

EVALUACION DE LA POROSIDAD EN ARENAS CON ALTO CONTENIDO DE MINERALES PESADOS EN LA CUENCA NEUQUINA

Alberto Khatchikian¹ y Jorge Zumel²

¹Tecnolog, ²Pluspetrol E & P.

ABSTRACT

In some wells of the Neuquen basin, porosity derived from density logs in sandstones of the Grupo Cuyo formation is too low because of the presence of heavy minerals such as pyrite, blende and siderite, which have the effect of increasing the grain density. Heavy minerals are easily detectable with logs because their photoelectric factor P_e is much higher than the P_e of sand and shale. Porosity can be estimated from the density log under these conditions using a sand-shale-heavy mineral model. The sonic log is relatively insensitive to heavy minerals, but there are uncertainties related to the velocity-to-porosity transform and the effect of gas. A better alternative is to estimate the porosity from Nuclear Magnetic Resonance logs, which are insensitive to lithology. The validity of both approaches was demonstrated in a Pluspetrol well that was extensively cored.

INTRODUCCIÓN

El caso que nos ocupa se ubica en el ámbito de la Dorsal Neuquina, Yacimiento Aguada Baguales, propiedad de la Cía Pluspetrol (Fig. 1). En el pozo AB-1010 se extrajeron testigos coronas en diferentes profundidades a la vez que se registraron diferentes perfiles de porosidad. La sección estudiada corresponde a arenitas lítico-feldespáticas conglomerádicas de la Fm Lajas (Fig. 2).

En estas arenitas la porosidad suele calcularse a partir del perfil de densidad corregido por contenido de arcillas y efecto de gas. La densidad de grano medida sobre varias coronas en pozos de la cuenca es del orden de 2.65 g/cm^3 . Que esta densidad promedio sea igual a la del cuarzo es una afortunada coincidencia, ya que la misma depende del contenido relativo de cuarzo, feldespatos alcalinos y plagioclasas. Como se observa en la Tabla I de la página siguiente, la densidad de los feldespatos varía entre un valor muy bajo como 2.52 g/cm^3 para la ortoclasa a un valor muy alto como 2.74 g/cm^3 para la anortita. El estudio por difracción de rayos X de coronas del pozo AB-1010 indica contenidos aproximadamente iguales de feldespatos potásicos y plagioclasas en cantidades que oscilan entre 5 y 15% (Tabla II).

En arenas limpias no gasíferas la porosidad derivada del perfil de densidad con una densidad de grano de 2.65 g/cm^3 coincide con la del perfil neutrón, es decir que sigue el modelo clásico de arenas arcillosas, como puede verse en la Fig. 3. En la misma figura puede observarse que el valor promedio del factor fotoeléctrico P_e es del orden de 1.9, típico de areniscas limpias.

Sin embargo, en algunos casos la respuesta del perfil de densidad no sigue este modelo. Como puede verse en el ejemplo de la Fig. 4, la porosidad derivada del densidad es baja y mucho menor que la del neutrón, inclusive en las zonas más limpias, y llega a leer porosidad cero a 1098 metros, mientras que la porosidad neutrónica a la misma profundidad es de 18%. A la misma profundidad el factor fotoeléctrico lee 5.0, sugiriendo la presencia de minerales pesados. Análisis de coronas y estudios de cutting indican que estos minerales son piritita, siderita y blenda.

MINERALES PESADOS

Propiedades físicas

La densidad y el factor fotoeléctrico de algunos minerales asociados a areniscas se listan en la Tabla I (Schlumberger, 1995). Densidad aparente ρ_a es la densidad leída por la herramienta de densidad, que es idéntica a la real para el cuarzo y el agua, pero puede ser ligeramente distinta para otros minerales. Como puede verse, todos los minerales pesados tienen un factor fotoeléctrico P_e alto y mucho mayor al del cuarzo debido a su alto número atómico. El efecto de pequeñas cantidades de minerales pesados en el P_e de la arenisca es importante, ya que el factor fotoeléctrico de una mezcla de minerales es función de los pesos relativos de los mismos, mientras que la densidad de la mezcla es proporcional a los volúmenes relativos.

	Fórmula	Densidad aparente pa (g/cm ³)	Factor fotoeléctrico Pe
Pirita	S ₂ Fe	5.0	17
Siderita	CO ₃ Fe	3.9	15
Blenda	ZnS	3.75	37
Cuarzo	SiO ₂	2.65	1.8
Ortoclasa	KAlSi ₃ O ₈	2.52	2.9
Anortita	CaAl ₂ Si ₂ O ₈	2.74	3.1
Agua dulce	H ₂ O	1.0	0.36

Tabla I – Valores de densidad y factor fotoeléctrico de minerales asociados a areniscas

Ambiente sedimentario y distribución areal

Las coronas obtenidas en el pozo AB-1010 corresponden a niveles de la Fm Lajas ampliamente distribuida en el área de la Dorsal Neuquina. En el yacimiento Aguada Baguales la misma está integrada por cuerpos de arenitas conglomerádicas de color gris amarillento a gris verdoso y cuellos arcillosos de color gris y gris verdoso. Las arenitas van de areniscas de grano medio a conglomerados finos con clastos de hasta el tamaño de un huevo de paloma. La composición media de los clastos es 40% de cuarzo, 20% de fedespátos y 40% de líticos, minerales opacos que pueden presentarse en cantidades variables, en general pequeñas, pero en algunos casos en proporciones de hasta un 10%, (como es el caso que nos ocupa) alterando las mediciones de los perfiles. Los principales minerales pesados descriptos en las coronas del pozo AB-1010 son la siderita y la pirita y en menor proporción la blenda. En las descripciones de cuttings de pozos del área de la Dorsal de Huincul es común encontrar descripciones de pirita tanto en la Fm Lajas como en la Fm Tordillo (probablemente otros minerales pesados no sean descriptos ya que a diferencia de la pirita son de más difícil identificación a simple vista).

En el área de Aguada Baguales al igual que en el Yacimiento Centenario los cuerpos clásticos de la Fm Lajas se presentan como cinturones paralelos a las líneas de costas con espesores que van de 5 a 15 m. Las estructuras sedimentarias tractivas son escasas, presentando el sedimento aspecto más bien masivo y poco seleccionado.

Dada la anterior descripción estos cuerpos corresponderían a areniscas de playas (shore zone facies) (Galloway, 1983). Dichas facies integradas por cuerpos depositados tanto por encima como por debajo del nivel del mar explicarían la coexistencia de ambientes reductores y oxidantes (sulfuros junto a óxidos y carbonatos).

Daño de formación

Tanto la pirita como la siderita son susceptibles a la acción del ácido clorhídrico, ya que el ion Fe es liberado durante la disolución de los minerales y puede precipitar hidróxido de hierro, produciendo reducción de la porosidad.

ESTIMACIÓN DE LA POROSIDAD EN ARENAS CON MINERALES PESADOS

Con perfil de densidad

La combinación de registros de densidad y factor fotoeléctrico permite calcular la porosidad de arenas que contengan un mineral pesado a partir de las siguientes ecuaciones (Khatchikian, 1999):

$$\rho_b = \rho_f \Phi + \rho_{sd} V_{sd} + \rho_{pes} V_{pes} + \rho_{cl} V_{cl} \quad (1)$$

$$Pe_b = Pe_f \rho_f \Phi + Pe_{sd} \rho_{sd} V_{sd} + Pe_{pes} \rho_{pes} V_{pes} + Pe_{cl} \rho_{cl} V_{cl} \quad (2)$$

$$1 = \Phi + V_{sd} + V_{pes} + V_{cl} \quad (3)$$

donde

ρ_b es la densidad leída

ρ_f es la densidad del fluido

ρ_{sd} es la densidad de la arena
 ρ_{pes} es la densidad del mineral pesado
 ρ_{cl} es la densidad de la arcilla
 P_e es el factor fotoeléctrico leído
 P_{ef} es el factor fotoeléctrico del fluido
 P_{esd} es el factor fotoeléctrico de la arena
 P_{epes} es el factor fotoeléctrico del mineral pesado
 P_{el} es el factor fotoeléctrico de la arcilla
 Φ es la porosidad
 V_{sd} , V_{pes} y V_{cl} son los volúmenes de arena, mineral pesado y arcilla respectivamente

Generalmente el valor de V_{cl} se obtiene a partir de las curvas de SP, Rayos Gamma o una combinación de ambos y se introduce en el sistema de ecuaciones (1), (2) y (3). Resolviendo las mismas, puede obtenerse simultáneamente la porosidad y el volumen del mineral pesado.

Con perfil sínico

Para el cálculo de porosidad también puede utilizarse el perfil sínico, pero el mismo tiene dos desventajas con respecto al perfil de densidad: por una parte hay incertidumbre en los parámetros a utilizar en la conversión de velocidad a porosidad, y por otra el efecto de gas, que disminuye la velocidad compresional, no es fácilmente cuantificable, por lo cual en la práctica no se corrige la porosidad por dicho efecto. Pero por otra parte, la velocidad del sonido en las rocas se ve poco afectada por la presencia de pequeñas cantidades de minerales pesados, por lo que la porosidad derivada del perfil sínico mediante la ecuación (4) puede ser una buena aproximación a la porosidad real en estos casos.

$$\Delta t = \Delta t_r \Phi + \Delta t_{cl} V_{cl} + \Delta t_{ma} (1 - \Phi - V_{cl}) \quad (4)$$

donde

Δt es la lentitud (inversa de la velocidad) medida ($\mu\text{seg/pie}$)
 Δt_r es la lentitud del fluido (habitualmente $189 \mu\text{seg/pie}$)
 Δt_{cl} es la lentitud de la arcilla (variable entre 70 y $100 \mu\text{seg/pie}$)
 Δt_{ma} es la lentitud de la roca (variable entre 51 y $56 \mu\text{seg/pie}$ en areniscas)

Con perfil de resonancia magnética nuclear

La porosidad medida por el registro de Resonancia Magnética Nuclear (RMN) es independiente del tipo de roca y contenido de arcilla, lo que lo cual

$\Phi = \Phi_{RMN}$
 donde
 Φ_{RMN} es la porosidad efectiva RMN, igual al área bajo la curva de distribución de T_2 entre 3 y 3000 milisegundos (Miller, 1990; Morris, 1993).

EJEMPLO

En el pozo AB-1010 se dispone de coronas en dos arenas. Los valores de porosidad y densidad de grano medida en una de ellas se grafican en la Fig. 5 junto con las curvas de porosidad derivada del perfil de densidad con densidad de grano 2.65 g/cm^3 , la porosidad neutrónica y el factor fotoeléctrico. En la misma puede observarse lo siguiente:

1. La densidad de grano medida oscila entre 2.64 y 2.7 g/cm^3 , lo que confirma la presencia de minerales pesados.

- Hay una correlación entre la densidad de grano y el factor fotoeléctrico, lo que confirma que este último es un buen indicador de la presencia de minerales pesados.
- En las zonas en que la porosidad de coronas coincide con la del densidad, la densidad de grano y el factor fotoeléctrico son bajos, mientras que cuando la porosidad de coronas es mayor a la del densidad, la densidad de grano y el factor fotoeléctrico son altos.

El estudio petrográfico de 4 testigos en esta arena indica la presencia (menos del 1%) de clastos de piritita y blenda a 1024, 1026.5, 1027 y 1028 metros, y entre 1 y 8% de cemento siderítico. El estudio de estos testigos por difracción de rayos X confirma el contenido de siderita pero detecta mayores porcentajes de blenda, como puede verse en la Tabla II.

Prof. (mbbp)	Cuarzo %	Feldespatos Potásicos %	Plagioclasas %	Arcillas %	Carbonatos %	Sulfuros %	Otros %
1024	64	7	5	9	S: 10	Bl: tr	5
1026.5	65	5	3	4	S: 10	Bl: 8	5
1027	65	10	8	7	S: tr	Bl: 5	5
1028	55	8	14	15		Py: 3	5

Tabla II – Estudio por difracción de rayos X de 4 testigos (S: siderita, Bl: blenda, Py: piritita)

Cálculo de la porosidad

Los perfiles no permiten identificar el tipo de mineral pesado asociado a la arenita. Por este motivo, para el cálculo de la porosidad a partir del perfil de densidad hemos utilizado un modelo arena-mineral pesado-arcilla, tomando como densidad y factor fotoeléctrico del mineral pesado un promedio ponderado de piritita, siderita y blenda.

En la Fig. 6 se muestra la comparación de la porosidad calculada con este modelo con la porosidad medida en coronas en el intervalo 1023-1033 metros. La concordancia es razonablemente buena, teniendo en cuenta la distinta resolución vertical de las muestras de laboratorio y los perfiles. El cálculo del volumen de minerales pesados muestra valores de hasta 8%. En la misma figura se muestra la muy buena concordancia entre la porosidad medida en coronas y la del perfil de resonancia magnética nuclear MRIL, con las limitaciones debidas a la falta de resolución vertical de este perfil (Solonet, 1998), como puede observarse por ejemplo a 1027.4 metros.

CONCLUSIONES

En areniscas del Grupo Cuyo de la cuenca neuquina la presencia de minerales pesados afecta las lecturas del perfil de densidad, produciendo errores en el cálculo de la porosidad si no se tiene en cuenta este efecto. Debido a que los minerales pesados también tienen un alto factor fotoeléctrico P_e , el mismo puede utilizarse para estimar el volumen de los mismos. Para calcular la porosidad en estos casos debe utilizarse el perfil de densidad con un modelo arena-minerales pesados-arcilla, o un perfil sísmico, o un perfil de resonancia magnética nuclear. Las medidas de porosidad en coronas en el pozo AB-1010 confirman que tanto el perfil de densidad con un modelo que incluye minerales pesados como el perfil de RMN son buenos estimadores de la porosidad en estos casos.

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos a Pluspetrol S.A. por la autorización para publicar este trabajo.

LISTA DE TRABAJOS CITADOS EN EL TEXTO

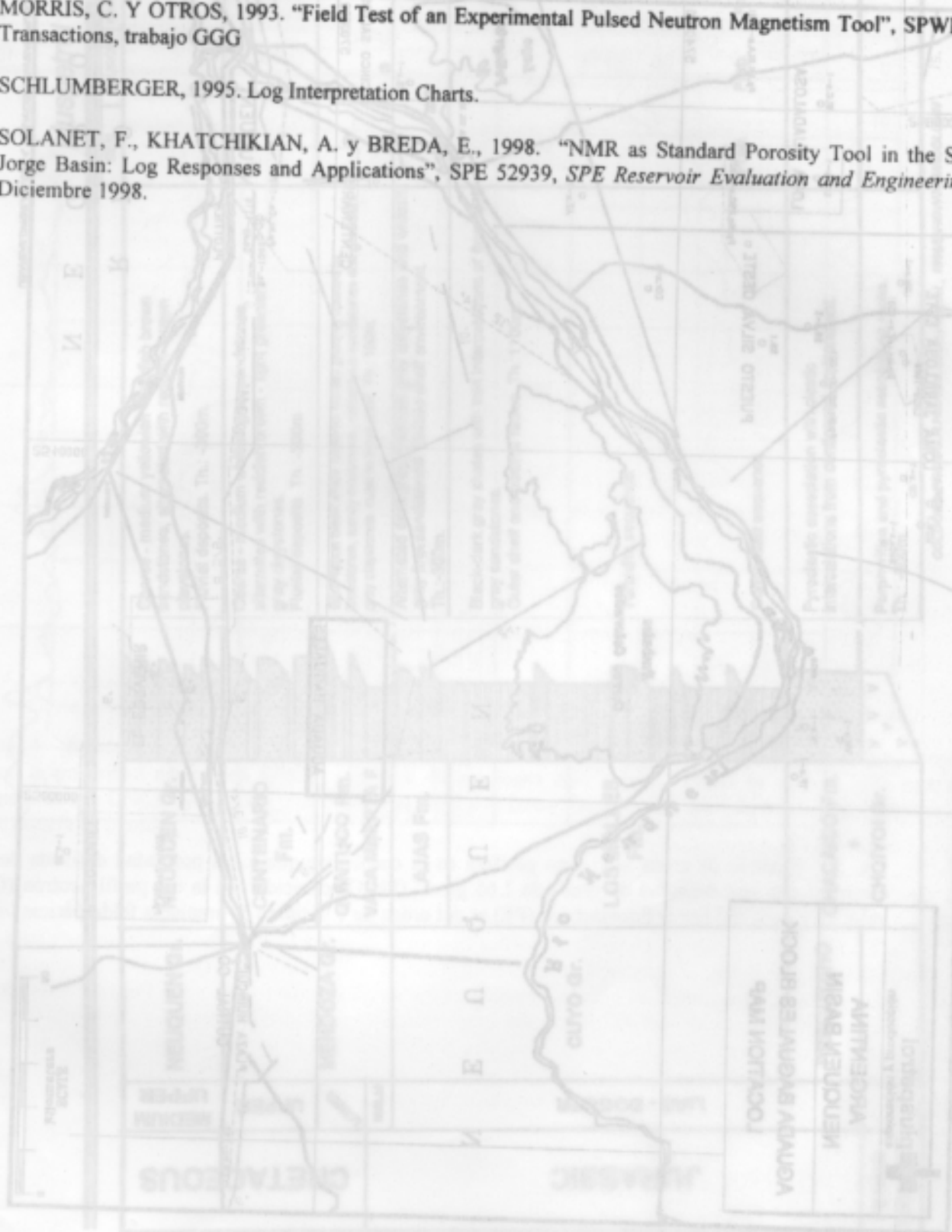
- GALLOWAY, W.E. Y HOBDA, D.K., 1983. Terrigenous Clastic Depositional Systems, Springer-Verlag.
- KHATCHIKIAN, A., 1999. Introducción a los registros de pozos.

MILLER, M.N. Y OTROS, 1990. "Spin Echo Magnetic Resonance Logging: Porosity and Free Fluid Index Determination", SPE 20561, presentado en la SPE Annual Technical Conference and Exhibition.

MORRIS, C. Y OTROS, 1993. "Field Test of an Experimental Pulsed Neutron Magnetism Tool", SPWLA Transactions, trabajo GGG

SCHLUMBERGER, 1995. Log Interpretation Charts.

SOLANET, F., KHATCHIKIAN, A. y BREDA, E., 1998. "NMR as Standard Porosity Tool in the San Jorge Basin: Log Responses and Applications", SPE 52939, *SPE Reservoir Evaluation and Engineering*, Diciembre 1998.



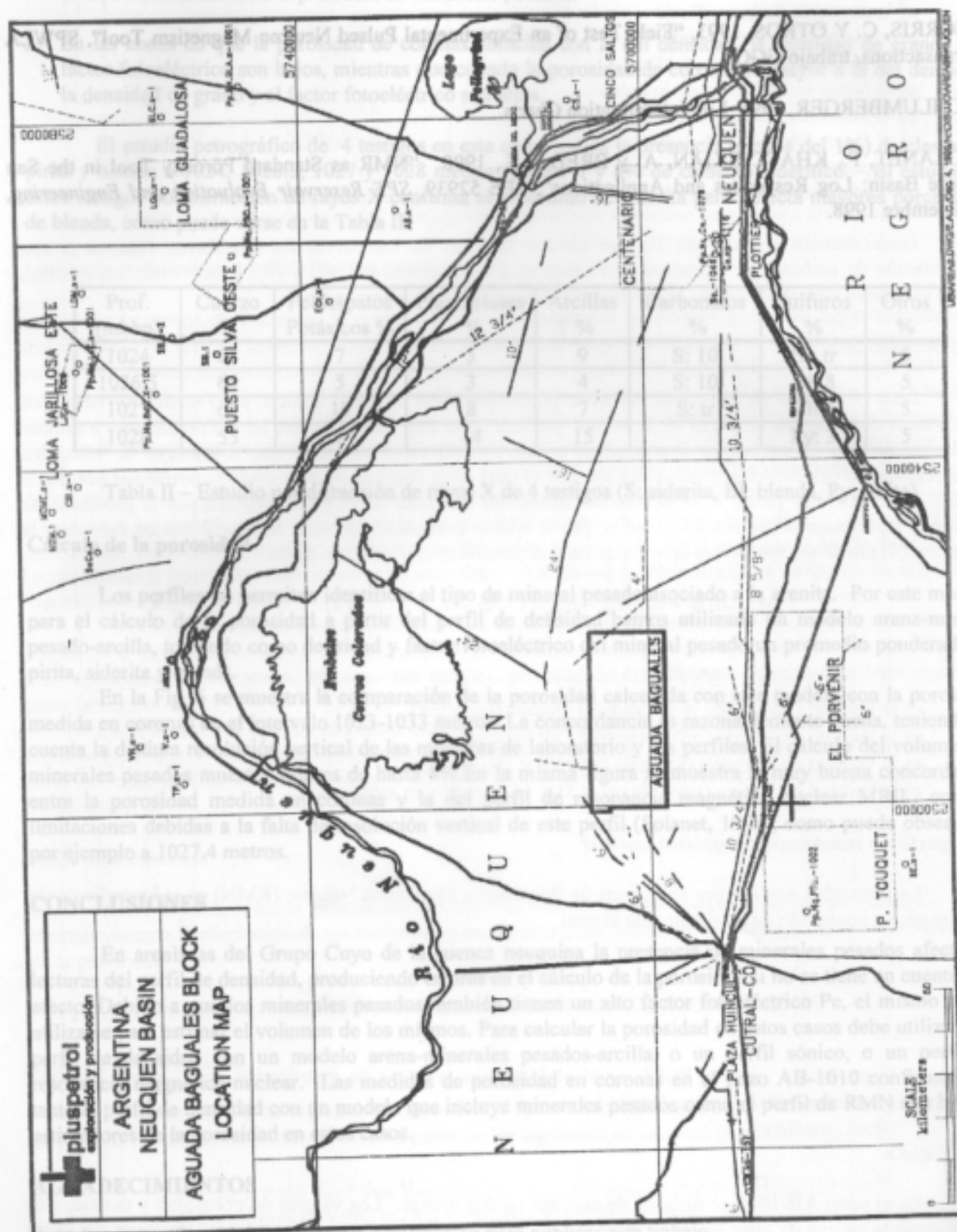


Fig. 1 – Mapa de locación del yacimiento Aguada Baguales

CRETACEOUS	MEDIUM UPPER	NEUQUEN Gr.	NEUQUEN Gr.	SEAL	SOURCE	RESERVOIR
JURASSIC	MEDIUM UPPER	MENDOZA Gr.	CENTENARIO Fm.	Coarse - medium whitish gray sandstones, alternated with reddish brown - light greenish gray claystones. Fluvial deposits Th.: ~300m.	Coarse - medium whitish gray sandstones, alternated with reddish brown - light greenish gray claystones. Fluvial deposits Th.: ~300m.	Coarse - medium whitish gray sandstones, alternated with reddish brown - light greenish gray claystones. Fluvial deposits Th.: ~300m.
JURASSIC	MEDIUM UPPER	MENDOZA Gr.	QUINTUCO Fm. VACA MUERTA F	Alternated dark gray-greenish gray claystones and whitish gray fine sandstones. Deltaic shelf environment. Th.: ~300m.	Alternated dark gray-greenish gray claystones and whitish gray fine sandstones. Deltaic shelf environment. Th.: ~300m.	Alternated dark gray-greenish gray claystones and whitish gray fine sandstones. Deltaic shelf environment. Th.: ~300m.
JURASSIC	MEDIUM UPPER	MENDOZA Gr.	LAJAS Fm.	Black-dark gray shales with thin intercalations of fine light gray sandstones. Outer shelf and basinal facies. Th.: ~1100m.	Black-dark gray shales with thin intercalations of fine light gray sandstones. Outer shelf and basinal facies. Th.: ~1100m.	Black-dark gray shales with thin intercalations of fine light gray sandstones. Outer shelf and basinal facies. Th.: ~1100m.
JURASSIC	MEDIUM UPPER	MENDOZA Gr.	LOS MOLLES Fm.	Turbidite sequence.	Turbidite sequence.	Turbidite sequence.
JURASSIC	MEDIUM UPPER	MENDOZA Gr.	Cuyo Gr.	Condensed sequence	Condensed sequence	Condensed sequence
PERMO-TRIASSIC	MEDIUM UPPER	PRECUYANO	CHACAICO Fm. + CHOYOI Gr.	Pyroclastic association with clastic intercalations from continental environment.	Pyroclastic association with clastic intercalations from continental environment.	Pyroclastic association with clastic intercalations from continental environment.
PERMO-TRIASSIC	MEDIUM UPPER	PRECUYANO	CHACAICO Fm. + CHOYOI Gr.	Porphyritic and pyroclastic association rocks. Th.: ~600m.	Porphyritic and pyroclastic association rocks. Th.: ~600m.	Porphyritic and pyroclastic association rocks. Th.: ~600m.

Fig. 2 – Columna estratigráfica del yacimiento Aguada Baguales

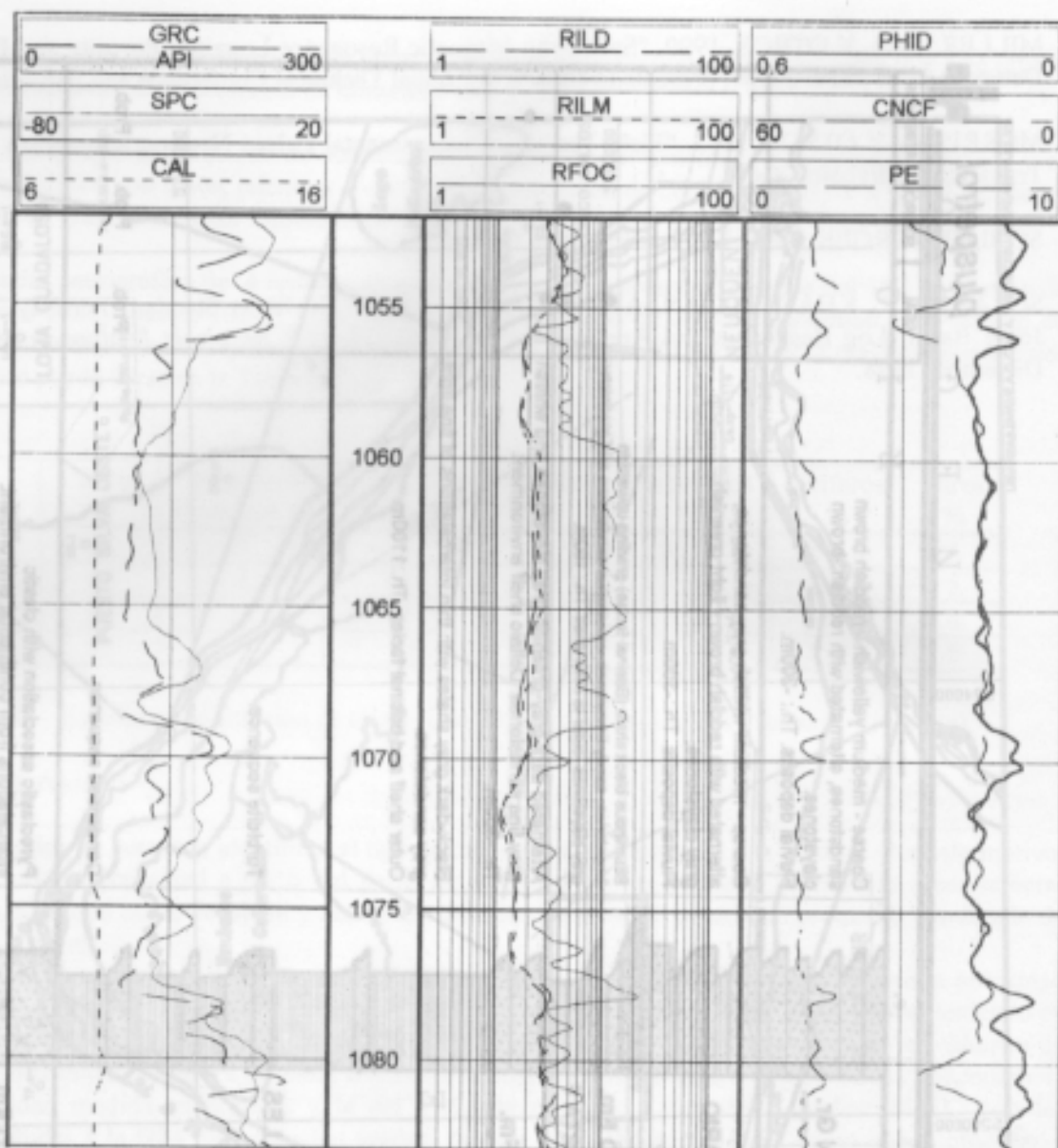


Fig. 3 - Ejemplo de arena limpia no gasífera en la cuenca neuquina. La porosidad derivada del perfil de densidad con una densidad de grano de 2.65 g/cm^3 (PHID) coincide con la del perfil neutrón (CNCF). El valor promedio del factor fotoeléctrico (PE) es del orden de 1.9, típico de areniscas feldespáticas limpias.

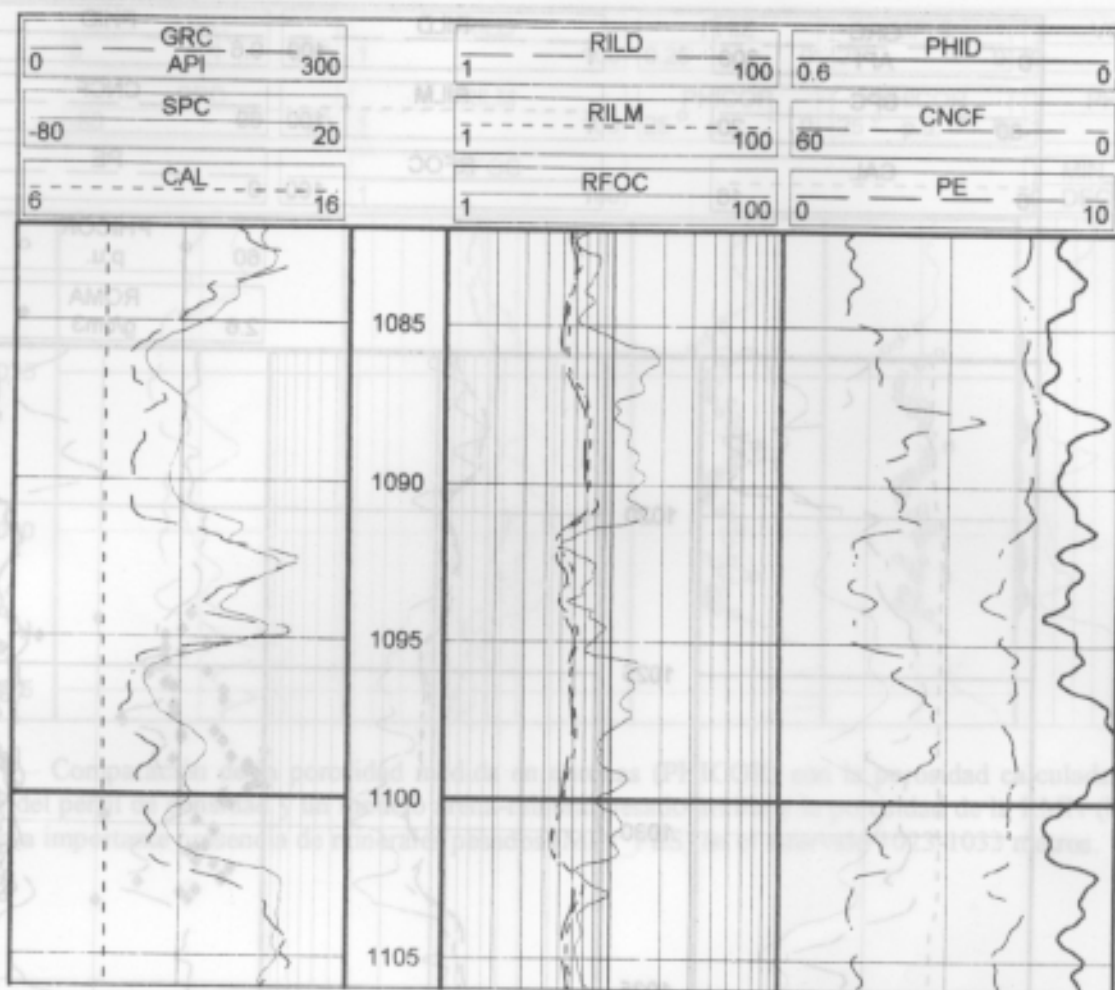
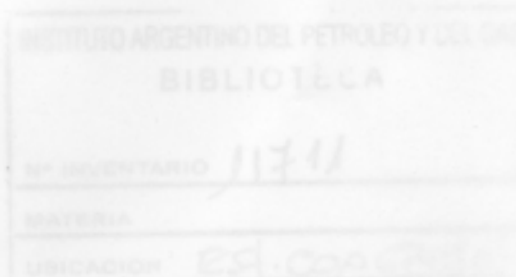


Fig. 4 - Efecto de minerales pesados en la porosidad derivada del densidad (PHID), que lee mucho menos que la porosidad neutrónica CNCF, inclusive en las zonas más limpias. PHID es cero a 1098 metros, mientras que CNCF a la misma profundidad es 18% y el factor fotoeléctrico lee 5.0, sugiriendo la presencia de minerales pesados.



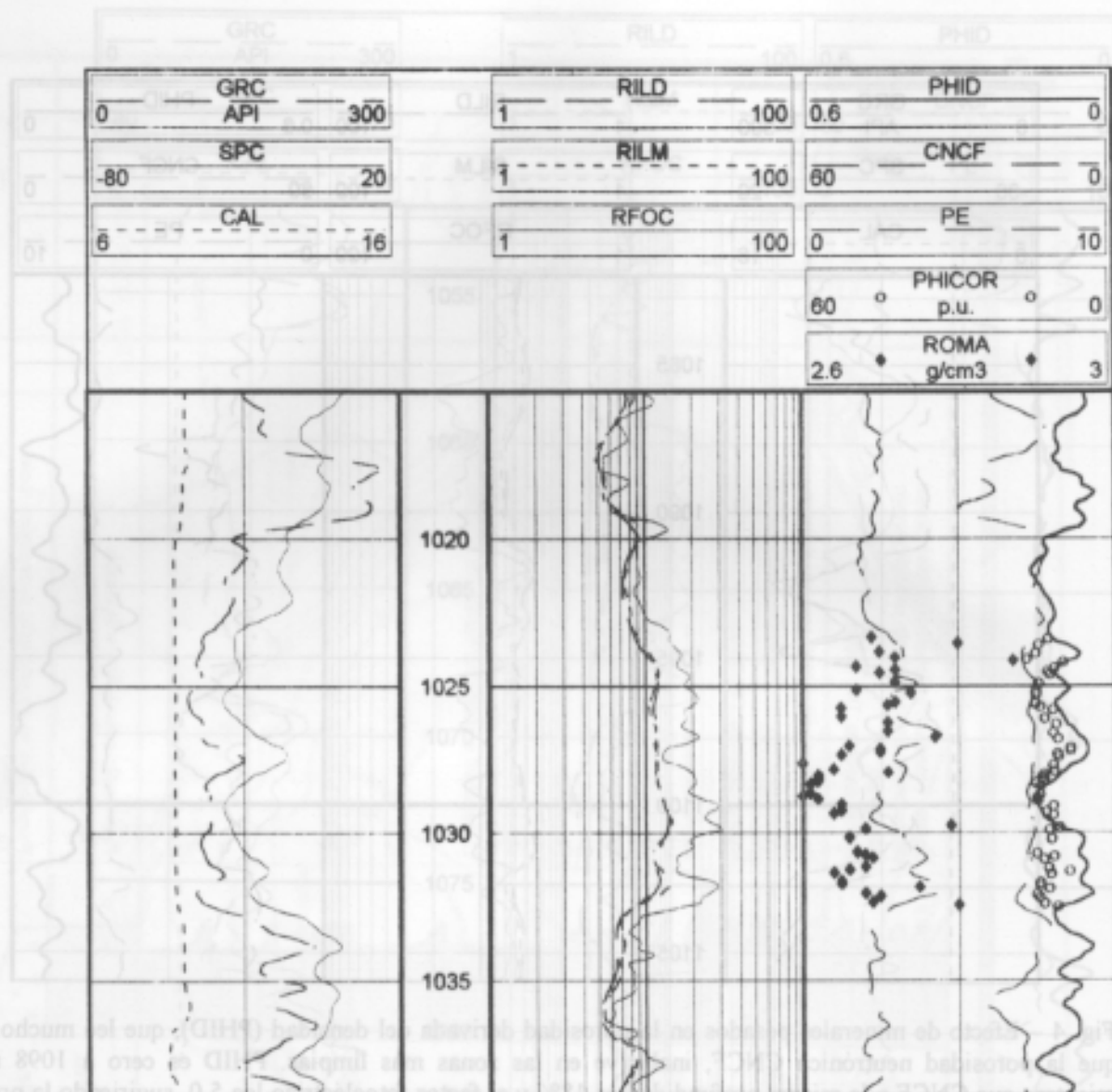


Fig. 5 – Comparación de la porosidad y densidad de grano medida en coronas (ROMA y PHICOR respectivamente) con la porosidad derivada del perfil de densidad con densidad de grano 2.65 g/cm^3 (PHID), la porosidad neutrónica CNCF y el factor fotoeléctrico PE.

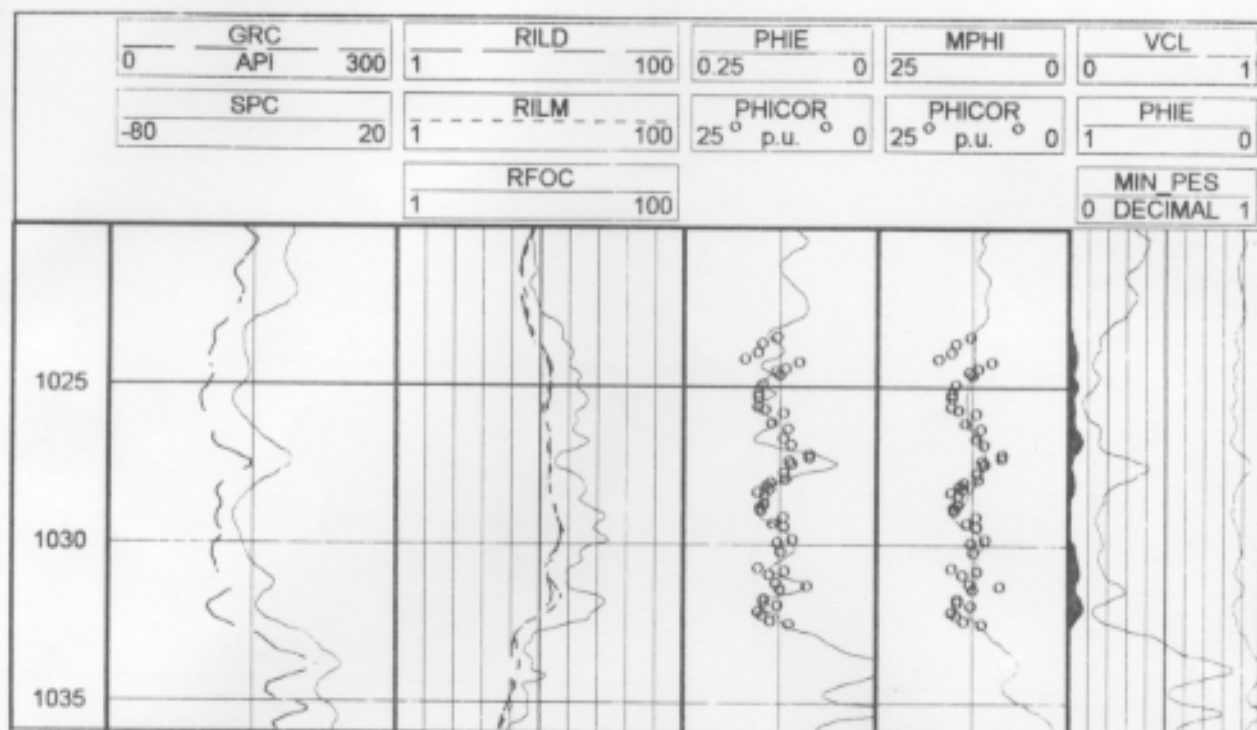


Fig. 6 - Comparación de la porosidad medida en coronas (PHICOR) con la porosidad calculada (PHIE) a partir del perfil de densidad y un modelo arena-mineral pesado-arcilla y la porosidad de la RMN (MPhi). Se observa importante presencia de minerales pesados (MIN_PES) en el intervalo 1023-1033 metros.

INSTITUTO ARGENTINO DEL PETRÓLEO Y DEL GAS	
BIBLIOTECA	
N° INVENTARIO	11711
MATERIA	
UBICACION	EST. COAGRESOS