

## ESTUDIO DEL ORIGEN DE RESISTIVIDADES ANÓMALAS EN LA FORMACIÓN LAJAS

Mariano Arregui<sup>1</sup>, Paula Bedini<sup>1</sup>, Romina Coppo<sup>2</sup>, Aldo Montagna<sup>1</sup>,  
Elizabeth Rodríguez<sup>1</sup>, Emiliano Santiago<sup>2</sup>

1: YPF Tecnología, mariano.g.arregui@ypftecnologia.com, paula.c.bedini@ypftecnologia.com,  
aldo.montagna@ypf.com

2: YPF, romina.coppo@ypf.com, emiliano.santiago@ypf.com

Palabras clave: Resistividades anómalas, Fm. Lajas

### ABSTRACT

#### Study of the origin of anomalous resistivities in the Lajas Formation

Near Loma La Lata and Sierra Barrosa fields, Lajas Formation thickness reaches up to 1000m of sediment that includes fine to coarse sandstone to subordinated conglomerates with tight features including low porosity and permeability values, 0.001 to 0.03 mD.

These reservoirs exhibit significant net pay, 150-300m, with high lithological, petrophysical and granulometrical complexity. An associated feature is the abnormal response of induction logs, resistivity, in some reservoir levels.

This anomaly shows significant different values for the same reservoir level, in which the rest of logs don't behave the same (GR, PEF, porosity logs, etc). This behavior can't be explained by lithological changes or flow capacity variations, and historically it has been assigned to several fluids responses; consequently, those levels were left without stimulation.

Based on the available cores and sidewall cores data from wells with this behavior, an integrated analysis is presented with the aim of find out what is causing the aforementioned anomaly, and to allow adding extra net pay.

Petrographic studies, thin sections, X-ray diffraction and MEB, were integrated with petrophysical data and NMR logs, Neutron Magnetic Resonance. Also, Lithological and Icnological studies were used in the core samples.

The results allowed to determine that high non-free water proportion included in nano and micropores from clay minerals, may be the cause of low resistivity anomalies. The parameters with highest influence are granulometry, clay content and pore size, more than total porosity. Compaction degree has also an important influence, showing low resistivity values related to warped clay chips and sutured grain contacts.

### INTRODUCTION

Las rocas que contienen gas o petróleo tienen una resistividad eléctrica mayor que las que contienen agua de formación con alto contenido de sales. Sin embargo, en distintos reservorios a nivel mundial se han reconocido intervalos que fueron denominados “*low resistivity pay*”, los

cuales pueden ser caracterizados por diferentes métodos surgidos a partir de la revitalización de campos maduros.

La conductividad inherente a fangolitas y arcillitas es la causa primaria de los “*low resistivity pay*”, variando su impacto en función del tipo, volumen y distribución de las mismas en la roca (Boyd *et al.* 1995).

La capacidad de intercambio catiónico expresada en unidades de miliequivalente por 100 gr de arcilla seca, mide la habilidad de una arcilla para liberar cationes (tales como  $\text{Na}^+$  y  $\text{K}^+$ ). Las arcillas con capacidad de intercambio catiónico (CIC) alta pueden producir una disminución en la resistividad más importante que las de capacidad catiónica baja. Por ejemplo, la esmectita tiene CIC de 80 a 150 meq/100gr mientras que la caolinita de 3 a 15 meq/100gr.

Las arcillas pueden distribuirse en la formación de tres formas:

- Arcillas laminadas, láminas de arcillas entre láminas de arena
- Arcillas dispersas, arcillas entre la arena, recubriendo granos o rellenando espacios porales entre granos.
- Arcillas estructurales, granos de arcilla o nódulos en la matriz

Las arcillas laminadas se forman durante la depositación e interdigitan con areniscas más o menos limpias. En los perfiles de pozo muchas de las zonas de baja resistividad pueden deberse a intervalos finamente laminados o estratificados de arenisca y arcillita. Las herramientas de medición carecen de la resolución vertical necesaria para arrojar el valor de resistividad de las láminas individuales de arcillita y de arenisca, por lo que da un promedio de resistividad del intervalo que puede resultar baja en algunas zonas y alta en otras.

Las arcillas dispersas se forman por la depositación de partículas individuales de arcillas o masas de arcilla y pueden resultar de procesos post-depositacionales tales como bioturbación y diagénesis. La diferencia de tamaño entre la arcilla y los granos del esqueleto de la arenisca permite que la arcilla recubra o rellene las gargantas porales de la arenisca. Cuando las arcillas cubren los granos de arena aumenta la saturación de agua capilar de la formación, disminuyendo drásticamente los valores de resistividad.

La arcilla estructural corresponde a granos de fangolita o arcillita de igual tamaño o mayor a los del esqueleto de la arenisca y se depositan simultáneamente con la arena (clastos blandos o intraclastos). También los procesos diagenéticos pueden alterar selectivamente granos como los de feldespato a arcillas. Si bien hay bibliografía que asegura que “a diferencia de la arcilla dispersa, la arcilla estructural forma parte de la arenisca sin modificar las propiedades del reservorio, asegurando que ninguno de los poros es ocupado por arcilla se sabe que por compactación mecánica estos granos blandos se deforman ocupando espacios porales y transformándose en una pseudomatriz desmejorando las propiedades del reservorio.

Otras causas de baja resistividad son granulometrías finas, no necesariamente arcillas desde el punto de vista mineralógico, que aportan al agua no móvil y minerales conductivos como la piritita.

En intervalos de grano fino, aunque mantenga una mineralogía y contenido de arcilla uniforme con otros intervalos, el aumento del área superficial asociada al menor tamaño de grano hace que tengan más agua irreductible originando una disminución en la resistividad. Los intervalos de grano fino compuestos por fragmentos de rocas ígneas y metamórficas imitan la firma del registro de arcillas, mostrando alto gamma ray, baja resistividad y pequeño potencial espontáneo o nulo.

La bioturbación es el resultado de la actividad de los animales bentónicos que retrabajan el sedimento y pueden alterar la disposición de los mismos ya que pueden remover o redistribuir los sedimentos más finos. Por lo tanto, puede ser una causa más que genere diferencias en la resistividad respecto a capas que no están bioturbadas.

Finalmente, las areniscas con más de 7% en volumen de pirita también pueden producir baja resistividad.

La problemática principal que de alguna manera motivó la realización de este trabajo estuvo dada por la respuesta de baja resistividad (*low resistivity pay*) en los perfiles de inducción en determinados espesores, cuya posición estructural no permitía asociarla claramente a altas saturaciones de agua de formación.

Esta peculiaridad fue observada en determinados sondeos en algunos niveles reservorios correspondientes a Lajas Medio y Lajas Superior; y tuvo un impacto directo en la terminación de esos pozos, ya que, si bien la ocurrencia de las mismas en el tope de las capas sin la presencia de un nivel subyacente que pudiese officiar de sello, permitía descartar en primera instancia la producción de agua móvil; en la práctica estos niveles no eran punzados ni estimulados, por no tener una explicación fehaciente y satisfactoria de la causa de la baja resistividad registrada. Los intentos de asociarlos a cambios litológicos y petrofísicos no eran satisfactorios por la baja correlación con los perfiles de rayos gamma y factor fotoeléctrico, y los registros de porosidad convencionales (registros sínicos, de densidad o neutrón), respectivamente.

La mencionada incertidumbre tenía varias consecuencias e impacto, tanto en el cálculo de gas original, por considerar un menor espesor útil; como en la terminación y producción de los pozos, ya que no sólo no se punzaban y estimulaban los intervalos en cuestión, sino tampoco los niveles reservorio situados por encima y por debajo, ya que las fracturas hidráulicas en este tipo de terminaciones de pozo se extienden varias decenas de metros en la vertical, este comportamiento se ha confirmado por estudios de microsísmica realizados en el campo.

A partir de ello, se revisaron los sondeos con esta problemática que contaran con datos de roca (testigos laterales y testigos corona) y set de perfiles completos (resonancia magnética nuclear, sínico dipolar, etc.) para comenzar el análisis.

El resultado de este estudio ha permitido involucrar a los sondeos que presentaban esta característica en una campaña de reparaciones de pozo que se está planificando y estimular dichos niveles en nuevas perforaciones.

## Ubicación

Se trabaja con muestras procedentes de sondeos ubicados dentro del bloque de explotación Loma La Lata-Sierra Barrosa, en las estructuras denominadas Sierra Barrosa, Barrosa Norte y Aguada Toledo. Estratigráficamente, la Formación Lajas (Jurásico Medio) pertenece al Grupo Cuyo y está integrada por sedimentitas marino marginales-continetales (Arregui, *et al.*, 2011b).

La Fm. Lajas tiene un espesor promedio de 1000 m y está conformada por una alternancia de rocas psefiticas, psamíticas y pelíticas que en su porción basal presentan características de reservorio tight.

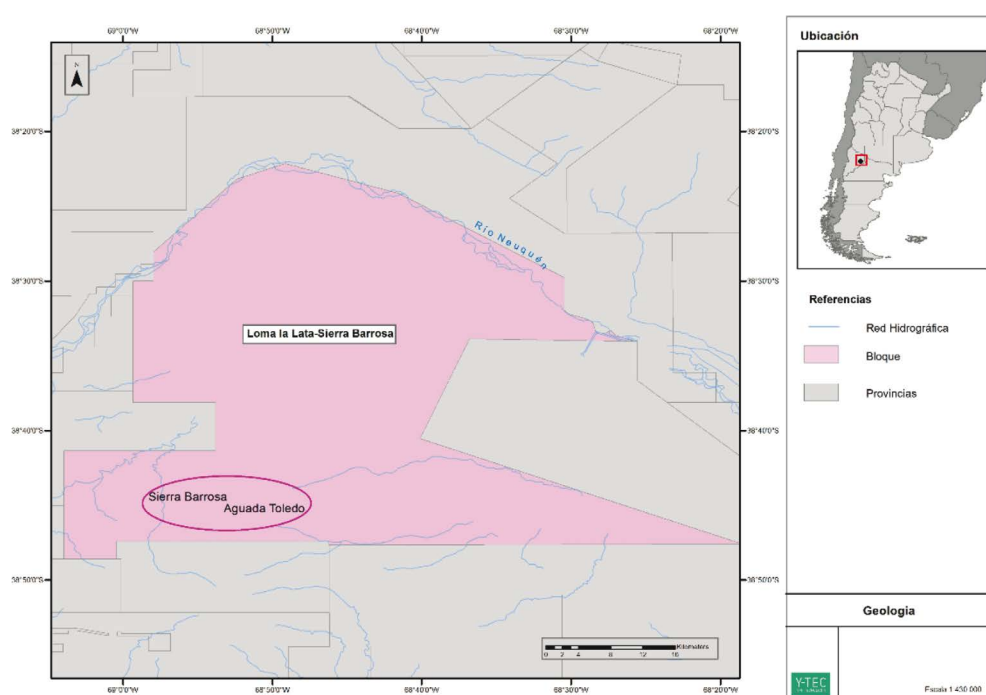


Figura 1. Mapa de ubicación

## TAREAS DESARROLLADAS

Para el entendimiento y la evaluación de los intervalos con resistividades anómalas es clave la calibración entre las características litológicas y petrofísicas de las rocas. Con tal objetivo se realizó la caracterización sedimentológica, petrográfica y petrofísica de niveles con diferentes resistividades identificados en testigos corona de 2 sondeos del área. Se integró la descripción sedimentológica (LCV SRL 2014 y 2015) de los testigos corona con las curvas de gamma ray (GR), resistividad media y profunda (ILM e ILD), factor fotoeléctrico (PEF), densidad (RHOB),

porosidad (PHI) y saturación de agua irreductible (Swirr), porosidad de corona (PHI-Core) y permeabilidad de corona (K-Core), se delimitaron y se caracterizaron los niveles de alta y baja resistividad.

La caracterización se basó en el trabajo de Aguilera Gómez *et al.* (2001) atendiendo a la granulometría, selección, consolidación, contenido de arcilla, accesorios y cementos (como pirita, óxidos, restos carbonosos y bitumen), permeabilidad y porosidad. Se agregaron a éstos los parámetros que ejercen influencia sobre la resistividad tales como tipo de arcilla según su distribución (laminar, dispersa o estructural), y composición (illita, esmectita, clorita, etc., según difracción de rayos X y microscopía de barrido electrónico MEB); tamaño poral y gargantas porales (medidas mediante MEB y determinadas por presión capilar de mercurio (PC Hg); y porcentaje de fluido no móvil (bound fluid) calculado mediante datos de PC Hg).

Se identificaron intervalos de resistividad anómala en otros siete sondeos que cuentan con testigos laterales. En este caso la caracterización estuvo limitada a composición y textura. No fue posible caracterizar estructuras sedimentarias, prevaleciendo en estas muestras la caracterización petrográfica y petrofísica.

Con el conjunto de datos obtenidos se generaron distintos tipos de gráficos para determinar una relación entre los parámetros analizados y la resistividad; y definir así cuáles son las características que producen los “*low resistivity pay*”. De este modo se obtuvieron gráficos de tipo *cross plot* de fluidos capilares o “*bound fluids*” (BF) vs. resistividad ( $\Omega m$ ), que permitieron establecer los valores de contenido de agua no móvil para los intervalos anómalos; así como la influencia de los tamaños porales y del tipo de arcilla sobre la resistividad.

### Metodología para la descripción petrográfica

Se revisó la composición y textura de las muestras, prestando atención principalmente a la presencia y distribución de arcillas, al reconocimiento de sulfuros como pirita, óxidos, restos carbonosos y bitumen, y a la búsqueda de diferencias entre las muestras con resistividades altas y aquellas con resistividades bajas (menores a  $10 \Omega m$ ; valor de corte informal para definir espesor útil). Se determinaron mediante el estudio de secciones delgadas los porcentajes de megaporos (1 a 4 mm), macroporos (0,25 a 1 mm), mesoporos (0,062 a 0,25 mm) y microporos (0,004 a 0,062 mm). Los tamaños menores de poros (cripto y nanoporos, menores a 0,062 mm) se observan utilizando el MEB, no pudiendo establecerse porcentajes de porosidad con este método. Asumimos que la diferencia entre la porosidad obtenida por petrofísica y la obtenida por petrografía nos indica el porcentaje de poros con tamaños menores a microporos y utilizamos ese valor para cuantificar la cantidad de cripto y nanoporos.

## Metodología para la cuantificación de tipos de fluidos a partir de ensayos de presión capilar por inyección de mercurio

La metodología empleada para determinar el porcentaje de BF y fluidos libres en una muestra de roca, basada en ensayos de presión capilar por inyección de mercurio, consiste en transformar los tamaños de garganta poral en tamaños de poro, tal como se vería por resonancia magnética nuclear (RMN).

Cuando una roca “*water-wet*” es completamente saturada con agua el valor de  $T_2$  (tiempo de relajación) de un solo poro es proporcional a la relación superficie/volumen del poro. Por lo tanto, la distribución  $T_2$  de todos los poros en la roca representa la distribución de tamaño poral de esa roca.

En la figura 2 se compara la distribución  $T_2$  de una roca saturada 100% en agua salina con una distribución obtenida a partir del ensayo de inyección de mercurio. La información obtenida a partir de la inyección incremental de mercurio en la muestra representa el porcentaje de gargantas porales de la roca. Cuando se aplica un “*shift*” empleando un factor, se puede observar que la distribución  $T_2$  muestra una marcada correlación con la distribución de gargantas porales. Si bien pueden presentarse algunas diferencias de acuerdo con los distintos tipos de roca, la correlación es buena en las rocas sedimentarias.

Este factor denominado “*effective relaxivity*” ( $\rho_e$ ) se utiliza para ajustar la respuesta de RMN con los resultados obtenidos del ensayo de presión capilar por inyección de mercurio (MICP), por el cual se determina la distribución de tamaño de garganta poral.

La “*effective relaxivity*” ( $\rho_e$ ) depende de la litología, en nuestro caso hemos usado  $0,012 \mu\text{m}/\text{ms}$  (valor de referencia que debe ser chequeado con mediciones en laboratorio). Aplicando

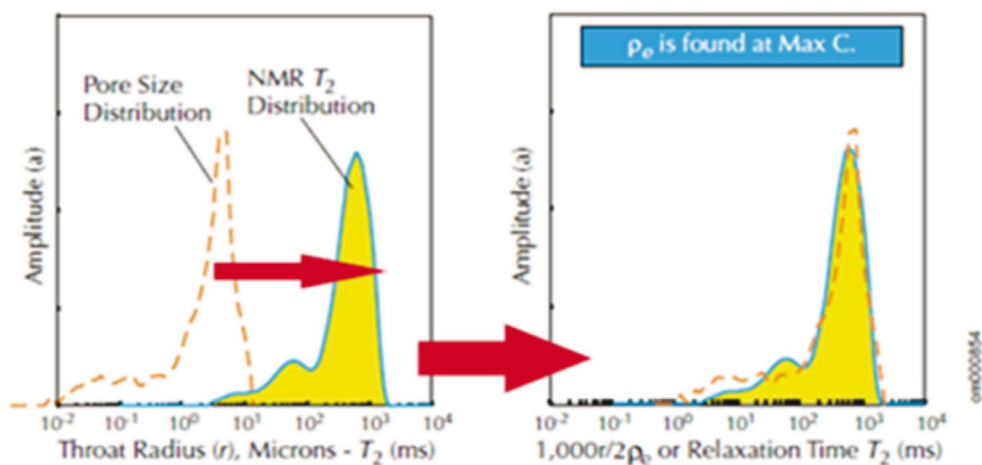


Figura 2. Comparación de una medición de presión capilar por inyección de mercurio con una de resonancia magnética nuclear de la misma muestra saturada 100% en agua salina. Ref. Libro “NMR Loggings – Principle and applications”, Halliburton, Chapter 3.

este valor y considerando un T2 cut off de 27 ms, el tamaño de garganta poral equivalente es de  $0,33 \mu\text{m}$ . Es decir que el porcentaje de mercurio que ingresó en tamaños mayores a  $0,33 \mu\text{m}$  corresponde a fluidos libres, y el resto a BF (“*clay bound water*” y “*capillary water*”).

### Metodología para la descripción icnológica

Se observa la corona en intervalos cada 5 cm, midiendo la intensidad de la bioturbación usando los índices de bioturbación (BI) de Taylor *et al.* (1993). Las trazas fósiles fueron identificadas usando sus icnotaxobases (Bromley 1990, 1996). Todos estos datos fueron compilados en una base de datos, y luego comparado con los perfiles litoestratigráficos.

## DISCUSIÓN DE RESULTADOS

### Testigos corona, caracterización sedimentológica, petrográfica y petrofísica

En el testigo corona B, tomado en depósitos basales de la Formación Lajas, se separaron distintas variedades de areniscas de acuerdo a los valores de resistividad, denominándose Ar3

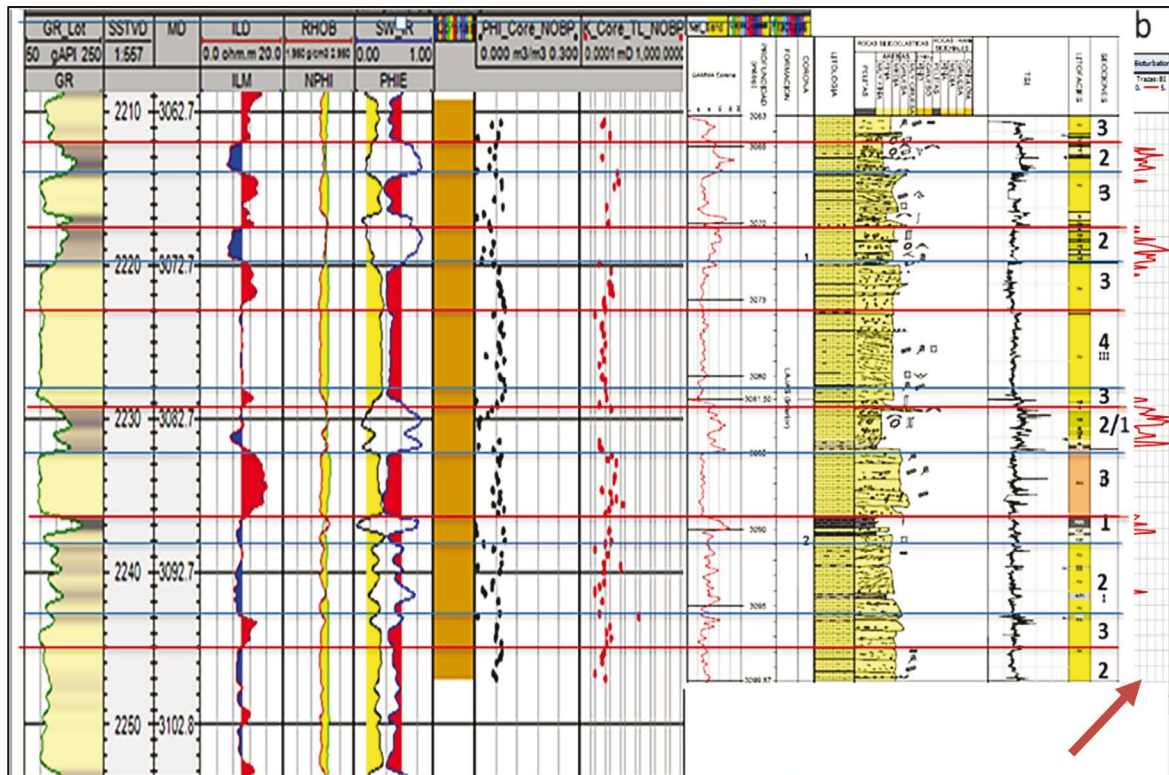


Figura 3. Detalle de la integración de datos de petrofísica de roca, sedimentológicos e índice de bioturbación (flecha) del testigo corona B donde se presenta la separación de tipos de areniscas según la resistividad e intervalos de fangolitas, limolitas y arcillitas (litofacies 1).

(areniscas con resistividad mayor a  $10 \Omega m$ ), Ar2 (areniscas con resistividad menor a  $10 \Omega m$ ) y Ar4 (areniscas con resistividades cercanas a  $10 \Omega m$ ) (figura 3).

Las areniscas Ar3 presentan una granulometría de media a gruesa hasta conglomerádica, con estratificación cruzada de alta a mediana escala que corresponden a depósitos de canal granodecrecientes, o se encuentran ubicadas al tope de cuerpos arenosos tractivos granocrecientes, de ambiente de *shore face*.

Las areniscas Ar4 corresponden a depósitos de corrientes tractivas canalizadas similares a las anteriores con mayor contenido de clastos blandos (arcillas estructurales), restos carbonosos y láminas de arcilla.

Las areniscas Ar2 representan depósitos de tormenta, bioturbados, conformados por areniscas finas a muy finas con laminación ondulítica de ola y estructura “*hummocky*”. Contienen arcilla dispersa y estructural.

En estas arenas no se realizó un análisis detallado de las características petrográficas y la petrofísica de los diferentes intervalos.

En el tramo de la corona A, correspondiente al sector medio de la Fm. Lajas (representado por depósitos de planicie deltaica), los intervalos con resistividad mayor a  $10 \Omega m$  están conformados por areniscas gruesas y conglomerados con estratificación cruzada difusa y/o masiva, niveles con clastos blandos que corresponden a depósitos de canal, y en forma subordinada por areniscas muy finas con laminación cruzada de ondulitas escalonadas “*climbing ripple*” depositadas por avenidas tractivas que arriban a una planicie deltaica subacua (Ar3 en la figura 4).

Los intervalos con resistividad menor  $10 \Omega m$  pueden corresponder a:

- Tramos superiores de depósitos de canal con menor granulometría y mayor contenido de arcillas que el resto del depósito de canal y con bioturbación (Ar2).
- Depósitos de reactivaciones de canales con granulometría ligeramente menor que los depósitos de canal, pero con mayor contenido de clastos blandos y con deformaciones plásticas sinsedimentarias (Ar2”) (Fig 4). A diferencia de todo el grupo de areniscas de baja resistividad, tienen porosidades elevadas, incluso superiores a algunas de las muestras de los intervalos con resistividad mayor a  $10 \Omega m$ . En estas muestras la baja resistividad puede deberse a la presencia de arcillas dispersas como recubrimiento de granos y bioturbaciones, arcillas estructurales como clastos blandos y láminas milimétricas de arcilla marcando la laminación cruzada difusa (Fig 5 a y b).
- “*Lags*” de avenidas tractivas, granulométricamente gruesos compuestos por areniscas conglomerádicas con clastos solamente de arcillas arrancados de la planicie interdistributaria, que hacia el techo continúan con depósitos granodecrecientes con estructuras que evidencian desaceleración de corriente (estratificación cruzada y ondulitas

escalonadas) (Ar2a en la figura 4). Tienen alto contenido de arcillas estructurales: clastos blandos y clastos alterados a arcillas deformados por compactación, que dan origen a pseudomatriz y es lo que constituye la potencial influencia sobre la resistividad de la roca (Fig. 5 c y d).

- Depósitos de avenidas distales en una planicie deltaica vegetada, conformada por vaques finas a medias con deformación plástica, bioturbadas (Ar2b en la figura 4). De los intervalos analizados son los que presentan mayor contenido de arcillas. Se detectó en las muestras de este intervalo una marcada diferencia entre el porcentaje de arcillas totales observadas por petrografía (27,7% en promedio) y las arrojadas por el análisis de DRX (16,67% en promedio), lo que puede deberse a altos contenidos en las muestras de minerales “tamaño arcilla” y no de “minerales de arcilla” (el DRX solo indica contenidos de minerales de arcilla). El elevado porcentaje de cuarzo arrojado por los análisis de DRX confirma esta idea.

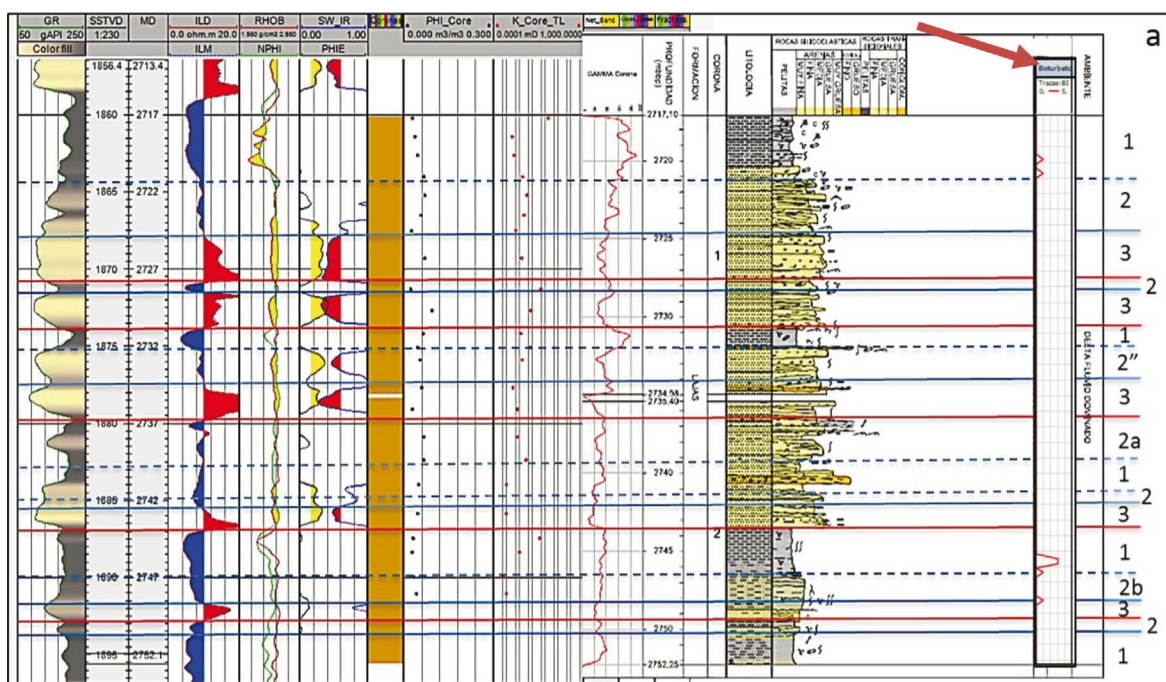


Figura 4. Detalle de la integración de datos de petrofísica de roca, sedimentológicos e índice de bioturbación (flecha) del testigo corona A donde se presenta la separación de tipos de areniscas según la resistividad e intervalos de fangolitas, limolitas y arcillitas (litofacies 1).

Las características más variables en los diferentes tipos de depósitos son la granulometría, el contenido de arcillas y la distribución de tamaños porales y por lo tanto se los considera los potenciales modificadores de la resistividad.

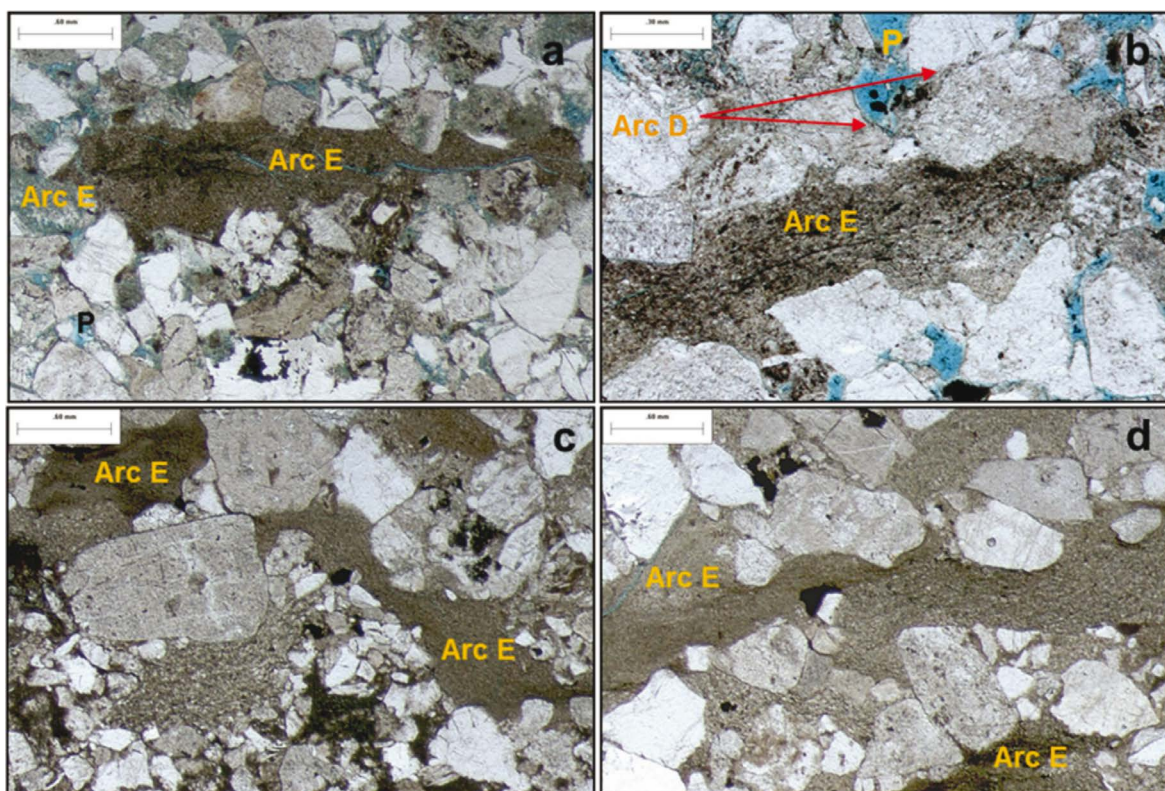


Figura 5. Microfotografías de cortes delgados tomadas con nicols paralelos. a.- Detalle de arcillas estructurales (Arc E) y porosidad (P) en muestra de Ar2" (escala 0,60 mm). b.- Mesoporos, microporos (P), arcillas estructurales (Arc E) y dispersas (Arc D) en Ar2" (escala 0,30 mm). c y d.- Detalle de pseudomatrix originada por presencia de arcilla estructural compactada (clastos blandos compactados) correspondientes a Ar2 a (escala 0,60 mm)

| Muestra | Clasificación | Tamaño de grano   | Selección  | Consolidación |          | Arcilla total x Petrografía (matriz+cemento) | Arcillas sg DRX | Tipo de Arcilla según DRX |                 |         |           | Cemento según DRX |             |        |         |
|---------|---------------|-------------------|------------|---------------|----------|----------------------------------------------|-----------------|---------------------------|-----------------|---------|-----------|-------------------|-------------|--------|---------|
|         |               |                   |            |               |          |                                              |                 | Clorita                   | Illita/smectita | Illita  | Caolinita | Cemento arcilloso | Dolomita    | Pirita | Bitumen |
| Ar 2    | ALF           | F-mf (M; L)       | B (Mo)     | C             | Max      | 10                                           | 12              | 60                        | 10              | 65      | 0         | 8                 | 5           | 5      | 5       |
|         |               |                   |            |               | Min      | 9                                            | 10              | 25                        | 10              | 30      |           | 5                 | 0           | 0      | 1       |
|         |               |                   |            |               | Promedio | 10                                           | 11              | 38.75                     | 10              | 51.25   |           | 6.75              | 3.67        | 2.3    | 3.25    |
| Ar 2"   | ALF           | F - FaM           | Mo         | C             | Max      | 6                                            | 7               | 40                        | 10              | 80      | 0.5       | 5                 | 5           | 5      | 1       |
|         |               |                   |            |               | Min      | 5                                            | 6               | 15                        | 5               | 50      |           | 3                 | 0           | 1      |         |
|         |               |                   |            |               | Promedio | 6                                            | 6.5             | 27.5                      | 7.5             | 65      |           | 4                 | 5           | 3      | 1       |
| Ar 2a   | ALF           | F-M               | Po (B)     | C             | Max      | 22                                           | 20              | 40                        | 20              | 65      | 5         | 4                 | 5           | 0      | 5       |
|         |               |                   |            |               | Min      | 8                                            | 8               | 10                        | 15              | 45      | 0         | 3                 |             | 0      | 1       |
|         |               |                   |            |               | Promedio | 16.6                                         | 15.3            | 30                        | 16.67           | 51.67   | 5         | 4                 | 5           |        | 2.3     |
| Ar 2b   | VLF; ALF y FA | F - M y mf        | Mo-po      | C             | Max      | 40                                           | 19              | 40                        | 25              | 65      | 0         | 4                 | 5           | 0      | 0       |
|         |               |                   |            |               | Min      | 13                                           | 15              | 10                        | 20              | 45      |           |                   | 0           |        |         |
|         |               |                   |            |               | Promedio | 27.7                                         | 16.67           | 28.3                      | 21.67           | 50      |           | 4                 | 3           |        |         |
| Ar 3    | ALF           | M (F y M-G; mf-L) | Mo (B; Po) | C             | Max      | 14                                           | 7 (23)          | 55                        | 25              | 65      | 0         | 7                 | 5 (14 y 18) | 5      | 5       |
|         |               |                   |            |               | Min      | 7 (2,5)                                      | 3               | 15                        | 5               | 60 (30) |           | 2                 | 0           | 0      | 1       |
|         |               |                   |            |               | Promedio | 6.1                                          | 7.875           | 29.375                    | 11.875          | 58.75   |           | 3.5               | 7.83        | 4      | 2.71    |

| Muestra |          | Petrografía            | Petrofísica | Macroporos Normalizado | Mesoporos Normalizado | Microporos Normalizado | Nano y crioporo (%) | Gargantas porales |                      |             | Permeabilidad mD | Resistividad $\Omega m$ |
|---------|----------|------------------------|-------------|------------------------|-----------------------|------------------------|---------------------|-------------------|----------------------|-------------|------------------|-------------------------|
|         |          | POROSIDAD Abundancia % | Porosidad % |                        |                       |                        |                     | Abundancia        | Diámetro ( $\mu m$ ) | Tortuosidad |                  |                         |
| Ar 2    | Max      | 5                      | 6.65        | 0                      | 0.5                   | 5                      | 3.75                |                   |                      |             | 0.007            | 7.7                     |
|         | Min      | 0                      | 2.56        |                        | 0                     | 0                      | 0.56                |                   |                      |             | 0.003            | 8,8 (27)                |
|         | Promedio | 4.5                    | 4.38        |                        | 0.5                   | 4.25                   | 1.3125              |                   |                      |             | 0.00475          | 8.36                    |
| Ar 2"   | Max      | 12                     | 9.48        | 0                      | 3                     | 9                      | 0.48                | E                 | 7.18                 | AI          | 0.078            | 10.1                    |
|         | Min      | 9                      | 6.53        |                        | 2.7                   | 6.3                    | 0                   |                   | 2.44                 |             | 0.013            | 8.8                     |
|         | Promedio | 10.5                   | 8.005       |                        | 2.85                  | 7.65                   | 0.24                |                   |                      |             | 0.0455           | 9.45                    |
| Ar 2a   | Max      | 5                      | 5.87        | 0.04                   | 0.05                  | 5                      | 1.87                |                   |                      |             | 0.259            | 14.1                    |
|         | Min      | 2                      | 1.55        |                        | 0.02                  | 2                      | 0                   |                   |                      |             | 0,166 (0,003)    | 6.4                     |
|         | Promedio | 3.67                   | 3.97        | 0.04                   | 0.04                  | 3.64                   | 0.62                |                   |                      |             | 0.1423           | 9.9                     |
| Ar 2b   | Max      | 5                      | 3.3         | 0                      | 0                     | 5                      | 3.3                 |                   |                      |             | 0.386            | 10.9                    |
|         | Min      | 0                      | 2.83        |                        |                       | 0                      | 0                   |                   |                      |             | 0.0005           | 6.2                     |
|         | Promedio | 5                      | 3.11        |                        | 0                     | 1.67                   | 2.04                |                   |                      |             | 0.1322           | 7.93                    |
| Ar 3    | Max      | 10                     | 6.98        | 1                      | 3.5                   | 6.5                    | 65 (2,44)           | E                 | 4.02                 | Mo-AI       | 0,072 (0,466)    | 40.9                    |
|         | Min      | 5 (0)                  | 2.44        | 0.3                    | 0.3                   | 4                      | 0                   |                   | 0.89                 |             | 0.015            | 3.8                     |
|         | Promedio | 8                      | 5.6875      | 0.65                   | 1.65625               | 5.18125                | 0.4375              |                   |                      |             | 0.0856           | 15.4                    |

Figura 6. Principales características de las areniscas separadas por resistividad y por características petrofísicas y sedimentológicas.

En la Figura 6 se caracterizan los intervalos definidos. Los datos de tamaño de garganta poral, analizados mediante microscopio electrónico no son suficientes como para dar alguna conclusión.

De la integración de datos sedimentológicos, petrográficos y petrofísicos surge que en general las muestras de resistividad baja tienen contenidos de arcilla mayores que las de resistividad alta. Esto queda evidenciado en la Figura 7a que muestra la relación entre el contenido de arcilla (según datos de DRX) y la resistividad, donde se ha representado al grupo de resistividades mayores a 10  $\Omega m$  en color azul y a los de menores en color rojo. Las muestras graficadas en color verde corresponden a muestras que superan los 10  $\Omega m$  según estudios de laboratorio, pero se encuentran dentro de niveles con resistividad menor a dicho valor de acuerdo a los perfiles de pozo o a la inversa. Algunas de estas muestras están en profundidades donde se registra en curvas de pozo, el pase entre los niveles de resistividad alta a baja o viceversas.

En un gráfico similar al anterior (Fig. 7b) pero separando por color a las muestras de los niveles con baja resistividad según sus características sedimentológicas (Ar2; Ar2", Ar2a y Ar2b), se observa que presentan contenidos diferentes de arcilla. Las muestras de "depósitos de reactivaciones de canales con clastos blandos" (Ar2") con bajo porcentaje de arcillas se agrupan con las muestras de resistividad mayor a 10  $\Omega m$  (Ar3). Las muestras de "Tramos superiores de depósitos de canal" (Ar2) tienen un 10% a 13% de arcillas, las de "Depósitos de avenidas distales en planicie deltaica vegetada" (Ar2b) alrededor de 15% mientras que las muestras de "Lags" de avenidas tractivas" (Ar2a) presentan valores muy dispares debido probablemente a las diferencias en el contenido de clastos blandos (arcillas estructurales).

En cuanto a la relación entre la resistividad y la porosidad (Fig. 7c), las muestras con resistividad menor a 10  $\Omega m$  presentan en general porosidades menores, pero existen también variaciones según sus características sedimentológicas. Las muestras de "depósitos de reactivaciones de canales

con clastos blandos” (Ar2”) presentan altas porosidades (6,5 a 10%), las “Depósitos de avenidas distales en planicie deltaica vegetada” (Ar2b) valores de alrededor del 3% y las muestras de “Lags” de avenidas tractivas” y de “depósitos de reactivaciones de canales con clastos blandos” (Ar2a y Ar2) valores dispersos entre 3,5 y 7%. La mayoría de las muestras representadas en color verde tienen valores de porosidad más bajos (1 a 3%), aunque algunas presentan porosidades mayores, agrupándose con las muestras de resistividad mayor a 10  $\Omega$ m (4,5 a 9,5).

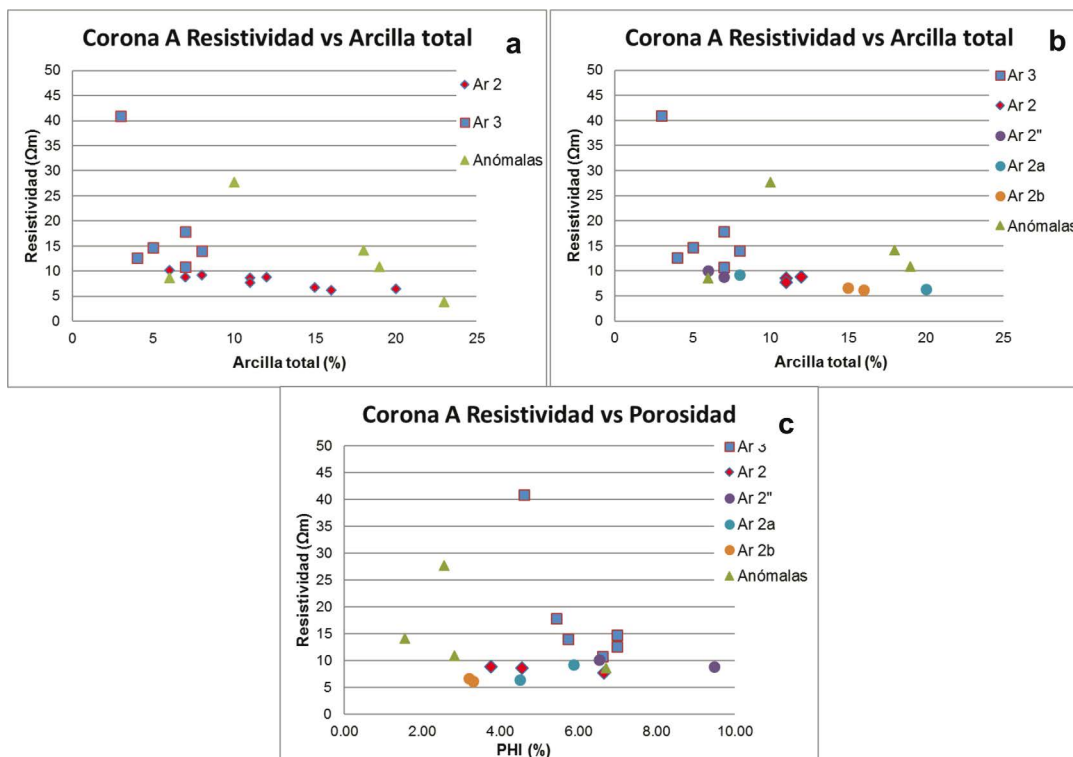


Figura 7a.- Resistividad vs porcentaje de Arcillas totales determinadas por DRX; b.- el mismo gráfico segregando en color verde las muestras “anómalas”; b.- Ídem a separando las muestras según los intervalos de areniscas con diferentes resistividades; c.- Resistividad vs Porosidad separando las muestras según los intervalos de areniscas con diferentes resistividades.

Analizando los resultados de las Figuras 7b y c surge la conveniencia de tratar en forma separada a los diferentes niveles de areniscas de baja resistividad y no tomarlos a todos como un conjunto con características únicas.

## Bioturbación

En la corona B (Lajas Inferior, Fig. 8a) se identificaron 2 asociaciones de trazas fósiles. La asociación de trazas fósiles 1, que es la más representativa, dominada por galerías de *Ophiomorpha irregulaire*, *Gyrolithes* isp., *Macaronichnus* isp. y *Planolites* isp. Esta asociación presenta altos índices de bioturbación (BI 2-6) y es típica de ambientes marinos. Su distribución en la corona corresponde

con niveles de barras de frente deltaico fluviodominado. En la sección inferior de la corona los influjos fluviales son mucho más continuos, impidiendo casi completamente el desarrollo de bioturbación. Hacia el final de la carrera 2 (3084 m) se observa una disminución de la influencia fluvial, haciéndose más episódica, por lo que la influencia marina adquiere preponderancia posibilitando una ventana de colonización para la fauna marina, que bioturba intensamente estos depósitos, deformando las estructuras sedimentarias originales. En estos niveles es donde se evidencia la resistividad anómala en las arenas.

La asociación de trazas fósiles 2 está dominada principalmente por *Planolites* isp., y corresponde a un ambiente de baja energía, de un sedimento con mucho contenido de agua (soposo) a la hora de depositarse. Corresponde a niveles con mucho sedimento fino y de baja energía.

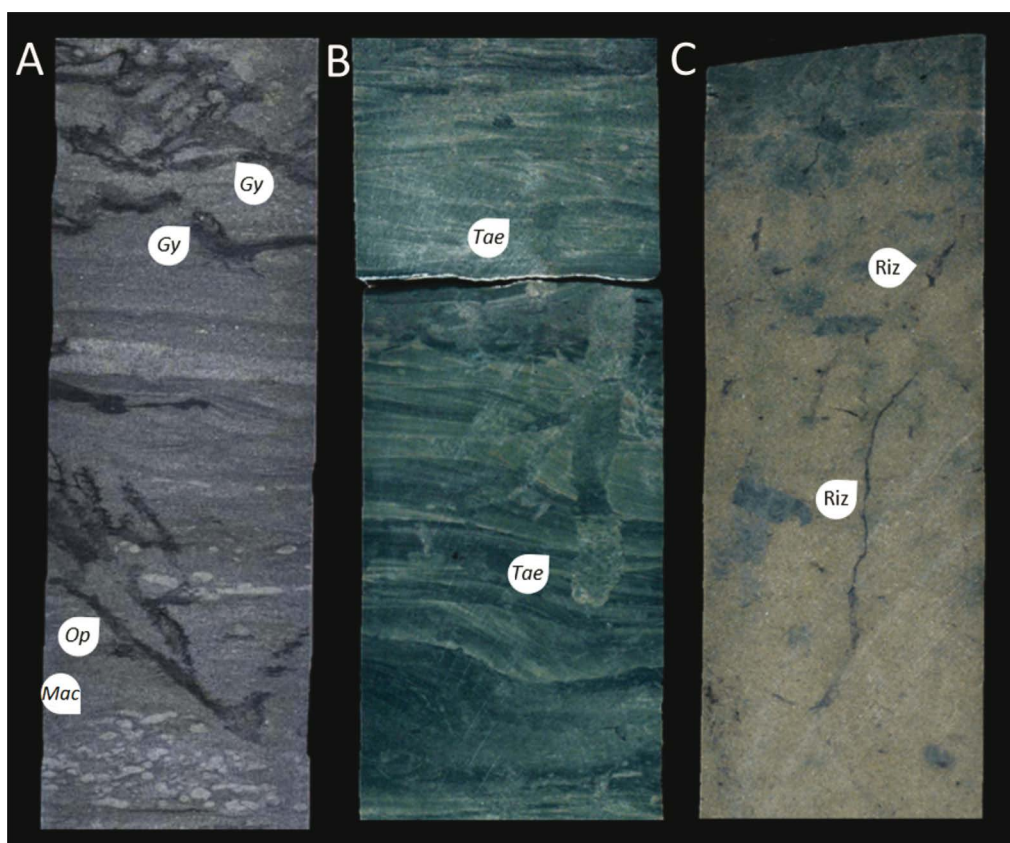


Figura 8. A, Bioturbación presente en la corona B (barras de frente deltaico), típica marina. Gy, *Gyrolithes* isp., Op, *Ophiomorpha* isp., Mac, *Macaronichnus* isp., B, C, Bioturbación presente en la corona A, típica de planicie deltaica. Tae, *Taenidium* isp., Riz, Rizolitos (trazas de raíces).

En la corona A la bioturbación tiene otro aspecto completamente distinto, estando representada por la asociación de trazas fósiles 3, dominada por *Rizolitos* (trazas de raíces), *Taenidium* isp. y *Planolites* isp., donde los índices de bioturbación son más bajos (BI 1-3), y de forma dispersa. Esto es indicativo de ambientes de baja energía, con incipientes procesos pedogenéticos de ambientes de planicie deltaica (Fig. 8b y c).

## Testigos laterales caracterización petrográfica y petrofísica

Mediante el estudio petrográfico se encontraron diferencias texturales entre las muestras de resistividad menor y mayor a  $10 \Omega m$ , Ar2 y Ar3 respectivamente. Las primeras son en general de granulometrías ligeramente menores, presentan arcillas de oclusión de poros (Fig. 9a), porosidad secundaria con distribución heterogénea y predominio de tamaños porales que van de cripto a microporos. Mientras las segundas tienen en general mayor granulometría, arcillas como recubrimiento de granos, porosidad secundaria heterogénea y tamaños porales desde macro a criptoporos (Fig. 9b). Entre las muestras de resistividades bajas se encuentran algunas con elevado contenido de pirita asociada a restos carbonosos y a arcillas dispersas (Fig. 9c).

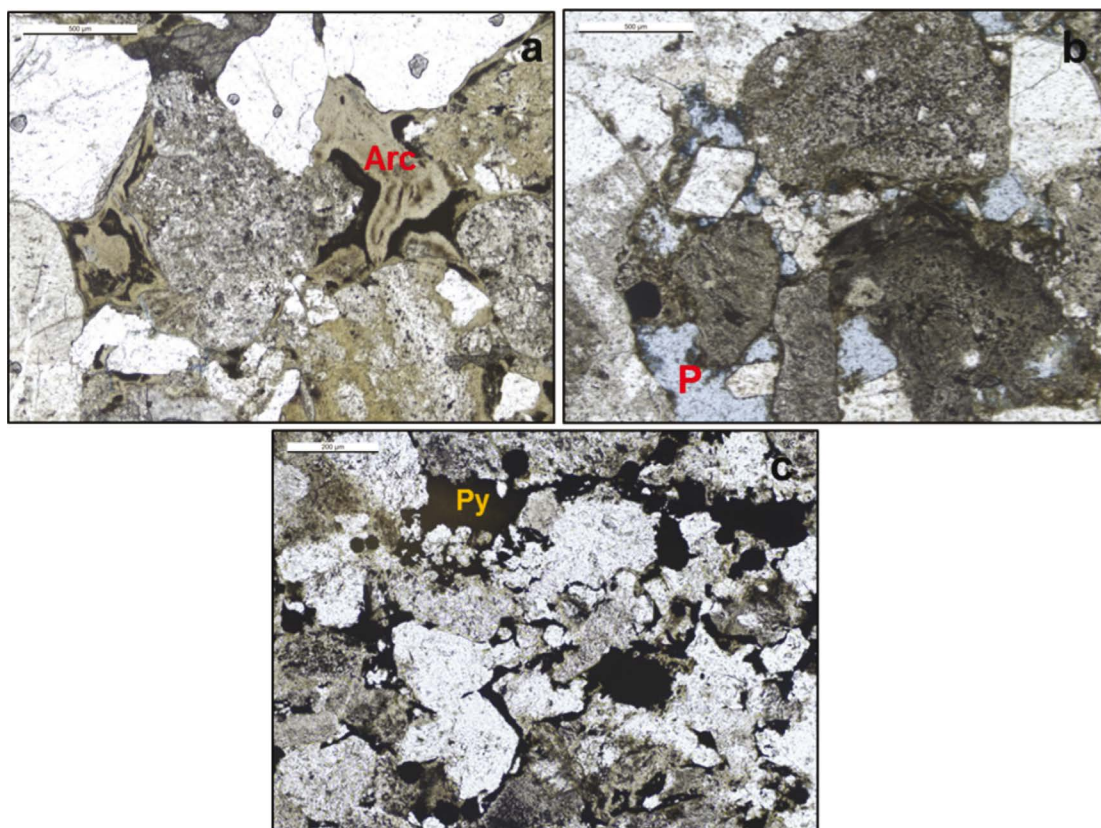


Figura 9. a.- Microfotografía con detalle de arcillas de oclusión de poros en muestras de Ar2; b.- Microfotografía de muestras de Ar3 con meso y macroporos; c.- Microfotografía de muestra de Ar2 con alto porcentaje de pirita

## Cuantificación de tipos de fluidos a partir de ensayos de presión capilar por inyección de mercurio

Se calculó, según la técnica descrita en el ítem “Metodología para la cuantificación de tipos de fluidos a partir de ensayos de presión capilar por inyección de mercurio” el porcentaje de

“bound fluids” para cada muestra. La figura 10 muestra ejemplos del análisis realizado en testigos laterales de un mismo paquete arenoso con resistividades anómalas.

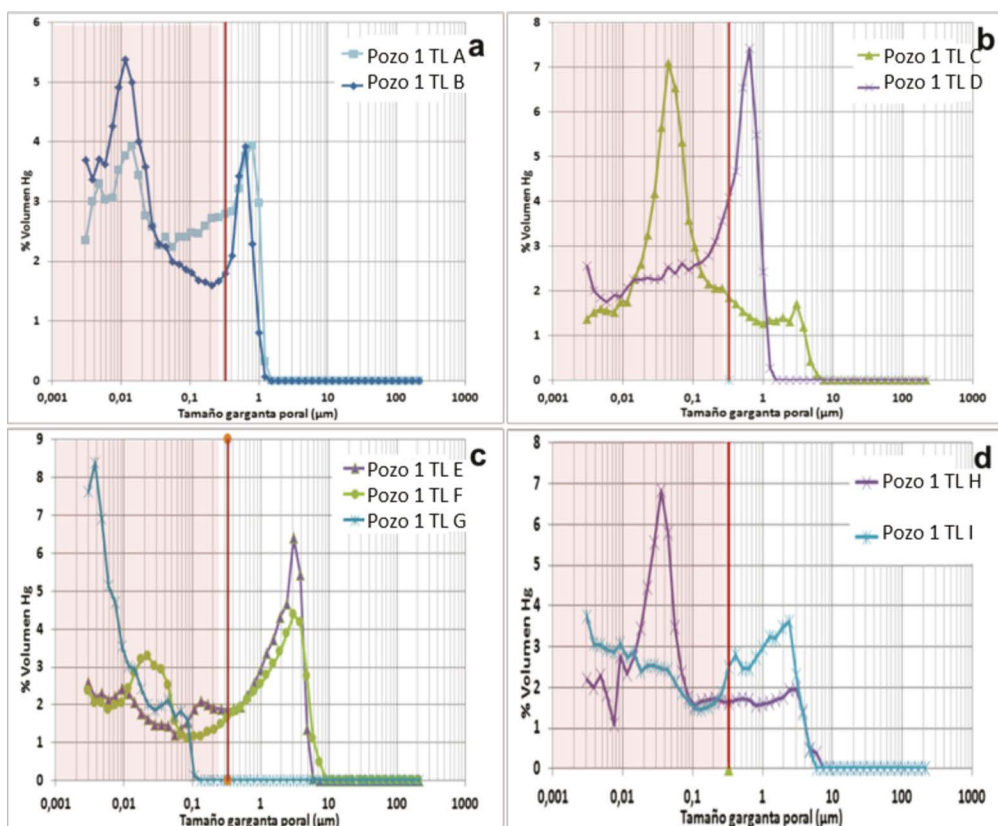


Figura 10. Determinación del porcentaje de “bound fluids” y fluidos móviles realizados en testigos laterales de intervalos con resistividades anómalas

En la figura 11 se muestra la relación entre la resistividad profunda leída en perfiles ( $\Omega m$ ) representada en el eje X y el porcentaje de fluido no móvil en el eje Y. Se encontró una cierta correlación entre estos parámetros, obteniendo una curva que presenta un cambio de pendiente a partir del 75% de fluidos no móviles y 10  $\Omega m$  de resistividad, indicando que las resistividades bajas en estas muestras están fuertemente influenciadas por el alto contenido de fluidos no móviles. Cuando los fluidos no móviles son menores al 75% se observa una mayor dispersión de resistividades debido a que responden mayormente al fluido libre contenido en la roca.

De las 55 muestras ploteadas en la Figura 11, once de ellas no se ajustan a la curva y de aquí en adelante las denominaremos como muestras “anómalas”. Se repitió el gráfico anterior sin estas muestras para ver la variación en el factor de correlación (Fig. 12) observándose un aumento sustancial en el mismo.

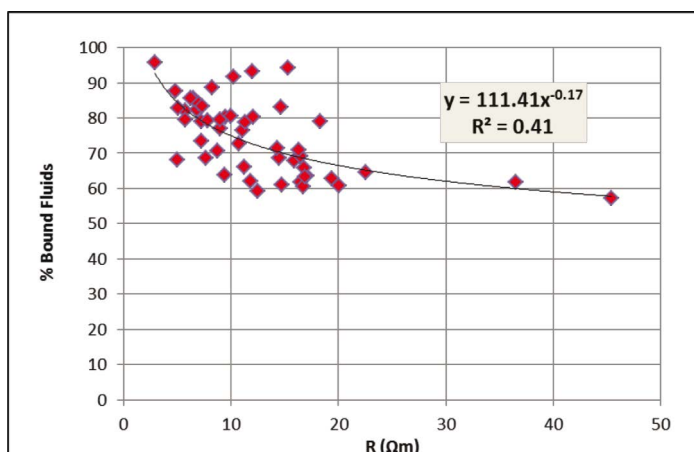


Figura 11. Resistividad profunda (Ωm) vs BF (%).

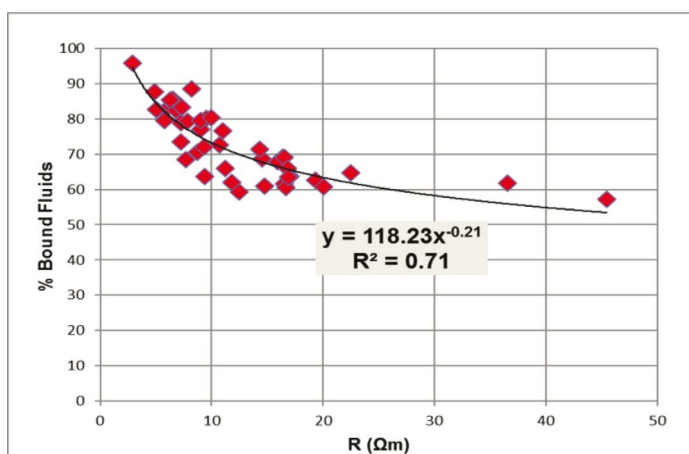


Figura 12. Ídem figura anterior sin las muestras anómalas.

El fluido no móvil se asocia a la presencia de bajas porosidades y permeabilidades, y para comprobar este comportamiento y entender mejor la presencia de muestras que no ajustan a la curva de correlación se graficó el porcentaje de “*bound fluids*” vs la porosidad estándar (Fig. 13)

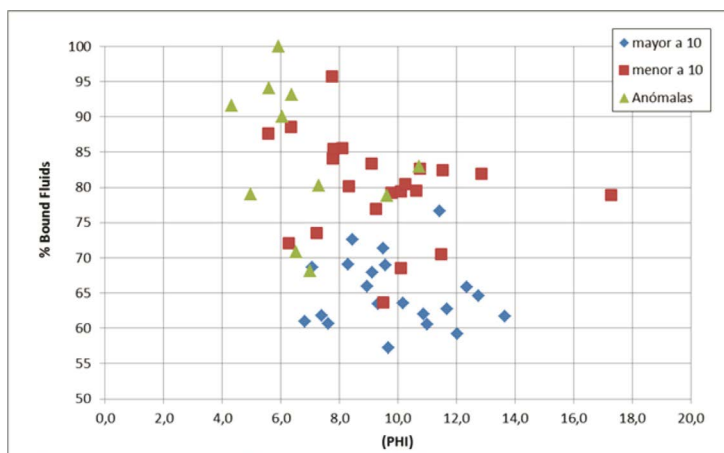


Figura 13. Porosidades petrofísicas vs. Porcentaje de fluido no móviles.

separando las muestras en mayor a  $10 \Omega\text{m}$  (en color azul); menores a  $10 \Omega\text{m}$  (en color rojo) y las “muestras que no se ajustan a la curva”, en color verde.

Puede observarse en este gráfico que las muestras con relaciones anómalas tienen elevado porcentaje de BF y en general porosidades menores al resto. Además, no se ve una separación definida por la porosidad entre las muestras con resistividad elevada y las de resistividad baja.

Teniendo presente esta falta de separación por porcentaje de porosidad de los dos grupos de interés y habiendo observado mediante microscopía electrónica la presencia de cripto y nanoporos en muestras que mediante petrografía mostraban muy baja a nula porosidad (Fig. 14) se analizó la influencia del tamaño poral en las muestras.

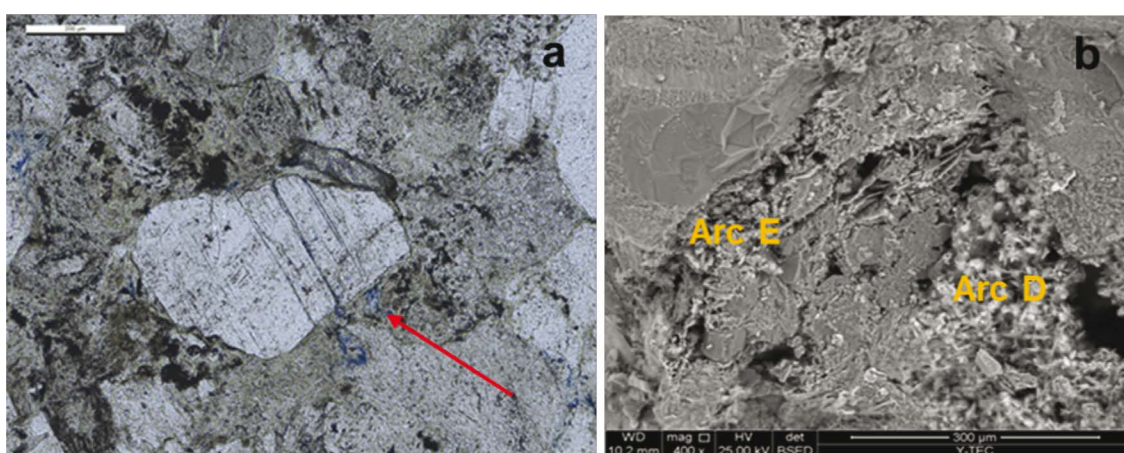


Figura 14. a. Microporo en corte delgado de un testigo lateral (flecha); b. Microfotografía obtenida en MEB de la misma muestra con nano y criptoporos en arcillas diseminadas (Arc D) oclusión de poros intergranulares y estructurales (Arc E) producto de alteración de feldespatos.

Con la finalidad de visualizar mejor las variaciones de estos parámetros se confeccionaron gráficos de distribución de porosidad, resistividad y porcentaje de BF (Fig. 15a); de distribución de tamaños porales y porosidad (Fig. 15b) y su relación con el porcentaje de arcillas para cada pozo analizado (Fig. 15c).

Este tipo de representación marca la diferencia de porcentajes de BF entre muestras con resistividades mayores y menores a  $10 \Omega\text{m}$  y permite comprobar que las muestras denominadas “anómalas” presentan resistividades en general mayores a  $10 \Omega\text{m}$ , pero el porcentaje de BF, a diferencia de las areniscas más resistivas es en general mayor al 70% alcanzando valores hasta de 98%. La porosidad es algo mayor en las muestras de areniscas con resistividad mayor a  $10 \Omega\text{m}$  y la distribución de tamaños porales evidencia mayor cantidad de megaporos en estas areniscas; mientras que entre las muestras de resistividad menor a  $10 \Omega\text{m}$  es escasa la presencia de megaporos y predominan los micro, cripto y nanoporos al igual que en las muestras “anómalas”. En cuanto a la porosidad de este último grupo es variada, en general baja a muy baja con algunas muestras de porosidad elevada.

Respecto al porcentaje de arcillas con relación a la porosidad (Fig. 15c), puede interpretarse una dependencia de la porosidad con el contenido de arcillas (a mayor porcentaje de arcillas menor porosidad), en las muestras de mayor resistividad. En el intervalo del gráfico correspondiente a las areniscas de menor resistividad esa relación es difusa. Esta característica sumada al predominio de poros menores permite interpretar que en estos intervalos cobran importancia los porcentajes de porosidad en arcilla. Estos porcentajes de poros no van a depender sólo de la cantidad de arcillas sino también del tipo y grado de compactación que tengan esas arcillas.

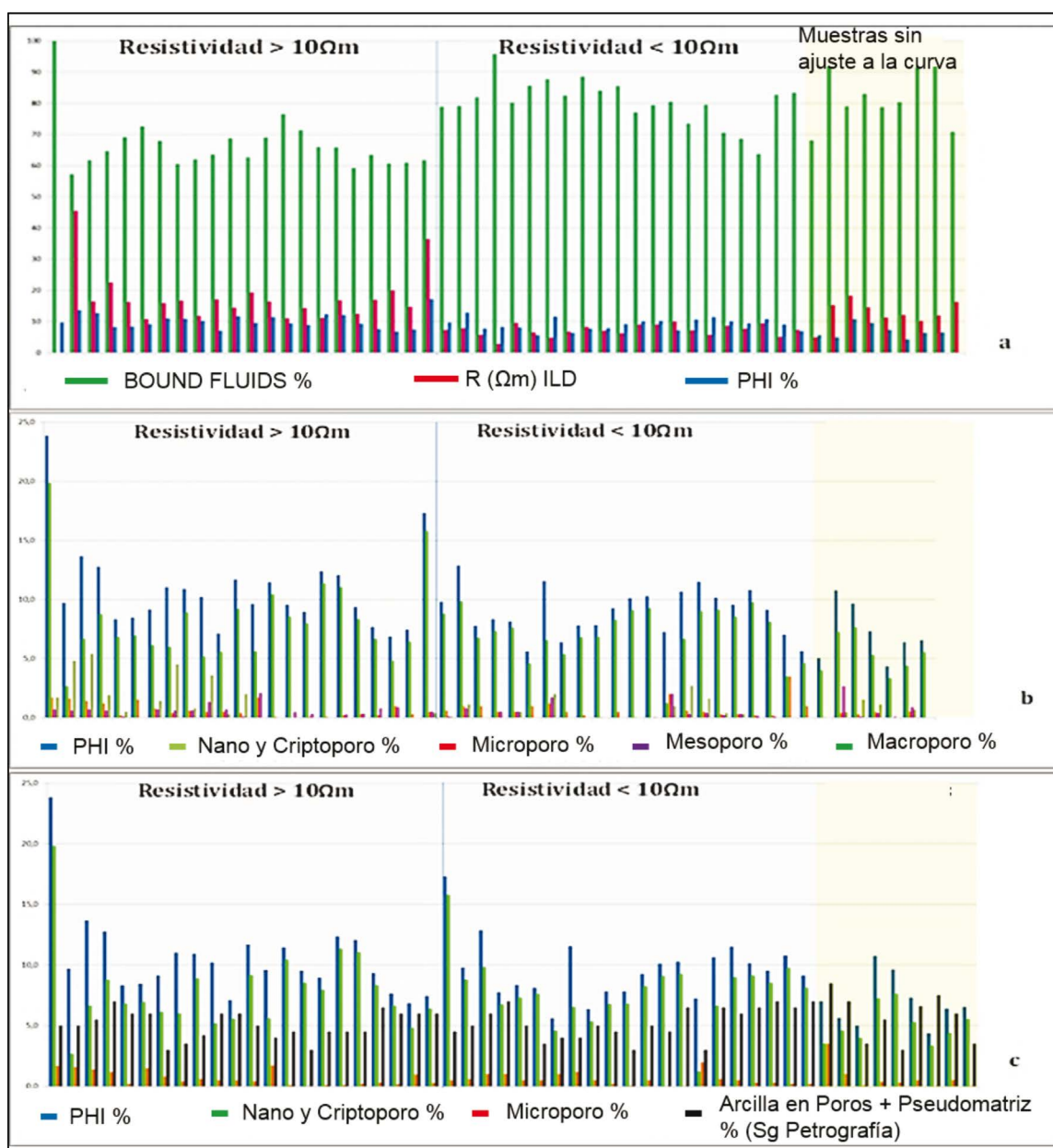


Figura 15. a.- Distribución de porcentaje de Fluido no móvil (BF), Resistividad medida en  $\Omega m$  y porcentaje de Porosidad; b.- Distribución de porcentaje de Poros y tamaños porales (macro, meso, micro y cripto/nanoporos), c.- Distribución de porcentajes de porosidad, cripto/nanoporo, microporos y arcillas tomadas de la descripción petrográfica

Considerando este último punto y lo dicho en la introducción teórica del origen de los “*low resistivity play*”, se realizaron análisis utilizando las muestras con estudios de DRX vinculando la cantidad y el tipo de arcillas en relación con la resistividad (Fig. 16).

No se encontraron intervalos de porosidad y porcentaje total de arcillas característicos para las areniscas con resistividad mayor a 10  $\Omega\text{m}$ , las areniscas con resistividad menor a 10  $\Omega\text{m}$  y las areniscas “anómalas”), pero sí se puede asegurar que las areniscas más resistivas presentan en general menores contenidos de arcilla (menos del 12%) correspondientes a Illita (hasta 6%) y clorita (hasta 4%).

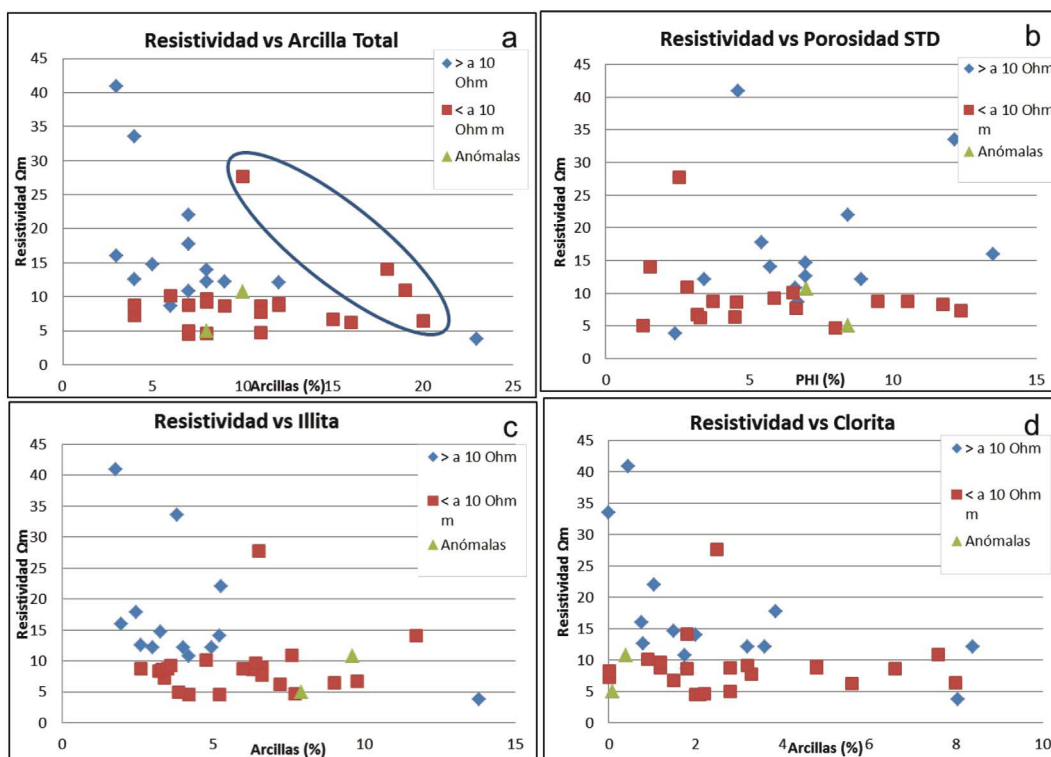


Figura 16. a.- Resistividad vs Arcilla total según DRX La elipse azul encierra las muestras anómalas correspondientes al sondeo A, b.- Resistividad vs porcentaje de porosidad STD; c.- Resistividad vs porcentaje de Illita; d.- Resistividad vs porcentaje de Caolinita.

Integrando los resultados del estudio de los testigos laterales con los del análisis del testigo corona A, mediante un gráfico de resistividad profunda en relación a la porosidad STD (Fig. 17), se observa que las muestras del testigo corona tienen menores porosidades que la mayoría de las muestras de los testigos laterales, esto es coherente con el mayor contenido de arcillas que tienen esas muestras. Las areniscas de resistividad mayor a 10  $\Omega\text{m}$  del testigo corona se agrupan con las muestras “anómalas” de los testigos laterales.

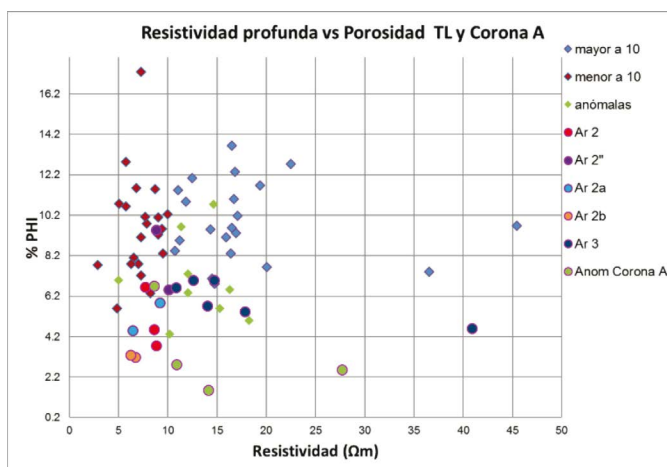


Figura 17. Resistividad profunda medida en  $\Omega m$  vs Porosidad STD integrando datos de corona A y de los testigos laterales.

## CONCLUSIONES

- Son varios los factores que influyen en la presencia de niveles reservorios con bajas resistividades: arcillas estructurales, dispersas y laminares; el contenido de pirita, mayor al 6% y restos carbonosos; granulometría; tamaños porales y contenido de “*bound fluid*”.
- La influencia de tamaños porales en las bajas resistividades es mayor que la influencia de la porosidad.
- Los altos contenidos de arcilla estructural compactada (clastos blandos y granos alterados a arcillas) favorecen significativamente a baja resistividad.
- Se reconocieron intervalos de baja resistividad integrados por arenitas con porosidades elevadas (Ar2”) con arcilla de tipo dispersa (como recubrimiento de granos) y subordinada presencia de arcillas estructurales (clastos blandos y micro-laminaciones) con alto grado de compactación (contacto cóncavo convexo a suturado entre granos).
- Hay muestras con resistividades variables (en general mayores a 10  $\Omega m$ ), pero con elevados porcentajes de BF, (agrupadas dentro de las “anómalas” en el estudio de los testigos laterales), caracterizadas por elevados porcentajes de arcilla, porosidad muy baja en tamaño nanoporos a microporos y con contenido de bitumen en los poros.
- En muestras con elevados contenidos de arcillas se encuentran discrepancias en la cuantificación de la misma mediante petrografía y análisis de DRX debido a la posible presencia de minerales tamaño arcilla y no tanto a minerales de arcilla.
- La bioturbación es mucho más intensa en ambientes marinos y es responsable de gran parte del retrabajo de las arcillas en niveles arenosos correspondientes a frente deltaico (Corona B). Su presencia coincide con los niveles de resistividades bajas, por lo cual, se interpreta como

uno de los factores que afectan a este parámetro. En la corona dominada por depósitos de planicie deltaica (Corona A), la bioturbación es mucho menor, considerándose por lo tanto como un factor poco relevante para modificar la resistividad.

## PASOS A SEGUIR

- Realizar mediciones de RMN en laboratorio para poder calcular el valor de relaxividad adecuado por tipo de roca; definir un T2 *cutoff* variable que ayude al cálculo de los fluidos móviles y no móviles; y calibrar los perfiles de pozo, por la influencia del gas en la lectura de los mismos.
- Aplicar la metodología de caracterización de muestras en los niveles identificados por separado y contemplando los ciclos de la Fm. Lajas al que pertenecen esos niveles.
- Realizar un análisis de los recortes de perforación de los intervalos anómalos para ajustar las caracterizaciones ya que, los testigos laterales dan características puntuales que por el grado de heterogeneidad de las arenitas no es suficiente.

## REFERENCIAS CITADAS

- Aguilera Gomez, L; Bortolotti Andrade, C and Sneider, J.S. 2001. "In search of bypassed gas pays in the Macuspana Basins wells. AMGP/AAPG joint conference, November 2001.
- Arregui, C., Carbone, O., Martínez, R. 2011. El grupo Cuyo (Jurásico temprano-medio) en la cuenca neuquina. En Relatorio del XVIII Congreso Geológico Argentino • Neuquén, 2011.
- Bedini, P. C.; Rodríguez, E. y Villa, N. V. 2014, "Integración de datos de la Formación Lajas en el Yacimiento Aguada Toledo -Sierra Barrosa; Cuenca Neuquina", YPF - Tecnología, informe interno.
- Boyd, A; Davis, B; Flaum, Ch; Klein, J; Sneider, R. M.; Sibbit, A. and Singer, J. 1995. The Lowdown on Low-Resistivity Pay. Oilfield Review Autumn 1995, Schlumberger.
- Comisky J.T., SPE, Apache Corp., K.E. Newsham, SPE, Apache Corp., J.A. Rushing, SPE, Andarko Petroleum Corp. and T.A. Blasingame, SPE, Texas A&M University, 2007, "A comparative Study of Capillary-Pressure-Based Empirical Models for Estimating Absolute Permeability in Tight Gas Sands", SPE 110050.
- Crotti M., Bardelli J., Cabrera M., 2015, "Caracterización de Reservorios Tight. Pozo Laj-62d" IN-LAB SA Informe 01-4405.
- Merletti German D., Pour Rohollah A., Spain David R., BP America, 2013, "Calibration of Static Reservoir Models with Dynamic Data for Efficient Tight-gas Field Development (Wyoming, US)", SPE 164031.
- Morad, S.; Kalid Al-Ramadhani; Ketzer, J.M. and De Ros, L.F., 2010, "The impact of diagenesis on the heterogeneity of sandstone reservoirs: A review of the role of depositional facies and sequence stratigraphy", AAPG Bulletin, Vol 94; N° 8; pp: 1267 – 1309.
- Newsham, K.; Rushing, J.; Lasswell, P.; Cox, J.; Blasingame, T., 2004, "A comparative Study of Laboratory Techniques for Measuring Capillary Pres-

- tures in Tight Gas Sands”, SPE 89866.
- Zhang, F.; Chengdu, S.; Xiao-Peng, L.; Xiao-Xin, H., 2012, “A General Model of Estimating Permeability from Mercury Injection Capillary Pressure (MICP) in Low Permeability Sandstones”, SPE 158406.
- LCV s.r.l., 2014 y 2015, “Informes inéditos de coronas de los sondeos A; y otros”.
- INLAB, 2014 a 2015, “Informes inéditos de los testigos laterales de diferentes sondeos