórficas neísicas. Los fragmentos de rocas ígneas son de rocas plutónicas (graníticas) y de rocas volcánicas, siendo estos últimos algo más abundantes. Los fragmentos de rocas volcánicas contienen proporciones variables de una matriz de textura homogénea a fluidal y son fundamentalmente de tres tipos: de matriz volcánica, de matriz volcánica con cuarzos volcánicos con golfos de corrosión y formas parcialmente euhedrales, y de matriz volcánica con cristales euhedrales tabulares, existiendo algún ejemplo de clastos con textura intersertal. Mientras que los fragmentos de rocas plutónicas se encuentran en general poco alterados, los de rocas volcánicas presentan un grado de alteración variable, a veces intenso, encontrándose reemplazados por arcillas o silicificados. Algunos ejemplos de fragmentos volcánicos son identificables frente a los fragmentos de lutitas por tener fantasmas de cristales euhedrales o de una textura fluidal.

*Chert:* se han identificado granos de chert con una abundancia relativamente baja. La identificación del chert se halla obstaculizada por existir rocas ígneas silicificadas. Se han contabilizado como granos de chert todos aquellos que no presentaban evidencias de corresponder a fragmentos ígneos (ver párrafo anterior). Los granos de chert presentan unos tamaños comprendidos generalmente entre arena media y fina, raramente muy fina.

Otros granos: aparte de los granos anteriormente descritos se encuentran otros fragmentos de granos sueltos en proporciones más bajas, entre ellos merece citar los fragmentos de calcedonia que muy verosíblemente corresponden al relleno de

fracturas desarrolladas en las rocas ígneas existentes en el área madre (T. Smith. com. pers.).

### 3.1.2. Limolitas

Las limolitas están formadas por granos de cuarzo, feldespatos y rocas ígneas, además de tener una matriz de arcillas y contener una proporción variable pero baja de materia orgánica (granos de materia orgánica y bitumen) y pirita (Fig. 11e). Contienen cementos, de morfologías similares a los de las areniscas, calcita y dolomita, ambas ferrosas, cerrando poros secundarios de disolución de feldespatos y rocas ígneas.

### 3.1.3. Lutitas y lutitas limosas

Es la litología más abundante en las láminas estudiadas. Se han diferenciado las lutitas de las lutitas limosas en función de su contenido en granos de tamaño limo, considerándose lutitas limosas aquellas que tienen entre un 10% y un 75% de dichos granos (Figs. 11f y 12a). Se han incluido también como lutitas limosas aquellas rocas lutíticas que contienen granos de arena dispersos.

Se han distinguido tres tipos de lutitas en este trabajo frente a los dos tipos que recoge el libro Excel, lutitas grises, lutitas grises con nódulos de siderita y lutitas rojizas, no apareciendo estas últimas descritas –ni por tanto contempladas– en el libro Excel original.

Las lutitas grises son las más abundantes y representan la práctica totalidad de las lutitas en la mayor parte del intervalo estudiado (Fig. 11f). En ocasiones presentan *burrows* en forma de pequeños fragmentos redondeados de arenisca de grano muy fino con forma subesférica. Su color indica depósito en condiciones de escasa oxigenación por lo que debe corresponder a condiciones ambientales subacuáticas, principalmente marinas, de acuerdo a su distribución en la sucesión.

Las lutitas nódulos de siderita contienen cuerpos subesféricos de siderita de diámetro cercano a 500–1000  $\mu\text{m}$  y estructura radial (esferosiderita) que en ocasiones se encuentran también disgregados y formando partículas del ripio (Fig. 12b). Al igual que en el caso anterior, sus colores indican déficit de oxígeno y han sido interpretadas en otras cuencas como paleosuelos mal drenados (Ufnar et al., 2001, 2005).

Las lutitas rojizas, incluidas en este trabajo, corresponden a lutitas depositadas en un ambiente oxidante que permite la existencia de ión férrico. Su aparición se restringe a los niveles estratigráficamente más altos de la sucesión y sugiere, como se detalla más adelante, que corresponden a depósitos de paleosuelos relativamente bien drenados, localizados en áreas más proximales de la cuenca sedimentaria.

La porosidad de estas rocas visible al microscopio es baja. Se observan fracturas rellenas por dolomita no ferrosa, y calcita ferrosa. Por otro lado, las lutitas y lutitas limosas presentan de modo esporádico porosidad de fractura abierta, cuyo origen no ha podido ser aclarado (Fig. 12a). Únicamente debe señalarse que este tipo de porosidad es más abundante en niveles estratigráficos cercanos a aquellos con alta abundancia de lutitas y lutitas limosas ricas en materia orgánica.

Se considera que la proporción de ripios lutíticos en una muestra es indicativo de la proporción de lutitas que hay en el intervalo de serie correspondiente; no obstante esta correspondencia debe ser matizada, pues se sabe por los testigos de sondeo recuperados que existen intervalos areniscosos y conglomeráticos cuyas capas o cuerpos contienen localmente clastos lutíticos intraformacionales lo suficientemente abundantes como para tener una representación significativa en la columna estratigráfica de tres metros de espesor representada en cada muestra. Este origen se sospecha en algunos ripios como lutitas de tamaño considerable y marcado redondeamiento. Esto implica que se puede producir una sobreestimación del porcentaje de lutitas en la serie.

#### **3.1.4. Lutitas y lutitas limosas ricas en materia orgánica**

Predominan en los niveles estratigráficos más bajos de la sucesión, cerca de la discontinuidad basal, llegando en algunas muestras a representar el 100% de la misma. Como en el caso anterior, aquellas con un contenido de 10–75% de granos de tamaño limo o superior han sido clasificadas como lutitas limosas, en este caso ricas en materia orgánica.

La roca contiene cantidades variables de carbonato, bien como fango carbonatado bien como partículas de mayor tamaño, fósiles y bioclastos incluidos, por lo que en algunos casos deberían ser denominadas como margas ricas en materia orgánica (Fig. 12c). Por lo que respecta a la materia orgánica, en este trabajo no ha sido estudiada. Únicamente se han observado diferentes modos de aparición de la misma en cuanto a su distribución y a la textura y morfología de sus masas. Estos rasgos y la existencia o ausencia de radiolarios permiten diferenciar cuatro tipos que se describen a continuación por orden de mayor a menor abundancia.

Lutitas masivas, son prácticamente opacas, internamente homogéneas (Fig. 12c–e). La mayoría de las lutitas limosas forman parte de esta categoría, aunque también se encuentran lutitas con esta apariencia.

Lutitas con láminas de materia orgánica, en ellas la materia orgánica se encuentra formado láminas discontinuas, a veces de extensión lateral muy reducida, encontrándose en ocasiones bandas alternantes con distinto contenido de materia orgánica (Fig. 12e).

Lutitas con masas arborescentes o dendríticas de materia orgánica (Fig. 12g). Estas masas presentan una morfología asimétrica, con un margen liso y el opuesto mostrando las formas dendríticas. Este tipo es poco frecuente y cuando aparece está principalmente asociado a lutitas con bajo o nulo contenido en limo.

Lutitas con radiolarios, similares a las masivas, pero conteniendo cuerpos esféricos cuya pared raramente se preserva y cuya cavidad central está rellena por cemento de calcita ferrosa. En base a los raros ejemplares conservados y a los datos consultados (T. Smith, com. pers.), estos restos esqueléticos corresponden a radiolarios. Este tipo de lutitas es el más característico en otros pozos estudiados y, como se detallará más adelante, registran episodios transgresivos en la cuenca, con una marcada profundización asociada.

Al igual que sucedía con las lutitas y lutitas limosas, pero en este caso con mayor frecuencia, las lutitas y lutitas limosas ricas en materia orgánica presentan localmente porosidad de fractura abierta.

### **3.1.5. Calizas**

Las calizas son raras en las muestras estudiadas y aparecen principalmente en los niveles estratigráficamente más bajos. Se distinguen dos tipos, el primero apareciendo exclusivamente en el pozo CuMa-impar, en forma de caliza micrítica a microesparítica, formada por calcita ferrosa, variablemente dolomitizada a microdoloesparita. El segundo en forma de margas asociadas a las lutitas ricas en materia orgánica (Fig. 12c).

### **3.1.6. Rocas volcánicas**

Aparecen en los niveles estratigráficamente más bajos de la sucesión estudiada. Son fragmentos de rocas volcánicas de grano fino, muy alteradas a arcillas, presentando color amarillento y colores de interferencia que revelan su composición arcillosa (Fig. 12f).

Regionalmente en la parte más baja de la Formación Los Molles y en el Grupo Precuyo y corresponden a depósitos vulcanoclásticos, generados durante el episodio de *rifting*.

### **3.1.7. Otros componentes**

Se incluyen aquí otros componentes, de origen sedimentario o diagenéticos, descritos en las muestras y que no presentan una asignación clara a una litología determinada.

#### *3.1.7.1. Bioclastos*

Son relativamente poco frecuentes y aparecen constituidos casi exclusivamente por fragmentos de bivalvos (Fig. 12b). Son distinguibles de los fragmentos esqueléticos de moluscos de las partículas LCM por su historia diagenética.

#### *3.1.7.2. Pirita y materia orgánica (bitumen)*

Se encuentran a lo largo de la serie en proporciones bajas, se reconocen rellenando la porosidad en areniscas, limolitas y lutitas, aunque también pueden encontrarse en menor proporción como cuerpos y como granos sueltos en el ripio (Fig. 12e). La pirita acostumbra a aparecer en forma de cristales cúbicos o agregados framboidales, además de en formas irregulares, mientras que el bitumen aparece rellenando huecos o como masas amorfas (Fig. 12h).

Además de bitumen se han identificado en algunos casos partículas de materia orgánica cuya morfología y tamaño sugieren que podría tratarse de fragmentos vegetales de origen vegetal terrestres.

Como se indicó anteriormente, no se ha realizado ningún estudio específico sobre la materia orgánica presente en las muestras.

#### *3.1.7.3. Cementos carbonatados*

Ya se han descrito en los apartados correspondientes; no obstante se proporciona aquí un resumen de los mismos. Aparecen en proporciones bajas, pero generalizados

en toda la sucesión. La mayor parte de los cementos aparecen rellenando la porosidad primaria o de disolución en areniscas (Fig. 11a, b, e, f y Fig. 12f); están formados por cristales equidimensionales de tamaño variable formando un mosaico. Su mineralogía es de calcita ferrosa, en menor proporción, dolomita ferrosa y muy raramente de calcita no ferrosa. En las limolitas, su modo de aparición es similar. En contraposición, en el caso de las lutitas, el más abundante es de dolomita no ferrosa, rellenando porosidad abierta por fracturas y a veces de calcita ferrosa, rellenando huecos de bioclastos.

En este grupo se incluyen también ripios de tamaño apreciable (arena media y gruesa, hasta fragmentos milimétricos) de composición calcita ferrosa o dolomita ferrosa, con textura cristalina gruesa, en los que en ocasiones se puede diferenciar una secuencia de crecimiento de los cristales. Este tipo de granos son generalmente interpretados como rellenos de fracturas. En algún caso, la forma del ripio, con un margen liso y otro más irregular y la disposición y morfología de los cristales de carbonato, formando una o más generaciones creciendo desde el margen liso del ripio así lo sugiere.

### **3.2 Distribución de los componentes en los dos pozos**

La distribución de los diferentes tipos petrográficos en los sondeos CuMa-par y CuMa-impar muestra las siguientes tendencias generales (Figs. 13 y 14) que permiten establecer las unidades estratigráficas informales que serán tratadas en el próximo apartado.

#### **3.2.1. Tipos de areniscas**

Muestran una importancia creciente hacia el techo (Figs. 13-A y 14-A). En el primer pozo (Fig. 13-B). En el pozo CuMa-impar los granos de arena sueltos muestran que los dos tipos más abundantes son el cuarzo y los clastos de rocas ígneas, apareciendo subordinados los feldespatos y los fragmentos de chert (Fig. 14-A). Los granos de cuarzo se vuelven más abundantes de modo regular entre los metros 2651 y los 2456, mientras que por encima presentan un comportamiento poco predecible, mostrando su curva de frecuencia un aspecto serrado. En cambio los fragmentos de rocas ígneas presentan fluctuaciones erráticas en su frecuencia a lo largo de todo el pozo desde su aparición en el metro 2639.

En cambio, en CuMa-par la distribución de los granos de cuarzo es más errática, presentando fluctuaciones, aunque menos importantes que las de los fragmentos de rocas ígneas. Las fluctuaciones más importantes para los fragmentos de rocas ígneas se dan en el intervalo situado entre los metros 2698 y 2614, en el que también son más abundantes (Fig. 13). Hacia la parte alta de la sucesión, entre los metros 2152 y 1984, se produce un claro aumento en la proporción de estos granos. En este pozo, los granos de chert y de feldespato también aparecen subordinados, siendo puntual la aparición de los primeros y bastante constante la de los segundos.

#### **3.2.2. Lutitas**

En ambos pozos la abundancia de las lutitas en conjunto (ricas o no en materia orgánica) sigue un patrón inverso al de las areniscas (Figs. 13 y 14).

En el pozo CuMa-impar las lutitas ricas en materia orgánica son especialmente abundantes desde la base de la serie hasta los 3082 metros de profundidad, apareciendo en niveles superiores de forma puntual (Fig. 13-C). Los cuatro tipos distinguidos presentan una distribución desigual a lo largo de la sucesión. En los niveles estratigráficos más bajos (parte baja de la Formación Los Molles), aparecen preferentemente las lutitas con radiolarios, volviéndose escasas por encima. En niveles estratigráficos más altos de esta misma formación se verifica una mayor presencia de lutitas con láminas de materia orgánica y de las lutitas de aspecto masivo. Finalmente en la Formación Lajas, los tipos predominantes son las lutitas con estructuras arborescentes y las lutitas con láminas de materia orgánica.

En el pozo CuMa-impar hay un claro dominio de las de tipo masivo, seguidas por las lutitas con láminas de materia orgánica y por las que contienen radiolarios (Fig. 14-C). Las lutitas con estructuras arborescentes, más escasas, aparecen solamente en dos intervalos, teniendo en uno (entre 2555 y 2635 metros) especial importancia. Las lutitas masivas empiezan a aparecer en la base de la sucesión donde forman la litología principal y hacia techo pierden importancia con rapidez para después recuperarla en intervalos aislados hasta los 2909 metros, a partir de donde pasan a ser menos abundantes y aparecer de modo puntual. Las lutitas con estructuras arborescentes también tienen cierta importancia en la parte baja de la serie aunque después decrece junto con la de las de tipo masivo para llegar a desaparecer casi por completo a los 2909 metros; más arriba entre los metros 2819 y 2807 presentan un pico de abundancia, formando más del 70% de las rocas. Las lutitas con radiolarios están agrupadas en un intervalo entre 2855 y 3017, en forma de picos aislados.

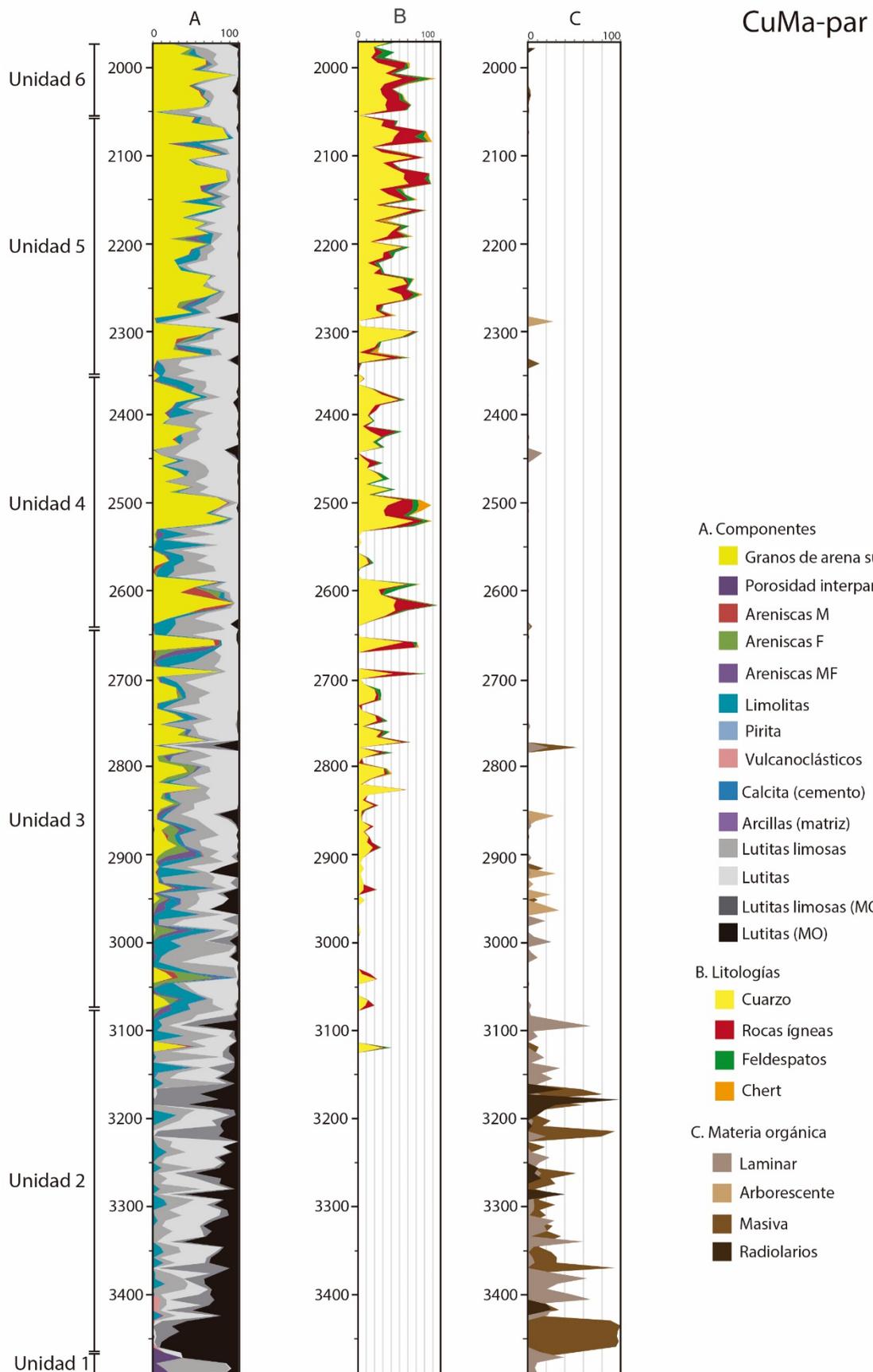


Figura 13. Síntesis de los componentes de CuMa-par junto a la relación entre litologías de las areniscas y los tipos de lutitas ricas en materia orgánica. Escala vertical no constante.

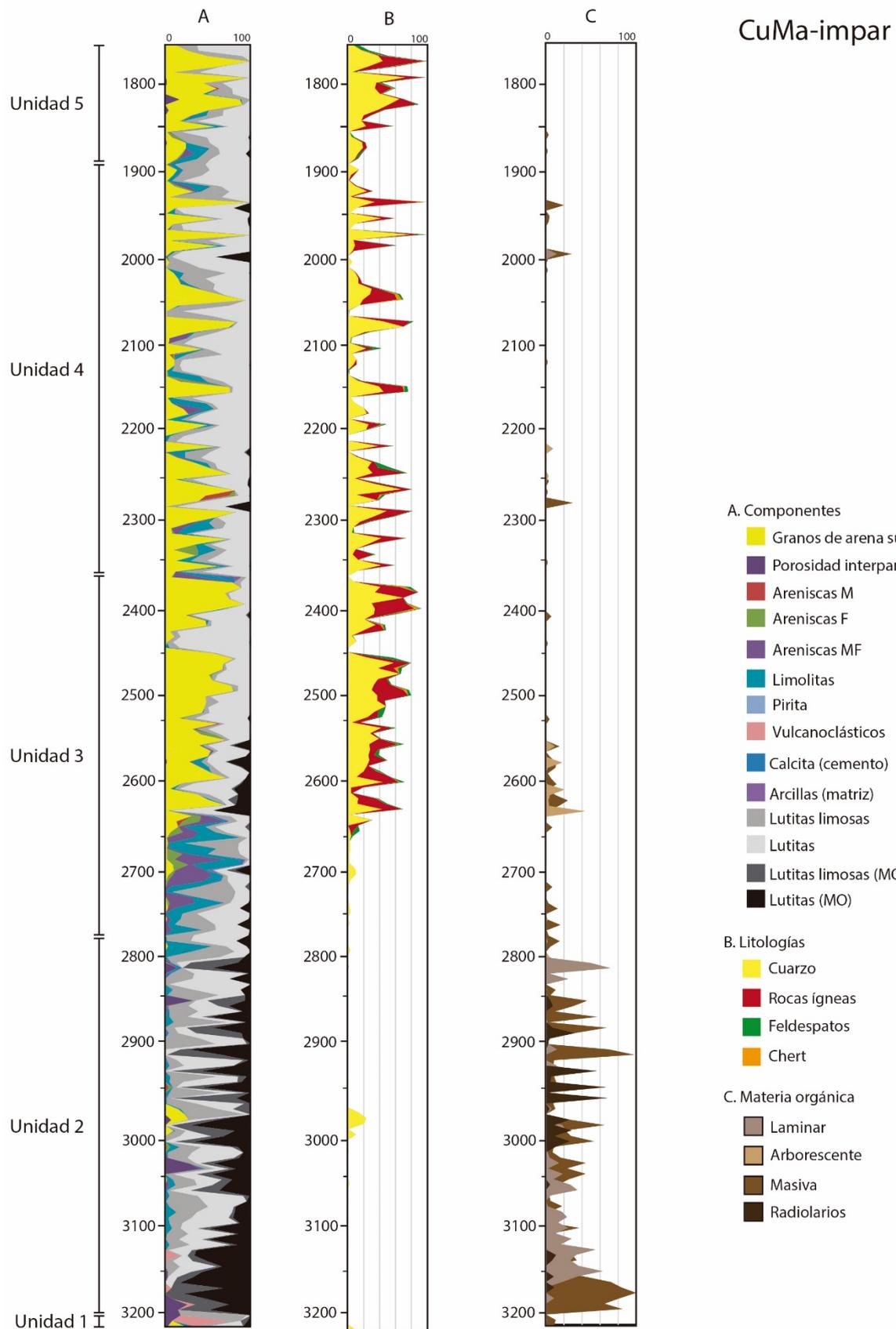


Figura 14. Síntesis de los componentes de CuMa-impar junto a la relación entre litologías de las areniscas y los tipos de lutitas ricas en materia orgánica. Escala vertical no constante.

### 3.3. Columna estratigráfica

Con los datos de los rípios de CuMa-par y los de las diagramas de sondeo se ha realizado una columna sintética de la sección entre 3028 y 3136 m. A grandes rasgos es una secuencia que, observando los componentes en base al tamaño de grano (Fig. 15-A) se identifican, de base a techo, unos niveles con proporciones altas en limos y lutitas, con proporciones variables en lutitas ricas en materia orgánica. Entre los primeros metros se encuentra una muestra que presenta de manera aislada sobre un 30% de arena media. Posteriormente, y separado de la secuencia anterior por lutitas ricas en materia orgánica, empiezan dos sucesiones granocrecientes con abundante cemento de calcita

En la interpretación hecha en la columna estratigráfica (Fig. 15-B) se observa que en la parte basal del GR hay una disminución de la radiación, lo cual indica un nivel de arenas que, comparando con los datos de los rípios, se sabe que son principalmente de grano medio con un poco de cemento de calcita, como atestigua el PEF con valores más altos que si fuera una arenisca sin cementar.

Posteriormente se observan lutitas, limolitas y areniscas de grano muy fino, interpretadas gracias al GR y a los valores de densidad (RHOB) y porosidad (NPHI). Este intervalo está seguido por una sucesión que empieza con lutitas ricas en materia orgánica, marcadas por un máximo en el GR, y una alternancia de lutitas grises con limolitas con contenido variable en cemento de carbonato, como marcan los datos de los rípios y el factor fotoeléctrico (PEF). En la parte superior se encuentran unas areniscas de grano medio junto a unas limolitas, visibles en el GR, en las cuales es posible ver el “*gas effect*” del log de densidad y de porosidad, presentando una bajada de la densidad y de la porosidad hasta llegar a cruzar levemente los gráficos, marcando la posible presencia de gas en estas rocas.

Esas areniscas marcarían el límite superior de la primera secuencia granocreciente, empezando la segunda con intercalaciones de lutitas con areniscas y limolitas que rápidamente pasan a areniscas de grano fino a grueso en la zona superior, en la que también existe la posibilidad de que las rocas alberguen gas.

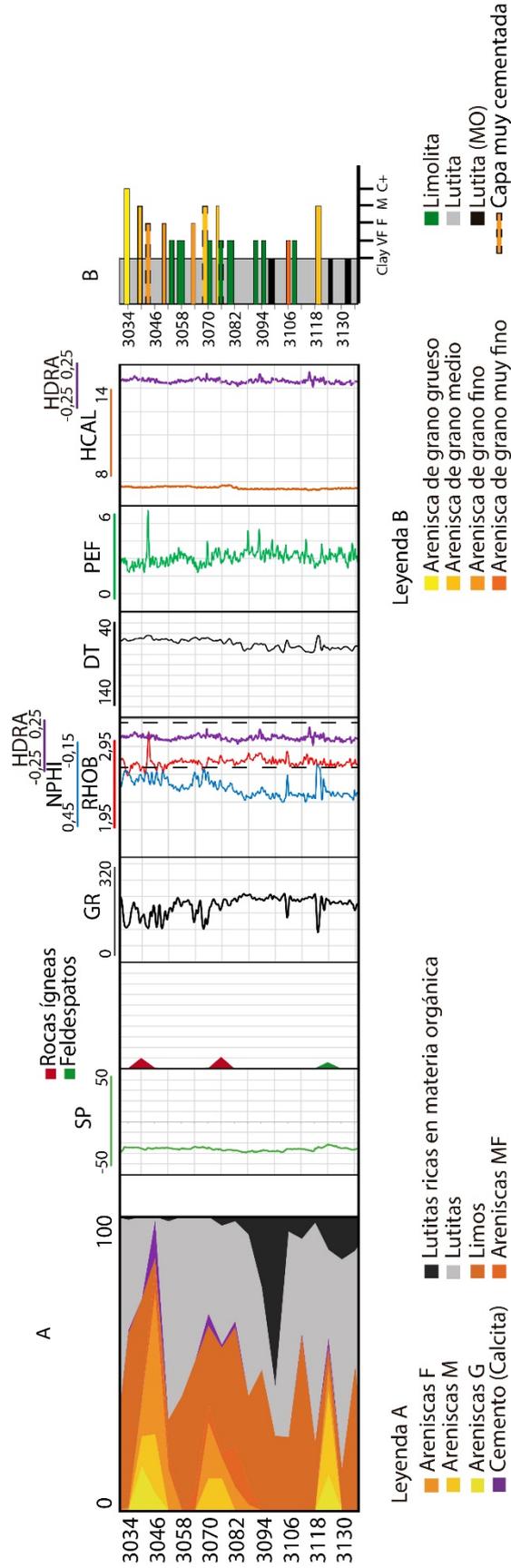


Figura 15. Sección de CuMa-par con los datos de los rípos correlacionados con las diagráfias de sondeo junto con la interpretación en forma de columna estratigráfica.

Por otro lado, en gran parte de las diagramas es muy difícil la utilización de los logs de densidad y neutrón, dado que, como se ha explicado en apartados anteriores, estos dependen de la estabilidad de las paredes del pozo y en el momento en que hay desprendimientos los datos dejan de ser fiables. Esto se observa con HDRA, cuando los valores exceden el 0,15 dejan de ser fiables los datos recogidos por NPHI y RHOB, como se observa en la figura 15 sus valores fluctúan de manera caótica.

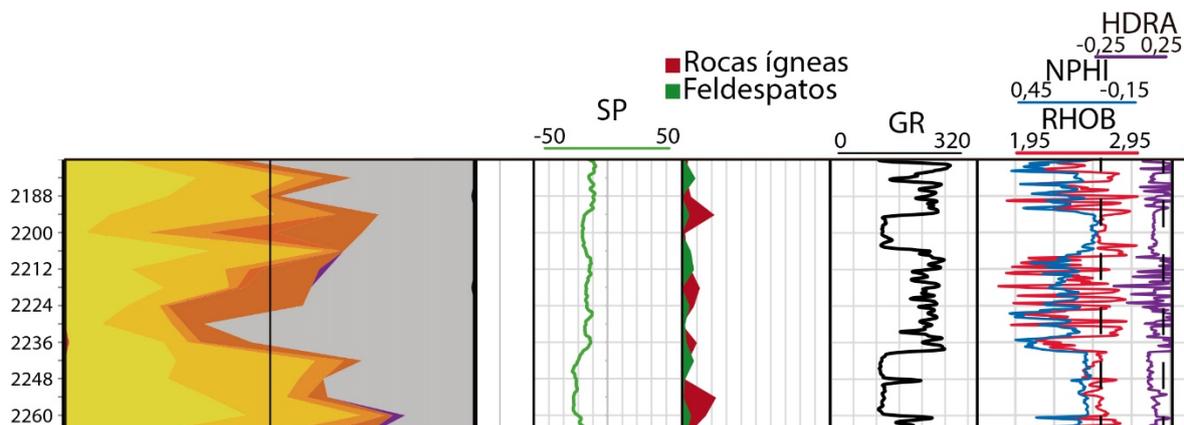


Figura 146. Sección de CuMa-par mostrando las fluctuaciones en los logs de densidad (RHOB) y porosidad (NPHI) en función de las del log de control HDRA.

### 3.4. Estratigrafía

Las gráficas de composición petrográfica de ambos pozos muestran una distribución vertical definida de las distintas litologías y tipos petrográficos que permiten distinguir varias unidades estratigráficas con una tendencia general granocreciente.

#### 3.4.1. Pozo CuMa-par

En este pozo se han separado las siguientes unidades estratigráficas (Fig. 13) que se referencian por su profundidad.

Unidad 1 (3490-3466 m). Está caracterizada por concentrar la aparición de calizas y margas y por el brusco aumento de los de lutitas limosas en detrimento de los componentes que dominan la Unidad 2 suprayacente.

Unidad 2 (3466-3076 m). Queda definida por el predominio de las litologías terrígenas más finas, lutitas y lutitas limosas. En la parte baja de la unidad, las lutitas son más ricas en materia orgánica, llegando a representar casi la totalidad de la muestra, y hacia techo van dando paso a los equivalentes pobres en materia orgánica. Paralelamente se va verificando un progresivo aumento de las limolitas, dibujándose en conjunto una secuencia granocreciente muy bien definida. Dentro de esta unidad se producen a 3208 m y a 3124 m sendas apariciones de areniscas. Estos dos intervalos ricos en areniscas parecen corresponder a intercalaciones de límites netos, a juzgar por su extensión vertical y por el alto porcentaje de areniscas que la intercalación superior presenta (40% de la muestra). Estas areniscas son de grano

fino la inferior y de grano medio la superior, lo que también apoya el que su aparición tenga un carácter brusco. Otro rasgo distintivo de esta unidad es la relativamente alta abundancia de rocas volcánicas que se produce entre los metros 3412 y 3436 y que presumiblemente corresponda a una intercalación de lavas o de rocas vulcanoclásticas. Finalmente, las lutitas ricas en materia orgánica presentan unos patrones de aumento y disminución de abundancia que parecen tener una ciclicidad del orden de 40-60 metros.

Unidad 3 (3076-2644 m). Definida por un progresivo aumento de las areniscas siguiendo una tendencia compuesta de ciclos de menor espesor, evidenciados por fluctuaciones en la proporción de areniscas y por máximos relativos transitorios en la abundancia de lutitas ricas en materia orgánica. Su techo se ha determinado en un brusco descenso en el porcentaje de areniscas y en la aparición de otro máximo en el porcentaje de lutitas en materia orgánica. Dentro de esta unidad podrían definirse dos subunidades con límite en los 2920 m. Por debajo las variaciones verticales en la abundancia de areniscas parecen organizarse en ciclos granocrecientes de 20-40 m de espesor, mientras que por encima de 2920 m, esta organización no es tan clara y se observan tendencias granocrecientes y granodecrescentes. Estas fluctuaciones en el contenido en areniscas vienen acompañadas del comportamiento inverso de las lutitas ricas en materia orgánica.

Unidad 4 (2644-2350 m): está definida por ciclos de unos 60 metros de espesor de aumento y disminución en el porcentaje de areniscas separados por intervalos más ricos en lutitas que concentran la aparición de lutitas con materia orgánica (Fig. 13C) con una disminución general a escala de toda la unidad. A 2560-2554 m se encuentra el máximo de abundancia de finos en un intervalo rico en lutitas especialmente potente que alternativamente podría tomarse como el límite entre las unidades 3 y 4. A lo largo de este intervalo, las lutitas ricas en materia orgánica, más escasas que en niveles infrayacentes aparecen también marcando los límites entre los ciclos definidos por las areniscas.

Unidad 5 (2350-2056 m) presenta una tendencia general de aumento de las areniscas hacia techo hasta que disminuyen bruscamente de abundancia.

Unidad 6 (1972-2056 m) engloba a unas areniscas de grano mayoritariamente grueso, con algunas intercalaciones de lutitas y niveles poco importantes de lutitas ricas en materia orgánica. En este intervalo se encuentran con relativa frecuencia lutitas rojas y esférulas de siderita.

### **3.4.2. Pozo CuMa-impar**

Como el pozo anterior, el registro de los ripios muestra una clara secuencia granocreciente general, desde una parte baja dominada por rocas de grano fino hasta un intervalo superior de rocas de grano esencialmente grueso con intercalaciones de lutitas (Fig. 14). Las unidades estratigráficas que pueden definirse en base a la distribución de litologías guardan algunas diferencias con las definidas en el pozo anterior.

Unidad 1 (3215-3203 m). Es similar la Unidad 1 del pozo anterior, estando igualmente definido por calizas y lutitas ricas en materia orgánica. Sin embargo, la parte baja de esta unidad contiene abundantes depósitos de rocas volcánicas/vulcanoclásticas y una proporción apreciable de areniscas.

Unidad 2 (3203-2780 m). Similar a la Unidad 2 del pozo anterior en litología y organización vertical, presenta las mismas litologías predominantes de grano fino, con una sustitución hacia techo de las lutitas y lutitas limosas ricas en materia orgánica por las pobres con un aumento paralelo en la abundancia de limolitas. Como en el caso del pozo anterior, las lutitas ricas en materia orgánica presentan variaciones en su abundancia que pudieran registrar una ciclicidad de escala de unas decenas de metros. Presenta igualmente un intervalo con rocas volcánicas o vulcanoclásticas (3134 m) y sendos intervalos ricos en areniscas de grano principalmente grueso y medio (a 3053 m el inferior y entre 3017 y 2975 m el superior), si bien a diferencia del caso del pozo CuMa-par, el intervalo superior presenta una organización granocreciente. Finalmente esta unidad contiene cuatro intervalos ricos en calizas, que de muro a techo se sitúan a 3041-3035 m), 2987 m, 2855 m y 2810 m.

Unidad 3 (2780-2663 m). Está caracterizada por el aumento general en la proporción de areniscas individualizándose varias secuencias menores de tendencia generalmente granocreciente de unos 60-80 m de espesor. Los intervalos de grano fino que las separan son delgados salvo el que separa las dos superiores, situado a 2450 m. Si se atiende a la distribución de las lutitas ricas en materia orgánica, estas muestran dos grandes ciclos granocrecientes cuyo límite se encuentra a 2663 m coincidiendo con un aparente límite menor en las tendencias deducibles de las areniscas.

Unidad 4 (2663-1892 m). Este intervalo no presenta una organización general clara, mostrando una disminución general poco marcada de las areniscas hacia techo; en él se pueden individualizar intervalos más ricos en areniscas separados por otros en los que las lutitas, en algunos casos ricas en materia orgánica, son predominantes a casi exclusivas. Estos posibles ciclos tienen un espesor cercano a los 100 m.

Unidad 5 (1892-1751 m). Presenta una tendencia granocreciente general compuesta con algunos niveles de calizas y lutitas intercalados.

## **4. Discusión de los resultados**

### **4.1. El encuadre en la litoestratigrafía de la cuenca**

Las unidades estratigráficas definidas en base a las características litológicas y petrográficas de la sucesión cortada se encuadran con facilidad en la litoestratigrafía definida en superficie y en el subsuelo para este sector de la cuenca neuquina (Figs. 5 y 6).

La Unidad 1, el primer intervalo se corresponde al Grupo Precuyo, depositado en la cuenca de intra-arco durante la fase de *rifting* entre el Triásico superior y el Lias, y formado por niveles vulcanoclásticos alternando con margas, lutitas y limolitas.

La Unidad 2 de ambos pozos corresponde a la Formación Los Molles, dispuesta sobre el del Grupo Precuyo mediante la Discordancia Intraliásica (o Rioatuélica) y constituida por depósitos prodeltaicos con intercalaciones de cuerpos turbidíticos de cuenca profunda y con algunas manifestaciones volcánicas (Leanza, 1990; Paim et al., 2008).

El resto de las unidades, salvo la superior, corresponde a la Formación Lajas. Dentro de ella, la Unidad 3 de ambos pozos, que presenta una organización granocreciente bien marcada, continuación de la Unidad 2, se corresponde con la unidad inferior de aquella formación. Registraría la primera progradación de los sedimentos deltaicos de la Formación Lajas (ver, Leanza, 1990; Paim et al., 2008; entre otros) sobre el talud deltaico de la Formación Los Molles. El resto de la formación aparece representado en ambos pozos por un apilamiento de unidades areniscosas y lutíticas sin una tendencia vertical tan definida, se correspondería con la porción de la formación que es interpretada como depósitos de llanura deltaica. (T. Smith, com. pers).

La totalidad de la Unidad superior (Unidad 6) en el pozo CuMa-par y la parte más alta de la misma (Unidad 5) en el pozo CuMa-impar se correlacionaría con la parte basal de la Formación Lotena, constituida por depósitos fluviales. Esta correlación se basa en la aparición brusca de ripios de lutitas rojizas, que son especialmente abundantes en el pozo CuMa-par.

Finalmente, en las gráficas de composición determinadas a partir del estudio de los ripios no es posible detectar ninguna de las discontinuidades que han sido descritas en la sucesión, tanto en el afloramiento (ver p. ej. Leanza, 1990, 2009) como en el subsuelo (ver apartado siguiente). La discontinuidad que se cita en el contacto entre las formaciones Los Molles y Lajas (discordancia Intracuyana o Seguélica) no es detectable, aunque como se indicará en el apartado siguiente de correlación su posición debe variar en función de la situación dentro de la cuenca sedimentaria.

### **4.2. Correlación entre ambos pozos: disposición a gran escala de las unidades de estratos**

Los dos pozos estudiados se disponen en una traza aproximadamente oblicua a las paleocorrientes deducidas regionalmente, de modo que el pozo CuMa-par estaría situado en una posición más proximal. Esta situación relativa se refleja en las

características de las secciones de ambos pozos determinadas a partir del análisis de los ripios.

En el pozo CuMa-par las areniscas son en general de tamaño de grano más grueso y la presencia de ripios de lutitas rojas edáficas de la Formación Lotena se produce en un espesor de serie mayor (Fig.17). Igualmente en el pozo CuMa-impar se registra una mayor abundancia de calizas dentro de la Formación Los Molles, y de intervalos conteniendo radiolarios.

Contrasta sin embargo la existencia de paquetes ricos en areniscas más potentes en el pozo CuMa-impar; este hecho pudiera explicarse por una migración lateral de los depocentros de los sucesivos lóbulos deltaicos (Fig. 17).

La correlación entre los dos pozos se ha realizado mediante un panel sísmico convertido a profundidad sobre el que se han representado las gráficas de composición petrográfica de ambos sondeos y se han representado las principales discontinuidades discernibles en el subsuelo; toda esta labor ha sido realizada por YPF propietaria de la información sísmica (Fig. 18). Dada la densidad de la malla sísmica disponible, el panel sísmico se ha realizado entre los dos pozos no habiendo sido necesario proyectarlos sobre la sección. Esto permite un mejor control de la relación entre los reflectores sísmicos y los distintos límites litológicos discernibles sobre las gráficas y susceptibles de ser los responsables de las reflexiones. El perfil sísmico está confeccionado con las reflexiones positivas (aumento de impedancia) hacia la derecha y codificadas en negro y las negativas hacia la izquierda codificadas en blanco, con la variación de amplitud codificada en intensidad de grises.

Existe en conjunto una serie de discontinuidades que cortan una sucesión que presenta cambios laterales de facies claramente visibles, de modo que una determinada discontinuidad puede encontrarse entre conjuntos litológicos diferentes en función de su posición geográfica. En este sentido, las discontinuidades que se citan en la bibliografía pueden no mantener la misma posición a lo largo de su trazado respecto a las unidades litoestratigráficas definidas.

En el ámbito del área de estudio, las discontinuidades más bajas (D1, verde oscuro, y D2, naranja oscuro) se disponen junto con los estratos que las contienen con una relación de *downlap* sobre la discontinuidad D0 (rojo), correspondiente a la discontinuidad basal del Grupo Cuyo.

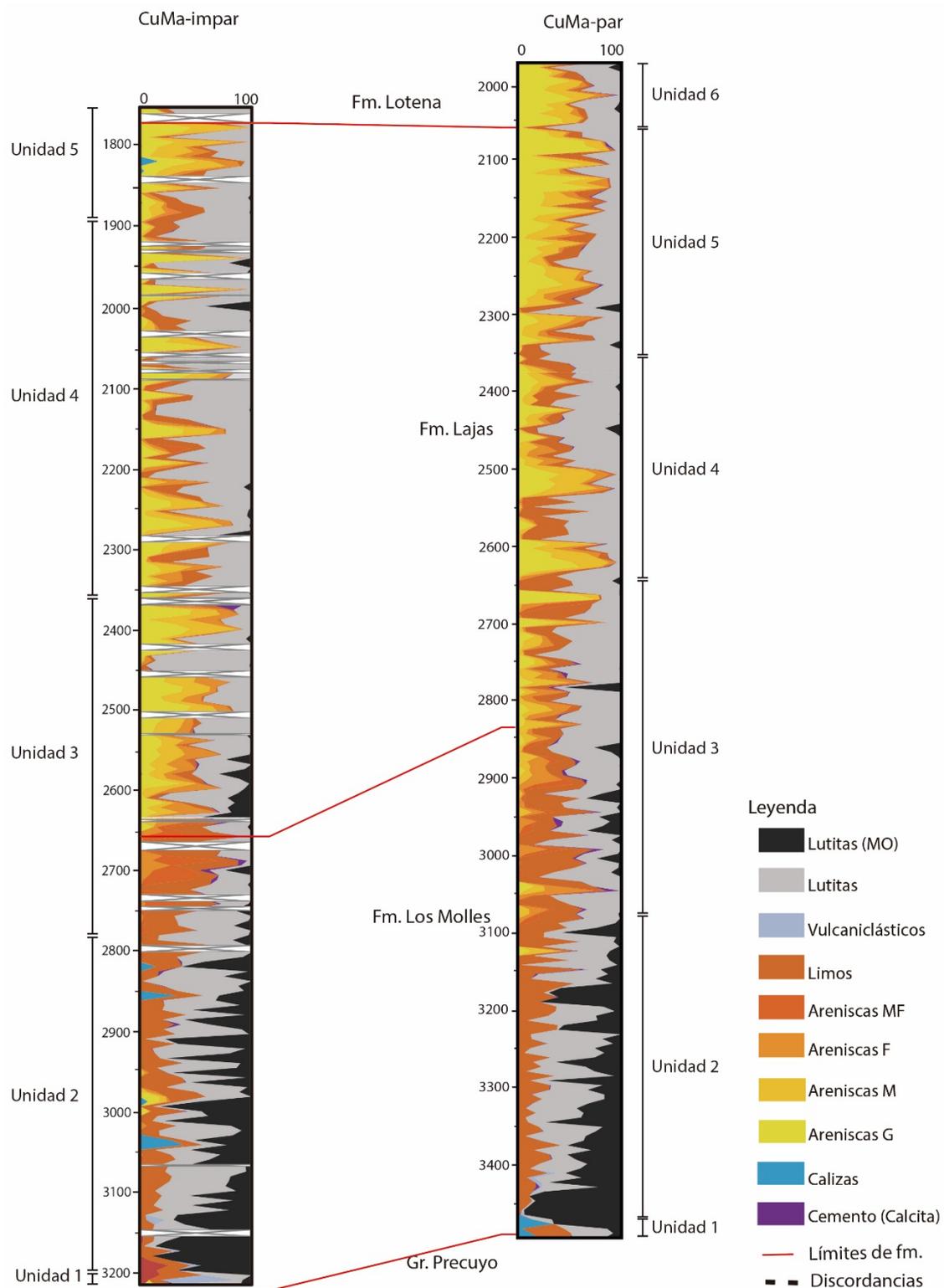
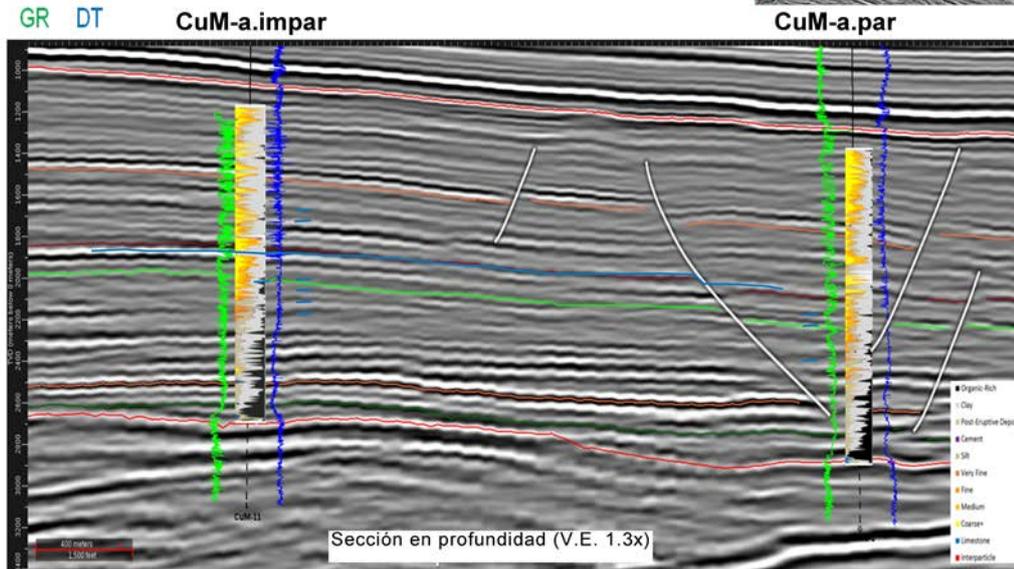
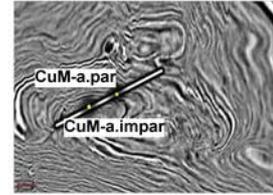


Figura 17. Comparación de los tamaños de grano de ambos pozos con los límites entre formaciones (según la información proporcionada)

Correlación cuttings-sísmica Univ. Oviedo  
(YPF)



2

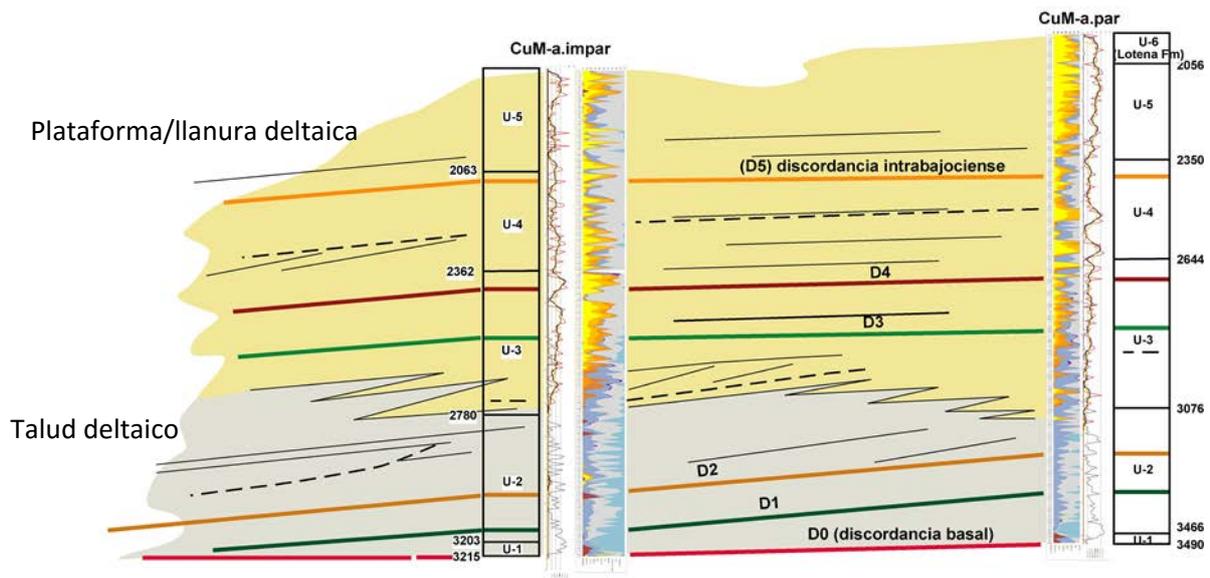


Figura 158. Panel sísmico con la interpretación de las principales discordancias. Debajo la interpretación de las mismas relacionadas con las diferentes unidades descritas en la descripción de la estratigrafía.

De modo coherente con lo anterior, la sucesión que se encuentra bajo la discontinuidad verde manzana (D3) presenta dos tipos de facies sísmicas. La facies sísmica inferior está constituida por reflectores continuos de alta amplitud y disposición clinoformal que se disponen con una relación de *downlap* tanto sobre la discontinuidad basal como, a menor escala, sobre la discontinuidad D2 (naranja oscuro). Estos reflectores pendiente arriba pasan a la segunda facies sísmica, constituida por reflectores discontinuos, de menor amplitud y disposición paralela. Estos dos conjuntos equivalen a un conjunto progradante que pasa a techo a un conjunto con

estratificación horizontal y menor contraste litológico respectivamente. Ambos conjuntos son interpretados como un talud (deltaico) progradante que es cubierto por un conjunto de estratos con disposición de *topset* y que corresponderían a una plataforma/llanura deltaica. Ambos conjuntos equivalen a las unidades 1 y 2 (Formación Los Molles) y 3 (parte baja de la Fm. Lajas) representada por depósitos de frente deltaico y llanura deltaica.

En el conjunto progradante inferior se aprecia una cicatriz con truncación de capas en el extremo NO, por encima de la discontinuidad D2 (naranja oscuro). Este rasgo se interpreta que podría corresponder a una cicatriz asociada a un sistema de alimentación de un turbidítico que aparecería desarrollado aguas abajo, fuera ya del área de estudio. En base a los datos obtenidos de los ripios, en el pozo CuMa-impar no hay señales evidentes de este rasgo. En la facies sísmica superior se interpreta que podría haber una discontinuidad que estaría truncando un conjunto de clinofomas de poca altura y bajo ángulo que hacia el interior de la cuenca acabaría enlazando con el conjunto progradante inferior. Este dispositivo podría corresponder a un delta de aguas someras que por progradación alcanzaría el margen de la plataforma pasando a constituir el delta principal de aguas profundas.

Por encima de la discontinuidad D3, la sucesión está integrada por unas facies sísmicas de reflectores principalmente paralelos con amplitud y continuidad variable. Este conjunto equivaldría al resto de las unidades definidas en la sucesión de ambos pozos y vendría esencialmente a constituir un conjunto de *topset*, muy probablemente un complejo de llanuras deltaicas superpuestas que hacia el interior de la cuenca acabaría enlazando con el conjunto clinoformal progradante basal tal como indican los datos de geología regional. La existencia en este conjunto sin embargo de patrones de apilamiento granocrecientes así como las intercalaciones de lutitas con materia orgánica que los limitan permite especular que en este conjunto se desarrollarían unidades progradantes limitadas por eventos transgresivos. Estas unidades progradantes estarían avanzando sobre una cuenca somera (deltas de aguas someras) con lo que su espesor sería demasiado pequeño como reflejarse en la geometría de los reflectores.

Una conclusión que el panel sísmico permite alcanzar atañe a la limitada continuidad lateral que presentan las unidades estratigráficas definidas en el capítulo anterior salvo en la parte baja de la sucesión. En esta parte inferior, dentro de la Formación Los Molles, y en ambas secciones, se reconocen dos ciclos granocrecientes que son correlacionables y que están limitados a su techo por las discontinuidades verde oscuro (D1) y naranja oscuro (D2), respectivamente. Sin embargo, por encima, los patrones de apilamiento y de distribución de cuerpos arenosos a gran escala que fueron utilizados para definir unidades estratigráficas (unidades 1 a 6 y 1 a 5 en el pozo CuMa-impar no presenta continuidad entre ambos pozos, de modo que estos rasgos no pueden ser tomados como criterio de correlación entre las secciones a larga distancia.

### **4.3. Implicaciones sedimentológicas**

Las características del estudio realizado (tipo de datos recogidos, poder de resolución de los mismos) limitan en gran manera la obtención de conclusiones de tipo

sedimentológico. No obstante se considera adecuado hacer algunas precisiones para contribuir al conocimiento que a escala regional se tiene sobre el funcionamiento de los sistemas (fan) deltaicos del Grupo Cuyo. Tanto los depósitos marinos someros como los depósitos turbidíticos distalmente asociados a ellos han sido interpretados por diversos autores como ligados a sistemas dominados por avenidas (Gulisano y Gutiérrez Pleimling, 1994; Paim et al., 2008; Zavala, 2008).

Los sistemas dominados por avenidas son aquellos en los que los flujos tienen un comportamiento hiperpícnico. Los flujos hiperpícnicos son aquellos que provienen del continente y tienen una densidad mayor a la del agua de la cuenca (mar o lago), debido a su gran carga de sedimento, transportado en forma de suspensión turbulenta (Mulder et al., 2003). Esta clase de sistemas tienden a desarrollarse en relación a sistemas aluviales de zonas tectónicamente activas, como es el caso de la zona de estudio, o sometidas grandes tormentas y terremotos o deshielos de carácter catastrófico (caso de los Scablands del estado de Washington –EEUU– o de los jokullhaups de Islandia). En estos sistemas, el momento alcanzado por los flujos puede permitir el bypass de la desembocadura fluvial y el transporta hasta o más allá de la plataforma, alimentando directamente los sistemas marinos profundos (ver Mutti et al., 1996; Mutti et al., 2000; Pattison et al. 2007; Zavala et al., 2011). El reconocimiento de estos sistemas tiene importancia por dos aspectos, la distribución de los sedimentos arenosos y su capacidad de incorporar a la cuenca cantidades significativas de materia orgánica de origen vegetal terrestre, capaz de generar hidrocarburos gaseosos).

En el presente estudio se ha observado que intercalados entre las lutitas de talud deltaico de la Formación Los Molles se encuentran varios cuerpos de areniscas (metros 3208 y 3124 del pozo CuMa-par y en los metros 3059–3053 y entre los metros 3017 y 2951) que presentan un grano relativamente grueso para su posición en relación al frente deltaico de esos momentos. No existen datos claros ni las diagráfias ni la sísmica permiten establecer conclusiones acerca de su organización interna y geometría, pero algunos de ellos pudieran corresponder a cuerpos de límites netos que estuvieran rellenando un canal turbidítico o constituir cuerpos lobulares depositados sobre el talud. Ejemplos de este tipo de depósitos existen en superficie en regiones situadas más hacia el W (hacia el interior de la cuenca), principalmente en la región de Las Jardineras, donde corresponden a los afloramientos estudiados por los autores arriba citados.

## 5. Conclusiones

En este estudio se ha seguido el método desarrollado por T. Smith para caracterizar la estratigrafía y composición y textura de las rocas sedimentarias mediante ripios de sondeos y diagráfias, Este método, desarrollado para su aplicación en la E&P de hidrocarburos se ha revelado extremadamente útil y operativo en términos de tiempo, costes y objetividad de los datos en numerosas cuencas petrolíferas.

El estudio se ha aplicado a dos pozos de la Cuenca Neuquina (CuMa-par y CuMa-impar) en los que se ha estudiado el intervalo estratigráfico de las formaciones Los Molles y Lajas (Grupo Cuyo) y a la base de la Formación Lotena suprayacente (Pliensbachense-Oxfordiense). Este conjunto representa un complejo fan deltaico progradante con las facies de talud y cuenca (Los Molles) cubiertas por las facies de frente y llanura deltaica (Lajas), sobre las que finalmente descansan discordantemente los depósitos fluviales (Lotena). El conjunto representa un sistema petrolero conteniendo niveles de roca madre (Los Molles) y almacenes y sellos (Lajas y Lotena).

De modo complementario, y en base a las características de las rocas estudiadas se han agregado algunos parámetros al método de Smith, con el fin de obtener resultados de detalle de algunos componentes que no estaban contemplados en la hoja de cálculo inicial. Estas precisiones atañen a discriminar los porcentajes de cuarzo, fragmentos de rocas ígneas, feldespatos y tipos y chert dentro de las areniscas, y a diferenciar distintos tipos de lutitas y de lutitas ricas en materia orgánica.

Los porcentajes de fragmentos de rocas ígneas y feldespatos en las areniscas han permitido constatar el escaso poder diagnóstico de las diagráfias de emisión natural de rayos gamma (GR) para discriminar entre lutitas y areniscas en los casos en los que aquellos son altos. Este hecho y las frecuentes desestabilizaciones de las paredes de los pozos estudiados han impedido aplicar de modo sistemático la información de las diagráfias a la de los ripios para obtener una mayor resolución en caracterización de la organización de los depósitos.

Se han diferenciado en ambos pozos, a grandes rasgos, las distintas litofacies e intervalos estratigráficos de carácter puramente litológico que conforman las formaciones Los Molles y Lajas. Los intervalos distinguidos son:

- Las facies del techo del Grupo Precuyo con las intercalaciones de lutitas con carbonatos y depósitos vulcanoclásticos (especialmente en CuMa-impar);
- Facies predominantemente finas, lutíticas, con abundante materia orgánica de modo general, organizadas en una secuencia granocreciente, en ocasionales con niveles más areniscosos de relativamente grano grueso de posible origen turbidítico (Formación Los Molles);
- Facies fundamentalmente arenosas, organizadas en una secuencia granocreciente continuación de la inferior (parte baja de la Formación Lajas), seguida de-

- Alternancias de niveles areniscosos y otros más lutíticos sin una organización definida (parte media y alta de la Formación Lajas) y finalmente,
- Alternancias similares a las anteriores, pero conteniendo lutitas rojizas base de la Formación Lotena).

Los resultados son coherentes con la posición paleogeográfica de ambos pozos, con el pozo CuMa-par de posición más proximal, presentando mayores contenidos en lutitas rojas (suelos bien drenados) y areniscas más groseras y el pozo CuMa-impar con más intercalaciones de calizas en la Formación Los Molles.

Finalmente se han aportado datos que, sin ser determinantes, pueden ayudar a entender el funcionamiento general de los sistemas fluviodeltaicos durante el Jurásico y el papel que las avenidas pudieron haber desempeñado en su generación.

Con el conocimiento de la sucesión alcanzado se estima que diversos parámetros no contabilizados podrían ser de interés en futuros estudios para proporcionar información sobre de las relaciones entre composición y granulometría de areniscas y acerca del área madre:

- el tamaño de grano de los distintos componentes (cuarzo, feldespatos, fragmentos de roca ígneos y chert)
- a abundancia respectiva de fragmentos de roca ígneos plutónicos y volcánicos

## 6. Bibliografía

Arregui, C.; O. Carbone, y H. A. Leanza (2011). Contexto tectosedimentario. In Congreso Geológico Argentino. Relatorio Geología y Recursos Naturales de la Provincia del Neuquén, p. 29-36.

Adams, J.A.S. y Weaver, C.K. 1958. Thorium to uranium ratios as indicators of sedimentary processes: example of concept of geochemical facies. AAPG Bulletin, p. 387-430.

Ballent, S. 1987. Foraminíferos y ostrácodos del Jurásico Inferior de la Argentina. Revista Museo La Plata (n.s.) Paleontología, p. 43-130.

Bailey, E.H. y Stevens, R.E. 1960. Selective staining of k-feldspar and plagioclase on rock slabs and thin sections. The American Mineralogist, p. 102-1025.

Bhattacharya, J.P. y MacEachern, J.A. 2009. Hyperpycnal rivers and prodeltaic shelves in the Cretaceous seaway of North America: JSR, p. 184-209.

Chernicoff, C.J. & Zappetini, E.O. 2003. Delimitación de los terrenos tectono-estratigráficos de la región centro-austral Argentina: evidencias aeromagnéticas. Revista Geológica de Chile, p. 299-316.

Dellapé, D.A., Pando, G.A., Uliana, M.A. & Musacchio, E.A. 1978. Foraminíferos y ostrácodos del Jurásico en las inmediaciones del arroyo Picún Leufú y la ruta 40 (Provincia del Neuquén, Argentina) con algunas consideraciones sobre la estratigrafía de la Formación Lotena. 7° Congreso Geológico Argentino, p. 489-507.

Dickson, J.A.D. 1965. A Modified Staining Technique for Carbonates in Thin Section. Nature, p. 587.

Folk, R.L. 1974. Petrology of Sedimentary Rocks. Hempill Publishing Company, Austin Texas, p. 182.

Gasparini, Z., Fernández, M.S. y de la Fuente, M. 1992. Reptiles marinos jurásicos de la Cuenca Neuquina. I.G.C. Project 322. First Field Conference, p. 13-14.

Girard, F., Ghienne, J.F., Rubino y J.L. 2012. Occurrence of hyperpycnal flows and hybrid event beds related to glacial outburst. Events in a late Ordovician proglacial delta (Murzuq Basin, SW Libya). JSR, p. 688-708.

Gómez Omil, R., Schmithalter, J., Cangini, A., Albariño, L. y Corsi, A. 2002. El Grupo Cuyo en la Dorsal de Huincul, consideraciones estratigráficas, tectónicas y petroleras. Cuenca Neuquina. 5° Congreso de Exploración y Desarrollo de Hidrocarburos, Actas en CD.

Groeber, P. 1929. Líneas fundamentales de la geología del Neuquén, sur de Mendoza y regiones adyacentes. Dirección Nacional de Geología y Minería, Publicación, p. 110.

Gulisano, C.A., Gutiérrez Pleimling, A.R. y Digregorio, R.E. 1984. Esquema estratigráfico de la secuencia jurásica al oeste de la provincia del Neuquén. 9° Congreso Geológico Argentino, p. 236-259.

Gulisano, C.A. y Gutiérrez Pleimling, A.R. 1995. The Jurassic of Neuquén Basin. a) Neuquén Province. Field Guide. Secretaría de Minería de la Nación y Asociación Geológica Argentina, Serie E, p. 111.

Herrero Ducloux, A. 1946. Contribución al conocimiento geológico del Neuquén extrandino. Boletín Informaciones Petroleras, p. 245-281.

Kielbowicz, A.A. 1987. Foraminíferos del Toarciano Inferior y del Aaleniano-Bajociano de la Fm. Los Molles, Cuenca Neuquina, Argentina. 10° Congreso Geológico Argentino, p. 139-141.

Kostadinoff, J., Gregori, D y Raniolo, A. 2005. Configuración geofísicageológica del sector norte de la provincia de Río Negro. Revista de la Asociación Geológica Argentina, p. 368-376.

Lamb, M.P. y D. Mohrig. 2009. Do hyperpycnal-flow deposits record river-flood dynamics? *Geology*, p. 1067-1070.

Leanza, H.A. 1990. Estratigrafía del Paleozoico y Mesozoico anterior a los movimientos intermámicos en la comarca del Cerro Chachil, provincia de Neuquén, p. 272-299.

Leanza, H.A. 2009. Las principales discordancias del Mesozoico de la Cuenca Neuquina según observaciones de superficie. Revista del Museo Argentino de Ciencias Naturales, p. 145-184.

Legarreta, L. y Gulisano, C. 1989. Análisis Estratigráfico Secuencial de la Cuenca Neuquina (Triásico Superior–Terciario Inferior). En: Chebli G.A. & Spaletti, L.A. (Eds.): Cuencas sedimentarias argentinas. Serie de Correlación Geológica, p. 221-243.

Legarreta, L. y Uliana, M.A. 1996. The Jurassic succession in westcentral Argentina: stratal patterns, sequences and paleogeographic evolution. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, p. 303-30.

Limeres, M. 1996. Sequence Stratigraphy of the Lower-Middle Jurassic in Southern Neuquén: Implicance for Unraveling Synsedimentary Tectonics along the Huincul Wrench System. *GeoResearch Forum*, p. 275-284.

Maretto, H. y Pángaro, F. 2005. Edad de formación de algunas de las grandes estructuras del engolfamiento de la Cuenca Neuquina: actividad tectónica durante la depositación de la formación Quintuco. VI Congreso de Exploración y Desarrollo de Hidrocarburos.

Mosquera, A. y Ramos, V.A. 2006. Intraplate deformation in the Neuquén Embayment. En: Kay S. & Ramos, V. (Eds.): Evolution of an Andean margin: a tectonic and magmatic view from the Andes to the Neuquén Basin (35°-39°S lat). Geological Society of America, Special Paper, p. 97-123.

Mosquera, A. 2008. Mecánica de deformación de la Cuenca Neuquina. Tesis Doctoral.

Mosquera, A. y Ramos, V.A. 2009. An integrated tectonic model for the late paleozoic deformation of southern Gondwana. AAPG International Meeting.

Mulder, T., J.P.M. Syvitski, S. Migeon, J.-C. Faugeres, y B. Savoye, 2003, Marine hyperpycnal flows: initiation, behavior and related deposits. A review. *Marine and Petroleum Geology*, p. 861-882.

Mutti, E., Davoli, G., Tinterri R., y Zavala, C. 1996. The importance of fluvio-deltaic systems dominated by catastrophic flooding in tectonically active basins. *Memorie di Scienze Geologiche, Universita di Padova*, p. 233-291.

Mutti, E., Tinterri R., di Biase, D., Fava, L., Mavilla, N., Angella, S. y Calabrese, L. 2000. Delta-front facies associations of ancient flood-dominated fluvio-deltaic systems. *Revista de la Sociedad Geológica de España*, p. 165-190.

Mutti, E., Tinterri, R., Magalhaes, P. M., and Basta, G., 2007. Deep-Water Turbidites and Their Equally Important Shallower Water Cousins. AAPG Annual Convention, Long Beach, California, April 1-4.

Myrow, P.M., Fischer, W., y Goodge, J.W. 2002. Wave-modified turbidites: combined-flow shoreline and shelf deposits, Cambrian, Central Transantarctic Mountains. *Journal of Sedimentary Research*, p. 641-656.

Myrow, P.M., Lukens, C., Lamb, M.P., Houck, K., y Strauss, J., 2008, Dynamics of a transgressive prodeltaic system: Implications for geography and climate with a Pennsylvanian intracratonic basin. *Journal of Sedimentary Research*, p. 512-528.

Paim, P.S.G., Silveira, A.S., Lavina, E.L.C., Faccini, U.F., Leanza, H.A., Teixeira de Oliveira, J.M.M. y d'Avila. R.S.F. 2008. High resolution stratigraphy and gravity flow deposits in the Los Molles Formation (Cuyo Group - Jurassic) at La Jardinera Region, Neuquén Basin. *Revista de la Asociación Geológica Argentina*, p. 728-753.

Pardo Casas, F. y Molnar, P. 1987. Relative motion of the Nazca (Farallon) and South American plates since Late Cretaceous time. *Tectonics*, p. 233-248.

Pángaro, F., Veiga, R. D. y Vergani, G. D. 2002. Evolución tectosedimentaria del área de cerro Bandera, Cuenca Neuquina, Argentina, V Congreso de Exploración y Desarrollo de Hidrocarburos.

Pángaro, F., Corbera, R., Carbone, O. y Hinterwimmer, G. 2002. Los reservorios del Precuyano rocas reservorio de las cuencas productivas de la Argentina, V Congreso de Exploración y Desarrollo de Hidrocarburos, p. 229-274.

- Pattison, S.A.J., Ainsworth R.B. y Hoffman, T.A. 2007. Evidence of across-shelf transport of fine-grained sediments: turbidite-filled shelf channels in the Campanian Aberdeen Member, Book Cliffs, Utah, USA. *Sedimentology*, p. 1033-1063.
- Ramos, V.A. 2008. Patagonia: A paleozoic continent adrift? *Journal of South American Earth Sciences*, p. 235-251.
- Riccardi, A.C. 2008 El Jurásico de la Argentina y sus Amonites. *Revista de la Asociación Geológica Argentina*, p. 625-643.
- Riccardi, A.C. y Gulisano, C.A. 1992 Unidades limitadas por discontinuidades. Su aplicación al Jurásico Andino. *Revista de la Asociación Geológica Argentina*, p. 346-364.
- Riccardi, A.C., Damborenea, S.E., Manceñido, M.O. y Ballent, S.C. 1988a. Hettangiano y Sinemuriano marinos en la Argentina. 5° Congreso Geológico Chileno, p.415-426.
- Riccardi, A.C., Westermann, G.E.G. y Elmi, S. 1988b. Zonas de amonites del Bathoniano – Calloviano inferior de los Andes Argentino-Chilenos. 5° Congreso Geológico Chileno, p. 415-425.
- Schlumberger. 1989. Log Interpretation. Principles/Applications. Schlumberger Educational Services, Houston Texas.
- Serra, O. 1984. Fundamentals of well-log interpretation. 1. the acquisition of logging data, *Developments in Petroleum Science* 15A. Elsevier, 422 p.
- Silvestro, J. & Zubiri, M. 2008. Convergencia Oblicua: Modelo estructural alternativo para la Dorsal Neuquina (39°S) –Neuquén. *Revista de la Asociación Geológica Argentina*, p. 49-64.
- Somoza, R. 1998. Updated Nazca (Farallon) - South America relative motions during the last 40 My: implications for mountain building in the central Andean region. *Journal of South America Earth Science*, p. 211-215.
- Storti, F., Billi, A., y Salvini, F., 2003. Particle size distributions in natural carbonate fault rocks: insights for non-self-similar cataclasis. *Earth and Planetary Science Letters*, p. 173–186.
- Swanson, R.G. 1981 *Sample Examination Manual*. AAPG Methods in Exploration Series, p. 35.
- Ufnar, D.F., Gonzalez, L., Ludvigson, G.A., Brenner, R., y Witze, B.J. 2001. Stratigraphic implications of meteoric sphaerosiderite  $\delta^{18}\text{O}$  compositions in paleosols of the Cretaceous (Albian) Boulder Creek Formation, NE British Columbia Foothills, Canada. *Journal of Sedimentary Research*, p. 1017–1028.

Ufnar, D.F., Gonzalez, L., Ludvigson, G.A., Brenner, R., Witze, B.J. y Leckie, D. 2005. Reconstructing a Mid-Cretaceous landscape from paleosols in Western Canada. *Journal of Sedimentary Research*, p. 984–996.

Veiga R. D.; Hechem, J.; Bolatti, N.; Agraz, P.; Sánchez, E.; Saavedra, C.; Pángaro, F.; García, D. y Moreiras, E. 2001. Syn-Rift Deposits as a New Play Concept in The Central Portion of the Neuquén Basin: Future Perspectives from the Analysis of Physical Models, Hedberg Conference AAPG.

Vergani, G.D., Tankard, H.J., Belotti, H.J. y Welsnik, H.J. 1995. Tectonic evolution and Paleogeography of the Neuquén Basin, Argentina. En: Tankard, A.J., Suarez Soruco, R. y Welsnik, H.J. 1995. *Petroleum Basins of South America*. AAPG Memoir, p. 383-402.

Zavala, C., 2008. Towards a genetic facies tract for the analysis of hyperpycnal deposits, in J. J. Ponce and E. B. Olivero, conveners, *Sediment transfer from shelf to deepwater—Revisiting the delivery mechanisms: Conference Proceedings*, AAPG Search and Discovery Article 50075, AAPG Hedberg Conference.

Zavala, C., Arcuri, M., Di Meglio, M., Gamero Diaz, H., y Contreras, C. 2011, A genetic facies tract for the analysis of sustained hyperpycnal flow deposits, in R. M. Slatt and C. Zavala, eds., *Sediment transfer from shelf to deep water—Revisiting the delivery system: AAPG Studies in Geology*, p. 31–51.