

6
2 Gen



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

Facultad de Ingeniería

**LOS REGISTROS DE POZOS EN LA
GEOHIDROLOGIA**

TESIS PROFESIONAL
QUE PARA OBTENER EL TITULO DE
INGENIERO GEOFISICO
P R E S E N T A :
FERNANDO LARA GUERRERO

México, D. F.

1985



UNAM – Dirección General de Bibliotecas Tesis Digitales Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS © PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis está protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

I N D I C E

	PAG.
- INTRODUCCION	1
I. GENERALIDADES	5
I.1. Salinidad del Agua	5
I.2. Permeabilidad	6
I.3. Porosidad	6
I.4. Resistividad del agua de la Formación	8
I.5. Factor de Formación	11
II. LOS REGISTROS ELECTRICOS	13
II.1. Teoria del Registro de Resistividad	13
II.1.1. Dispositivos Utilizados	16
II.1.2. Radio de Investigación	19
II.1.3. Características de las Curvas de Resistividad	19
II.2. Microlog	24
II.2.1. Dispositivo	24
II.2.2. Radio de Investigación	26
II.2.3. Características de las Curvas	26

	PAG.
III.3. El Registro Neutron-Gamma	62
III.3.1. Instrumentos de Medición	62
III.3.2. Operación del Registro - Gamma-Neutrón	64
III.3.3. Factores que influyen en el Registro de Neutrones	64
III.4. Registro de Densidad	65
 IV. APLICACIONES	 67
IV.1. Registros Eléctricos	67
IV.1.1. Registro de Resistividad	67
IV.1.2. Registro S.P.	70
IV.1.3. Microlog	76
IV.1.4. Sonda Monoeléctrica	78
IV.2. Registros Radioactivos.	79
IV.2.1. Registros Rayos Gamma	79
IV.2.2. Registro Neutrón-Gamma	83
IV.2.3. Registro de Densidad	83
IV.3. Ejemplos	89
IV.3.1. Ejemplo # 1	89
IV.3.2. Ejemplo # 2	92
IV.3.3. Ejemplo # 3	94
IV.3.4. Ejemplo # 4	101
V. CONCLUSIONES	106
BIBLIOGRAFIA.	110

INTRODUCCION

Uno de los problemas a los que se enfrentan actualmente las ciudades es el abastecimiento de agua para diferentes usos: consumo doméstico, agrícola, industrial, etc. En México este hecho guarda características especiales dado que la mayor parte del territorio nacional está constituido por zonas áridas donde la única fuente de abastecimiento es el agua que proviene del subsuelo.

El agua subterránea tiene varias ventajas sobre las aguas superficiales, posee una distribución más uniforme en tiempo-espacio y es menos susceptible a la contaminación de sedimentos químicos y biológicos, sin embargo su localización requiere de estudios complejos ya que en algunas regiones se presentan dificultades técnicas en su exploración.

Para obtener resultados más eficientes y elevar la calidad de los trabajos Geohidrológicos se realizan estudios geofísicos terrestres y en pozos. Los estudios geofísicos comprenden la exploración del subsuelo con métodos eléctricos, sísmicos, magnetométricos y gravimétricos y se realizan en la superficie.

Los estudios geofísicos en pozos (Registros de pozos) tienen como objetivo reconocer el terreno a partir de la perforación

efectuada. Pueden concebirse como la introducción de un -
pequeño laboratorio físico en el pozo con el cual se anali-
za la roca.

En los trabajos Geohidrológicos se realizan perforaciones
con el fin de conocer las características de las rocas atra-
vezadas; los testigos obtenidos del subsuelo en forma mecá-
nica, son una muestra poco segura para su análisis ya que
el proceso de perforación perturba y altera intensamente el
terreno, en especial si este es frágil y blando, de tal for-
ma que obtener muestras inalteradas es trabajo difícil. Por
otra parte extraer la totalidad de la roca, no es posible,
parte se destroza y convierte en detritus.

La dificultad de establecer un corte geológico seguro a par-
tir de las perforaciones mecánicas y el elevado costo de la
extracción ha llevado a desarrollar las técnicas de Regis-
tros de Pozos.

Los Registros de Pozos se utilizaron inicialmente en la in-
vestigación minera, la utilidad de los datos proporcionados
motivó a que con el tiempo se emplearan en la Industria -
Petrolera y en la Geohidrología.

Los registros de mayor utilidad en el estudio de las aguas
subterráneas son:

Registros Eléctricos

- Registro de Resistividad
- Registro de Potencial Espontáneo
- Microlog
- Sonda Monoeléctrica

Registros Radioactivos

- Registro de Rayos Gamma
- Registro de Neutron-Gamma
- Registro de Densidad

Los Registros Eléctricos miden la resistividad de las formaciones y de los líquidos contenidos en los poros, lo que permite, entre otras cosas, diferenciar litológicamente las capas geológicas, establecer sus límites, espesores y determinar la calidad química del agua contenida en ellas. La condición para su aplicación es que los pozos no estén revestidos por tuberías y que contengan un lodo conductor.

Los Registros Radioactivos miden la radioactividad natural ó inducida de las rocas, lo que permite diferenciar geológicamente las formaciones y determinar su porosidad y densidad. Estos registros pueden correrse en pozos con tubería de revestimiento y no necesitan lodo conductor.

Las técnicas empleadas en los registros de pozos para agua son las mismas que en la industria petrolera sin embargo el equipo y la interpretación difieren en algunos casos.

Los equipos son pequeños, ligeros y menos caros, a causa de las bajas temperaturas y presiones encontradas en los pozos de agua. En cuanto a la interpretación esta cambia en los Registros Eléctricos ya que las ecuaciones que se utilizan para el área petrolera no se adaptan a la Geohidrología. Esto da origen a que se realice un análisis que permite utilizar los bajo otras condiciones del terreno.

La aplicación del conjunto de registros permite realizar -- una parte importante de los estudios Geohidrológicos, además de elevar su calidad y reducir los costos de trabajo y tiempo.

En pozos terminados permiten verificar su estado técnico -- para conservación y mantenimiento, este punto no será objeto de estudio en esta tesis.

CAPITULO I

I GENERALIDADES

Los resultados cuantitativos obtenidos por medio de los registros de pozos permiten evaluar las características físicas de las formaciones. Para ello definiremos algunos conceptos básicos necesarios para la comprensión e interpretación de éstos.

I.1. SALINIDAD DEL AGUA

El agua contenida en el interior de la tierra varia en su concentración de sal, cerca de la superficie es dulce y a medida que se profundiza tienden a volverse salada, en esta variación también influye la edad de la roca y grado de metamorfismo.

La medida de salinidad en los registros de pozos esta dada en partes por millón (P.P.M.) de NaCl y puede calcularse por medio de la siguiente relación:

$$\text{Salinidad en (PPM a } 75^{\circ}\text{F)} = 10^X \quad (1.1.1.)$$

$$\text{Donde } X = \frac{3.562 - \text{Log} (Rw75 - 0.0123)}{0.995} \quad (1.1.2.)$$

Rw75 = Resistividad del Agua a 75°F.

I.2 PERMEABILIDAD

La permeabilidad es la facilidad con la cual un fluido atraviesa una formación, es una característica intrínseca de las rocas y varía de acuerdo al tipo de material que se trate. La permeabilidad medida con un sólo fluido, en los poros, - se la conoce como permeabilidad absoluta y cuando se refiere a más de un fluido se le denomina permeabilidad efectiva.

I.3 POROSIDAD

La porosidad es una característica que nos permite conocer las propiedades filtrantes de una formación, para fines prácticos se puede decir que la porosidad es la parte vacía de la roca. Su valor está referido a un determinado porcentaje.

Se distinguen dos clases de porosidad:

Porosidad Absoluta.

La porosidad absoluta se define como la relación entre el volumen de poros V_p y el volumen de la muestra porosa V la relación está dada por:

$$\phi_a = \frac{V_p}{V} \cdot 100 \quad (1.3.1.)$$

ϕ_a = Porosidad absoluta

V_p = Volumen de poros

V = Volumen total de la roca

Porosidad Efectiva

Es el resultado de dividir el volumen total de poros comunicados entre el volumen total de la roca. La relación está dada por:

$$\phi = \frac{V_{pc}}{V} \cdot 100 \quad (1.3.2.)$$

Donde

ϕ = Porosidad efectiva

V_{pc} = Volumen de poros comunicados

V = Volumen total de la roca

En los cálculos cuantitativos de los registros de pozos puede obtenerse la porosidad efectiva o absoluta según el registro utilizado.

I.4. RESISTIVIDAD DEL AGUA DE FORMACION

La resistividad de un electrolito como el agua depende de dos factores:

a). Contenido de sales disueltas.

La resistividad del agua es función de la concentración y naturaleza de las sales disueltas, a temperatura constante la resistividad disminuye a medida que la concentración de sal aumenta.

En las mediciones cuantitativas de los registros eléctricos se utiliza la resistividad del agua de la formación, que equivale a una concentración con NaCl.

Dado que en las formaciones existen diferentes sales la resistividad equivalente puede obtenerse tomando una relación entre las concentraciones de los diversos aniones disueltos en Cl y los cationes en Na; se asigna el valor uno para Cl y Na. La equivalencia para los otros iones será:

SO ₄	= 0.5	CO ₃	= 1.26
HCO ₃	= 0.27	Cl	= 1.0
Ca	= 0.95	Mg	= 2.0
Na	= 1.0	K	= 1.0

Temperatura

Cuando la temperatura del agua se incrementa se genera una gran movilidad iónica y un aumento en la conductividad. Por lo tanto la resistividad decrece cuando la temperatura aumenta.

Ya que en algunas ocasiones los resultados de resistividad se dan en temperaturas estandar (18, 20, 25 °C) es necesario hacer correcciones para obtener el valor de la resistividad a una temperatura deseada. Para realizar lo anterior existen las siguientes relaciones:

$$Rw2 = Rw1 \frac{T1 + 7}{T2 + 7} \quad \text{Si T en Farenheit} \quad (1.4.1)$$

$$Rw2 = Rw1 \frac{T1 + 22}{T2 + 22} \quad \text{Si T en Centigrados} \quad (1.4.2)$$

La fig. (1.1) muestra la relación entre resistividad y temperatura para soluciones de NaCl.

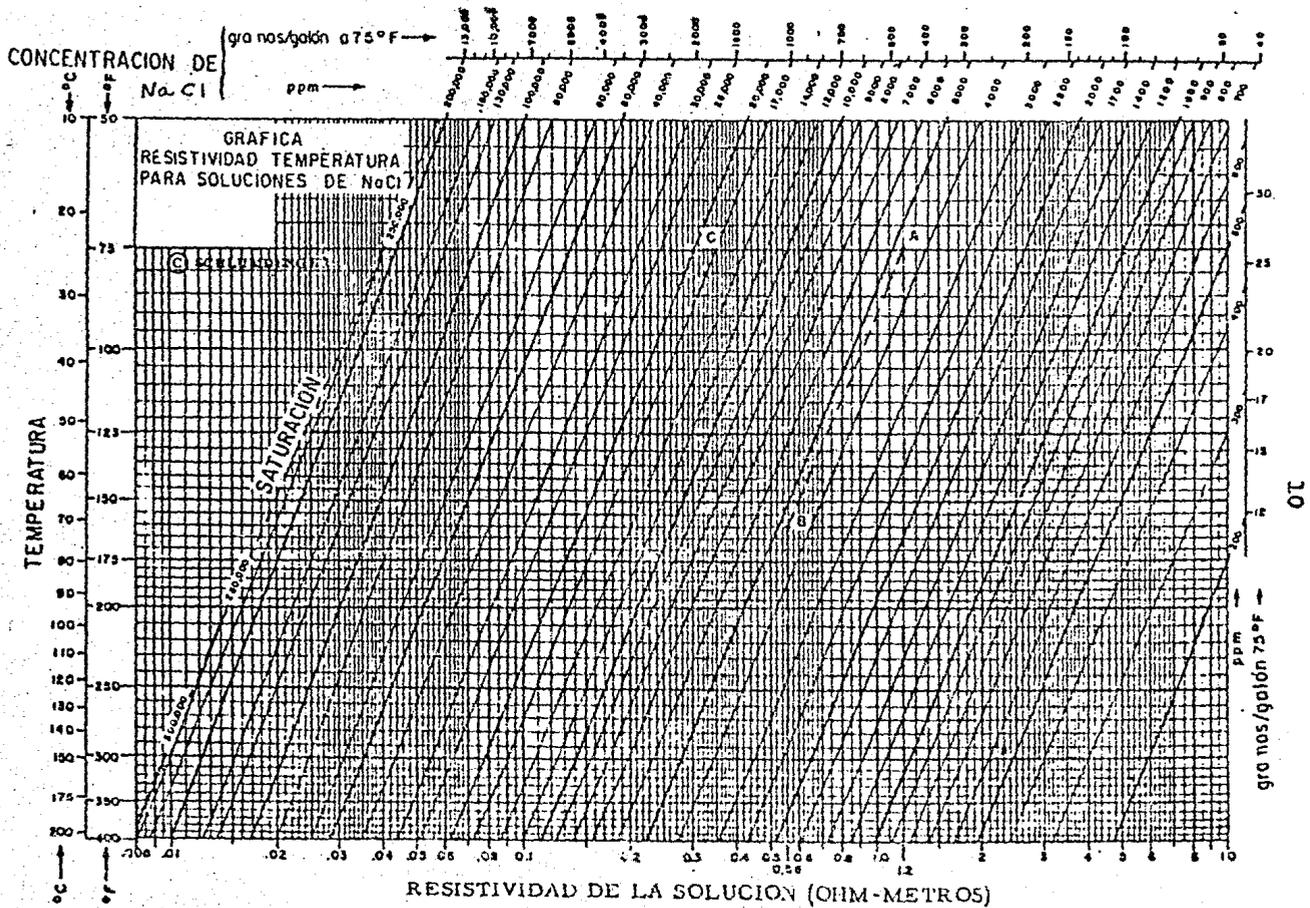


Fig. 1.1 Relación entre resistividad, temperatura y concentraciones para soluciones de NaCl. Ref.(15).

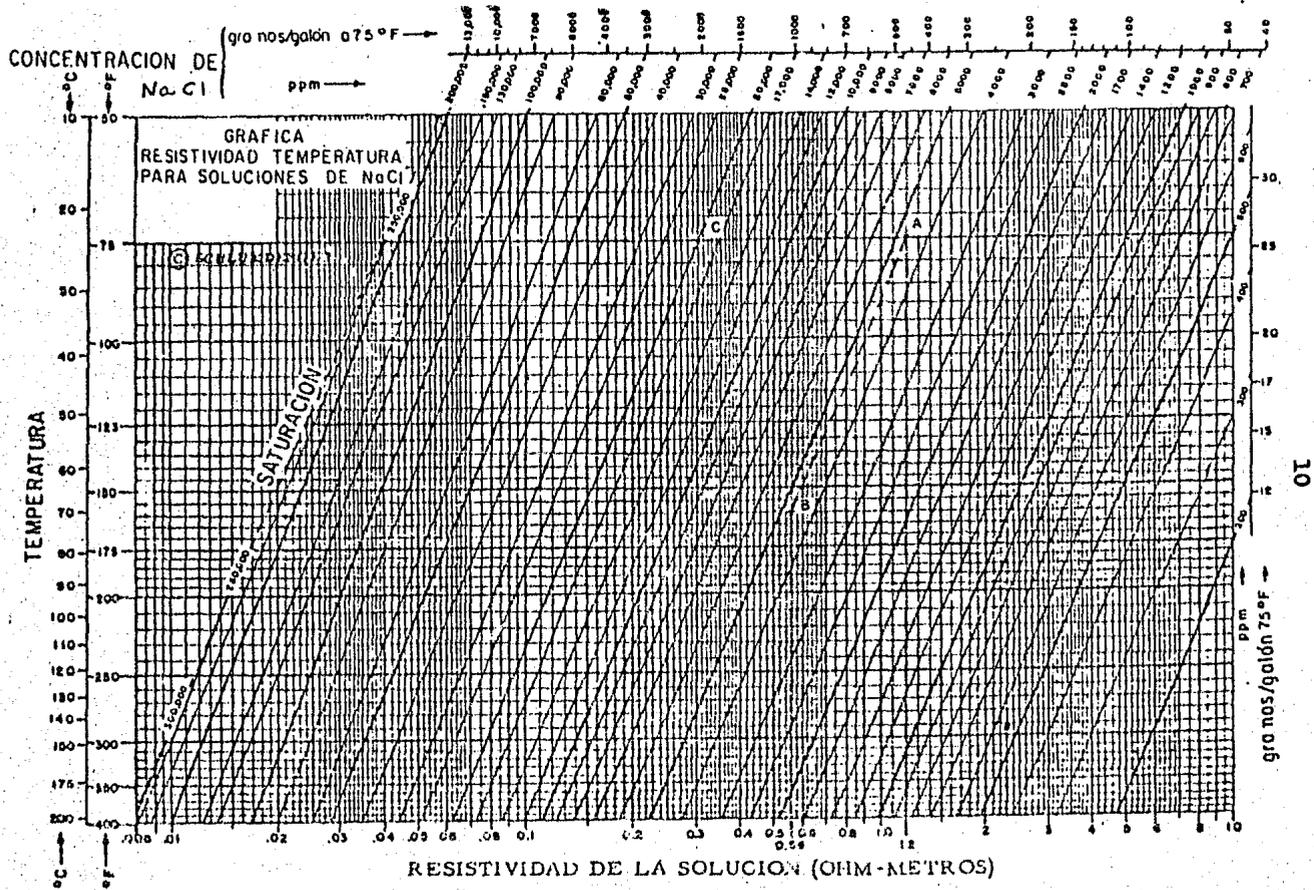


Fig. 1.1 Relación entre resistividad, temperatura y concentraciones para soluciones de Na Cl. ref.(15).

I.5 FACTOR DE FORMACION

La conductividad de una roca es generalmente pequeña, la corriente eléctrica que circula a través de ella depende principalmente de el movimiento de iones en el agua que satura los espacios porosos del material. Por tanto depende del grado de interacción entre los fluidos de la roca y la conductividad de esos fluidos. La resistividad de una roca es inversamente proporcional a su porosidad y a la concentración iónica de sus fluidos intersticiales.

Relaciones empíricas entre la resistividad de la roca, la resistencia del fluido intersticial, textura y porosidad han sido usadas para determinar el factor de formación.

El factor de formación se define como el cociente que resulta de dividir la resistividad de una roca 100% saturada con agua salada entre la resistividad del agua que la satura. La relación es esta definida como:

$$F = \frac{R_t}{R_w} \quad (1.5.1)$$

Donde

F = Factor de formación

R_t = Resistividad de la Formación

R_w = Resistividad del agua que la satura.

Una segunda relación, encontrada por Archie, es la que muestra el factor de formación como una función de la porosidad y en un menor grado de la permeabilidad de la muestra. Esta relación es:

$$F = 1/\phi^m \quad (1.5.2)$$

donde

F= Factor de formación

ϕ = Porosidad del material

m= Constante de cementación

El valor de m puede variar de 1.3 en arenas sin consolidar hasta mas de 2.2 en calizas de baja porosidad.

Estudios recientes, Pérez Rosales (1981), han permitido obtener una expresión general del factor de formación y la porosidad:

$$F = G \phi^m + (1-G) \quad (1.5.4)$$

donde G es un parámetro que depende de la geometría interna del medio poroso y m es un parámetro que permite determinar cual porción del volumen de poros participa activamente en el flujo de la corriente eléctrica. Con valores experimentales se ha determinado en diferentes medios porosos los siguientes valores:

	G	m
Esferas	1.49	1.09
Cubos	1.37	1.28
Arenas	1.03	1.73

CAPITULO II

II. LOS REGISTROS ELECTRICOS

Las exploraciones superficiales con métodos eléctricos fueron practicadas desde principios de este siglo para localizar, principalmente, minerales. A fines de los años 20's - esas exploraciones fueron adaptadas a pozos y fué en los años 1927 y 1931, respectivamente, cuando el registro S.P. y de Resistividad fueron reconocidos comercialmente.

Su objetivo es cuantificar el potencial natural y resistividad de una formación geológica en función de la profundidad, y con ello suministrar información acerca de las características de los fluidos contenidos en las capas geológicas atravesadas por un pozo, o en caso contrario determinar la ausencia de éstos.

A este método de exploración se le conoce como Registros - Eléctricos de Pozos su uso es común en la Industria Petrolera y ha sido incluido en la Geohidrología dando resultados satisfactorios.

II.I. TEORIA DEL REGISTRO CONVENCIONAL DE RESISTIVIDAD.

El principio de este registro es crear un campo eléctrico dentro de un pozo, haciendo pasar una corriente I , conoci-

da, entre dos electrodos "A" y "B", para ello se introduce un electrodo "A" en el agujero quedando "B" en la superficie. La distancia que existe entre "A" y "B" es relativamente grande.

La diferencia de potencial (ΔV), producto del campo eléctrico, se registra por medio de dos electrodos "M" y "N", descendiendo "M" y quedando "N" en la superficie. Ver - (Fig. 2.1.)

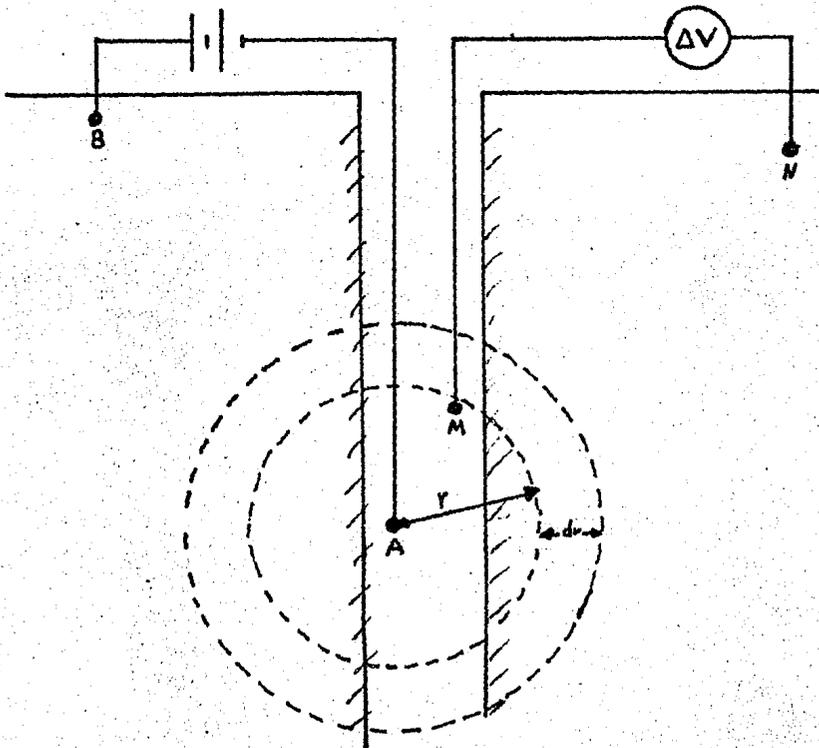


FIG. 2.1.

Si consideramos un medio de gran volumen homogéneo e isotrópico y el agujero del pozo se considera pequeño, la corriente se transmite desde el electrodo "A" a todo el exterior en forma radial. Así las superficies equipotenciales son esféricas y concéntricas con respecto a la fuente de corriente.

La diferencia de potencial V entre dos esferas de radio r_1 y r_2 estará determinada por la ley de Ohm.

$$V = \frac{R}{4\pi} \frac{dr}{r} I \quad (2.1.1)$$

Donde:

dr = Espesor radial del elemento

R = Resistividad del medio

I = Intensidad de la corriente eléctrica

r = Radio del elemento al centro de la fuente.

Tomando dos esferas equipotenciales cuyos radios son r_1 y r_2 la diferencia de potencial será:

$$\Delta V = \frac{RI}{4\pi} \int_{r_1}^{r_2} \frac{dr}{r^2} = \frac{IR}{4\pi} \left[\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right] \quad (2.1.2)$$

En este caso, si se mide entre "M" y "N" entonces (2.I.2) - se convierte en

$$\Delta V = V_m - V_n = \frac{IR}{4\pi} \left[\frac{1}{AM} - \frac{1}{AN} \right] \quad (2.I.3)$$

El voltaje entre un punto a una distancia AM del centro y otro lejano a una distancia AN (considerada infinito) es:

$$\Delta V = \frac{IR}{4\pi} \left[\frac{1}{AM} - \frac{1}{\infty} \right] = \frac{IR}{4\pi} \left[\frac{1}{AM} \right] \quad (2.I.4)$$

Si I es constante y la distancia AM también lo es, entonces la ecuación (2.I.4) será función de la resistividad del medio en donde se encuentre la sonda.

II.1.1. DISPOSITIVOS UTILIZADOS

a).- Sonda Normal

Los dispositivos de dos electrodos que se conocen como normal-corta y normal-larga fueron introducidos en los comienzos de los años 30's. El electrodo "B" se implanta en la superficie lo mismo que "N"; mientras que en el interior del pozo se introducen "A" y "M". En la práctica se introduce el electrodo "B" al pozo para facilitar la medida de resistividad y potencial. Ver (fig.2.2).

Según el valor del espaciamento entre "A" y "M" podemos distinguir dos tipos de sonda o dispositivo:

-Normal corta si AM= 0.40 m

-Normal larga si $AM=1.60$ m

b).- Sonda Lateral o Inversa

Se implanta el electrodo "B" en la superficie y se desciende "A" en el pozo con los electrodos "M" y "N" , r es igual a OA localizando "O" a la mitad de "M" y "N" (practicamente $r= 5.6$ m).La distancia MN es pequeña en relación al espaciamiento OA por lo que la diferencia de potencial entre "M" y "N" se aproxima a la intensidad del campo eléctrico o gradiente de potencial en "O".Ver (fig.2.2.b)

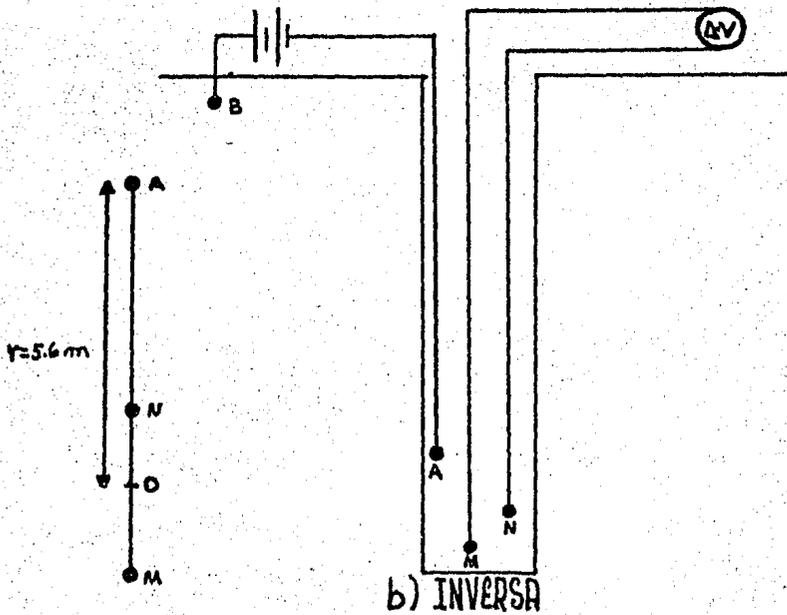
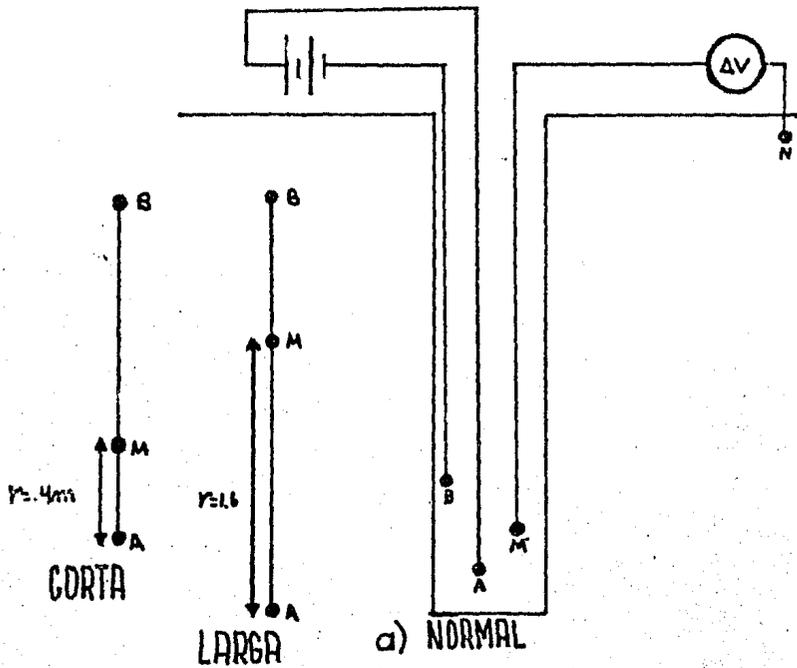


Fig. 2.3.

II.1.2. RADIO DE INVESTIGACION

En el caso del dispositivo normal se define por radio de investigación de la sonda a la distancia radial medida del -- electrodo "A" de corriente, a la cual ocurre el 50% de la -- caída de potencial total desde el electrodo "M" hasta el -- electrodo "N" .

Para el dispositivo lateral será aproximadamente el espesor de la distancia MN.

De acuerdo al arreglo utilizado tenemos:

DISPOSITIVO	RADIO DE INVESTIGACION
Normal Corta	0.80 m
Normal Larga	3.20 m
Lateral 6 Inversa	5.60 m

II.1.3. CARACTERISTICAS DE LAS CURVAS DE RESISTIVIDAD

a).- Sonda Normal

Cuando el espesor de una capa es mayor que el espaciamiento del arreglo AM, no existe invasión por filtrado de lodo y la capa es mas resistiva que las vecinas, la curva de resistividad será simetrica al plano medio de la capa. Esto se debe a

que la resistividad aparente de un medio resistivo es más grande que el de la formación adyacente y la resistividad aparente de una capa conductiva será menor que la de la formación. En cuanto a los límites de capa éstos no se pueden determinar con precisión debido a la influencia de las capas sobre los instrumentos de medida que hacen que éstos se desplacen. Ver (Fig. 2.3).

Cuando exista una capa resistiva con un espesor delgado inferior al espaciamiento AM observamos que la curva de resistividad presenta una disminución en el valor de la resistividad aparente formándose dos protuberancias simétricas a uno y otro lado del valor mínimo de la curva, separadas una distancia igual a AM más el espesor de la capa. En este caso las capas dan la impresión en la curva de ser conductoras. Ver (Fig. 2.4).

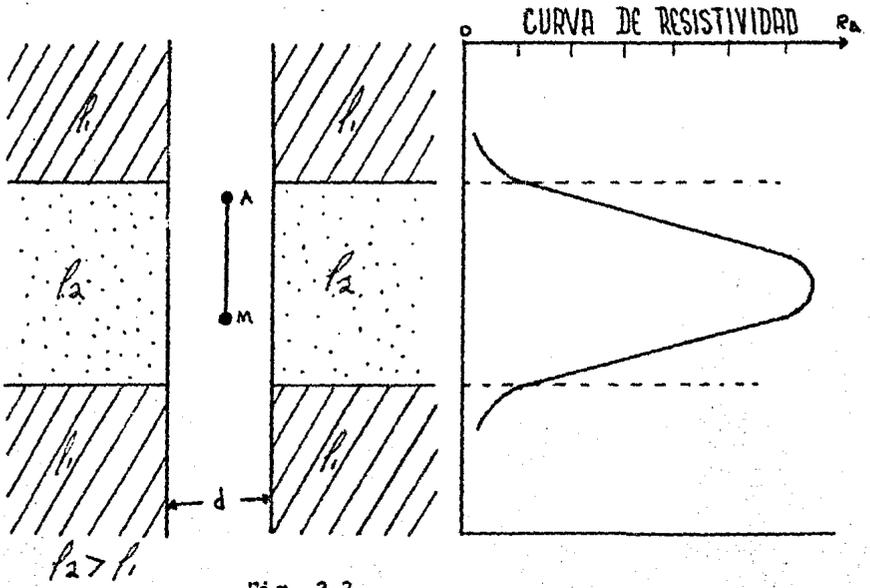


Fig. 2.3.

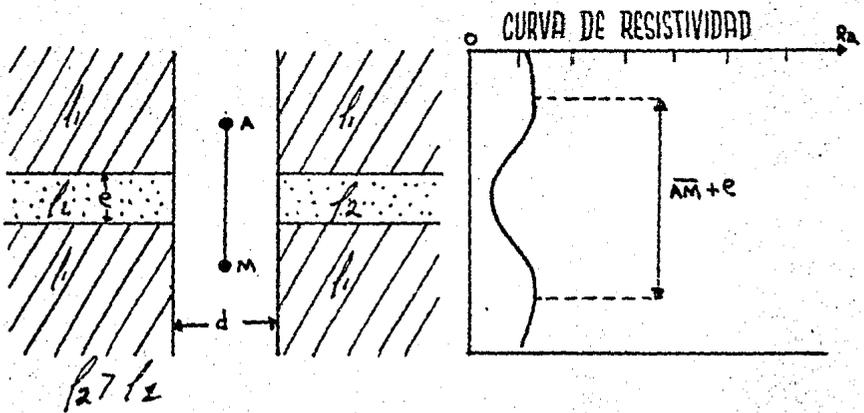


Fig. 2.4.

b).- Sonda Lateral

La curva de resistividad muestra una baja resistividad debajo de las capas conductoras, la longitud de este intervalo es aproximadamente igual al espaciamento A_0 .

En caso de tener capas resistivas con espesor mayor que el espaciamento entre electrodos la curva mostrará una baja resistividad en la parte superior de la capa, su longitud es aproximadamente igual al espaciamento A_0 . Ver (Fig.2.5)

Si por el contrario, tenemos capas resistivas que son más pequeñas que el espaciamento, la curva mostrará una baja resistividad debajo de la capa resistiva. Este intervalo se conoce como "Zona ciega" y su longitud es más corta que el espaciamento A_0 . Ver (Fig. 2.6).

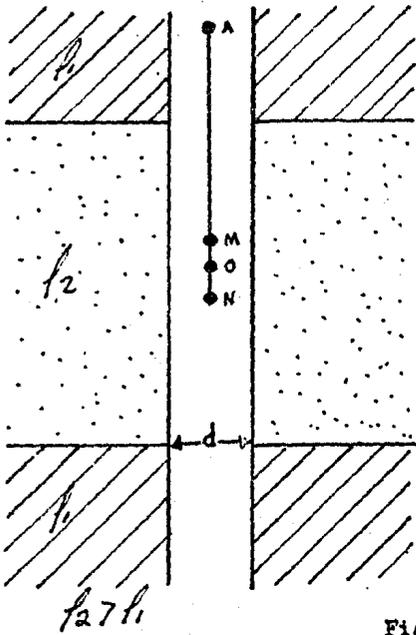


Fig. 2.5.

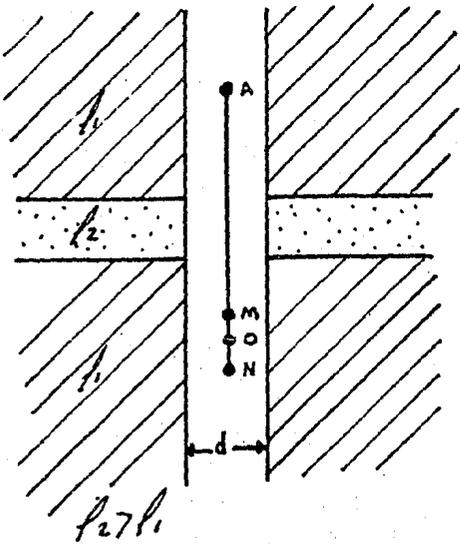
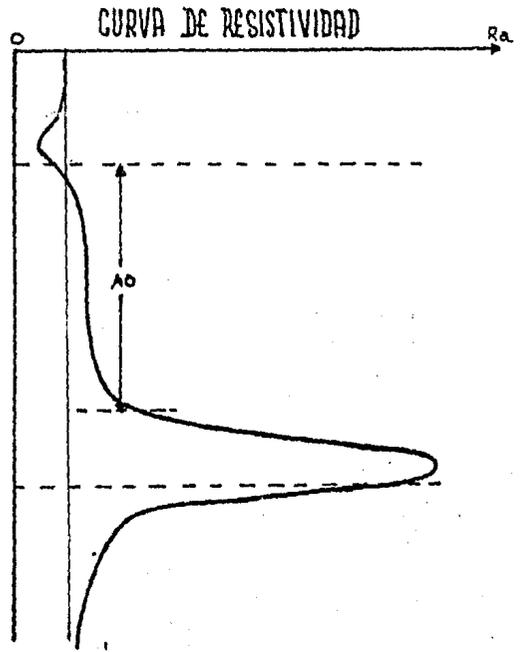
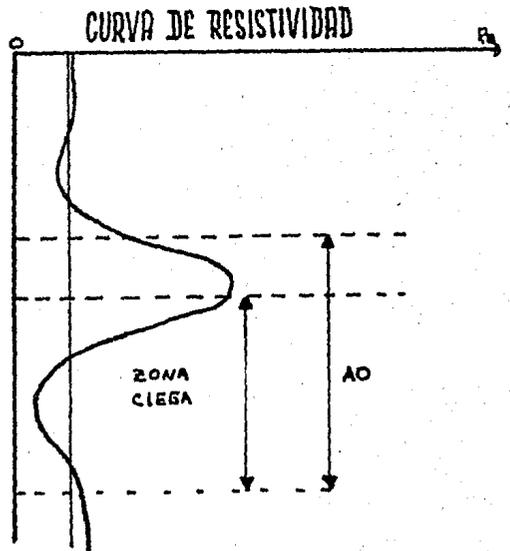


Fig. 2.6.



II.2. MICROLOG

Debido a la disposición que guardan los electrodos en el dispositivo, este mide la resistividad de pequeños volúmenes de la formación adjunta al pozo. Por lo anterior el microlog permite evaluar la resistividad R_{xo} de la zona invadida por el filtrado de lodo, así como la determinación de las zonas permeables y porosas con sus correspondientes espesores.

II.2.1. DISPOSITIVO

Consiste en una sonda compuesta por tres electrodos (A, M1, M2) cuyo espaciamento entre ellos es de 2.5 cm. y que están adheridos a un patín de caucho que se desliza manteniéndose en contacto con la pared del pozo. Ver (Fig. 2.7).

La intensidad de la corriente I se mantiene constante en el electrodo A, mientras que M1 y M2 registran las diferencias de potencial.

Quando se utiliza un arreglo de electrodos (A, M1, M2) y la diferencia de potencial se mide entre M1 y M2, la curva de resistividad obtenida, es como en los registros de resistividad convencionales.

Si se usa un sistema de electrodos AM2 y la diferencia de -

potencial se mide entre M2 y un electrodo de referencia B la curva obtenida recibe el nombre de Micro-normal. Ver (Fig. 2.7.B) Cuando se usa la combinación de electrodos AMLM2, se mide la resistividad del volumen de materia que miden los electrodos M1 y M2; a este arreglo se le llama Micro-inversa o Micro-lateral. Ver (Fig. 2.7.a).

A la curva Micro-inversa se le designa como R1x1 y está representada en el registro como una línea continua, para la curva Micro-normal, R2, se representa como una línea espaciada. Las mediciones se registran en ohms-metro.

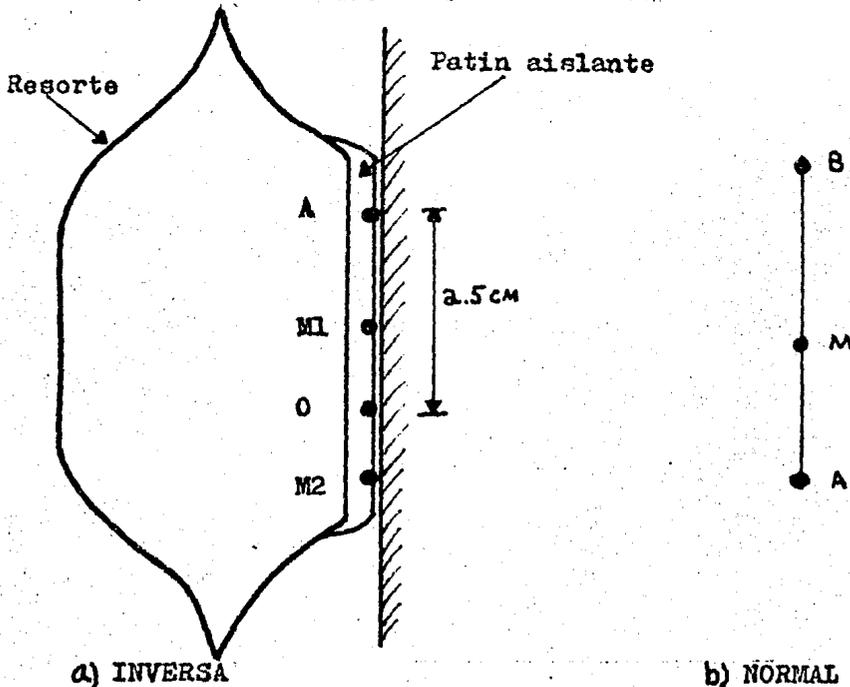


Fig.2.7. Representacion del dispositivo Microlog.

II.2.2 RADIO DE INVESTIGACION

El dispositivo Micro-inverso (R_{1x1}) o lateral tiene un radio de investigación igual al espaciamiento AO , éste es de aproximadamente 2,5 a 5cm medidos desde A.

El dispositivo micro-normal (R_2) tiene un radio de investigación aproximadamente de 5 cm. a partir de A.

II.2.3. CARACTERISTICAS DE LAS CURVAS DE RESISTIVIDAD MICROLOG.

Aparece en el registro una diferencia conocida como separación entre los valores de las dos curvas y es ésta la que permite dar una interpretación cualitativa.

Cuando la resistividad de la micro-normal sea mayor que la micro-inversa la separación será "positiva". Por el contrario cuando la micro-inversa sea mayor que la micro-normal la separación será "negativa".

Hay algunos casos en que no existirá diferencia entre las dos curvas por lo que se tendrá entonces una separación "nula". Ver (Fig.2.8).

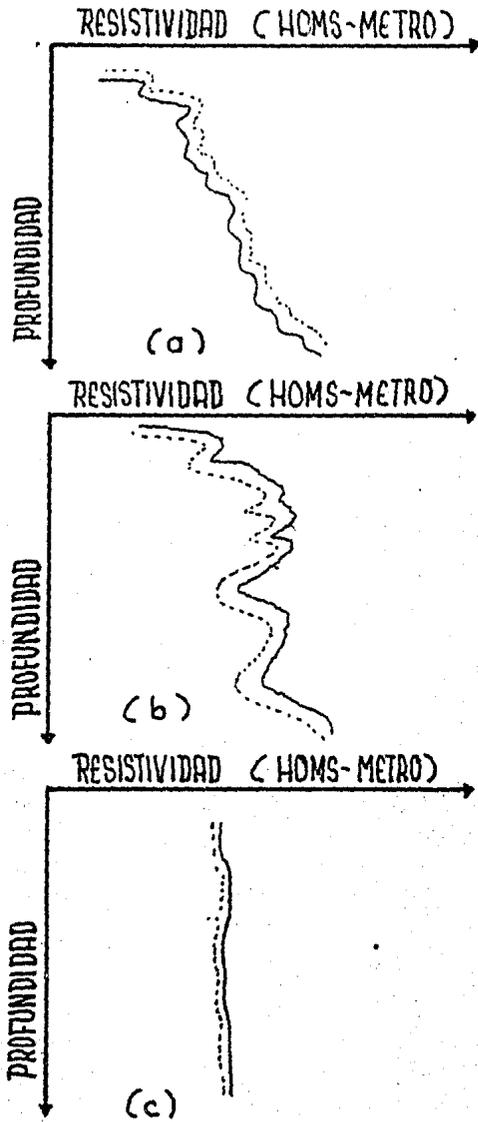


Fig.2.8. a)SEPARACION POSITIVA b) SEPARACION NEGATIVA
c)SEPARACION NULA

II.3. INFLUENCIA DEL LODO SOBRE LOS TERRENOS

En el análisis hecho anteriormente para los registros convencionales de resistividad se tomó en cuenta que no existía invasión de lodo de perforación, sin embargo debido a la presión y a la presencia de formaciones porosas y permeables éste invade las rocas situadas alrededor del pozo.

Una gran parte de materiales en suspensión que forman el lodo se depositan sobre la pared del pozo formando una película o "enjarre". En un medio homogéneo el filtrado de lodo irá creciendo desde la pared hacia el interior pudiendo distinguirse las siguientes zonas:

- Zona invadida
- Zona contaminada
- Zona virgen

Los diferentes dispositivos permiten determinar la resistividad de los terrenos de acuerdo a lo siguiente:

- El microlog nos muestra la resistividad del enjarre o de capas muy próximas a la pared del agujero.
- La normal-corta muestra la resistividad de la zona invadida.

- + La normal-larga muestra la resistividad de la zona contaminada.
- + La lateral muestra la resistividad de la zona virgen.

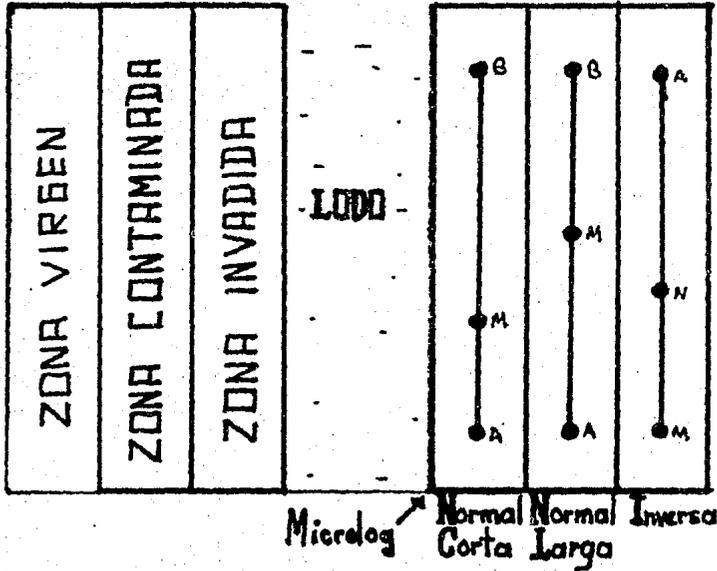


Fig. 2.9. La gráfica muestra las diferentes zonas invadidas por el filtrado de lodo a partir de la pared de un pozo y los dispositivos usados para medir su resistividad.

II.4. DETERMINACION DE LA RESISTIVIDAD VERDADERA.

La resistividad medida en los pozos por medio del Registro Eléctrico, ya sea con la normal (tomando los valores en el centro de la capa) o de la lateral (tomando valores cerca de los límites de capa), se conoce como resistividad aparente.

Esta resistividad es función de varios parámetros.

- 1.-Espesor de la capa (h)
- 2.-Resistividad del lodo (R_m)
- 3.-Diámetro del agujero (d)
- 4.-Resistividad verdadera de la capa (R_t)
- 5.-Resistividad de la zona invadida (R_i)
- 6.-Diámetro de la zona invadida (D_i)

Los tres primeros se pueden inferir del registro eléctrico o de otros elementos, mientras que los otros son generalmente funciones desconocidas.

Por lo anterior la resistividad verdadera de una formación se determina corrigiendo los datos de la resistividad aparente.

II.5. EL REGISTRO S.P.

El registro de Potencial Natural (S.P.) entró en uso en el año de 1928, cuando los hermanos Schlumberger eliminaron el ruido que originaba la introducción de los electrodos en la columna del lodo. Ellos atribuyeron este ruido a las movilidades de las partículas que estaban en el electrolito.

Este registro ha sido de gran utilidad para localizar zonas permeables y porosas, presentando una deflexión en la curva. Las deflexiones originadas en la presentación también se han asociado a contactos entre areniscas y lutita, con lo cual ha ayudado a realizar correlaciones litológicas entre pozos.

En los años siguientes su uso se incrementó debido a un estudio teórico que tomó en cuenta la magnitud y dirección de -- las variaciones de la curva S.P. , producidas por las diferencias de concentración de diferentes sales, entre el fluido de perforación y el fluido contenido en una formación geológica atravesada por el pozo.

El dispositivo de medida para obtener el registro S.P. es el más sencillo de los registros geofísicos de pozos, ha sido adaptado en los trabajos de Geohidrología porque su origen -- esta relacionado con el movimiento y calidad química del agua de las formaciones.

II.5.1. ORIGEN DEL POTENCIAL ESPONTANEO

El contacto entre formaciones geológicas con diferentes minerales, y concentraciones de sales entre el agua de la formación y el lodo de perforación es el que lo genera.

El caso del Potencial Espontáneo medido en pozos, su origen se debe fundamentalmente a la acción conjunta de un Potencial Electroquímico y un Potencial Electrocinético.

II.5.2. POTENCIAL ELECTROQUIMICO

Este potencial puede generarse de dos formas:

a).-Potencial de Difusión

Es producto de la diferencia en la movilidad de varias iones en solución.

Cuando dos soluciones con diferente concentración de la misma sal entran en contacto, las partículas de la solución de mayor concentración se difunden hacia la solución de menor concentración. Esto es considerando el fluido en reposo.

Cada ión o partícula es portador de una carga eléctrica sea ésta positiva o negativa, la cual es igual en magnitud a la carga de un electrón. Si se tiene un número igual de cargas positivas y negativas que atraviesan un límite en una unidad de tiempo, no habrá transporte de

cargas eléctricas en el límite que las separa. Sin embargo -
 dado que los iones positivos y negativos no se desplazan -
 con igual velocidad, habrá un flujo de cargas a través de la
 frontera que las une. La diferencia en el movimiento da por
 resultado una fuerza electromotriz (FEM).

Cuando entran en contacto dos soluciones de Cloruro de So-
 dio (NaCl) la transferencia neta de cargas en dirección de
 la solución de más baja concentración es negativa lo cual e-
 corresponde a una corriente y una FEM dirigida hacia la so-
 lución de menor concentración.

Si se coloca un galvanómetro que este en contacto con las -
 dos soluciones, aparecerá una diferencia de potencial entre
 éstas. Este potencial de difusión. Ver (fig. 2.10.a).

b).- Ecuación General de difusión

La ecuación general de difusión para el potencial entre
 dos soluciones, desarrollado por Glasston (1951) es:

$$E = \frac{-RT}{F} \sum_i \frac{1}{Z_i} \int_I^II T_i d(\ln A_i) \quad (2.5.1)$$

donde:

E= Potencial de difusión en milivolts

Zi= Valencia

Ti= Numero de transporte

Ai= Actividad de los i^{és} especies de iones

R= Constante Universal de los Gases (8.31 joules/c)

T= Temperatura Absoluta

F= Constante de Faraday (9.65×10^4 c/mol)

I y II= Los límites se refieren a la medida de la actividad de las especies entre las cuales se mide el potencial

El numero de transporte se define como la relación entre la cantidad de carga transportada por un ión, y el total de -- cargas transportadas, através del plano en ambas direcciones, en una unidad de tiempo.

Si la sumatoria sólo incluye los elementos Na y Cl y el número de transporte es constante, éste puede salir de la integral quedando:

$$E = -\frac{RT}{F} \left[0.4 \ln \frac{A_{Na-II}}{A_{Na-I}} - 0.6 \frac{A_{Cl-II}}{A_{Cl-I}} \right] \quad (2.5.2)$$

Las actividades del ión de cloro y sodio (ANa y ACl) pueden reemplazarse por una actividad promedio de Cloruro de Sodio Am. Así cuando T=25 °C, E en milivolts y usando logaritmo -- base 10 se tiene:

$$E = 11.5 \log \frac{A_m - II}{A_m - I} \quad (2.5.3.)$$

Esta ecuación nos permite calcular el valor del potencial de difusión para dos soluciones de NaCl.

II.5.3. POTENCIAL DE MEMBRANA

Cuando dos soluciones de NaCl están en contacto por medio de una membrana porosa que solo deja pasar iones positivos, las condiciones para la validez de la ecuación (2.5.1) son diferentes.

Debido a la presencia de la membrana catiónica, únicamente pasarán iones de Na(+) de la solución más concentrada a la menos concentrada. Esto origina que el lado derecho de la membrana se cargue positivamente, mientras que el lado izquierdo se cargue negativamente por quedar exceso de iones de Cl.

Si se unen las dos soluciones por medio de un conductor - aparecerá una diferencia de potencial entre ambas terminales. Ver (Fig. 2.10).

El potencial de membrana puede calcularse por medio de:

$$E = \frac{RT}{F} \ln \frac{A_{Na-II}}{A_{Na-I}} \quad (2.5.4.)$$

Sustituyendo R,T,F y usando logaritmo base 10, la ecuación -- que representa a el potencial de membrana es:

$$E = - 59 \text{ Log } \frac{A_m - II}{A_m - I} \quad (2.5.5)$$

II.5.4. POTENCIAL ELECTROKINETICO

Este se genera cuando se hace pasar un electrolito a través de una membrana permeable.

La expresión matemática que representa este fenómeno está dada por R.Desbrandes:

$$E_f = 0.37 P \sqrt{R_{mc} T_{mc} Q_f} \quad (2.5.6)$$

Donde

E_f = Potencial de Electrofiltración en milivolts.

R_{mc} = Resistividad de la película de lodo en ohms-m

T_{mc} = Espesor de la película del lodo en cm

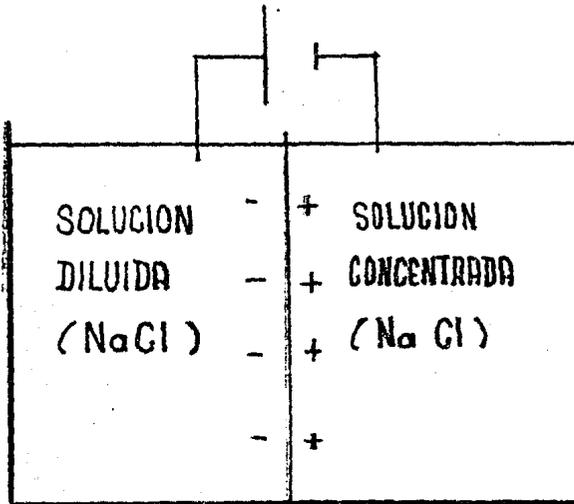
Q_f = Filtrado en $\text{cm}^3/30 \text{ min.}$ por cada 700 K pa

P = Presión diferencial en centenas de K pa

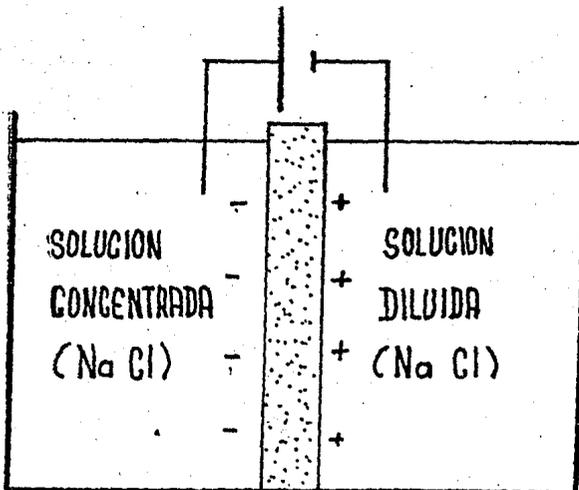
K pa = Kilo Pascal

Este potencial se genera en las paredes de los pozos cuando el fluido del lodo penetra en las capas atravesadas por el

agujero, debido a una diferencia de presión entre el lodo de perforación (mayor) y el fluido de la formación (menor). Generalmente su valor es despreciable.



a) Potencial de Difusión



b) Potencial de Membrana

II.5.5. POTENCIAL MEDIDO EN POZOS

Cuando dos capas geológicas de naturaleza diferente son atravesadas por un pozo que contiene un lodo conductor, los tres medios (capa I, capa II y lodo) entran en contacto. Si se parte que tanto el agua de la formación como el lodo son soluciones de NaCl, en cada límite o contacto a, b, c, ver (fig. 2.11) aparecerá una FEM de origen electroquímico.

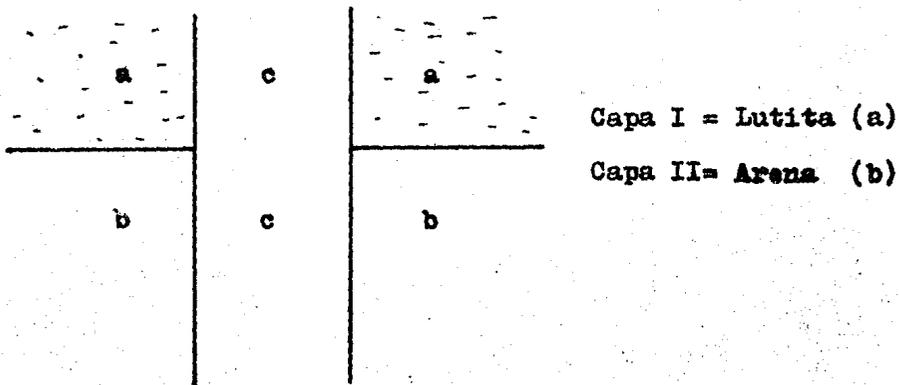


Fig. 2.11

Así en el contacto b-c se genera un potencial de difusión y por otro lado, la capa de lutita sirve como unión generando un potencial de membrana en b-c. Se puede representar entonces a dichos potenciales como en la fig. (2.12).

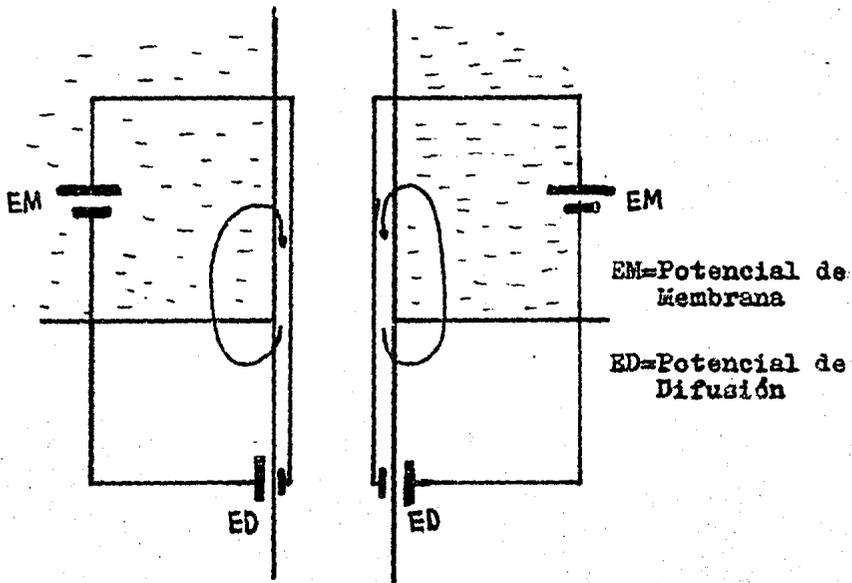


Fig. 2.12

Observando la fig. 2.12 se nota que los dos potenciales (E_m , E_D) se encuentran dentro de un circuito en serie. El potencial total estará determinado de acuerdo a la segunda ley de Kirchoff.

Tomando en cuenta lo anterior tenemos:

$$E_{\text{total}} = E_M + E_D$$

entonces

$$E_{\text{total}} = -59.1 \log_{10} \left(\frac{A_{m-II}}{A_{m-I}} \right) - 11.5 \log_{10} \left(\frac{A_{m-II}}{A_{m-I}} \right)$$

$$E_{\text{total}} = -70.6 \log_{10} \left(\frac{A_{m-II}}{A_{m-I}} \right) \quad (2.5.7)$$

Sustituyendo en (2.5.7.) la relación de actividad $\frac{A_m-II}{A_m-I}$ por la relación de resistividad $\frac{R_{mf}}{R_w}$

donde:

R_{mf} = Resistividad del filtrado del lodo

R_w = Resistividad del agua de la formación

entonces

$$S.P. = E = -76 \log_{10} \frac{R_{mf}}{R_w} \quad (2.5.8)$$

Esta es la expresión que permite evaluar el potencial espontáneo dentro de un pozo. Si analizamos las caídas de potencial que suceden en el circuito de la fig. 2.12 podemos escribir la ecuación (2.5.8) como:

$$S.P. = I_{sp} R_{ss} + I_{sp} R_{sh} + I_{sp} R_m \quad (2.5.9)$$

donde

I_{sp} = Intensidad de la corriente

R_{ss} = Resistencia de la arena

R_{sh} = Resistencia de la lutita

R_m = Resistencia del lodo

R_m se considera como la que ofrece mayor resistencia ya que el área de la sección será menor que en el caso de la arena y la lutita. Por tanto el registro S.P. mide la relación $I_{sp} R_m$ ya que los términos $I_{sp} R_{ss} + I_{sp} R_{sh}$ son despreciables, así la ecuación (2.5.9) tendrá la forma de

$$S.P. = I_{sp} R_m \quad (2.5.10)$$

II.5.6. POTENCIAL ESTÁTICO (SSP)

Como se vió anteriormente el potencial espontáneo es la suma de las diferentes caídas de potencial que se presentan en un pozo. Si ahora se abriera el circuito, impidiendo el paso del lodo en una parte, de tal forma que no pudiese continuar el paso de la corriente, el S.P. alcanzaría su máximo valor ya que no habría caída de potencial a través del circuito establecido. El potencial generado bajo estas condiciones se conoce como Potencial Estático ó SSP.

El SSP es un concepto puramente teórico, pero permite visualizar gráficamente cuál sería el valor máximo del S.P. , así como su relación con cada elemento del circuito (lodo-lutita-arena) en este caso.

De acuerdo a (2.5.9) se tiene

$$I_{sp} R_m + I_{sp} R_{sh} + I_{sp} R_{ss} = SSP \quad (2.5.11)$$

entonces

$$I_{sp} = \frac{SSP}{R_m + R_{sh} + R_{ss}} \quad (2.5.12)$$

multiplicando por R_m en ambos lados y de acuerdo a (2.5.10)

$$S.P. = \frac{(SSP) R_m}{R_m + R_{sh} + R_{ss}} \quad (2.5.13)$$

El máximo valor de S.P. será cuando los términos R_{sh} y R_{ss} sean cero y el valor del S.P. decrecerá cuando R_{sh} y R_{ss} se incrementen.

II.5.7. OPERACION DEL REGISTRO S.P.

La obtención del registro S.P. dentro un pozo se lleva a cabo a través de una técnica sencilla.

Se mide la diferencia de potencial por medio de un galvanómetro colocado en la superficie y cuyos electrodos están conectados al medidor. Ver (Fig. 2,13).

El electrodo M se mueve de abajo hacia arriba o viceversa dentro del agujero; a medida que se desplaza, los cambios de potencial se registran en un papel graduado por medio de una plumilla que se mueve en sentido horizontal, dibujando con una línea continua dichas diferencias.

El movimiento del papel está sincronizado con el desplazamiento del electrodo M dentro del pozo, de tal forma que la profundidad esta graduada a escala en el papel.

En el registro se tiene que las abscisas son función de la profundidad de M y las ordenadas representan el potencial de M con respecto a N a medida que cambia la profundidad. Las diferencias de potencial se miden en milivolts y pueden desplazarse al lado positivo o negativo del papel dado que no existe cero absoluto y que los potenciales estan referidos a la toma de tierra N. El registro S.P. se obtiene junto con el de resistividad.

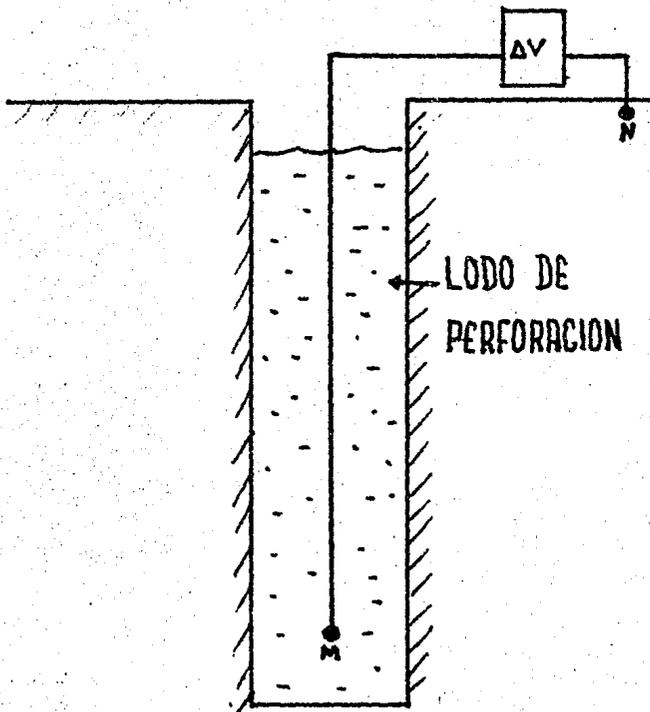


Fig. 2.13. Dispositivo de medida para el Registro S.P.

II.5.8. CARACTERISTICAS DE LA CURVA S.P.

Básicamente ésta consiste de una línea "base" continua que se comporta aproximadamente como una recta y que presenta - ciertas desviaciones ó saltos hacia ambos lados (+ ó -). La línea base del S.P. puede, en algunos casos, no conser-- var una determinada dirección sobre el papel, es decir que puede desviarse abruptamente y otras veces de dirección es constante.

Las deflexiones de la curva S.P. (izq. ó der.) respecto a - la línea base indicaran la presencia de capas permeables -- conteniendo fluidos de diferente salinidad, también puede - dar una idea aproximada de los límites de capa aunque por - lo general estos no pueden ser determinados efectivamente e sin la ayuda de los registros de resistividad.

II.5.9. FACTORES QUE INFLUYEN EN EL REGISTRO S.P.

a).- Espesor de las Capas

La curva S.P. está relacionada con las caídas de poten

cial que suceden, en este caso, entre lodo-arena-lutita de acuerdo a la expresión (2.5.9).

Si la sección transversal de una capa disminuye, el valor de su resistencia aumenta, entonces el S.P. será menor. Por el contrario si las capas aumentan su espesor la caída de potencial tendrá un valor mínimo de tal forma que el valor de S.P. y de SSP serán casi iguales. Así cuando tenemos capas de lutitas con espesores grandes y espesores delgados de capas permeables, estas últimas incrementan su resistencia y de acuerdo a (2.5.9) se reduce el valor del S.P.

Un claro ejemplo de la relación entre espesores y S.P. fué desarrollado por Doll (1948) quien muestra una alternancia entre capas permeables y porosas (arena con agua salada) y una impermeable (lutita). Ver (Fig. 2.14). Cuando los espesores de las capas son mayores que el diámetro del pozo, el S.P. es casi igual al valor del SSP, pero cuando los espesores de las capas se reducen el valor del S.P. disminuye en relación al SSP.

En caso de que las arenas tengan un espesor menor que la mitad del diámetro del agujero, el máximo en la curva S.P. será proporcional a los espesores de dichas capas. Por lo tanto:

a).- La curva S.P. está en función del área trans

versal de los espesores de capas y la curva decrecerá cuando el espesor de las capas tenga un valor menor que la mitad del diámetro del pozo.

b).- Diámetro del Pozo

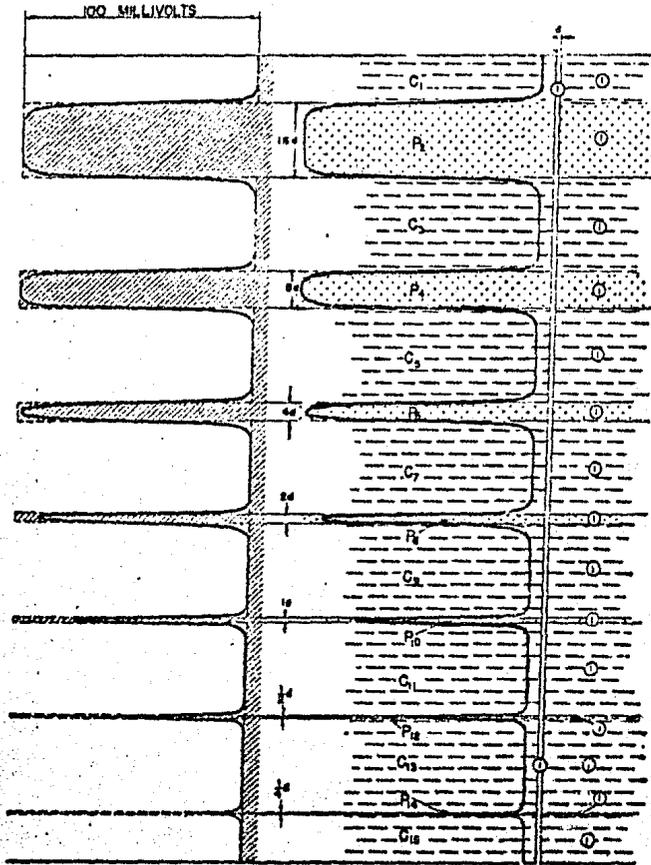
El incremento en el diámetro del pozo se refleja en la curva de S.P. con una tendencia a redondear las máximas deflexiones y reducir el valor de la amplitud en las capas permeables.

c).- Invasión por el Filtrado del Lodo

La formación de la zona de invasión por filtrado de lodo en una zona porosa y permeable tiene como consecuencia el alejamiento aparente de la pared del pozo.

Si el fluido contenido en el lodo se filtra a una determinada profundidad de la capa porosa esto sería equivalente a aumentar el diámetro del pozo. Por tanto dado que la resistencia de el lodo depende de el área transversal, cuando ésta se incrementa, la resistencia se reduce y así mismo el valor del S.P. decrece.

El reflejo en la curva será muy similar al que produce el incremento del diámetro del pozo, es decir una disminución de la amplitud de la curva S.P. con respecto a la línea base.



- ⊠ Estrato condutivo permeable P
- ▨ Estrato condutivo impermeable C
- Diagrama de Potencial Estatico
- Registro S.P.

Fig.2.14. Registro S.P. para diferentes espesores de capas permeables. Ref (17).

roca en el entorno de la sonda, que al multiplicarse por -
una constante geometrica dara la resistividad. Sin embargo -
la resistividad calculada es sólo relativa ya que se desco-
noce la resistencia de contacto de los electrodos.

II.6. SONDA MONOELECTRÓDICA

La sonda monoelectrónica es el dispositivo más sencillo para medir la resistividad. Una corriente I circula por un cable aislado que une al electrodo A, colocado en el interior del pozo, con el electrodo B que permanece fijo en la superficie del terreno. Ver (Fig.2.15).

La intensidad de corriente I que fluye en el circuito estará determinada por la ley de Ohm de acuerdo a :

$$I = \frac{V}{R} \quad (2.6.1)$$

La resistencia total R del circuito es la suma de las siguientes resistencias:

R_1 = Resistencia del cable y aparatos

R_2 = Resistencia de contacto entre el electrodo de superficie y el terreno

R_3 = Resistencia del terreno entre A y B

R_a = Resistencia del electrodo móvil A

La suma de las resistencias $R_1 + R_2 + R_3$ puede considerarse constante, por lo que las variaciones de la resistencia total R del circuito se deben a las variaciones de la resistividad del terreno alrededor del electrodo A.

La resistencia R_a esta dada por

$$R_a = K/a \quad (2.6.2)$$

donde

K =Factor geometrico

ρ_a =Resistividad aparente del medio

el factor geometrico depende de las dimensiones del electrodo, en este caso si se considera de forma esferica tenemos

$$R_a = \frac{\rho_a}{4\pi rc} \quad (2.6.3)$$

donde:

rc es el radio de la esfera.

De lo anterior podemos observar que la resistencia R_a es proporcional a la resistividad del material cercano al electrodo A. Por tanto si I se mantiene constante y conocemos el radio, rc , de la esfera podemos calcular el valor de ρ_a de acuerdo a (2.6.1):

$$\rho_a = \frac{\Delta V 4\pi rc}{I} \quad (2.6.4)$$

Dado que su radio de investigación es muy pequeño, del orden del diametro del electrodo ($2rc$), la resistividad aparente calculada esta muy influenciada por la resistividad del lodo de perforación y por el diametro del agujero,

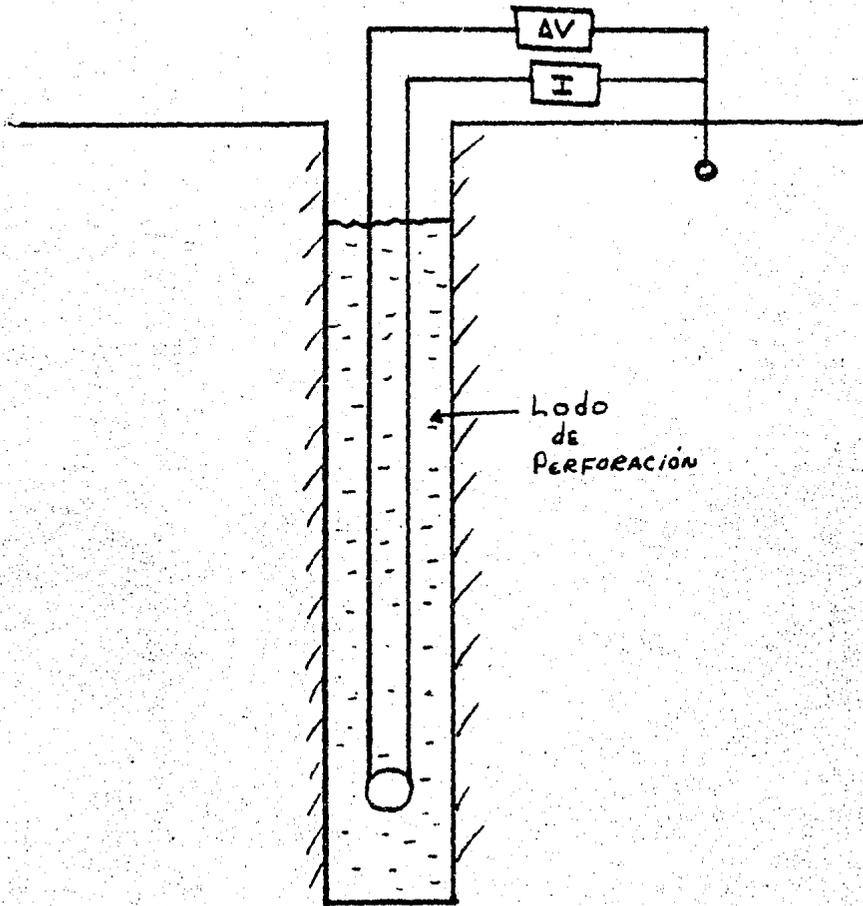


Fig. 2.15. Representación de la sonda monoelectrónica.

CAPITULO III

III LOS REGISTROS RADIOACTIVOS

En el estudio de los anteriores registros hemos tomado como base las propiedades eléctricas de las rocas de una formación. Sin embargo en los últimos años otra propiedad física ha sido incorporada a los registros geofísicos para determinar algunas características del subsuelo, está se conoce con el nombre de Radioactividad.

Las diferentes capas geológicas que se encuentran en el subsuelo contienen materiales que emiten radiaciones de diferente tipo (Alfa, Beta y Gamma), producto de su desintegración natural. Fué en 1935 cuando se construyen los primeros instrumentos de medición que permiten detectar dentro de un pozo las radiaciones naturales de los materiales.

Con el tiempo a este tipo de mediciones se les dió el nombre de Registro de Rayos Gamma y se utiliza hasta la fecha para obtener información acerca de la Litología y Estratigrafía de las formaciones Geológicas.

Actualmente se han desarrollado diversas técnicas en los registros radioactivos aprovechando no solamente la emisión natural de rayos gamma sino también creando una radioactividad artificial por medio del bombardero de neutrones, este registro se conoce como registro de neutrones y nos permite

conocer la porosidad de las rocas alrededor de un pozo.

III.1. ESTUDIO DE LA RADIOACTIVIDAD

La Radioactividad es un proceso nuclear que se puede definir como la desintegración de átomos acompañada por la emisión de radiación.

El descubrimiento original de la radioactividad fue hecho por Becquerel en 1896 cuando estudiaba la fluorescencia y la fosforescencia de compuestos, con luz visible.

Posteriormente se demostró que la actividad de los materiales radioactivos da lugar a tres clases de radiación que se emiten cuando un átomo se desintegra.

Los tipos de radiación son:

- a).- ALFA .- Consisten primordialmente de núcleos de Helio pero sin electrones por lo cual son partículas cargadas positivamente. Son las de más alta energía aunque de poca penetración ya que unas cuantas hojas de papel pueden detenerlas, por lo que son difíciles de detectar dentro de un pozo.
- b).- BETA .- Estas partículas tienen la misma carga y masa que los electrones de ahí que sean eléctricamente negativas. Son emitidas -

por núcleos de átomos radioactivos con velocidades muy grandes cercanas a -- .9995 veces la de la luz.

El bajo poder de penetración de los electrones hace difícil su detección, además bastarían solo unos milímetros de acero o un determinado volumen de agua para - detenerlos.

c.- GAMMA

.- Los rayos gamma no son desviados al - pasar por un campo magnético, por lo que se demostró experimentalmente que son - ondas electromagnéticas con una longitud de onda muy corta.

Estas radiaciones son las que poseen el mayor poder de penetración por lo que - es posible detectarlos en el interior - de un pozo aún cuando se encuentran re- vestidos con tuberías de acero.

III.2. EL REGISTRO DE RAYOS GAMMA

Este registro mide la radioactividad natural de las forma- ciones geológicas atravesadas por un pozo.

La intensidad de la radiación depende de varios factores, el de mayor importancia es la concentración y actividad de

los elementos radiactivos diseminados en las rocas.

En la naturaleza existen muchos núcleos de átomos inestables de los cuales sólo unos cuantos tienen la concentración necesaria para extender su radiación, entre ellos tenemos el Uranio, Thorio y un Isotopo de Potasio (K^{40}). Estos contribuyen en mayor proporción a la radiación que se presenta en las rocas sedimentarias.

Por otro lado la energía inicial de los rayos gamma disminuye a través de repetidas colisiones elásticas. El espectro de energía de los rayos medido en los pozos es parcialmente degradado por la composición química y la densidad de las formaciones.

La intensidad de la radiación gamma indicara la relativa concentración de todas las impurezas radioactivas, pero no es posible diferenciar la naturaleza de su fuente de origen ya que los aparatos solo detectan la presencia de los rayos sin poder distinguir que elemento (s) los produce.

III.2.1. UNIDAD DE MEDIDA

En la Industria Petrolera se utiliza la unidad de radiación gamma A.P.I, Sin embargo compañías particulares que corren registros de pozos emplean con frecuencia unidades particu-

lares. La siguiente tabla muestra las diferentes unidades y su equivalente en A.P.I.:

<u>UNIDADES DIVERSAS</u>	<u>UNIDADES A.P.I.</u>
Microgramo de radio equivalente por toneladas	16.5
Microentgen/Hora P.G.A.C.	15
Microentgen/hora Mc.Cullough	10.4
Unidad de Radiación Lane-Wells	2.16

III.2.2 INSTRUMENTOS DE MEDICION

La medida de los rayos gamma puede hacerse con el Contador Geiger, La Cámara de Ionización ó el Centelleometro. Este último ha desplazado a los anteriores por su mejor rendimiento, su menor tamaño brinda una mejor resolución para formaciones pequeñas hasta de 1 m de espesor.

El centelleometro consiste en un cristal que emite un destello luminoso cada vez que sobre él incide un rayo gamma. Este destello se transforma a su vez en un impulso eléctrico que se registra en la superficie. Ver(fig. 3.1.).

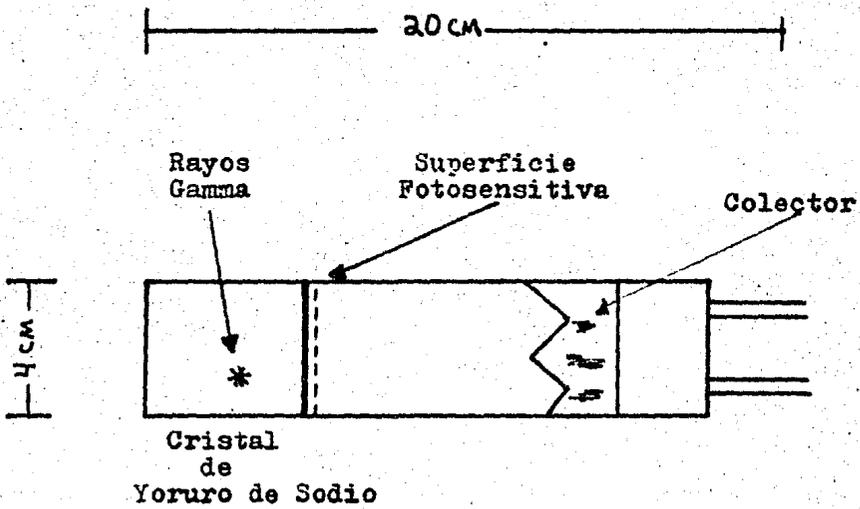


Fig. 3.1. Representación grafica de un Centelleometro.

III.2.3. OPERACION DEL REGISTRO DE RAYOS GAMMA

Se introduce en el pozo una sonda que contiene el centelleómetro, circuitos y preamplificadores para transmitir a la superficie los impulsos captados.

El registro se obtiene por medio de un equipo electrónico, que mediante los impulsos integrados mueve una pluma en sentido horizontal sobre el papel sensible; la pluma dibuja, sobre la superficie que se desplaza en proporción al movimiento de la sonda (según escala), una curva continua de intensidad de radiación gamma.

La curva de rayos gamma es muy parecida a la curva S.P. con la cual es correlacionable.

III.2.4. RADIO DE INVESTIGACION

Los análisis de el espectro de energía de los rayos gamma muestran que aproximadamente el 90% de ellos son originados dentro de los primeros 15 cm de la formación investigada.

III.2.5. FACTORES QUE INFLUYEN EN EL REGISTRO DE RAYOS GAMMA.

a). - VARIACION ESTADISTICA

La naturaleza de todas las emisiones aleatorias, incluyendo la radioactividad, es variar en un lapso de tiempo, Así las radiaciones gamma no se manifiestan en forma continua sino al azar. El número de rayos que son detectados por los instrumentos varía aún cuando éstos se encuentran inmóviles.

Por otro lado, el número de rayos gamma contados por segundo - sobre un período de tiempo largo será constante, este período de tiempo es comunmente de varios segundos. La constante de tiempo de integración se define como: El tiempo necesario que el detector debe permanecer frente a la capa para registrar el 63% de cualquier cambio de intensidad de rayos gamma. Con un mayor tiempo de integración menor será la fluctuación estadística y el registro indicará más claramente la variación del terreno. Pero si el tiempo de integración es pequeño las variaciones estadísticas darán lugar a cambios que pueden confundirse con capas pequeñas del terreno. Así también si se eligen tiempos muy grandes la práctica del registro será lenta y costosa.

b).- VELOCIDAD DEL REGISTRO

Para la práctica de campo de un registro de rayos gamma debe elegirse el tiempo de integración y la velocidad de registro en forma coordinada dependiendo de cuáles sean los objetivos que se persiguen.

El producto de la velocidad de registro por el tiempo de integración nos proporciona el espesor que tiene la capa para detectar el 63% de la deflexión que resultaría con la sonda detenida. Por ejemplo, si la sonda se desplaza a una velocidad de 50 cm/seg y el tiempo de integración fuese 10 seg. el registro mostrará la radiación correspondiente a $(50 \text{ cm/seg} \times 10 \text{ seg})$ 5 m, por lo que no sería posible distinguir estratos con espesores inferiores a esta longitud. Por otro lado si disminuimos la velocidad, para el ejemplo anterior a 1m/min, un pozo de 300 m. necesitará 5 horas para completarlo.

Usualmente será el espesor de las capas que se pretende detectar, uno de los puntos más importantes para seleccionar la velocidad del registro. Comúnmente se adopta una velocidad de 3 m/min.

III.3. EL REGISTRO NEUTRON-GAMMA

Este registro fue introducido comercialmente en 1941, su principal objetivo es evaluar la porosidad de las formaciones alrededor de un pozo.

Una fuente de alta energía como el Plutonio, Berilio ó Radio - se introduce en el pozo bombardeando a las paredes con partículas de neutrones, éstos al entrar en contacto con el material van sufriendo colisiones con núcleos atómicos liberando energía y reduciendo su velocidad. Después de varios choques son capturados por átomos de hidrógeno contenidos en la formación quienes liberan a su vez rayos gamma de captura los cuales son detectados por los instrumentos y registrados como pulsos eléctricos en la superficie.

La captura de los neutrones esta relacionada con el contenido de núcleos de hidrógeno en las paredes del pozo y por consiguiente con el contenido de agua.

III.3.1. INSTRUMENTOS DE MEDICION

Los detectores usados en el registro de neutrones son del mismo tipo que en los registros de rayos gamma (centelleómetro).

El dispositivo de medición que se introduce en el pozo contiene

una fuente emisora de neutrones y uno ó dos receptores de rayos gamma de captura.

La elección de la distancia entre la fuente y receptor depende de la resolución de porosidad que se desee obtener, comunmente el receptor se coloca aproximadamente entre 28 y 45 cm. de la fuente. ver fig. (3.2.)

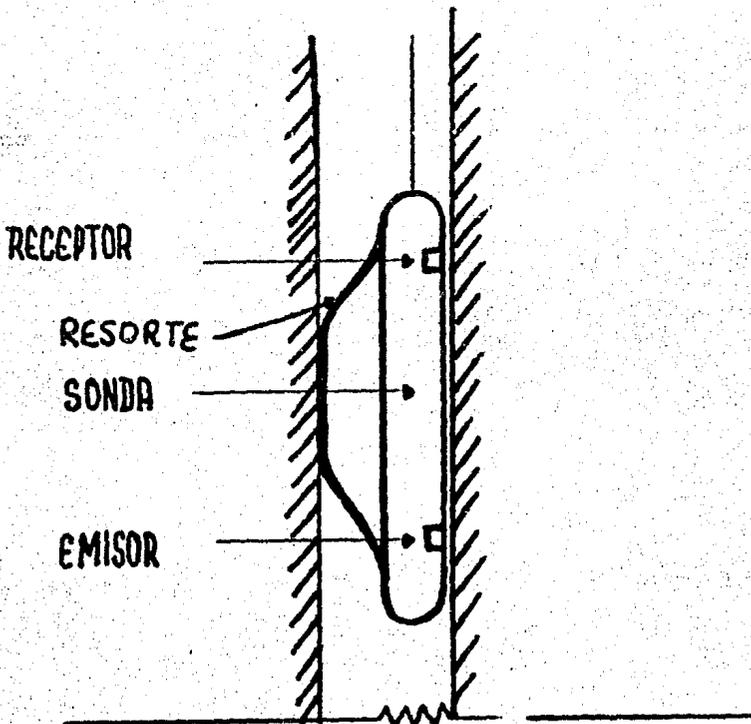


Fig. 3.2. Diagrama de la Sonda del Registro Neutrón-Gamma.

III.3.2. OPERACION DEL REGISTRO NEUTRON-GAMMA

Se introduce la sonda en el pozo conteniendo la fuente emisora y el receptor, una vez que se ha determinado el espaciamento entre fuente-receptor permanecerá constante durante todo el registro.

Lo que detecta el medidor es el número de rayos gamma de captura. Cuando la cantidad de hidrógeno contenido en la formación, cerca del emisor, sea alta los neutrones serán capturados y el número de rayos gamma de captura que llegan al receptor será baja.

Cuando el contenido de hidrógeno es menor, cerca de emisor, los neutrones sufren menos colisiones en su trayectoria de la fuente al emisor por tanto se tendrá una mayor cantidad de rayos de captura que lleguen al receptor.

III.3.3. FACTORES QUE INFLUYEN EN EL REGISTRO

a).- Constante de tiempo y velocidad del registro.

Estos factores producen el mismo efecto que en el caso de los rayos gamma naturales, el registro está sujeto a variaciones estadísticas y la velocidad debe ser aquella que permita una buena definición de los límites de capas.

b).- Efecto del Agujero.

Este factor es la combinación entre el efecto del diámetro del agujero y el fluido que llena el pozo.

Cuando en un pozo lleno con lodo aumenta el diámetro del agujero disminuye la cantidad de neutrones que penetran en la formación; por tanto disminuye la intensidad de la señal.

III.4. REGISTRO DE DENSIDAD

Este registro fue introducido en 1950 con el fin de obtener el valor de la densidad en las formaciones atravesadas por un pozo, sin embargo se le clasifica dentro de los registros de porosidad ya que los valores de porosidad se pueden obtener como función de la densidad.

Los registros de densidad son usados para hacer correlaciones geológicas, identificación litológica-minera y evaluación de la porosidad de una formación.

Una fuente de rayos gamma y un detector son montados en la parte inferior del instrumento el cual se introduce en el pozo, cuando el dispositivo es puesto sobre la pared este emite rayos gamma, los cuales son absorbidos y sufren cambios de dirección debido a colisiones con los electrones contenidos en la formación.

El número de rayos gamma que captura el detector es proporcional al número de electrones contenidos en las capas, y estos, a su vez son función de la densidad de la matriz del material que se trate, por tanto la intensidad de los rayos gamma es inversamente proporcional a la densidad de la formación, la profundidad de investigación de la sonda es de aproximadamente 15 cms.

El valor de la densidad ρ_B que se obtiene en el registro es función de la densidad de la roca y de los fluidos que contiene. La porosidad se obtiene por medio de la ecuación.

$$\phi = \frac{\rho_G - \rho_B}{\rho_G - \rho_F} \quad (3.4.1.)$$

Donde:

- ϕ = Porosidad
- ρ_B = Densidad total (obtenida del registro)
- ρ_G = Densidad de los granos o matriz
- ρ_F = Densidad del fluido que satura la roca

Todos estos valores se calculan en grs/cc³ y generalmente

ρ_G y ρ_F son valores constantes.

En la actualidad existen dispositivos que permiten eliminar los efectos indeseables como el diámetro del agujero y el enjarre del lodo.

CAPITULO IV

IV. APLICACIONES

La aplicación de los registros de pozos en la Geohidrología se basa en la determinación de las propiedades físicas de las rocas. Lo anterior permite obtener una información más amplia y objetiva de las condiciones del terreno, lo que eleva considerablemente la calidad y eficiencia del estudio Geohidrológico.

Los registros pueden realizarse en todas las etapas de exploración pero su aplicación más frecuente esta en la exploración detallada, ya que permiten analizar las características del subsuelo y dar una primera evaluación de la calidad química del agua, la porosidad y permeabilidad de las formaciones.

IV.I. REGISTROS ELECTRICOS

IV.I.I. REGISTRO DE RESISTIVIDAD.

Las curvas de resistividad indican la litología del corte geológico y permiten distinguir la presencia de agua dulce ó salada así como determinar su calidad química.

Para obtener la información correcta del registro es necesario considerar diferencias en la interpretación comúnmente aceptada en la industria petrolera.

En los pozos perforados para agua el contraste de resistividad entre el lodo y el agua de la formación es generalmente bajo, la invasión del filtrado del lodo es leve debido a la alta porosidad y baja presión entre el pozo y la formación, esto provoca que la diferencia entre la curva normal-corta y normal-larga sean mínimas.

El valor R_w se obtiene a partir de la ecuación $R_w = R_t/F$ dando valores apropiados a F y obteniendo R_t de las curvas normal ó inversa.

En los trabajos petroleros el factor de formación F se calcula de la ecuación (1.5.2). La porosidad (ϕ) y el factor de cementación (m) son obtenidos con un análisis de laboratorio, utilizando un determinado número de muestras extraídas del subsuelo.

En los trabajos de Geohidrología la posibilidad de obtener muestras en buen estado es difícil, debido a la fragilidad de las rocas, por lo cual los valores de ϕ y m sin un control de laboratorio darán resultados de F no confiables.

Por otro lado la relación (1.5.2) no se comporta como en pozos petroleros. El valor de F no es constante sino función de R_w . Estudios realizados (Ref.9) muestran que F decrece cuando R_w se incrementa. Esto se debe, fundamentalmente, a la presencia de arcilla en las formaciones que modifica la conductividad de la roca en forma considerable.

Existen varias formas de calcular el valor de F ;

- a).- Utilizando la ecuación de Archie (1.5.2) siempre y cuando las formaciones no contengan arcilla.
- b).- Aplicando la ecuación de Pérez Rosales (1.5.4), éste implica conocer las características de la roca para dar valores a (m) y G y obtener el valor de ϕ empíricamente o con ayuda de los registros de radioactividad. (Densidad, Neutron-Gamma).
- c).- Estableciendo relaciones empíricas, locales, entre R_t , R_w y F para una área determinada de estudio.
- d).- Calcular F por medio del registro Microlog, una vez que se conoce R_{xo} y R_{mc} .

El método que se utilice dependerá de los recursos económicos disponibles para la operación de los registros, del conocimiento geológico del área de estudio y de la experiencia del interprete.

El análisis cualitativo se realiza distinguiendo los valores de resistividad en las curvas del registro, tomando en cuenta el radio de investigación de la sonda, lo que permite obtener la siguiente información:

- a).- Localizar acuíferos con agua dulce y estimar la calidad química del agua contenida en ellos.
- b).- Determinar el espesor y los límites de capa en las formaciones.
- c).- Determinar la litología de la formación en función de su resistividad.
- d).- Realizar correlaciones Geológicas con pozos cercanos.

Los registros eléctricos solo pueden correrse en pozos que no tienen ademe ó tubería de revestimiento y que contengan un fluido conductor dentro del pozo.

IV.I.2. REGISTRO S.P.

La teoría que da origen a la ecuación del SP en un pozo establece que el agua de la formación y la del filtrado del lodo son soluciones de NaCl. Esta condición se satisface generalmente en pozos petroleros, sin embargo en pozos de agua no se cumple debido a que en el agua de la formación, como en el fluido del lodo, las concentraciones

de NaCl rara vez predominan. Comúnmente se encuentran disueltos iones como Calcio, Potasio, Sulfatos ó Carbonatos en mayor ó igual concentración que el NaCl.

Lo anterior puede dar origen a diferencias en el contenido iónico de las soluciones de tal forma que ciertos compuestos predominen en el agua de la formación y otros en el fluido del lodo.

Por esta razón los resultados obtenidos con la ecuación (2.5.8) difieren de la realidad, la solución sería la aplicación de (2.5.1) pero sus funciones y variables desconocidas hacen un análisis cuantitativo muy difícil de evaluar. Gondoun (1957) demostró que cuando las concentraciones de Ca o Mg en el agua son importantes la magnitud del S.P. es función de:

$$SP = -K \log \frac{A_w}{A_{mf}} \quad (4.2.1)$$

$$SP = -K \log \frac{(A_{Na} + \sqrt{A_{Ca} + A_{Mg}})w}{(A_{Na})_{mf}} \quad (4.2.2)$$

Donde A_{Na} , A_{Ca} y A_{Mg} son respectivamente la actividad de solución debida al Sodio, Calcio y Magnesio. Considerando al filtrado del lodo como una solución de NaCl, $(A_{Na})_{mf}$ se determina a partir de R_{mf} y conociendo el valor de los iones en la solución se aplica la ecuación (4.2.2).

El SP permite evaluar la calidad del agua y para ello es necesario realizar un análisis químico que muestre, a la vez, las características del líquido. Sin embargo la utilidad del análisis es encontrar relaciones empíricas locales entre S_p , R_w y el Contenido Total de Sólidos (TDS). En algunos casos los resultados pueden extenderse a zonas de estudio con características geológicas similares.

Con la ecuación (2.5.8) se calcula una resistividad equivalente R_{we} y con la relación $R_{we}-R_w$ se encuentra R_w . Ver. Fig. (4.1).

El valor de R_w se utiliza para calcular el contenido de NaCl y el TDS en el agua de la formación, cuando se han determinado las relaciones entre ellos. Ver. Fig. (4.2.)

El procedimiento anterior facilita la información sobre la calidad del agua. Sin embargo para que estos valores sean aceptables es necesario establecer relaciones empíricas locales. Cuando se carece de esos estudios el SP debe interpretarse únicamente en forma cualitativa. A continuación se presentan algunas reglas para la interpretación del SP:

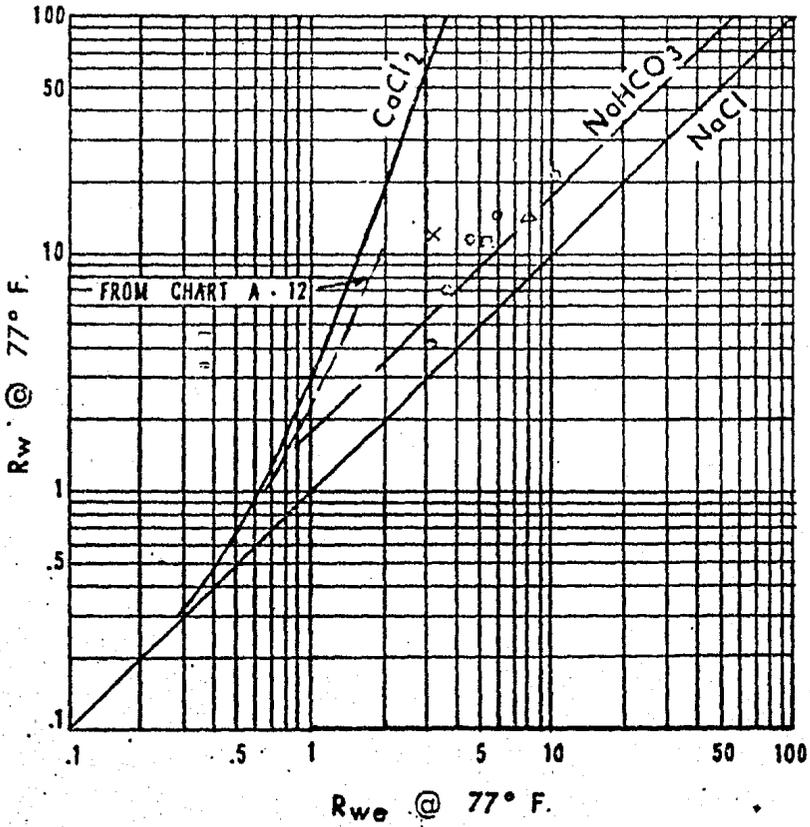
- La línea que conserva un valor constante, en grandes espacios de la curva SP se conoce como línea base.

Generalmente esta asociada con la presencia de Lutita (Línea base de Lutita) y es a partir de esta referencia que se toman las lecturas del potencial ya que la curva

S.P. no tiene punto cero.

La línea base corresponde a las capas impermeables, las variaciones o deflexiones de la curva respecto a la línea base son debido a capas permeables.

- Cuando la curva presenta una deflexión (+) el agua contenida en la formación es menos salada que el filtrado del lodo ($R_w > R_{mf}$). Si la curva tiene una deflexión (-) el agua es más salada que el filtrado del lodo ($R_{mf} > R_w$).
- Si el S.P. permanece constante, el agua de la formación y el filtrado del lodo tiene aproximadamente la misma salinidad ($R_{mf} \approx R_w$).
- Si a medida que se profundiza en el pozo, la curva S.P. va adquiriendo una deflexión negativa, esto indica que la salinidad del agua de la formación se incrementa con la profundidad.



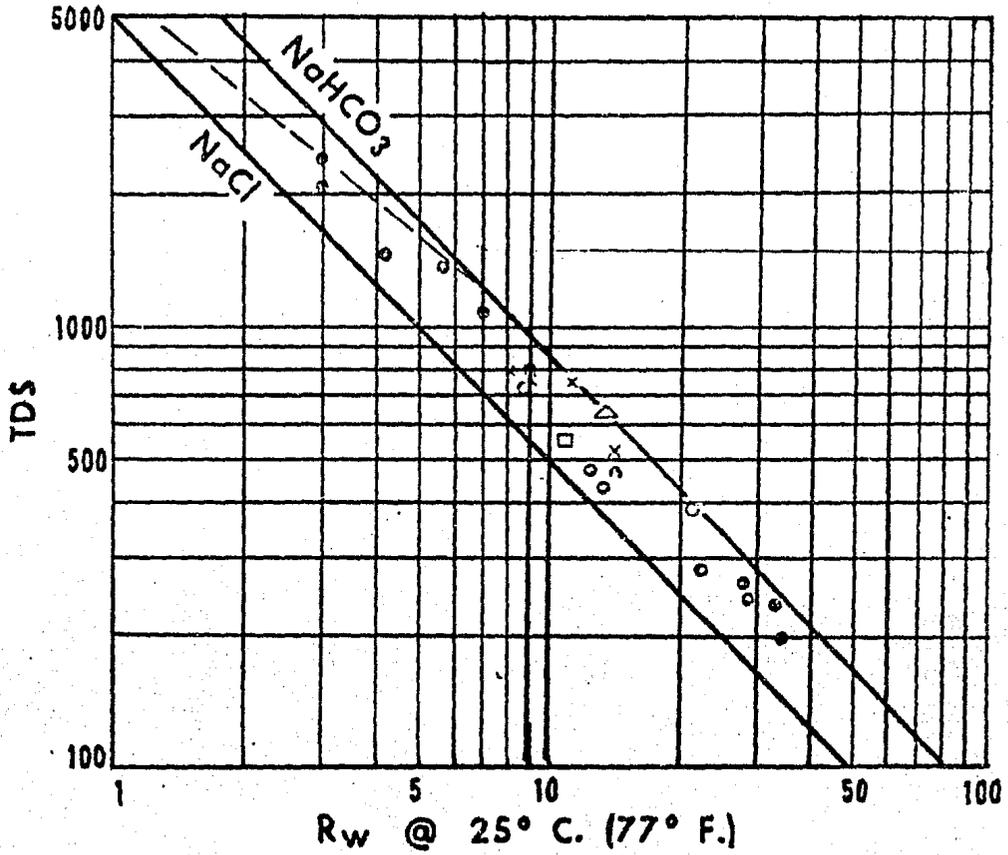


Fig. 4.2. Relación entre el Contenido Total de Sólidos (TDS) y R_w . Ref (9)

IV.I.3

MICROLOG

La habilidad del dispositivo para medir los cambios de resistividad en detalle lo convierte en un buen registro que permite localizar capas delgadas resistentes.

Analizando las curvas de resistividad, Ver (Fig.2.10)

la información cualitativa se obtiene de acuerdo a lo siguiente:

- + Cuando existen capas porosas y permeables que contienen agua dulce ($R_{xo} > R_{mc}$), las curvas tendrán una separación positiva.

El tamaño de la separación dependerá del contraste de resistividad entre el enjarre del lodo y la formación invadida (R_{xo}/R_{mc}), así como del espesor del filtrado del lodo.

- + Cuando existan arenas altamente porosas saturadas con agua salada la separación en las curvas será negativa.
- + En zonas impermeables la separación entre curvas será mínima ó nula, ya que al no formarse enjarre y zona invadida la micro-inversa tendrán un valor aproximadamente igual. En el caso de lutitas, cuando su resistividad es parecida a la del enjarre, la separación en -

las curvas será despreciable, si la resistividad del lodo es más alta que la de la lutita la separación - será negativa.

+ En zonas compactas por no haber enjarre ni zona invadida las dos curvas registran resistividades altas que por lo general salen de la escala.

En condiciones favorables, la interpretación cuantitativa determina la resistividad de la zona lavada R_{xo} .

Se toma en cuenta que las curvas de resistividad están sensiblemente afectadas por el espesor del enjarre, el contraste del lodo y la resistividad de la formación.

Cuando la relación de resistividad (R_{xo}/R_{mc}) es baja, los valores de la curva no son afectados fuertemente y R_{xo} puede calcularse.

Si la relación (R_{xo}/R_{mc}) es alta, como en el caso de baja porosidad, los valores obtenidos de las curvas no son confiables.

Para obtener una interpretación cuantitativa aceptable se debe cumplir lo siguiente:

- Porosidad $> 15\%$
- Enjarre del lodo < 1.25 cm
- Relación de Resistividad < 25 ohms-m

IV.I.4. SONDA MONOELECTRÓDICA

La sonda monoelectrónica señala con gran precisión los contactos entre formaciones diferentes, brinda además información de la salinidad del agua contenida en las formaciones. La interpretación de la curva se realiza en forma cualitativa. Cuando la curva no presenta perturbaciones puede utilizarse para calcular el espesor aproximado de las capas a partir de los puntos de inflexión, sin embargo el uso de los pozos de perforación con baja resistividad tienden a disminuir el valor de la curva y en algunos casos impide su apreciación.

Los equipos utilizados son de fácil manejo, su costo es relativamente bajo y sus posibilidades de estudio pueden llegar hasta 300 m de profundidad. Es por ello que su uso está muy extendido en la Geohidrología.

IV.2. REGISTROS RADIOACTIVOS

IV.2.1. REGISTRO RAYOS GAMMA

El registro de rayos gamma permite localizar las variaciones en la radioactividad de la roca, que están asociadas con cambios de litología. Por ello es necesario determinar la fuente de radiación en las rocas y establecer relaciones con su intensidad.

- Lutita y Arcilla

La lutita es la roca sedimentaria más radioactiva. Esta compuesta de diferentes porciones de minerales de arcilla, silicatos finos y otros minerales saturados con un electrolito. La radiación de una partícula de lutita es función de su ambiente de depósito, enriquecimiento por circulación de agua y compactación.

La fuente más común de su radiación se debe al abundante depósito de material orgánico. Los minerales de arcilla contenidos en la roca pueden absorber cantidades significativas de Uranio así como concentrar iones de Potasio.

El Radio y Thorio son fuentes importantes de radiación en lutitas de origen marino (lutita negra) el contenido de Radio y Thorio se incrementa en proporción al contenido de Carbón orgánico.

- Areniscas

Algunas areniscas contienen glauconita, que es un silicato formado en ambientes marinos y que contiene Potasio Radioactivo. Por otro lado los granos de cuarzo - pueden contener una pequeña radiación debida a concentraciones de Uranio.

Aunque la radiación en las areniscas es pequeña una gran parte de esta se debe a la presencia de lutita y arcilla.

- Rocas Carbonatadas

La caliza y dolomía están entre las rocas con menor grado de radioactividad. Los iones de carbono inhiben la precipitación de Uranio, el Potasio es escasamente incorporado en rocas carbonatadas excepto cuando contienen minerales de arcilla.

La Fig.(4.3) muestra la distribución de radioactividad en rocas sedimentarias más comunes.

El uso más frecuente del registro de rayos Gamma es proporcionar información acerca de la secuencia litológica de las rocas en el pozo. La interpretación se realiza en forma - cualitativa, con la definición de los distintos niveles litológicos. En la serie normal la arcilla se detecta por su alta radiación y le siguen en orden decreciente las arenas, areniscas, calizas y evaporitas.

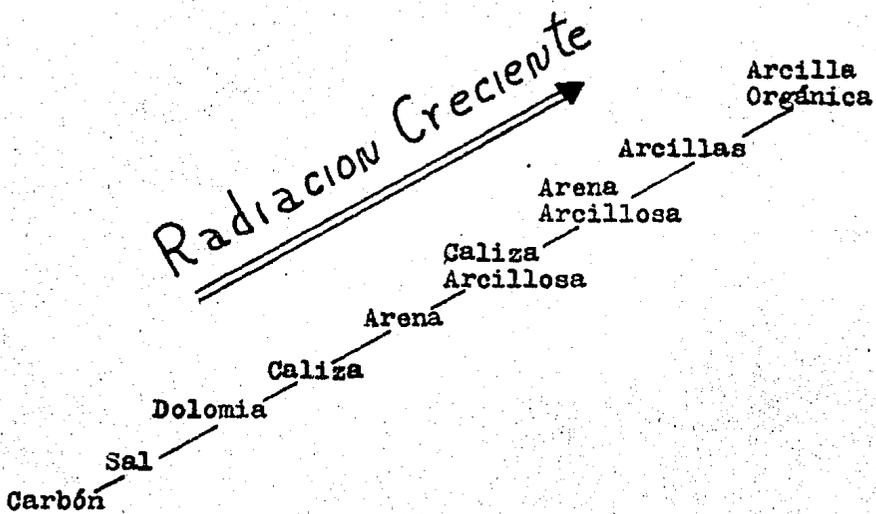


Fig. 4.3. Intensidad de radiación en rocas sedimentarias.

Los cambios de radiación entre arcilla y arena son generalmente grandes, pero entre arenas, calizas, areniscas y evaporitas los contrastes son pequeños y es difícil diferenciar los sedimentos unicamente con el registro de rayos gamma.

En los terrenos sedimentarios la aplicación del registro es muy útil, no así en rocas intrusivas y metamórficas donde la diseminación de minerales de potasio no permite hacer correlaciones con facilidad.

Otras características geológicas que se pueden obtener del registro son:

- El grado de arcillosidad de una formación
- Localización de intercalaciones delgadas de arenas en lutitas y de lutitas en calizas.
- Permite correlacionar la información con el registro SP y en algunos casos sustituirlo cuando este no brinda resultados satisfactorios.

IV.2.2. REGISTRO NEUTRON-GAMMA

El registro neutron-gamma tiene aplicaciones en la determinación de la porosidad y litología de las formaciones.

Debido a que las diferentes formaciones no contienen la misma cantidad de hidrogeno, las variaciones en el registro son proporcionales a la porosidad de la roca.

Cuando la porosidad es alta, las deflexiones en la curva serán bajas, cuando la porosidad decrece las deflexiones serán grandes. Ver (fig. 4.4.).

En formaciones arcillosas, con alta porosidad, la deflexión será mínima. El registro neutrón-gamma brinda buenos resultados en rocas carbonatadas, ya que están menos contaminadas de arcilla.

IV.2.3. REGISTRO DE DENSIDAD

El uso del registro de densidad permite evaluar las variaciones en la densidad de la columna geológica.

Dado que existe una relación entre densidad y porosidad los valores obtenidos con el registro permiten determinar la porosidad de la formación. Este cálculo se realiza de acuerdo a la ecuación (3.4.1), del registro se obtiene (f_s) y la densidad del grano (ρ_g) como la del fluido contenido en los poros son valores conocidos.

La Fig.(4.4.) representa un r3gistro te3rico de Rayos Gamma y Neutr3n-Gamma para el corte geol3gico dado, en el podemos observar las variaciones en la radioactividad y porosidad de las rocas.

Las arcillas por ser el material mas radioactivo y con alta porosidad presentan valores grandes en el registro Gamma y valores pequenos en la curva de Neutron-Gamma.

Las gravas y arenas varian en sus valores de radioactividad y porosidad dependiendo del contenido de arcilla en ellas.

En las calizas la radioactividad varia de acuerdo a su constituci3n, y su porosidad dependera del grado de compactaci3n 3 fracturaci3n de la roca.

En las rocas de origen igneo los materiales radioactivos -- que se depositan son pocos por ello los valores de la curva de rayos gamma son bajos, en cuanto a su porosidad esta varia de acuerdo al estado en que se encuentre la roca(compacta o fracturada).

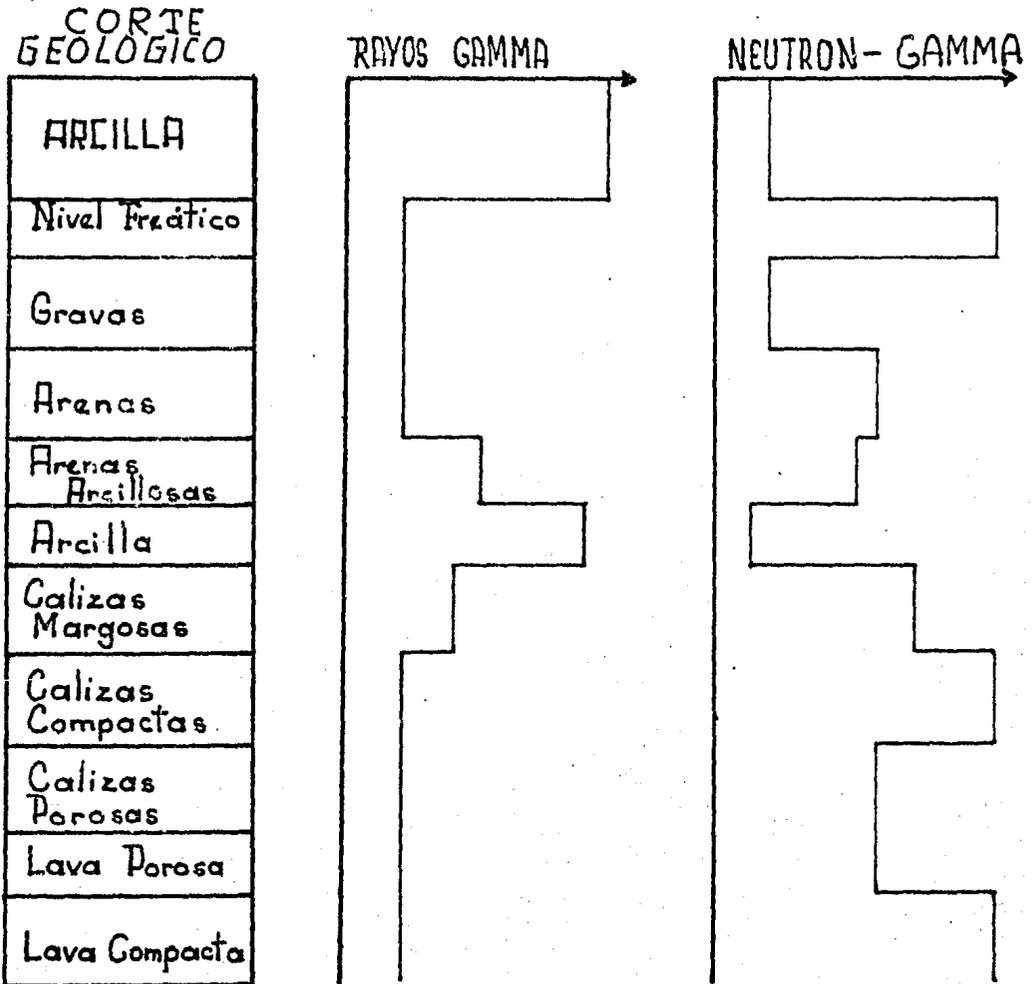


Fig. 4.4 Registro teórico de Rayos Gamma y Neutron-Gamma.

La aplicación conjunta de los registros de pozos, eléctricos y radioactivos, determina la solución de problemas Geohidrológicos como:

- a).- El estudio de la estructura geológica alrededor del pozo y su división litológica.
- b).- Localización de capas y zonas permeables determinando su espesor efectivo y profundidad.
- c).- Separación de las zonas de explotación más convenientes en un pozo para agua.
- d).- Determinación de la mineralización de las aguas subterráneas.
- e).- Estimación cuantitativa y cualitativa de los horizontes acuíferos.
- f).- Cálculo de la porosidad en acuíferos y zonas permeables.
- g).- Cálculo de la porosidad en acuíferos y zonas permeables.
- h).- Realización de correlaciones geológicas entre pozos cercanos.

La Fig. (4.5.) muestra un r3gistro te3rico de Potencial Espont3neo (S.P.), Resistividad y Rayos Gamma para el corte geologico dado. En el se puede observar en forma conjunta las variaciones de S.P., resistividad y radioactividad para cada tipo de roca.

Las arcillas por ser impermeables tienen valores de potencial nulos y una baja resistividad, dada la cantidad de material radioactivo que absorven su intensidad de radiaci3n es grande. Las arenas y gravas con agua dulce presentan valores positivos en la curva S.P. producto de la diferencia entre R_w y R_{mf} , los valores de resistividad varian de acuerdo al tipo de roca y los valores de la curva de rayos gamma son bajos debido a la ausencia de material arcilloso.

En las areniscas los valores del S.P. pueden variar en forma considerable dependiendo del l3quido que contengan y de su grado de compactaci3n. Los valores de resistividad son generalmente altos, en cuanto a su radioactividad los valores en la curva de rayos gamma son bajos a menos que las areniscas o calizas contengan material arcilloso.

Cuando las rocas (areniscas, arenas, gravas) contienen en sus poros agua salobre el S.P. presenta valores negativos, la resistividad es baja debido a la presencia de NaCl en el agua. En cuanto a la radioactividad los valores que se presentan son bajos ya que las rocas no contienen sustancias radioactivas en forma considerable.

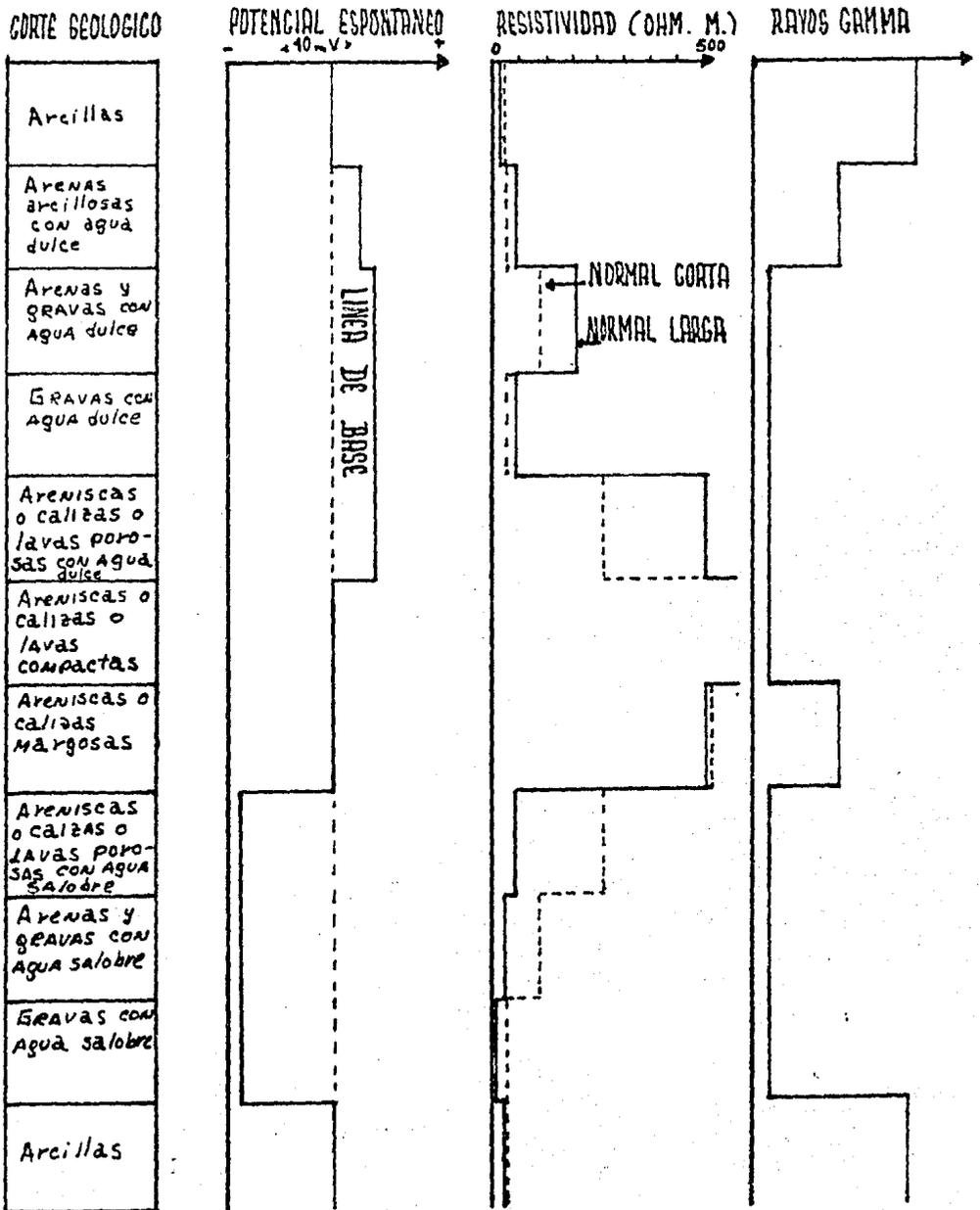


Fig. 4.5 Registro teorico S.P., de Resistividad y Rayos Gamma.

IV.3. EJEMPLOS

IV.3.1. EJEMPLO # 1

La fig.(4.6) presenta un registro eléctrico constituido por la curva de S.P. y la curva Monoeléctrica corrido con fines geohidrológicos.

Con las características de las curvas del registro y el estudio geológico de la zona se determinaron los límites de capas así como el corte geológico el cual se presenta en la parte derecha del registro.

Por las deflexiones a la derecha de la curva S.P., con respecto a la línea base, y los valores de resistividad se consideran tres intervalos con posibilidades de almacenar agua

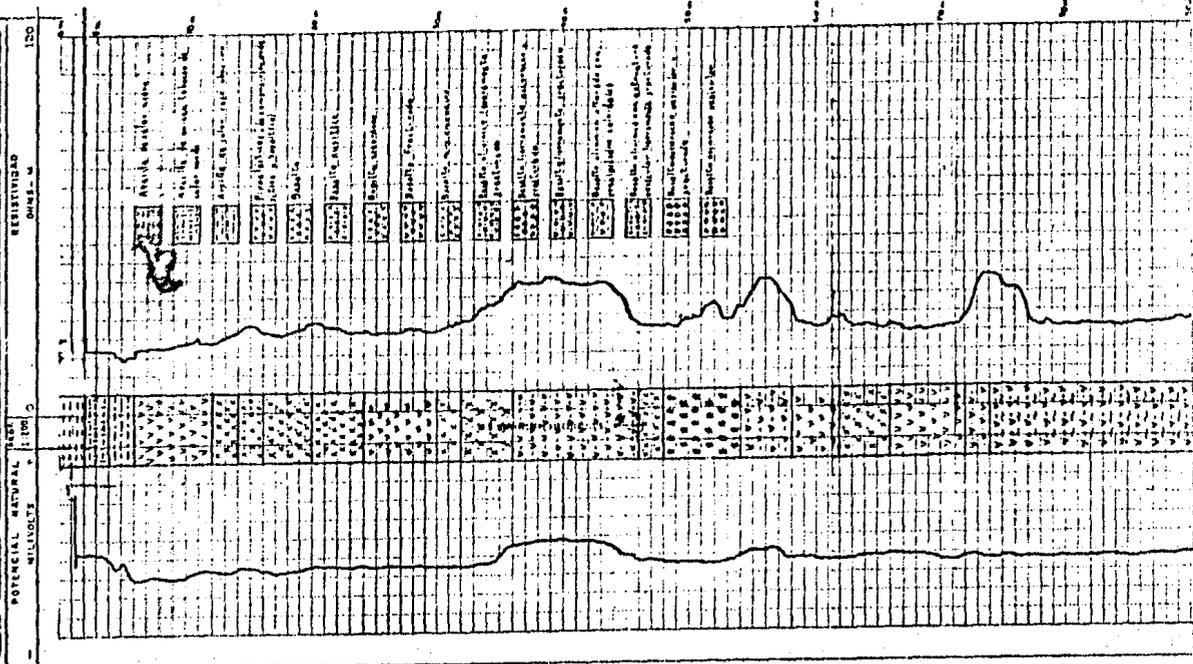
35-46 m

54-58 m

72-77 m

en este último rango se presenta un cambio en la curva de resistividad sin el correspondiente desplazamiento de la curva S.P., esto se debe a que la resistividad del filtrado del lodo es similar a la resistividad del agua contenida en la roca ($R_{mf} \approx R_w$).

 REGISTRO ELECTRICO	
POZO <u>ELINDO LAS CRUCES</u>	
PERFORADO POR: <u>S.A.R.H. (RESIDENCIA DE GEOLOGIA Y DE ZONAS ARIDAS)</u>	
MUNICIPIO <u>VILLA JIMENEZ</u>	
ESTADO <u>DE SONORA</u>	
FECHA DE PERFORACION <u>1958</u>	
PROF. PERFORADA <u>122.8 m</u>	PROF. REGISTRADA <u>122.8 m</u>
ADOLE. <u>122.8 m</u>	
TIPO DE PERFORACION <u>WOTANIA CON PRESION</u>	
EQ. DE PERFORACION <u>WIMCO 1228</u>	
DIAM. BARRERA <u>4 1/2"</u>	DIAM. DE PERFORACION <u>4 1/2"</u>
DIAMETRO ADEME <u>4 1/2"</u>	DIAMETRO DE PERFORACION <u>4 1/2"</u>
EQUIPO DE PERFORACION <u>MIA</u>	EQUIPO DE PERFORACION <u>1228 NAT</u>
NIVEL <u>122.8 m</u>	NIVEL <u>122.8 m</u>
RESISTIVIDAD <u>10</u>	RESISTIVIDAD <u>10</u>
CURRIDA <u>UNP</u>	CURRIDA <u>UNP</u>
OBSERVACIONES	
REGISTRO: <u>MANUEL FLORES LARA</u> SUPERVISOR: <u>MR. JUAN RODRIGUEZ PIERRE</u>	



- Analisis Cuantitativo

Tomando en cuenta las características de la curva S.P., y debido a que se carece de mas información con respecto a la calidad del agua, se considera que el agua contenida en las rocas es solución de NaCl.

a) Calculo de R_w

$$R_m = 16 \text{ ohms a } 23^\circ \text{ C}$$

Utilizando la E.C.(1.4.2.)

$$R_m = 15.31 \text{ a } 25^\circ \text{ C} \quad R_{mf} = 15.31 (.85) = 13$$

Se aplicamos:

$$R_w = \frac{R_{mf}}{10 - (SP/K)} \quad (4.3.1)$$

donde: $K = 70$

y utilizando la fig. 4.2. con solución de NaCl tenemos:

<u>intervalo</u>	<u>SP</u>	<u>R_w</u>
35-46 m	+ 5 mv	15.3 ohms-m
54-58 m	+ 3 mv	14.3 ohms-m

De este análisis se concluye, tentativamente, un valor de T.D.S. \approx 355 P.P.M. que representa agua de buena calidad menor al limite máximo (500 P.P.M. de T.D.S.) establecido para uso doméstico.

IV.3.2. EJEMPLO # 2

La fig(4.7) presenta un registro S.P. y de Resistividad corridos en forma simultánea dentro de un pozo.

De acuerdo a las características de las curvas se distinguen, básicamente, dos zonas de estudio; "A" y "B" .

En la zona "A" se observa que la curva presenta una deflexión hacia el lado positivo (+) de la línea base , lo que significa que la resistividad del agua de la formación R_w es más grande que el filtrado del lodo ($R_w > R_{mf}$). Las curvas de resistividad confirman lo anterior; la normal-corta muestra una baja resistividad en la zona invadida mientras la sonda inversa ó lateral da valores altos de resistividad para la zona virgen producto de la arena con agua dulce.

El comportamiento de las curvas (S.P. y Resistividad) cambia significativamente a medida que aumenta la profundidad del pozo.

En la zona "B" la curva S.P. presenta una deflexión (-) lo que implica un cambio en la composición química del agua y de la resistividad ($R_w < R_{mf}$).

Esto se comprueba con las curvas de resistividad, la inversa tiene un valor menor que la normal-corta debido a la presencia de arena con agua salada en la zona virgen.

De acuerdo al análisis del registro la salinidad del agua contenida en la formación se incrementa con la profundidad, pasando de agua dulce a salada.

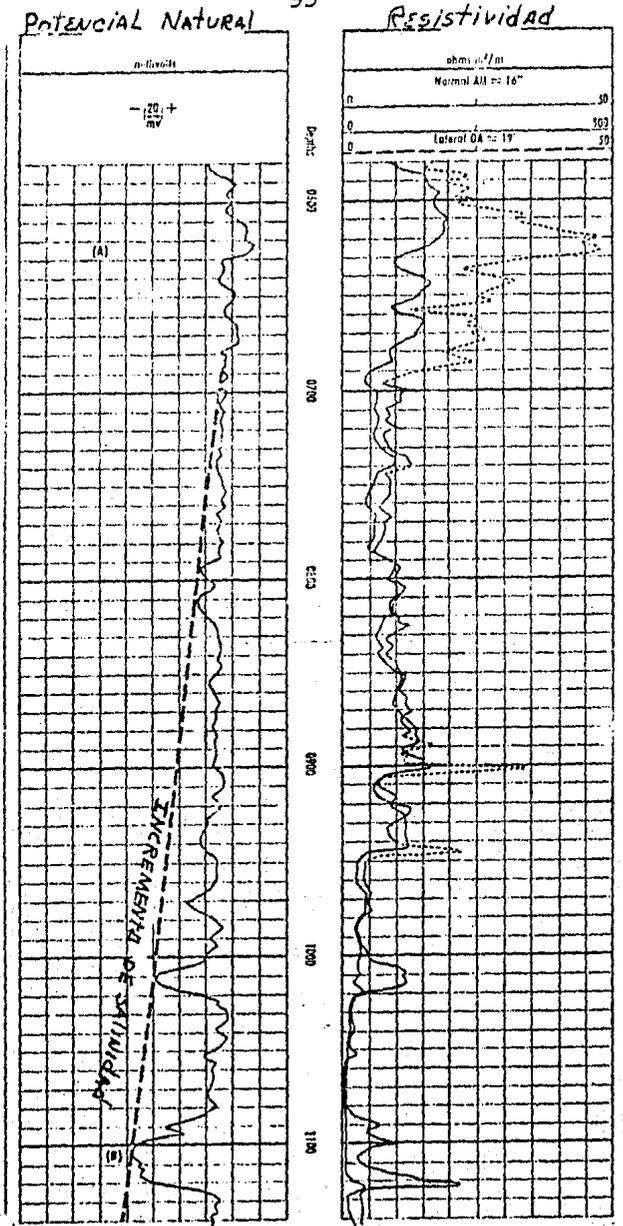


Fig. 4.7 Registro S.P. y Resistividad. Ref (3).

IV.3.3. EJEMPLO # 3

La Fig. (4.8) presenta una parte del registro eléctrico (S.P., Resistividad) corrido en un pozo con fines geohidrológicos. Ref (2).

Con el estudio geológico de la zona y las características de las curvas del registro se establecieron los límites de las capas y su correspondiente litología la cual se presenta en la siguiente tabla:

<u>INTERVALO</u>	<u>S.P.</u>	<u>RESISTIVIDAD</u>	<u>LITOLOGIA</u>
230-260	Moderado	Alta	Clasticos Gruesos
260-288	Alto	Alta	Basaltos Fracturados
288-300	Moderado	Alta	Gravas y Gravillas

Con el analisis de la curva S.P. y resistividad se establecieron las zonas de mayor interés con posibilidades de captación para agua:

230-260 m. La curva S.P. y de resistividad (inversa) reflejan la presencia de material mas grueso con agua menos salada que el lodo de perforación ($R_w > R_{mf}$).

260-290 m. Las altas resistividades y la curva S.P. reflejan la presencia de agua contenida en rocas mas densas en su conjunto, en los ultimos metros - las curvas sugieren la presencia de material - mas fino.

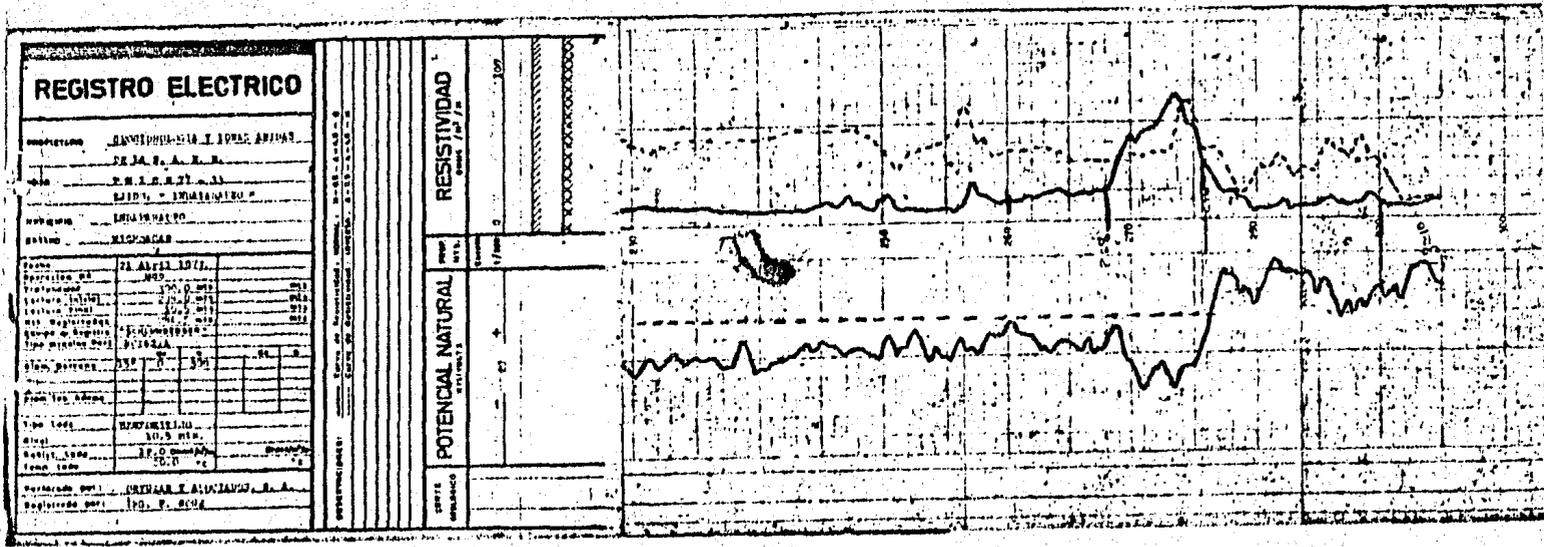
De acuerdo a la curva de resistividad, la zona virgen contiene agua menos salada que el lodo, es decir $R_w > R_{mf}$, - bajo estas condiciones la curva de S.P. en el intervalo de 268-276 m deberia de tener una deflexión (+) sin embargo es negativa.

Los valores altos de resistividad y la deflexión de la - curva S.P. hacia el lado negativo (-) nos indican que el agua contenida en la formación no es una solución de NaCl, por lo que el comportamiento del S.P. no corresponde a lo establecido.

Lo anterior se pudo comprobar con el análisis químico del agua que reportó lo siguiente:

Agua potable con inconvenientes en bicarbonatos, cuyo análisis a 30°C es:

Ca = 36.07	CO ₃ = 0
Mg = 21.88	HCO ₃ = 268.44
Na = 39.10	SO ₄ = 28.81
K = 11.70	CL = 17.72
T.D.S. = 320 P.P.M.	



Debido a que en el agua no predomina el NaCl la ecuación (2.5.8) no puede aplicarse ya que produce resultados erróneos.

En forma ilustrativa el valor del S.P. lo podemos calcular utilizando la ecuación (4.2.2) cuando las concentraciones de Mg, Ca, y Na son considerables.

Del análisis químico conocemos:

Na=36.07 p.p.m.

Ca=21.88 "

Mg=39.10 "

de la fig. (4.9.) 36.07 p.p.m Ana= .0018 y si Ca+Mg=58 obtenemos $Ana + \sqrt{Aca + Amg} = 0.0308$ entonces $(Aw) = 0.0308$ Por otro lado del registro tenemos que $Rm = 12$ ohms a $20^\circ C$ entonces $Rm = 9.6$ ohms a $25^\circ C$ y $Rmf = 0.75 Rm = 7.2$ ohms si utilizamos la fig.(4.10) obtenemos $(Amf) = 0.01$ entonces

$$SP = -84 \text{ Log } (Aw)/(Amf)$$

$$SP = -84 \text{ Log } (0.0308/0.01) = -40.07 \text{ mv}$$

este valor corresponde, aproximadamente, al valor promedio de S.P. que se presenta en el registro en los intervalos de interes.

Para obtener valores cuantitativos a partir del S.P. tendríamos que haber encontrado relaciones empíricas entre $Rw-Rwe$ y T.D.S. como las de las figuras 4.1 y 4.2 para el pozo es-

tudiado.

El corte geológico, los registros eléctricos y la localización de las pérdidas de lodo, señalan que las rocas fracturadas que se encuentran a partir de los 260 m de profundidad, presentan las condiciones mas favorables en permeabilidad y que la parte inferior de del relleno tambien puede ser favorable por la presencia de material de grano grueso. Considerando lo anterior se decidió entubar el pozo con ce-dazo "Filmont" (250 mm) de 246 a 300 m y con tubería ramura da (355 mm) de 91 a 260 m.

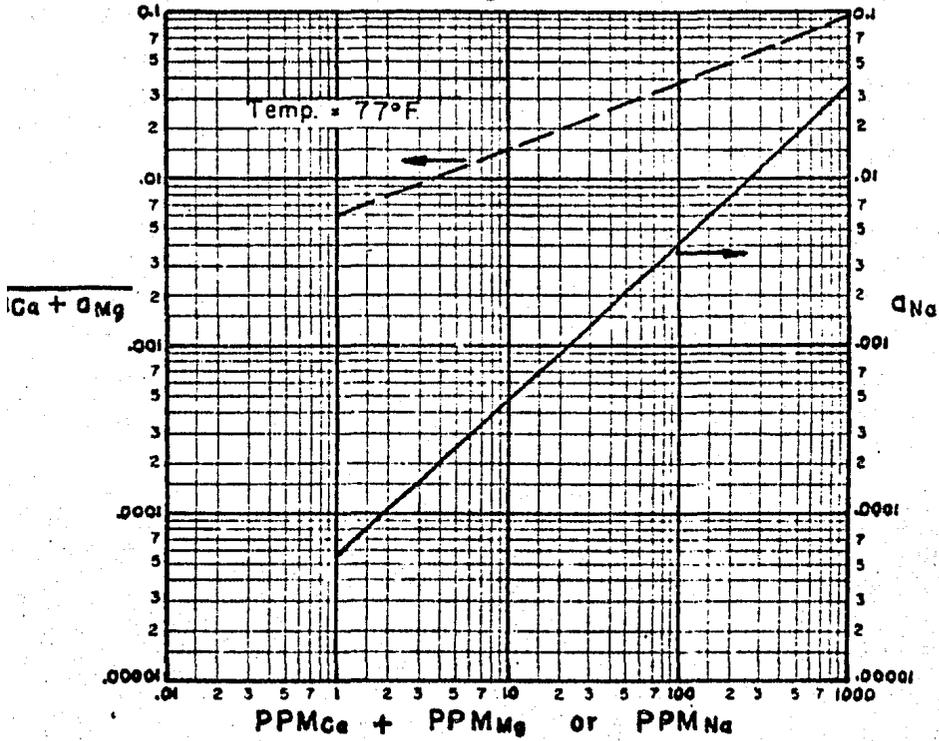


Fig. 4.9. Concentración de cationes v.s. actividad para soluciones diluidas a 25°C. Ref.(9).

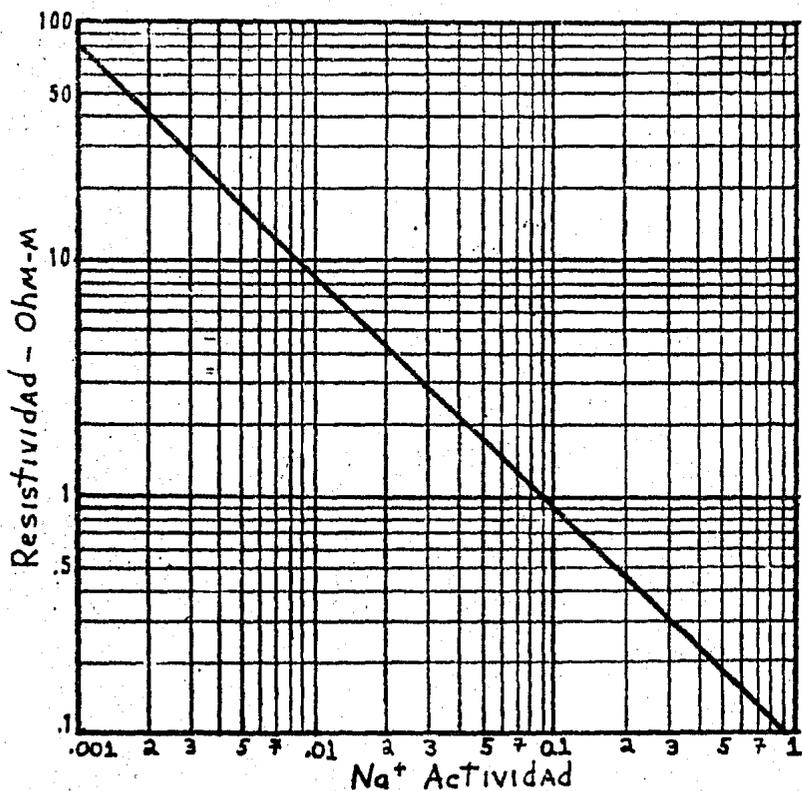


Fig. 4.10. Actividad del sodio en función de la resistividad de una solución de NaCl. Ref.(9).

IV.3.4. EJEMPLO # 4

La Fig.(4.11)muestra una parte de un registro eléctrico (S.P. y Resistividad) y un registro radioactivo (Rayos Gamma, Neutrón-Gmm) corridos en un pozo para fines geohidrológicos.Ref.(2).

Con las características de las curvas (S.P., Resistividad, Gamma y Neutron) y con ayuda del estudio geológico de la zona se establecieron los límites y su correspondiente litología la cual se presentan en la siguiente tabla:

<u>INTERVALO</u>	<u>S.P.</u>	<u>RESISTIVI- DAD</u>	<u>RAYOS GAMMA</u>	<u>NEUTRON</u>	<u>LITOLOGIA</u>
120-126 m	Nulo	Baja	Alto	Bajo	Arcillas de - origen lacus- tre.
126-220 m	Varia ble. (-)	Alta	Baja	Varia ble.	Basaltos y Andesitas.Pre sentan una - estructura ma siva hasta una estructura ve sicular y frác turada.

- Interpretación Cuantitativa

Con el análisis integral de los registros de pozos se establecieron las zonas de mayor interés con posibilidades de producir agua:

128 - 134 m

136 - 142 m

150 - 159 m

170 - 180 m

En estos intervalos las curvas se comportan de la siguiente manera:

S.P. Presenta desviaciones hacia el lado izquierdo (-) de la línea base, lo que sugiere la presencia de agua en las formaciones cuya resistividad es menor que el lodo de perforación ($R_{mf} > R_w$)

RESISTIVIDAD. Las resistividades que se presentan - son altas producto del agua contenida en los - poros. La normal-larga es mas pequeña que la normal-corta debido a que $R_{mf} > R_w$.

RAYOS GAMMA. El registro gamma muestra valores bajos de intensidad debidas a la baja radioactividad de las rocas y a la ausencia de arcilla en las formaciones.

NEUTRON GAMMA. En los intervalos indicados el registro neutron muestra valores bajos de intensidad debidos a la presencia de H_2O en las formaciones lo que retiene las emisiones de radiación.

Calculo de R_w

Aplicando la Ec. (4.3.1) para $K=70$ y $R_{mf}= 58$ ohms-m y utilizando la Fig. 4.2. obtenemos la siguiente tabla.

<u>INTERVALO</u>	<u>SP</u>	<u>R_w</u>
128-134 m	- 12.5	38.4
136-142 m	- 11.0	40.
150-159 m	-13.0	37.81
170-180 m	- 10.0	41.74

Obteniendo un promedio tenemos:

$$R_w \approx 40 \text{ ohms-m y T.D.S.} = 125 \text{ p.p.m.}$$

Por otro lado el análisis químico practicado en el pozo reporta:

Agua potable de baja salinidad y baja en sodio - con un T.D.S. = 141 p.p.m.

Se puede observar, Comparando resultados, que el obtenido por el medio del S.P. es una aproximación muy aceptable al valor real de T.D.S.

E.R.Y.E.S.A.

REGISTRO RAYOS GAMMA NEUTRON

COMPANIA S.A. 115 MICAS
 P.O. BOX 10000 BY 10000
 CAMPO Y 10000
 MUNICIPIO
 ESTADO

TIPO DE SUELO SUELO
 TIPO DE VEGETACION VEGETACION
 TIPO DE CULTIVO CULTIVO
 TIPO DE USO USO

TIPO DE INSTRUMENTO INSTRUMENTO
 TIPO DE BATERIA BATERIA
 TIPO DE CABLE CABLE
 TIPO DE FILTRO FILTRO

TIPO DE OPERACION OPERACION
 TIPO DE AREA AREA
 TIPO DE AREA AREA
 TIPO DE AREA AREA

TIPO DE AREA AREA
 TIPO DE AREA AREA
 TIPO DE AREA AREA
 TIPO DE AREA AREA

TIPO DE AREA AREA
 TIPO DE AREA AREA
 TIPO DE AREA AREA
 TIPO DE AREA AREA

DATOS DEL EQUIPO
 SERIE
 MODELO
 FABRICA
 TIPO DE BATERIA
 TIPO DE CABLE
 TIPO DE FILTRO
 TIPO DE OPERACION
 TIPO DE AREA
 TIPO DE AREA
 TIPO DE AREA
 TIPO DE AREA

DATOS DEL NEUTRON
 TIPO DE SUELO
 TIPO DE VEGETACION
 TIPO DE CULTIVO
 TIPO DE USO
 TIPO DE INSTRUMENTO
 TIPO DE BATERIA
 TIPO DE CABLE
 TIPO DE FILTRO
 TIPO DE OPERACION
 TIPO DE AREA
 TIPO DE AREA
 TIPO DE AREA
 TIPO DE AREA

VALORES DE RESISTIVIDAD
 SERIE
 MODELO
 FABRICA
 TIPO DE BATERIA
 TIPO DE CABLE
 TIPO DE FILTRO
 TIPO DE OPERACION
 TIPO DE AREA
 TIPO DE AREA
 TIPO DE AREA
 TIPO DE AREA



E.R.Y.E.S.A.

REGISTRO ELECTRICO

COMPANIA S.A. RESISTIVIDAD
 P.O. BOX 10000 BY 10000
 CAMPO Y 10000
 MUNICIPIO
 ESTADO

TIPO DE SUELO SUELO
 TIPO DE VEGETACION VEGETACION
 TIPO DE CULTIVO CULTIVO
 TIPO DE USO USO

DATOS DEL EQUIPO
 SERIE
 MODELO
 FABRICA
 TIPO DE BATERIA
 TIPO DE CABLE
 TIPO DE FILTRO
 TIPO DE OPERACION
 TIPO DE AREA
 TIPO DE AREA
 TIPO DE AREA
 TIPO DE AREA

DATOS DEL NEUTRON
 TIPO DE SUELO
 TIPO DE VEGETACION
 TIPO DE CULTIVO
 TIPO DE USO
 TIPO DE INSTRUMENTO
 TIPO DE BATERIA
 TIPO DE CABLE
 TIPO DE FILTRO
 TIPO DE OPERACION
 TIPO DE AREA
 TIPO DE AREA
 TIPO DE AREA
 TIPO DE AREA

VALORES DE RESISTIVIDAD
 SERIE
 MODELO
 FABRICA
 TIPO DE BATERIA
 TIPO DE CABLE
 TIPO DE FILTRO
 TIPO DE OPERACION
 TIPO DE AREA
 TIPO DE AREA
 TIPO DE AREA
 TIPO DE AREA

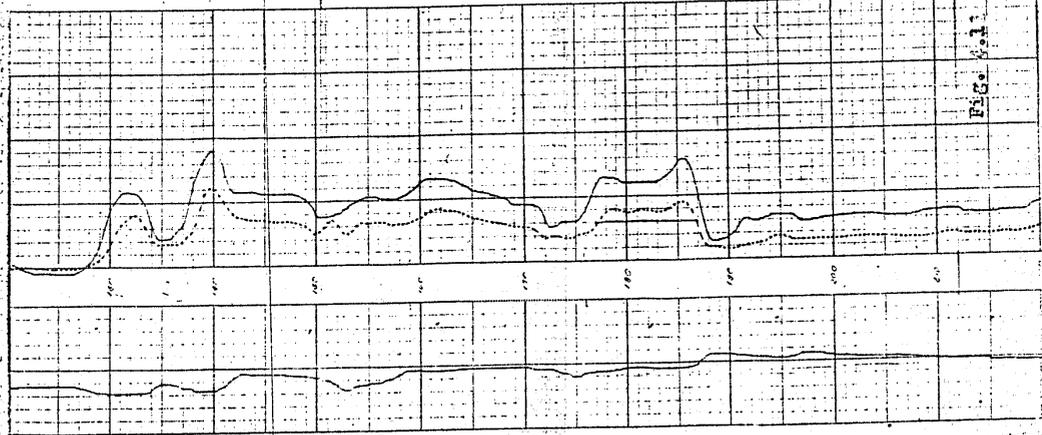


FIG. No. 1

De la correlación e interpretación del corte geológico - y los registros de pozos se llegó a la conclusión de que los derrames lávidos que se encuentran entre los 126-220 m son favorables para la captación de agua de muy buena calidad por lo que se decidió colocar en este intervalo la - sección principal de captación.

CAPITULO V

V. CONCLUSIONES

Los Registros de pozos son una parte indispensable en las exploraciones y deben efectuarse en todos los pozos que sea posible. En los últimos años se les ha considerado como una parte integrante de los trabajos de exploración, explotación y cuantificación de los recursos hidráulicos subterráneos.

La introducción de los Registros en los trabajos de exploración y evaluación de pozos es uno de los caminos más efectivos para elevar la calidad de los estudios geohidrológicos y reducir los gastos. En las investigaciones geohidrológicas se utilizan muchos recursos económicos, por lo cual el ahorro tiene gran importancia, los registros contribuyen en ello ya que representan entre el 10% y 20% del costo total de un pozo terminado.

Los Registros Eléctricos (S.P., Resistividad y Sonda Monoelectrónica) son los que tienen mayor uso actualmente en México, por su fácil operación y bajo costo.

Los Registros Radioactivos, con excepción del Registro de Rayos Gamma, se utilizan pocas veces debido al peligro que existe en el manejo de fuentes radioactivas y la posible contaminación de los acuíferos. Sin embargo con personal capacitado y tomando las precauciones debidas pueden aportar

una ayuda considerable en el estudio de las aguas subterráneas,

Por otro lado la Industria Petrolera es la que se ha encargado del desarrollo de los equipos y de la interpretación de los registros utilizados a la fecha, por lo que algunas herramientas tienen costos muy elevados ya que el producto que se obtiene (Petroleo, Gas, Aceite) justifica las grandes inversiones.

Cuando los registros se aplican a pozos para agua el costo del equipo y servicios se reduce, es por ello que existen pocas compañías especializadas que brinden estos servicios ya que las ganancias comparadas con las obtenidas en la exploración petrolera, son mucho menores.

La interpretación de los resultados se ha desarrollado para formaciones sedimentarias porque es en éstos donde se encuentran la mayoría de los pozos petroleros, no así en Geohidrología donde los acuíferos se pueden localizar en diferentes tipos de terrenos. Por lo cual es necesario realizar nuevas investigaciones para poder extender su uso.

El uso de los registros en pozos terminados tiene un campo muy amplio de aplicaciones, tanto en la explotación de los acuíferos como en el mantenimiento de los pozos.

A continuación mencionaremos, brevemente, algunas de las herramientas más utilizadas para dichos fines:

- Registro de velocidad. Determina el movimiento vertical del fluido que llena el pozo bajo condiciones de bombeo ó reposo. Permite examinar el reacondicionamiento del pozo.
- Registro de resistividad del fluido. Es una herramienta que se utiliza en pozos recién terminados y nos permite determinar el contenido total de sólidos disueltos del agua en diferentes capas.
- Registro de temperatura. Permite detectar los movimientos de fluidos en agujeros abiertos, trazar zonas de pérdida de filtrado de lodo y localizar la parte superior del cemento después de la operación de cemento.

Existen sondas que tienen integradas una televisión que se introduce en el pozo y que permite observar directamente las condiciones que guarda internamente el pozo.

Otra herramienta utilizada es el registro conocido como "Sonar Jet", que permite reacondicionar el pozo.

Existen pocos profesionistas como Geólogos, Geohidrólogos, que conocen y utilizan los registros en sus proyectos, esto ha motivado su poca difusión y en algunos casos su mal uso ya que los registros son un conjunto de técnicas que no deben interpretarse en forma individual sino en forma conjunta, de lo contrario se cometen graves errores en su evaluación.

Los profesionales dedicados al estudio del agua subterránea deben ser instruidos sobre las ventajas de estas técnicas. Así mismo los registros para agua deben adaptar sus equipos e interpretaciones a los requerimientos de la Geohidrología aprovechando la experiencia y capacidad adquirida en la Industria Petrolera.

Debido a la problemática escases de agua en algunas regiones y ciudades del país, los registros adquieren cada vez mayor importancia en la solución de problemas geohidrológicos diversos y su utilización deberá incrementarse en un futuro inmediato.

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

1. APLICATIONS OF ELECTRICAL AND RADIOACTIVE WELL LOGGIN
TO GROUND WATER HIDROLOGY
PATTEN E.P. Y BENNETT G.D.
U.S. GEOL. SURVEY WATER SUPPLY PAPER 1544-D.1963
2. ESTUDIO GEOHIDROLOGICO PRELIMINAR DE LA ZONA MORELIA
QUERENDARO MICHOACAN
SARH. DIR. GRAL. DE GRANDE IRRIGACION.1977
3. EYEBALLING THE OLD ELECTRIC LOG
KING E.E. Y FERL W.H.
THE OIL AND GAS JOURNAL.NOV.1978
4. GEOPHYSICAL WELL LOGGIN FOR GEOHIDROLOGICAL PURPOSES
IN UNCONSOLIDATED FORMATIONS
GROUND WATER SURVEY TNO
TECHNICAL INFORMATION SERVICE.U.S.1976
5. GEOFISICA APLICADA A LA HIDROGEOLOGIA
ASTIER J.L.
PARANINFO.1982
6. GEOPHYSICAL LOGGING FOR MINERAL AND ENGINEERING
APPLICATIONS
HALLENBURG J.K.
PENNWELL BOOKS.1984
7. GROUND WATER HYDROLOGY
TODD D.K.
JOHN WILEY AND SONS INC.1973
8. HIDROLOGIA SUBTERRANEA
CUSTODIO E. Y RAMOS M.
TOMO I.OMEGA.1976

9. INTERPRETATION OF ELECTRIC LOGS IN FRESH WATER WELL IN UNCONSOLIDATED FORMATIONS.
ALGER, R.P. 1966
S.P.E. REPRINT SERIES, No. 1
WELL LOGGING S.P.E. OF AIME. 1971.
10. LOG
INTERPRETATIONS FUNDAMENTALS
DRESSER ATLAS DIVISION. 1975.
11. LOS REGISTROS GEOFISICOS DE POZOS COMO UNA HERRAMIENTA EN LA EVALUACION DE ACUIFEROS
ING. F.A. ARROYO CARRASCO
ING. F.J. ROIG SAMPEDRO
DEPARTAMENTO DE GEOFISICA, FAC. INGENIERIA, UNAM.
12. METODOLOGIA DE LAS INVESTIGACIONES HIDROGEOLOGICAS
P.P. KLIMENTOV Y U.M. KONONOV.
MIR. MOSCU. 1982.
13. NOTAS PARA LA INTERPRETACION DE REGISTROS EN POZOS DE AGUA.
ING. LUIS LARA TRUJILLO.
CURSO DE PERFORACION DE POZOS PARA AGUA.
EDUCACION CONTINUA, FAC. INGENIERIA, UNAM. 1983.
14. PROSPECCION Y EXPLOTACION DE LAS AGUAS SUBTERRANEAS.
CASTANY, G.
OMEGA, 1975.
15. REGISTROS DE POZOS
PARTE I, TEORIA E INTERPRETACION
ORLANDO GOMEZ RIVERO. 1975.
16. TECHNIQUES FOR QUALITY-OF-WATER INTERPRETATIONS FROM CALIBRATED GEOPHYSICAL LOGS. ATLANTIC COASTAL AREA.
DONALD I. BROWN
GEOLOGICAL SURVEY. WATER RESOURCES DIV. 1971.

17. THE S.P. LOG: THEORETICAL ANALYSIS AND PRINCIPLES
OF INTERPRETATION.
DOLL, H.G.
I.M.M.E TECHNICAL PUBLICATIONS, 2463, 1948

18. WELL LOGGING IN GROUND-WATER HYDROLOGY
W. SCOTT KEYS
SOCIETY OF PROFESSIONAL WELL LOG ANALYSTS
U.S. GEOLOGICAL SURVEY. 1967.