



# REGISTRO ELÉCTRICO Y GAMMA NATURAL APLICADOS A LA CARACTERIZACIÓN DE ACUÍFEROS

Ing. Rosa M. Valcarce Ortega

Ing. Jorge Ruíz Ibarra

Ing. Jacqueline González Espinosa

Departamento de Geofísica. Instituto Superior Politécnico «José A. Echeverría». Ciudad de La Habana

## RESUMEN:

Se presenta una metodología de interpretación conjunta de los registros de gamma natural y resistividad aparente para el cálculo de la porosidad efectiva y la arcillosidad en acuíferos, empleando la técnica del Gráfico Cruzado. Se ofrecen los resultados de la aplicación de esta metodología a un pozo del acuífero cársico Cuenca Sur de La Habana y se comparan los mismos con los valores de porosidad obtenidos al emplear la ecuación de Archie y los de arcillosidad logrados utilizando el parámetro duplo diferencial de la intensidad gamma natural. Se concluye que la metodología brindada es efectiva para la evaluación de las propiedades colectoras de las rocas arcillosas.

## ABSTRACT:

This paper shows a methodology for interpreting both natural gamma ray and electrical logs in order to obtain the effective porosity and clay volume in collector rocks using the Crossplot. It is also shown the result of the application of this methodology in a borehole at Havana South Basin. These results are compared with the ones obtained from the evaluation of the porosity using Archie's equation and evaluation of shaly from natural gamma ray. The effectiveness of the applied methodology in order to evaluate the reservoir properties of shaly rocks is well established.

En las rocas colectoras de agua, en muchos casos, la porosidad no puede ser evaluada directamente mediante la ecuación de Archie porque la presencia de arcilla varía esta relación práctica. Dicha ecuación supone que el agua es el único material eléctricamente conductivo en la formación, y por tanto, la presencia de otro material conductivo, como la arcilla, requiere la modificación de esta ecuación, lo que implica desarrollar otros modelos de interpretación que relacionen la resistividad de la roca con su porosidad efectiva.

Ha sido propuesto un gran número de modelos (Walter H, 1980; Schlumberger, 1988) que consideran: la resistividad eléctrica de las arcillas, el contenido de arcilla en las rocas, las reacciones químicas que tienen lugar entre las arcillas y el agua que satura las rocas, y la forma de distribución de las arcillas en el colector.

En estos modelos se considera que la influencia en la conductividad eléctrica de las rocas por la presencia de arcilla, puede expresarse como un sistema en paralelo de la conductividad de la arcilla con el esqueleto rocoso saturado de agua. Todos estos modelos se reducen a la ecuación de Archie cuando el contenido de arcilla es igual a cero. Para un contenido de arcilla relativamente bajo, la mayoría de los modelos ofrece resultados muy similares.

## EQUIPAMIENTO UTILIZADO

En los trabajos de campo se utilizó la estación de métodos geofísicos de pozo K-1 500 de nacionalidad

húngara. Las características técnicas de los equipos utilizados en cada método son las siguientes:

Cavernometría: Sonda KM-2 (soviética-húngara).  
Escala horizontal: 25 mm/cm .

Intensidad gamma natural: Sonda KRGN-3-120-43s (húngara).  
Escala horizontal: 1 ó 2  $\mu$ r/h/cm .

Resistividad eléctrica aparente: Sonda potencial (checa) de longitud 0,41 cm .  
Sonda gradiente (checa) de longitud 1,64 m .  
Escala horizontal: 5 ó 50 ohm-m/cm .

Resistivimetría: Sonda AQUALOG (checa).  
Escala horizontal: 1 ó 2 ohm-m/cm .

La escala vertical para todos los registros fue 1:200.

## METODOLOGÍA DE INTERPRETACIÓN DESARROLLADA

En acuíferos cársicos, de acuerdo con sus características estructurales y desde el punto de vista práctico, es de esperar que el modelo más apropiado para el estudio de sus propiedades colectoras corresponda a una roca con oquedades rellenas parcialmente con arcilla y saturadas totalmente de agua. Este modelo puede ser explicado matemáticamente por la ecuación de resistividad

Fue fundada el 20 de agosto de 1972 y ha constituido desde sus inicios una fuente inagotable de conocimientos, cultura, ciencia y tecnología para el desarrollo de toda la nación cubana.

Está ubicada en la Ciudad de Pinar del Río, capital de la provincia del mismo nombre, situada geográficamente en la zona más occidental del territorio cubano, a 176 km al oeste de la Ciudad de La Habana.

Además de su responsabilidad en la formación de profesionales, capaces y con alto grado de independencia; la Universidad de Pinar del Río difunde los beneficios de su acción social y cultural mediante la Extensión Universitaria en todo el país y en el extranjero.

## Principales autoridades:

Rector: Dr. Ynocente Betancourt Figueras

Vicerrector Docente: Dr. Antonio de la Flor Santalla

Vicerrector de Investigaciones y Posgrado: Dr. Ángel Notario de la Torre

Vicerrector económico: Lic. Carlos Lezcano Neyra

## Funcionarios de enlace:

Metodólogo de Educación de Posgrado: Dr. Félix Ledo Babarro

Metodólogo de Investigaciones: Dra. Maricela González Pérez

Metodólogo de Servicios Académicos: Dr. Jacinto Cires López

Director de Relaciones Internacionales: Ing. Raymundo Vento Tielves

de porosidad ficticia (Kobranova V. N., 1986) la cual está dada por:

$$m \sqrt{\frac{aRw}{Ro_{ra}}} = \phi_{ef} + \frac{Rw}{R_{ar}} C_{ar} \quad (1)$$

donde:

- $\phi_{ef}$  : porosidad de la roca limpia, porosidad efectiva;
- $m$  : coeficiente de cementación de la roca;
- $a$  : índice litológico;
- $Rw$  : resistividad eléctrica del agua que satura la roca;
- $Ro_{ra}$  : resistividad eléctrica de la roca arcillosa 100 % saturada de agua;
- $R_{ar}$  : resistividad de la arcilla;
- $C_{ar}$  : contenido de arcilla.

Por otra parte, si el esqueleto de la roca es poco radiactivo o su radiactividad es constante, entonces, la ecuación del registro de intensidad gamma natural, considerando que la roca está compuesta de arcilla, agua y matriz, y que la intensidad gamma natural del agua es nula, queda expresada (Ruiz J. y Kobr M., 1988 ; Schlumberger, 1988) como:

$$Ig = Ig_{mat} - \phi_{ef} Ig_{mat} + C_{ar} (Ig_{ar} - Ig_{mat}) \quad (2)$$

donde:

- $Ig$  : intensidad gamma natural de la roca;
- $Ig_{mat}$  : intensidad gamma de la matriz de la roca;
- $Ig_{ar}$  : intensidad gamma de la arcilla.

Las ecuaciones (1) y (2) pueden combinarse para conformar un sistema de dos ecuaciones con dos incógnitas ( $\phi_{ef}$  y  $C_{ar}$ ) que puede ser resuelto mediante el Gráfico Cruzado de los parámetros  $Ig$  vs.  $\sqrt{\frac{aRw}{Ro_{ra}}}$

Los Gráficos Cruzados o Crossplot han sido usados desde los primeros años de la década del 60 (William y Xaughn, 1969; Poupon *et al.*, 1971). En la literatura especializada se reporta un gran número de variantes de Gráficos Cruzados, bidimensionales y tridimensionales (Walter H., 1981; Schlumberger, 1988).

El Gráfico Cruzado que se aplica en este trabajo surge ante la necesidad de extraer la mayor información de los registros disponibles para esta investigación, capaces de reflejar la porosidad y la arcillosidad de las rocas: el registro de resistividad aparente y el registro gamma natural.

El sistema de ecuaciones formado por (1) y (2) combina la ecuación del modelo de porosidad ficticia y la ecuación del registro gamma natural, además permite el cálculo cuantitativo de la porosidad efectiva y el contenido de

arcilla. Este sistema de ecuaciones encuentra solución gráfica a partir del ploteo de los parámetros  $Ig$  vs.  $\sqrt{\frac{aRw}{Ro_{ra}}}$  (ver Figura 1).

En este gráfico se definen tres puntos característicos: A, B y C (Valcarce, 1995). El punto A representa el punto de porosidad efectiva igual a 100 % y un 0 % de contenido de arcilla. Sus coordenadas son (0,a). El punto B representa el punto de matriz, o sea, el punto donde la porosidad efectiva y el contenido de arcilla toman el valor cero y la matriz es igual a uno. Sus coordenadas son ( $Ig_{mat}$ , 00). El punto C representa el punto de arcilla, es decir, el punto de porosidad efectiva cero, contenido de arcilla igual a uno y matriz cero. Sus coordenadas son:

$$\left( Ig_{ar}, \frac{a}{(Rw / R_{ar})} \cdot m \right)$$

Los puntos A, B y C pueden ser determinados por ploteo en el Gráfico Cruzado, por mediciones geofísicas en pozo o combinando ambas informaciones.

En este caso los puntos A y B fueron obtenidos del Gráfico Cruzado, y el punto C se definió a partir de mediciones de gamma natural y resistividad eléctrica en capas de arcilla.

Las líneas que unen estos puntos representan los límites de los contenidos de cada componente de la roca. Estas líneas pueden dividirse según una escala lineal de contenido de cada componente, de forma tal que a cada punto interior del triángulo le correspondan determinados valores de porosidad efectiva, contenido de arcilla y matriz.

La solución matemática de este sistema para el cálculo de la porosidad efectiva y la arcillosidad es la siguiente:

$$\phi_{ef} = \frac{(Ig_{ar} - Ig_{mat}) \sqrt{\frac{a}{Ro_{ar} / Rw}} - (Ig - Ig_{mat}) \frac{Rw}{R_{ar}}}{(Ig_{ar} - Ig_{mat}) + Ig \frac{Rw}{R_{ar}}} \quad (3)$$

$$C_{ar} = \frac{(Ig - Ig_{mat}) + Ig_{mat} \sqrt{\frac{a}{Ro_{ar} / Rw}}}{(Ig_{ar} - Ig_{mat}) + Ig_{mat} \frac{Rw}{R_{ar}}} \quad (4)$$

**RESULTADOS**

La metodología obtenida para el cálculo de la porosidad efectiva y la arcillosidad fue aplicada en el pozo I-II-21K de la cuenca sur de La Habana (ver Figura 2), la cual constituye un acuífero desarrollado en rocas cársicas carbonatadas (Valcarce, 1995).

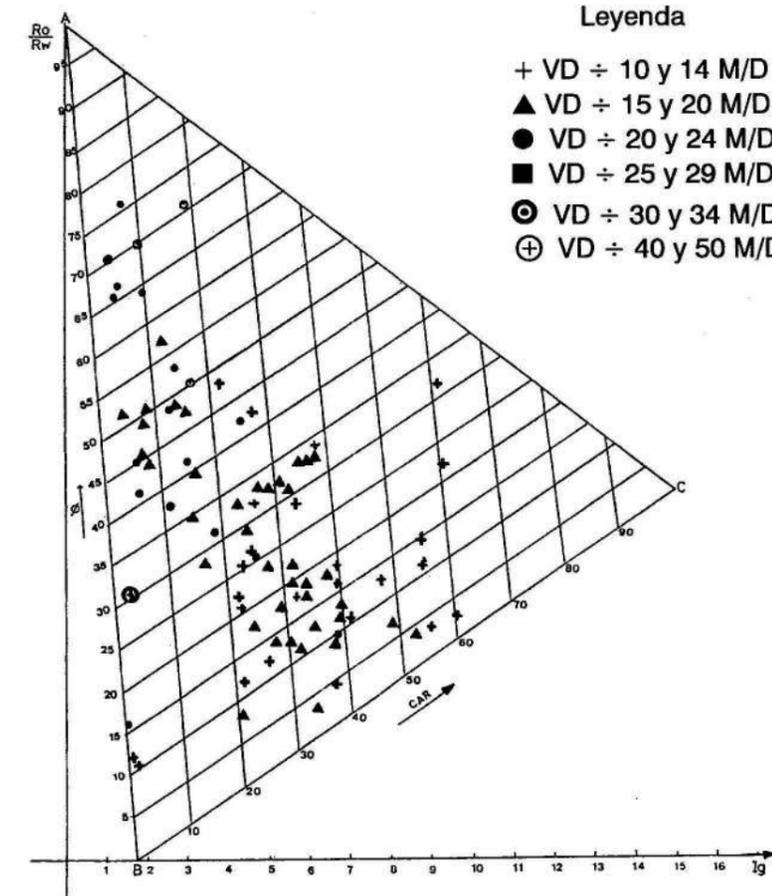


FIGURA 1. Gráfico cruzado  $\sqrt{\frac{a}{Ro/Rw}}$  vs  $Ig$ .

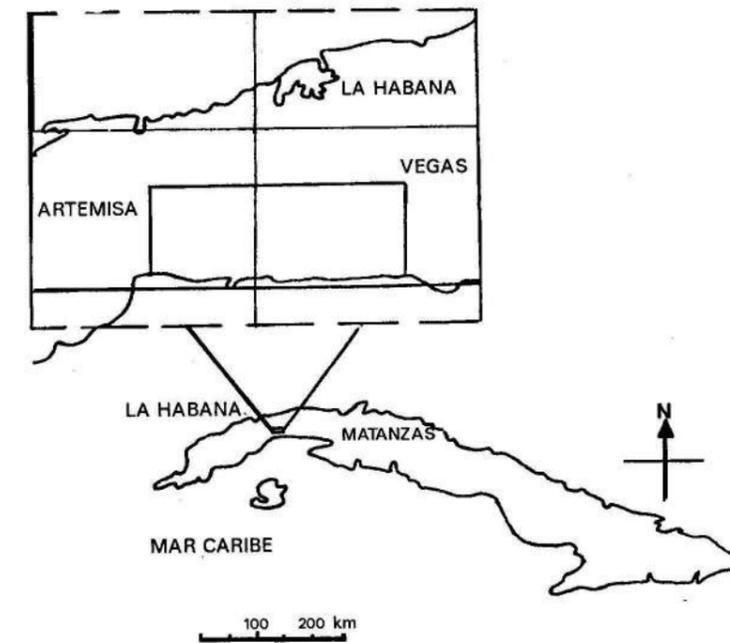


FIGURA 2. Ubicación del área de estudio.

En la Figura 1 aparece el Gráfico Cruzado de  $I_g$  en

escala lineal vs  $R_o/R_w$  en escala  $\left(\sqrt[m]{\frac{a}{R_o/R_w}}\right)$

para  $m=2$ . Se ha reflejado también el rango de variación de la velocidad de filtración aparente del agua subterránea obtenida por la interpretación del método de dilución de sal (Grinbaum, 1965) para cada uno de los intervalos cuasihomogéneos en que fue dividido el pozo. Se destaca que los mayores valores de velocidad del agua sub-

terránea aparecen en las capas de mayor porosidad efectiva y menor arcillosidad.

En la Tabla 1 aparecen los valores de porosidad efectiva y contenido de arcilla obtenidos a partir del Gráfico Cruzado de la Figura 1 ( $\phi_{ef}$  y  $C_{ar}$  respectivamente) para algunos intervalos del pozo. También se reportan los resultados obtenidos al calcular la porosidad efectiva según la ecuación de Archie ( $\phi$  de Archie) y la porosidad según el parámetro duplo diferencial del registro gamma natural ( $C_{ar}$ ) (Ruíz, J. y Kobr, M., 1988).

**TABLA 1. Estimación de la porosidad y la arcillosidad en un intervalo del pozo I-II-21k aplicando diferentes metodologías de interpretación**

Profundidad (m)	$\phi$ de Archie (%)	$\phi_{ef}$ (G.C.) (%)	$C_{ar}$ (%)	$C_{ar}$ (G.C.) (%)
14,0	17	16	0	0
15,5	12	12	0	0
17,4	12	11	0	1
37,2	32	31	0	3
54,9	30	23	22	23
58,7	16	11	24	24
59,5	13	5	48	41
63,7	36	29	21	24
67,4	40	29	33	33
68,2	19	9	53	45
69,1	23	16	32	30
70,0	39	29	30	31
71,1	24	18	24	25
71,9	23	16	29	28
74,7	29	23	20	21
75,3	38	28	32	32
76,0	25	17	29	29
77,5	36	27	28	29
79,3	16	9	37	33
79,8	22	11	53	45
82,9	34	25	29	30
85,0	22	3	21	36
86,3	18	10	37	34
86,7	19	9	53	45
89,4	32	22	36	35
90,1	17	9	40	36
90,6	38	29	24	26
91,2	24	15	35	33
93,0	37	28	27	29

Para las capas con poco contenido de arcilla, la porosidad efectiva calculada tanto por el modelo de Archie como por la metodología desarrollada en este trabajo,

ofrece resultados similares, pero en capas de elevada arcillosidad existen diferencias importantes.

## CONCLUSIONES

La metodología desarrollada en este trabajo para la interpretación conjunta de los registros de resistividad aparente y gamma natural que da solución a la ecuación del modelo de porosidad ficticia y a la ecuación de registro del gamma natural, permite una mejor caracterización de las propiedades colectoras de las rocas al considerar, de forma conjunta, el efecto de la arcillosidad y la porosidad en los registros de resistividad aparente y gamma natural. Esto resulta de mayor importancia aun en colectores muy arcillosos.

## BIBLIOGRAFÍA

- ALFONSO, J.: *Estadística en las ciencias geológicas*, 2t, ISPJAE, Ciudad de La Habana, 1989.
- GRINBAUM, I. I.: *Métodos geofísicos para determinar la filtración en los poros de las rocas*. 120 pp., Ed. Nedra, Moscú, 1965 (en ruso).

- KOBRANOVA, V. N.: *Petrofísica*, 200 pp., Ed. Nedra, Moscú, 1986.
- POUPON, A.; W. R. HOYLE and A.W. SCHMIDT: «Log analysis information with complex lithologies», In: *Journal of Petroleum Technology*, pp. 995-1005, august, 1971.
- RUIZ, J. y M. KOBR: *Métodos geofísicos en pozos*, 417 pp., ISPJAE, Ciudad de La Habana, 1988.
- SCHLUMBERGER: *Principios/Aplicaciones de la interpretación de registros*, 197 pp., Schlumberger Educational Services, 1988.
- VALCARCE, R.: «Métodos geofísicos en pozo para el estudio de acuíferos cársicos», Tesis de Maestría, 74 pp., Departamento de Geofísica, ISPJAE, 1995.
- WALTER, H.: «Evaluation of shaly clastic reservoir rocks», *Journal of Petroleum Technology*, pp. 1641-1646, september, 1980.
- : «Openhole crossplot concepts. A powerful Technique in well log analysis», *Journal of Petroleum Technology*, pp. 535-549, march, 1981.
- WILLIAM, A. y A. XUAGH: «Improved simultaneous determination of formation properties from well logs», *Journal of Petroleum Technology*, pp. 827-835, july, 1969.



**Facultades:**

### Facultad de Agronomía y Forestal

Decano: Dr. Aleido Díaz Guerra  
Títulos que otorga:  
Ingeniero Agrónomo  
Ingeniero Forestal  
Maestría en Cultivo del Tabaco  
Doctorados en Forestal y Cultivo del Tabaco

### Facultad de Economía

Decana: Dra. María Elena Fernández  
Títulos que otorga:  
Licenciado en Economía  
Licenciado en Contabilidad y Finanzas  
Maestrías en Economía Solidaria y Cooperativismo, y en Administración de Empresas Agropecuarias

### Facultad de Ciencias Técnicas

Decana: Dra. Esther María Cruz Games  
Títulos que otorga:  
Ingeniero Mecánico en Construcción de Maquinarias  
Ingeniero Geólogo  
Ingeniero en Telecomunicaciones  
Maestrías y Doctorados en Geología

### Facultad de Agronomía de Montaña

Decano: Ing. Andrés E. Ares Rojas  
Título que otorga:  
Ingeniero Agrónomo  
Además, la Universidad a nivel central imparte maestrías en Ciencias de la Educación y en Informática

### Claustro:

Formado por 298 Profesores, de ellos 49 Doctores, 13 Profesores Titulares, 42 Auxiliares, 113 Asistentes y 126 Instructores