GEOACTA,vol.11,n.2 (Junio de 1982), pág 343 a 356

EVALUACION DE FORMACIONES CON EL GRAVIMETRO DE POZO

Rubén A. Gutierrez y Roberto F. Santiso

YACIMIENTOS PETROLIFEROS FISCALES

R E S U M E N

1) Limitaciones y desventajas

La presión y la temperatura máximas que puede soportar el instrumento son: 840 kgs./cm2 y 150°F; las condiciones del pozo son que el mismo no se desvíe de la vertical en más de 14°; y que el diámetro no sea menor de 4 1/8".

La herramienta si bien determina anomalías, aunque las mismas no esten en la perforación, no da la dirección de las mismas.

Las lecturas del registro gravimétrico no son contínuas. hay que hacer estación dentro del pozo, para ver el valor de la gravedad en cada profundidad; estas lecturas, por condiciones de seguridad, deben hacerse entre 5 y 10 minutos. Además para poder ser determinadas, las anomalías deben ser de un espesor no menor de 10 metros. No reemplaza a otros perfiles geofísicos de pozo, como ser al registro de densidad.

2) Las ventajas del método son:

No lo afectan ni los derrumbes del pozo, ni el revoque que se forma alrededor del mismo, ni las variaciones en los tipos de lodos que se usan en la perforación.

Tampoco es afectado por la invasión de las formaciones que rodean al pozo por dicho lodo.

Se puede registrar en pozos entubados con una o varias cañerías; tiene un radio de investigación mayor que las herramientas de densidad y no requiere calibración insitu.

Los gravímetros que se utilizan para realizar estas mediciones son: gravímetros de cuerda vibrante que utilizan como principio la variación de la frecuencia de vibración del elemento de medida ó gravímetros La Coste Romberg en los cuales una masa es suspendida en condición inestable y se mide la longitud necesaria para restaurarla a su posición original.

Detecta anomalías laterales, es decir, aún las que no atraviesan al pozo, y su costo de registro es bajo.

Al promediar las densidades de volumenes grandes de rocas permite hacer estudios sismológicos estratigráficos o con modelos.

En la Argentina puede ser útil para la detección de Yacimientos en calizas.-

A B S T R A C T

1) Limitations and disadvantages

Maximum pressure and temperature the instrument a bear are; 84- kgs./cm2 and 150°F respectively; borehole diviation from vertical must not exceed 14°, and well diameter should not be less than 4 1/8".

Although the tool can determine anomalies, even if they are not within the borehole, it does not provide their direction.

Gravimetric record readings are not continuous. It is necessary to spot within the well in order to obtain gravity values at each depth; for security purposes, these readings should be mode between 5 and 10 minutes. Furthermore, in order to be determined anomalies tickness should not be less than 10 meters. It does not replace other geophisical well logs, as for example the density log.

2) Advantages of this method:

It is affected neither by well wash out or mudcake nor by variations in the types of mud used in drillig.

Besides it is not affected by mud invasion into the formations surrounding the well.

Records can be obtained in cased hole wells one or more casing; its investigation radius is greater than density tools and in situ calibration is not required.

Gravimeters used for these measurements are: vibrating string gravimeters in which the vibrational frequency changes of the string are measured or La Coste Romberg gravimeters in which

a mass is suspended in unstable condition and the necessary length to restore its original position is measured.

It can detect side anomalies, that is, even those outside the well and its recording cost is low.

Seismologic-stratigraphic and model studies can be made when getting an average of large rocks bulk densities.

In Argentina, it may prove to be useful por finding out limestone reservoirs.

1. ANTECEDENTES

En 1950 Neal J. Smith (1950) publicó un trabajo precursor. En el mismo sugería el uso de gravímetros en pozo (también analizó el caso de los gradiómetros). Otros geofísicos habían hecho estudios gravimétricos en cavernas y minas con vistas a la obtención de datos para mejorar la interpretación gravimétrica, mas Neal Smith tenía ideas concretas sobre su utilización en la interpretación de sísmica y de geología de subsuelo. Analiza las fórmulas y estudia en particular el caso de los domos salinos y las fallas próximas al pozo. Luego dedica una sección a la determinación del coeficiente de reflexión y sus posibilidades en sísmica.

En lo referente a la geología de pozo, ya señala el perfil gravimétrico como método para obtener un perfil de densidad de las formaciones y diferenciar las zonas con gas y petróleo.

Con amplia visión prevé el inconveniente principal que presentará el método: la medición es discontinua porque para asegurar la máxima precisión debe leerse en reposo.

En la década del 60 empiezan a aparecer instrumentos aptos para su uso en pozo, empezando por los de cuerda vibrante. El de la ESSO permitía una precisión de 0,1 ug.

A fines de la década del 60 comienza el estudio sistemático: McCulloh (1967 a y b, 1968) establece las bases de los trabajos posteriores.

Finalmente en la década del 70, el proceso llega a su culminación.

2. LIMITACIONES

2.1 Temperatura y presión: Los instrumentos son muy delicados y la temperatura fue uno de los principales problemas. Al principio

no soportaban más de 150°F. En la actualidad admiten hasta 300°F (150°) y hasta 12000 psi (840 ugr/cm2) se llegaría a 20000psi en un modelo nuevo).

Esos límites cubren el rango de la mayoría de las formaciones de interés en nuestro país.

2.2 Precisión: En la actualidad, el instrumento más sensible mide con una precisión de ± 0,007 g. Este valor nos da un límite de resolución de capas de unos 10 m. En casos especiales, puede disminuir ese valor, pero otros factores influyen para que por el momento ese sea el límite de resolución. Sin embargo, este defecto debido (entre otras cosas) a que promedia volúmenes grandes de rocas, será muy ventajoso en ciertos casos.

2.3 Discontinuo y baja velocidad de registro: Es una de las desventajas que más incidieron en su comienzo. Cada lectura entonces demoraba cerca de media hora. Además punto a punto no conviene moverlo muy bruscamente. En la actualidad ese tiempo se bajó a unos 5 minutos o algo más, según el modelo de gravímetro. Es decir que en un pozo de 4000 m a una lectura cada 10 metros, insumiría como mínimo alrededor de 30 horas. Como rara vez se perfila todo el pozo y en tramos de poco interés se agranda el intervalo de lectura, vale la referencia de Jones (1972): término medio el trabajo dura de 12 a 24 horas.

No hay perspectivas inmediatas de producir una herramienta de registración continua pues harían falta mecanismos de estabilización durante el ascenso (suspensión cardánica, giróscopos y algún sistema de control remoto de la nivelación) y la tecnología actual no puede producirlos con diámetros suficientemente pequeños (menos de 5").

2.4 Exige cierta verticalidad del pozo: Antes era factor crítico, ahora el modelo L.R. usado por EDCON permite desviaciones de hasta 14°. De todos modos esa condición es limitante en pozos dirigidos.

2.5 Diámetro mínimo del pozo: El L.R. de EDCON mide 4 1/8" (diámetro) y puede correrse en "casings" de algo menos de 5".

2.6 Costo: En 1972 el L.R. costaba 80.000 dólares y el ESSO, 18.000

La última generación del L.R. es más sofisticada y es más caro. No se tienen precios del servicio, pero es seguramente

asequible: para un pozo de 4.000 m,el costo del servicio del gamma-gamma se acerca a un 50% del precio del gravímetro más caro.
2.7 Poco adecuado para buzamientos grandes, fallas o discordancias: Esto se debe a que promedia volúmenes grandes y además leemos en la vertical. Pero este mismo defecto puede ser ventaja si se corre el gamma-gamma: la comparación de ambos nos da información geológica imposible de detectar con otros perfiles.
2.8 Topografía de superficie muy irregular y apartamiento de la horizontal de las superficies "isopícnicas" (igual densidad de la roca) (Mc Culloh, 1968): Como generalmente interesan zonas a más de 1000 m de la superficie, la corrección topográfica es despreciable. Evaluarla es sencillo y se puede hacer con cualquier plancheta acotada (no hay corrección cercana).

En estratos de buzamientos suaves, la corrección por esa circunstancia es también insignificante. En caso contrario debe evaluarse: un método es comparar con la densidad de un buen testigo. Esta corrección sólo afecta las densidades absolutas, no así las relativas.
2.9 Falta de direccionalidad: Cuando se trata de información estructural o estratigráfica lateral, podemos estimar la distancia, no así el rumbo: habría que disponer de información sísmica o de pozos cercanos.

3. VENTAJAS

3.1 Poco afectado por las condiciones de pozo: aun con derrumbes que invalidan los resultados del gamma-gamma convencional, el efecto sobre la densidad del perfil gravimétrico es casi nula. Es fácil calcular esos efectos.
3.2 Puede correrse en pozos entubados: Aun con varias cañerías, la influencia es mínima y fácil de evaluar si es necesario. Es uno de los pocos métodos que permite el perfilado en pozos entubados viejos.
3.3. No influye la invasión ni el tipo de lodo:Condición sumamente útil. Como en la mayoría de las herramientas con lodos muy densos el descenso debe ser muy lento.
3.4 No requiere calibración in situ: La medición es directa y sólo la densidad puede influir en los valores (si damos por descontado que se lee en reposo y se cumplen las tolerancias en cuanto a la verticalidad del pozo).

3.5 Buena precisión: Para capas de más de 15 m de espesor, la densidad se obtiene con un error de ± 0,01 gr/cm3. Para menos de 10m, el error es mayor que ± 0,025 gr/cm3. Esto equivale en porosidad a ± 1,6% y ± 3% respectivamente.

En formaciones homogéneas y subhorizontales, la máxima diferencia con el gamma-gamma es de un 10%, pero debe recordarse que los métodos miden densidades de volúmenes de roca muy distintos, por lo cual es irrelevante comparar la precisión.

3.6 Medición de densidad de fluídos: Combinado con el gamma-gamma, que obtiene la porosidad de la formación saturada de agua (zona invadida), el gravímetro permite, para una litología dada, deducir la densidad del fluído en la formación. Así intervalos con baja densidad de fluído justifican punzar una capa muy invadida por el filtrado, la cual hubiera sido dejada de lado como posible objetivo comercial.

En yacimientos viejos puede ser útil para conocer el estado de la formación después de años de explotación.

3.7 Mide la densidad promedio de grandes volúmenes de rocas: Si la posible capa productora es de espesor apreciable, la porosidad dada por el gravímetro es más fiable que la del perfil convencional, que da un dato muy local (penetra unas pocas pulgadas). Por supuesto, la resolución del último es mucho mejor (hasta medio metro).

3.7.1 Es de más correcta aplicación en sísmica estratigráfica: El Dr. Neidel de Geoquest, en el primer curso que dictó en YPF. sobre sísmica de alta resolución en 1979, señaló que el frente de onda sísmico (zona de Fresnel) abarca un volumen de roca de varios centenares de metros de diámetro, más comparable con el dato provisto por el gravímetro que con el valor calculado con el gamma-gamma.

Pronosticó en ese entonces una creciente utilización del gravímetro de pozo debido el vencimiento de las patentes sobre el método. Esa ventaja es definitiva en caso de porosidad irregular o en pozos con derrumbes.

3.7.2 Mayor radio de investigación: Para una capa de 10 m de espesor, el radio de investigación es de unos 10 m, pero para 30 m ya ese radio supera los 150 m. Por lo tanto, comparando con otros perfiles como el gamma-gamma convencional se puede detectar, por

ejemplo, en calizas la porosidad lateral, regular o de fracturas. Hay muchos ejemplos en la bibliografía. En Libia se corrió en pozos viejos entubados y ensayados con los perfiles convencionales: las diferencias permitieron encontrar capas porosas donde antes aparecían cerradas. En el S.O. de EEUU. en una formación se halló gran diferencia de porosidad entre el perfil gravimétrico y el gamma-gamma: 7% y 18% respectivamente. Si ambas herramientas trabajan bien, hay varias posibilidades:

1) Un "pinch-out" o acuñamiento;
2) Una falla (o discordancia) lateral pero próxima al pozo;
3) Porosidad lateral a menos de unos 60 m y alcanzable con tratamiento adecuado.

Como se conocía la geología del área se excluyeron las dos primeras posibilidades y el pozo se ensayó con éxito.

En el yacimiento de Springs Field, California, se hizo un estudio comparando con densidades determinadas en laboratorio: el acuerdo fue correcto salvo en algunos niveles donde la diferencia se debió al gas de formación.

3.7.3 Caso de Arrecifes: La interpretación es compleja pues a las correcciones convencionales debe agregarse la influencia del arrecife lo que se efectúa quitando el "gradiente estructural" (obviamente se debe disponer de una idea aproximada sobre la configuración del arrecife). Anomalías "residuales" negativas señalarían las zonas de interés. Por supuesto que ni el gravímetro ni las otras herramientas de porosidad dan ningún indicio sobre la permeabilidad o la interconexión de poros. Otra circunstancia negativa es la extrema heterogeneidad de la porosidad que puede influir dando por resultado una producción pobre de hidrocarburos.

En realidad en estos casos el gravímetro actúa como un verdadero sensor remoto y añade una tercera dimensión a los perfiles de pozo.

3.7.4 Suministra información estructural: En este caso se puede trabajar directamente con la anomalía, sin pasar por el proceso numérico que da la densidad. Acá también, si se dispone de un relevamiento gravimétrico en superficie, el gravímetro de pozo añade una tercera dimensión al plano gravimétrico y se pueden aplicar técnicas como el "stripping" de Hammer.

4. CONCLUSIONES

El gravímetro de pozo es una herramienta especializada

que no reemplaza a otras sino que las complementa. Tiene limitaciones físicas perfectamente definidas así como campos de aplicación específicos. El mayor provecho resulta de integrarlo con otro tipo de información.

En los últimos 5 años ha contribuído sustancialmente al hallazgo de nuevos reservorios como el de Prizzy Shiff 1-14 en Michigan cuya producción a la fecha se eleva a varios millones de dólares. Varias compañías han estado vinculadas al desarrollo de la técnica, a saber: California, Shell, Esso, Amoco, Tidelands Geophysical Company, además del U.S.Coast and Geodetic Survery y el V.S. Geological Survey. Ultimamente se integró una compañía de servicio -EDCON- que reunió a varios de los profesionales que desarrollaron esta tecnología, que en principio fue propiciada por grandes compañías de explotación más interesadas en usar la tecnología que en venderla.

En Argentina algunas de las posibilidades de aplicación son entre otras:

4.1 Calizas de Puesto Rojas y otros yacimientos similares de la Cuenca Neuquina.

4.2 Formaciones no consolidadas del Chubutiano del Golfo San Jorge.

4.3 Pozos viejos (o nuevos) entubados en la Cuenca Neuquina.

Para detectar el gas de hidrocarburo se corre un neutrón y una densidad gravimétrica. Hay en esa y otras cuencas gran número de pozos viejos cuyo único perfil es un Inducción: con un neutrónico y un gravimétrico se pueden revisar las posibilidades, determinando porosidad e inclusive litología, contenido de fluídos etc., lo que permite detectar otras capas de interés y evaluar la perspectiva de tratar el pozo con fracturación, acidificación etc..

4.4 En zonas como Puesto Rojas sería útil como apoyo a la sísmica estratigráfica porque hay fuertes variaciones de densidad y por lo tanto de impedancia acústica.

4.5 En reservorios lenticulares como hay en varios yacimientos del país, el gamma-gamma puede dar una estimación optimista, pero el gravímetro puede medir una densidad mayor debido a la falta de extensión lateral del reservorio. Obviamente este resultado puede ser un valioso complemento de la sísmica estratigráfica. Se sobreentiende que se conoce el volúmen mínimo de reservorio que puede detectar el gravímetro.-

B I B L I O G R A F I A

BEYER L.A., 1976: The Interpretation of Borehole Gravity Survey; Survey; S.E.G. 46 th. Meeting, HOUSTON.

BRADLEY J.W., 1974: The commercial Application and Interpretation of the Borehole Gravimeter; Symp.of Houston Geophysical Society.

BRADLEY J.W., 1975: The Application of the Borehole Gravimeter;. 45th. Annual Meeting of S.E.G. DENVER, Colorado.

EDCON; 1980: Borehole Gravity Meter; Exploration Data Consultante, Incorporated; Chairman T.R. La FEHR; DENVER Colorado.

FARLAY O.G., 1971: Application of the Downhole Gravity Meter for Porosity Determination; Libyan Association of Petroleum Technologists Seventh Annual Meeting, 1-20.

GILBERT R.L.G., 1952: Gravity Observations in a Borehole; Nature, 170, 424-425.

GOODELL R.R. and FAY C.H., 1964: Borehole Gravity Meter and its Application; Geoph, 29, 774-782.

HEARST J.R. et al., 1976: Structure Elucidation with Borehole Gravimetry; Geoph., 41, 491-506.

HEARST J.R., 1977: Estimation of Dip and Lateral Extent of Beds With Borehole Gravimetry; Geoph., 42, 990-994.

HOWELL L.G. et al., 1965: The Development and Use of a high Precision Downhole Gravitey Meter; Geoph., 31, 754-772.

JAGELER A.H., 1975: Improved Hydrocarbon Reservoir Evaluation Through Use of Borehole Gravimeter Data, 50th. Annual Meeting of SPE of AIME, DALLAS, Texas, Paper 5511.

JAGELER A.H., 1980: New Well Logging Tools Improve Formation Evaluation; Worl Oil, March, 89-103.

JONES B.R., 1972: The use of Downhole Data in Formation Evaluation; S.P.W.L.A. 13th. Annual Logging Sympos., M 1-13.

La COSTE L., 1976: Recent Advances and Possible Future development in Gravity Meter Instrumentation; SEG, 46th Meeting, HOUSTON.

LA FEHR T.R., 1976: State of the Art of Gravity Exploration; S.E.G. 46th. Meeting, HOUSTON.

Mc Culloh T.H., 1966: The Promise of Precise Borehole Gravimetry in Petroleum Exploration and Exploitation; U.S.Geol.Survey Circ.531.

Mc CULLOH T.H., 1967: Borehole Gravimetry; World Petroleum Congress 7th., MEXICO CITY, Proc.;113, 735-744.

Mc CULLOH T.H. et.al., 1967: The US.Geological Survey-La Coste and Romberg Precise Borehole Gravimeter System; U.S.Geol.Survey Prof.Paper 575-D, 92-100 and D.101-D.112.

Mc CULLOH T.H., 1968: Application of Gravity Measurements in Wells to Problems of Reservoir Evaluation; S.W.P.L.A. Ninth Annual Logging Symposium, O 1-28.

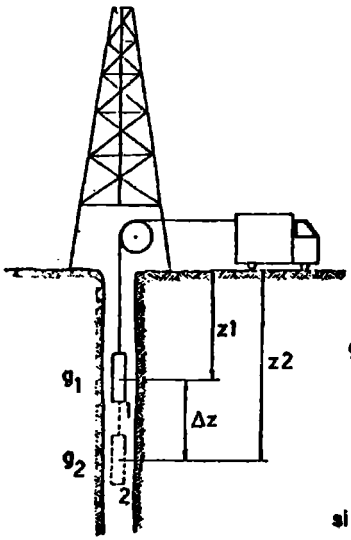
Oil and Gas Journal, 1966: Esso Licenses Down-Hole Gravity Meter; Oil and Gas Journal, 64, 101-102.

RASMUSSEN N.F., 1975: The Successful Use of the Borehole Gravity Meter in Northern Michigan; Log Analyst, 3-10.

SMITH N.J., 1950: The Case for Gravity Data from Boreholes; Geoph., 15, 605-635.

SNYDER D.D., 1976: The Borehole Gravity Anomaly; S.P.W.L.A. Seventeenth Annual Logging Symp., AA 1-20.

CALCULO DEL CONTRASTE DE DENSIDAD EN UN ESTRATO



$$g_1 - g_2 = \Delta g = (3{,}086 - 0{,}838\,\Delta\sigma)\,\Delta z$$

$$\frac{\Delta g}{\Delta z} = K \; ; \quad \boxed{\Delta\sigma = 3{,}683 - 1{,}193K}$$

Δz [m] Δg [ug] $\Delta\sigma$ [gr/cm³]

si $d\Delta\sigma = 0{,}1$; $d\Delta g = 0{,}5$; $\Delta z > 6$

FIGURA 1

DISTANCIA A LA CUAL LA ANOMALIA ES EL 90 % DE LA DE UNA PLACA INFINITA

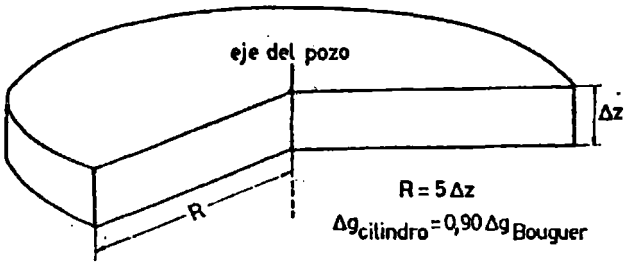


FIGURA 2

TIPO DE INSTRUMENTO	DIAMETRO EXTERIOR DE LA HERRAMIENTA	TIEMPO DE LECTURA	ESTACIONES POR HORA	MAXIMA TEMPERATURA (°C)	MAXIMA DESVIACION DEL POZO TOLERADA (GRADOS)
USGS LA COSTE & ROMBERG	5.9 (para 3000 psi) / 6.3 (para 12000 psi)	5a10	3-6	103	7,75
EDCON	4 1/8	5a10	6	121	14
ESSO	4.0	20	2-3	125	4

FIG.3 COMPARACION DE CARACTERISTICAS DE VARIAS HERRAMIENTAS

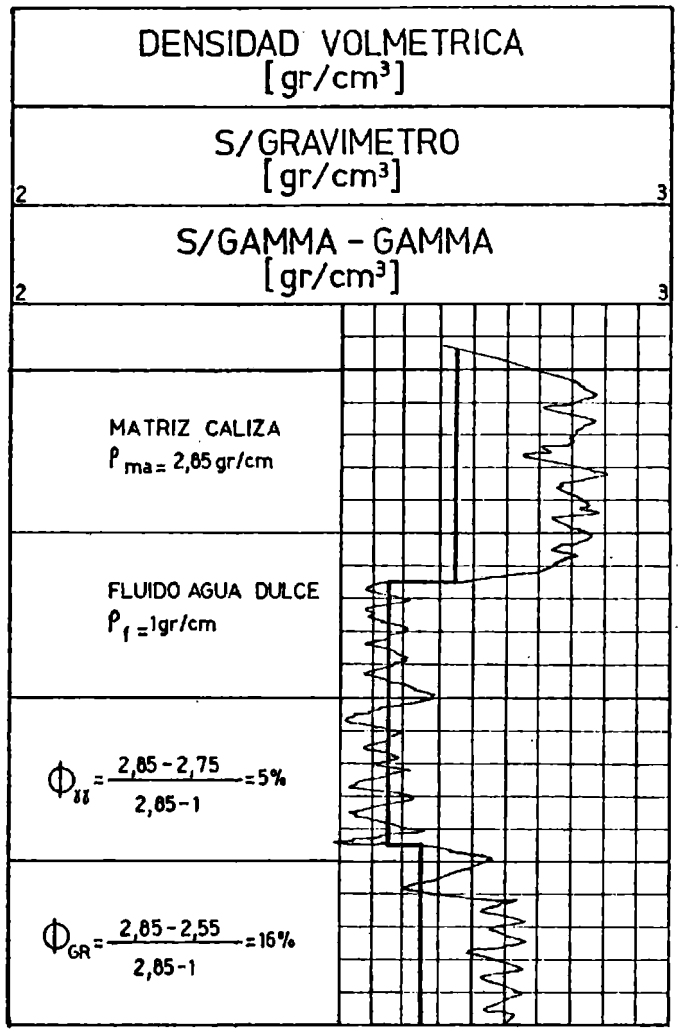


FIG. 4: EJEMPLO DE UN PERFILAJE REAL EN FORMACION CALCAREA

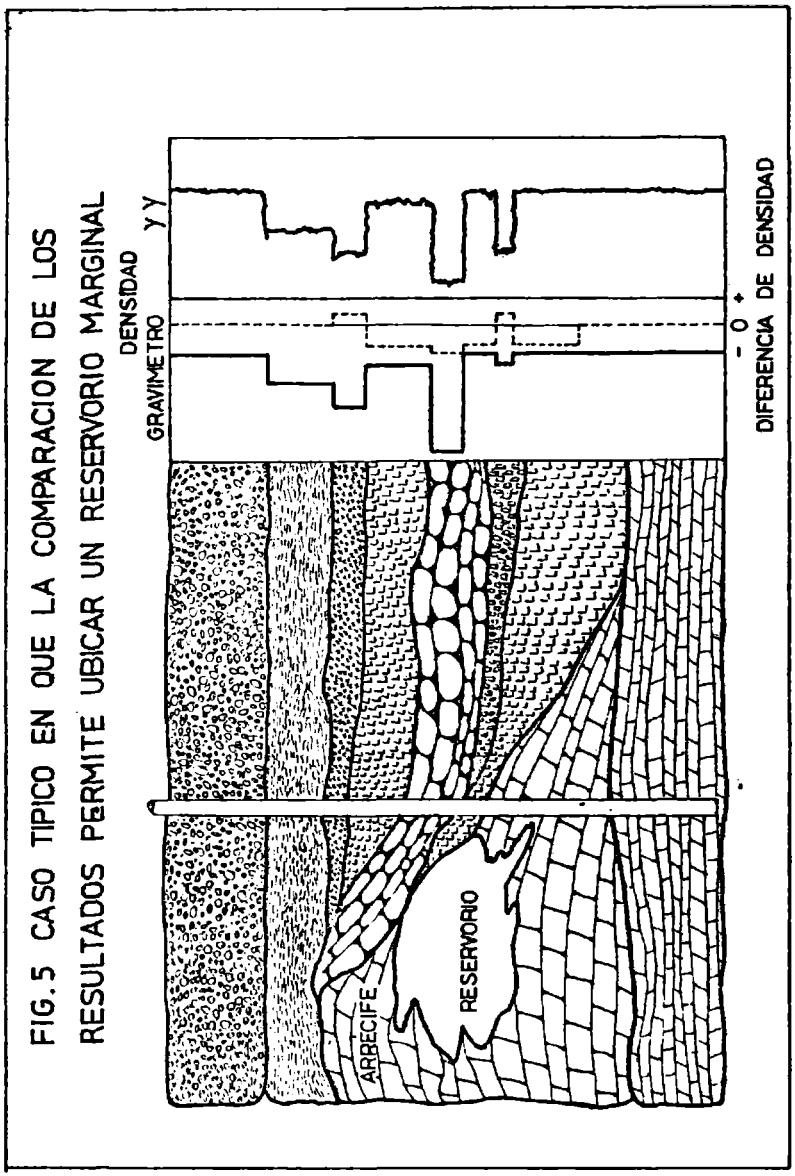


FIG.5 CASO TIPICO EN QUE LA COMPARACION DE LOS RESULTADOS PERMITE UBICAR UN RESERVORIO MARGINAL