

Universidad Nacional de Ingeniería
Programa Académico de Ingeniería de Petróleo
y Petroquímica

Uso de la Computación Digital y los Perfiles
Eléctricos en la Determinación
de Arenas con Hidrocarburos

TESIS PROFESIONAL
para optar el Título de Ingeniero de Petróleo

RAUL A. PALACIOS COSSI

L I M A - P E R U 1 9 7 2

C O N T E N I D O

USO DE LA COMPUTACION DIGITAL Y LOS PERFILES ELECTRICOS

EN LA DETERMINACION DE ARENAS CON HIDROCARBUROS

	<u>Pag.</u>
1.-Capítulo I	1
1.1 Introducción.....	1
2.-Capítulo II	4
2.1 Teoría del Método.....	4
2.1.1 Datos Iniciales.....	8
2.1.2 Temperatura de Formación Th.....	9
2.1.3 Resistividad del Filtrado de Lodo Rmf...10	
2.1.4 Resistividad del Agua de Formación Rw...12	
2.1.5 Resistividad de la Costra de Lodo Rmc...16	
2.1.6 Resistividad de la Zona Lavada Rxo.....17	
2.1.7 Resistividad de la Formación.....23	
2.1.7.1 Formación Saturada con Hidrocar- buros y agua de Formación Rt....23	
2.1.7.2 Formación 100% Saturada con Agua de Formación Ro.....23	
2.1.8 Factor de Resistividad de Formación F...24	
2.1.9.Porosidad \emptyset	24
2.1.10 Indice de Resistividad RI.....26	
2.1.11 Saturación de Agua Sw.....27	
2.1.12 Reservas de Petroleo N.....28	
3.-Capítulo III	
3.1 Datos de Campo.....	30

	<u>Pag.</u>
4.-Capítulo IV	39
4.1 Formulación del Programa En Lenguaje Fortran IV	39
4.1.1 Concepto de Programa.....	39
4.1.2 Proposiciones.....	42
4.1.3 Constantes; Entera y Real.....	43
4.1.4 Variables; Entera y Real.....	43
4.1.5 Operaciones.....	44
4.1.6 Funciones.....	44
4.1.7 Transferencia de Control.....	48
4.1.8 Dimension.....	49
4.1.9 Proposición DO.....	50
4.1.10 Lectura-Impresión.....	52
4.1.11 Proposiciones STOP y END.....	54
4.1.12 Diagrama de Flujo.....	54
4.1.13 Codificación.....	62
4.1.14 Nomenclatura.....	66
5.-Capítulo V	69
5.1 Análisis de los Resultados.....	69
6.-Capítulo VI	72
6.1 Conclusiones.....	72
Apéndice.....	74
Bibliografía.....	78

C A P I T U L O I

I N T R O D U C C I O N

La interpretación de perfiles de pozos, implica el uso frecuente de gráficos y ecuaciones, por lo que, es posible efectuar programas para computadoras digitales que permitan un rápido y completo análisis de los registros para tomar las decisiones de exploración y producción.

Las computadoras pueden ser usadas para la interpretación de perfiles de pozos por el siguiente procedimiento:

- a) Digitización de los datos del perfil
- b) Preparación ó diseño de los programas para procesar los datos
- c) Análisis y evaluación de los resultados.

El programa tiene una utilidad primaria que es la de realizar una gran cantidad de trabajo con muy poco esfuerzo físico del hombre.

El mayor gasto se realiza en la digitización de los perfiles, ya que todos los datos de entrada deben estar en forma digital, en este caso en tarjetas perforadas.

En la preparación de los programas se sigue un proceso numérico, definido con precisión de operaciones con la computadora. Primariamente, la secuencia de operaciones se escribe en forma gráfica en un diagrama de flujo, luego este procedimiento se establece en un lenguaje que pueda ser entendido por la computadora.

El lenguaje aquí empleado es el conocido como FORTRAN (Formula Translation). El programa sigue un proceso análogo a la interpretación normal; una persona que interpreta perfiles, busca que discriminar entre estratos ó capas porosas y no porosas; luego, aplica técnicas cuantitativas ó cualitativas para evaluar las posibilidades productivas de estas capas, y así selecciona la zona(s) más promisorias(s).

Partiendo del cálculo de la resistividad del agua de formación, el programa llega a computar la porosidad y la saturación relativa de hidrocarburos dentro de la capa u horizonte en cuestión, luego hace un ranking en orden de interés decreciente.

El cálculo de la saturación relativa de hidrocarburos, se realiza a través del método del Índice de Resistividad, el cual da resultados provechosos. En este método una razón de resistividad es computada para cada zona porosa de interés penetrada por un pozo. Cuando mayor sea la razón, ó índice, para una zona particular en el pozo, mayor es la probabilidad de que la zona contenga petróleo ó gas.

Como sabemos, los resultados dados por la computadora no constituyen siempre una respuesta final al problema. Luego se deben interpretar estos resultados para ver lo que significan en términos de las combinaciones de metas que deben satisfacer el sistema propuesto. Entonces la computadora no puede por

no puede por si misma resolver el problema, ya que sigue solamente el procedimiento de computación definido; siendo así, que a pesar de que la computadora es más exacta y rápida que un humano no puede decidir como proceder con los resultados. Luego el analista debe analizar y evaluar los resultados y, hacer las decisiones finales basado en su juicio y experiencia.

Se han tomado como ejemplo los perfiles que se corrieron en los pozos RPC-1 y RPC-2; ellos son: perfil eléctrico y micro-perfil que contienen las siguientes curvas: Potencial Espontáneo (SP), normal corta de 16" lateral de 18'8", micro-inversa de 1*1 y micro-normal de 2".

Se ha usado la computadora IBM tipo 360/40 y el compilador WATF IV de la Universidad Nacional de Ingeniería.

(WAT-WATERLOO, Ontario, Canadá)
(F IV - Fortran IV)

C A P I T U L O I I

T E O R I A D E L M E T O D O

La teoría aquí expuesta trata de llegar a un método capaz de ayudar al analista de perfiles a tomar decisiones más seguras. Un diagrama de flujo del método es mostrado en la fig. 1, en la cual podemos apreciar que el objetivo primordial es llegar a la determinación de un índice que nos sirva para tales evaluaciones. Para ello es necesario hallar ó tener disponibles los siguientes parámetros:

- Datos iniciales ó básicos (explicados posteriormente)
- Temperatura de cada horizonte por analizar $T_H (^{\circ}F)$
- Resistividad del filtrado de lodo $R_{mf}(\text{ohm-m})$
- Resistividad del agua de formación $R_w(\text{ohm-m})$
- Resistividad de la zona lavada $R_{x}(\text{ohm-m})$
- Resistividad de la costra de lodo $R_{mc}(\text{ohm-m})$
- Resistividad de la formación:
 Saturada con agua de formación $R_o(\text{ohm-m})$
 verdadera $R_t(\text{ohm-m})$
- Factor de formación F
- Porosidad

Una vez obtenidos estos parámetros, podremos finalmente hallar el Índice de Resistividad $RI = R_t/R_o$

Como el cociente hallado implica una comparación entre las dos resistividades, es lógico suponer que si el resultado es mayor que 1.0, la formación contendrá hidrocarburos y esto es lo que nos interesa; las otras alternativas

nos sirven para comparación, ya que si el cociente es 1.0 ó menor, nos estará indicando que las dos resistividades son iguales y por lo tanto la formación será acuifera.

Los resultados son presentados en forma tabulada

Además de la discriminación que podemos hacer con los diferentes estratos, podemos realizar una investigación no muy profunda de la potencialidad de la roca en cuanto a contenido de hidrocarburos se refiere. Aquí calculamos la saturación de agua S_w y, hacemos un estimado aproximado de las probables reservas de petróleo. O sea que una vez halladas las capas más promisorias, podemos saber acerca de su riqueza petrolífera.

El método puede aplicarse a estratos de arena cuya potencia sea hasta 70 pies como máximo, ya que se emplean temperaturas promedio para cada capa y no para cada pie perforado.

Si las capas analizadas, fueran de mayor potencia, las temperaturas promedio, así como las resistividades promedio diferirán más de los valores para cada pie, consiguiendo así propiedades que no se ajustarían a lo real.

Así mismo el método utiliza ecuaciones representativas de los gráficos, que son válidas solo para lodos salinos que

tengan hasta una resistividad $R_m = 1.3 \text{ ohm-m.}$ a condiciones de superficie.

Se introducirán errores en los cálculos, si el programa es aplicado usando lodos predominantemente frescos y, como ya se mencionó, a capas muy gruesas.

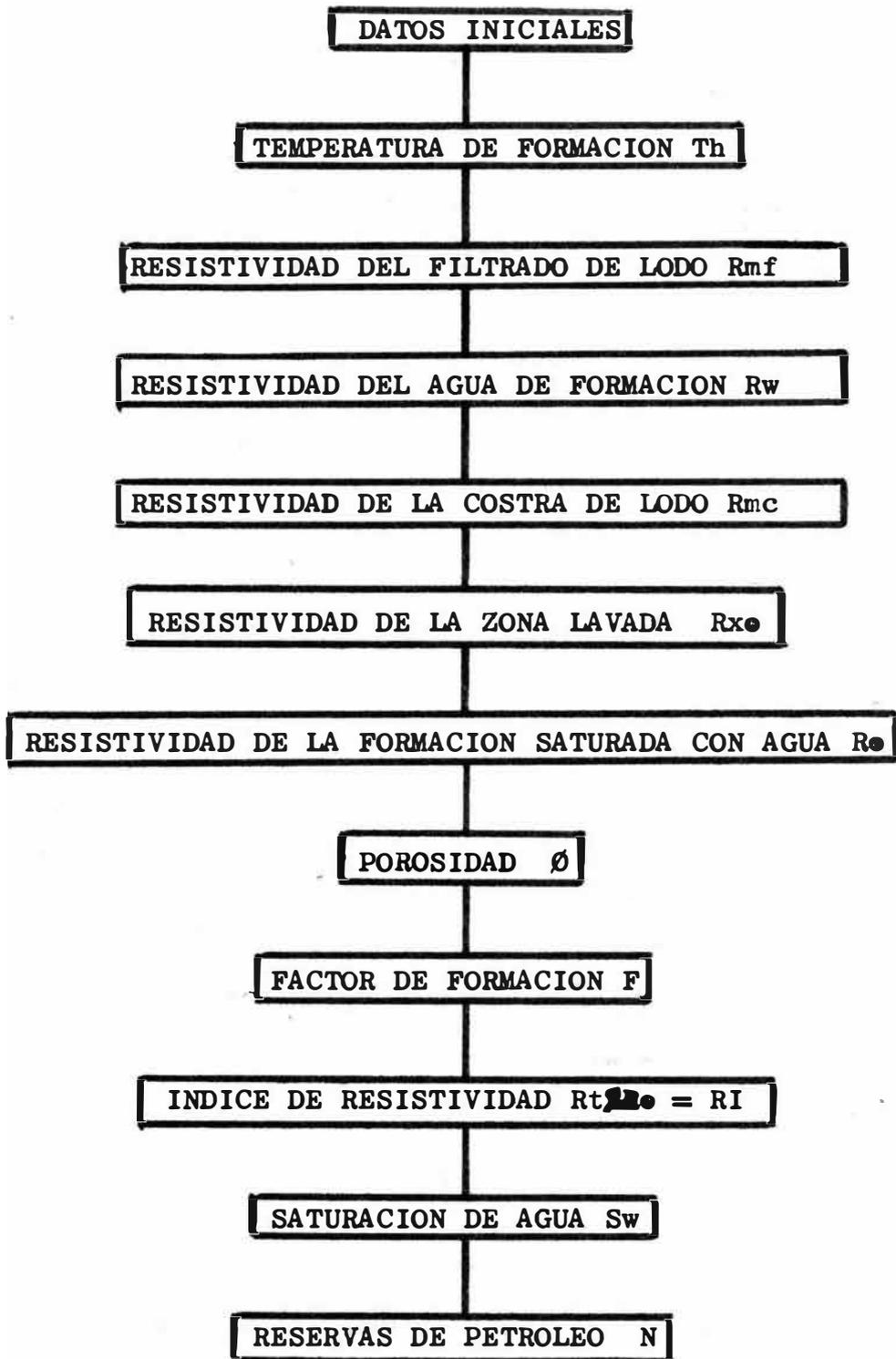


FIG. 1

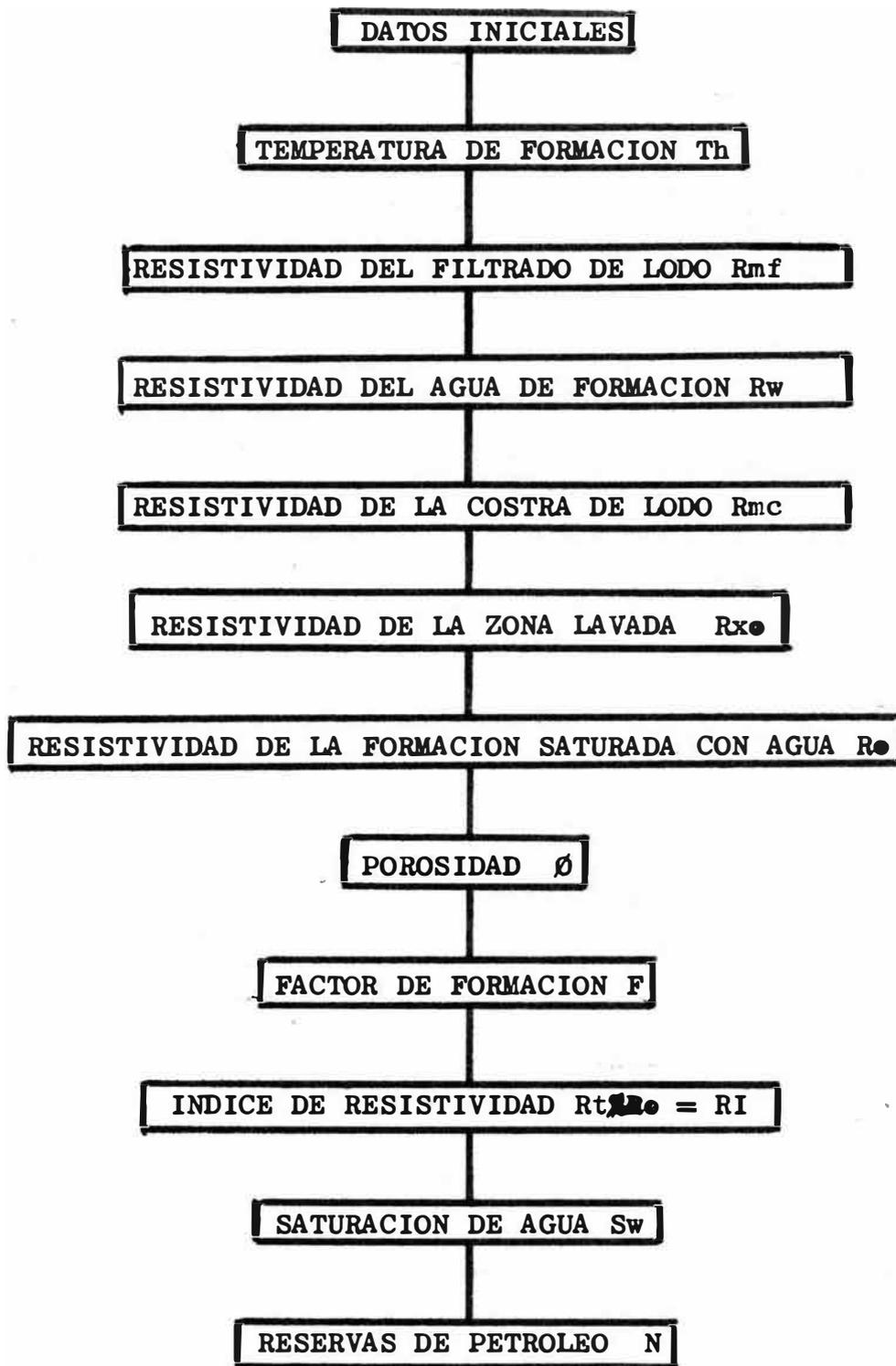


FIG. 1

DATOS INICIALES

Los datos básicos ó iniciales, necesarios en el desarrollo del programa bosquejado en la fig. 1, son obtenidos directamente de las mediciones hechas en superficie ó por herramientas dentro del pozo; ellos son:

-Temperatura del fondo del pozo	Tbh(°F)
-Profundidad total del pozo	Pt-pies
-Resistividad del filtrado de lodo en la superficie ó a la temperatura de Prof(1)	Rmf-ohm,m
-Resistividad del lodo en la superficie	Rm ohm-m
-Resistividad de la costra de lodo en la superficie ó a la temperatura de Prof(1)	Rmc ohm-m
-Temperatura de superficie	T (°F)
-Lecturas del micro-perfil: micro-inversa y micro-normal	R1"*1" R2" ohm-m
-Lecturas de la curva lateral para hallar Rt	R18'8" ohm-m
-Profundidades de cada horizonte particular	Topo Prof t pies Fondo Prof f pies
-Factor de volumen de formación original (asumido)	Bø
-Area del reservorio (asumido)	Acøe
-Número de capas por analizar	n
-Lectura de la curva de SP(pot. espont.)	Mili-volt.
-Lectura de la curva normal corta	R16" ohm-m

TEMPERATURA DE FORMACION Th

Es bien sabido que, a medida que se avanza hacia el centro de la tierra, la temperatura aumenta, esto por supuesto tambien sucede en la perforación de pozos petrolíferos.

Para nuestros cálculos posteriores, es preciso conocer la temperatura de cada zona atravesada por la broca de perforar. Para ello, existen tablas y gráficos, pero en nuestro caso necesitamos una ecuación que nos permita hallarla con ayuda de la computadora. Utilizaremos la siguiente ecuación:

$$Th = ((Tbh - 80)/Pt)*P+80 \quad (1)$$

- Donde: Th = Temperatura del horizonte particular (°F)
Tbh = Temperatura de fondo del pozo (°F)
Pt = Profundidad total del pozo (pies)
P = Profundidad del horizonte particular (pies)

El término encerrado en el paréntesis exterior, representa la gradiente geotérmica para el pozo en particular.

Con la fórmula (1) hallamos la temperatura para cada pie perforado a través de las diferentes capas y, después obtenemos una temperatura promedio para cada capa, la cual la usaremos en los subsiguientes cálculos.

RESISTIVIDAD DEL FILTRADO DE LODO Rmf

Durante la perforación de un pozo, se realiza lo que se denomina como infiltración del elemento líquido del lodo hacia las formaciones atravesadas por la broca, debido esto a la presión hidráulica del mismo fluido de perforación como a la calidad y tipo del lodo usado y a la porosidad y permeabilidad de la roca. Este fenómeno de invasión resulta en un cambio de las propiedades de la formación; sin embargo el fenómeno de invasión del filtrado de lodo es un beneficio ya que permite obtener información derivada de las zonas invadida y lavada.

Es sabido que la temperatura reduce la resistividad de los electrolitos, es por ello que es necesario convertir la resistividad de ellos medida a una temperatura (como la de superficie) a la temperatura de formación. Esto se puede conseguir con el gráfico de la fig. 2 cuya ecuación aproximada es la siguiente:

$$R_2 = R_1 * \left(\frac{T_1}{T_2} \right)^{0.986} \quad (2)$$

Donde: R_1 y R_2 son resistividades (ohm-m)

T_1 y T_2 son temperaturas ($^{\circ}$ F)

Los subíndices 1 y 2 indican dos situaciones diferentes

RESISTIVIDAD DEL AGUA DE FORMACION R_w

Existen diferentes procedimientos para hallar la resistividad del agua de formación, aquí emplearemos el método que permite la obtención de este parámetro a partir de la curva de Potencial Espontáneo (SP).

La composición y salinidad del agua de formación es altamente variable. Esta variación depende de la profundidad y temperatura. Un buen conocimiento de las resistividades del agua de formación es básico para la interpretación de perfiles eléctricos. Si bien la curva SP da un medio para su determinación, sería conveniente (y tómese esto como una recomendación) verificar sus valores a partir de muestras representativas.

Las aguas de formación son buenos conductores de la electricidad, por virtud de las sales ionizadas que contienen en solución. Bajo la aplicación de un potencial eléctrico a un electrolito, los iones migran hacia el electrodo de polaridad opuesta a sus cargas respectivas.

En la deducción de R_w de la curva SP, el componente electrocinético de la curva SP generalmente puede dejarse de lado. El SP estático es considerado igual al potencial electroquímico y es relacionado a las actividades químicas a_w y a_{mf} del agua de formación y el filtrado de los por la siguiente fórmula:

$$\boxed{SSP = K \cdot \log(a_w/a_{mf})} \quad (3)$$

Para soluciones de ClNa que no son muy concentradas, las resistividades son inversamente proporcionales a las actividades, sin embargo es justo aclarar que esta proporcionalidad no se mantiene exactamente para concentraciones demasiado altas ó para todos los tipos de agua. Entonces de acuerdo a esto la ecuación (3) se convierte en:

$$\boxed{SSP = E_c = K \cdot \log(R_{mf}/R_{we})} \quad (4)$$

Donde: E_c = Componente electroquímico del SP (mv.)

Resistividad del agua de formación (equivalente) (ohm-m)

R_{mf} = Resistividad del filtrado de lodo (ohm-m)

K = Coeficiente que varía directamente con la temperatura absoluta.

Se sabe que $[E_c - E_m + E_j]$ ó mejor dicho que la e.m.f. es la suma del potencial de membrana y el potencial de contacto de líquidos. Previas experiencias han demostrado que:

$$E_m = 59.15 \cdot \log(R_{mf}/R_w) \quad \text{y}$$

$$E_j = 11.5 \cdot \log(R_{mf}/R_w) \dots \dots \dots (\text{Refer. 10})$$

$$\boxed{E_c = 70.65 \cdot \log(R_{mf}/R_w)} \quad \text{a } 77^\circ \text{F} \quad (5)$$

Para otras temperaturas el valor de K puede ser hallado de:

$$K = 70.65 \left(\frac{460 + t}{537} \right) \quad (6)$$

Donde: t = temperatura (°F)

De la ecuación (4) obtenemos por despeje:

$$R_{we} = R_{mf} * 10^{-E_c/K} \quad (7)$$

R_{we} es la recíproca de la actividad a_w , siendo la solución en cuestión ClNa puro; pero esto en la práctica, mejor dicho en las aguas de formación no es tal, por lo que se ha tratado a través de muchísimas experiencias, relacionar R_{we} vs. R_{wt} (R_{wt} es la resistividad verdadera del agua de formación), llegando a relacionarlas mediante el gráfico de la fig. 2A cuya ecuación aproximada es:

$$R_{we} = 0.93 (R_{wt} + 0.03 (75/t)) \quad (7A)$$

Donde t es la temperatura de formación (°F)

Para mayor exactitud, sería recomendable obtener una curva del tipo de la fig. 2A para cada locación.

RESISTIVIDAD VERDADERA
VS.
RESISTIVIDAD EQUIVALENTE

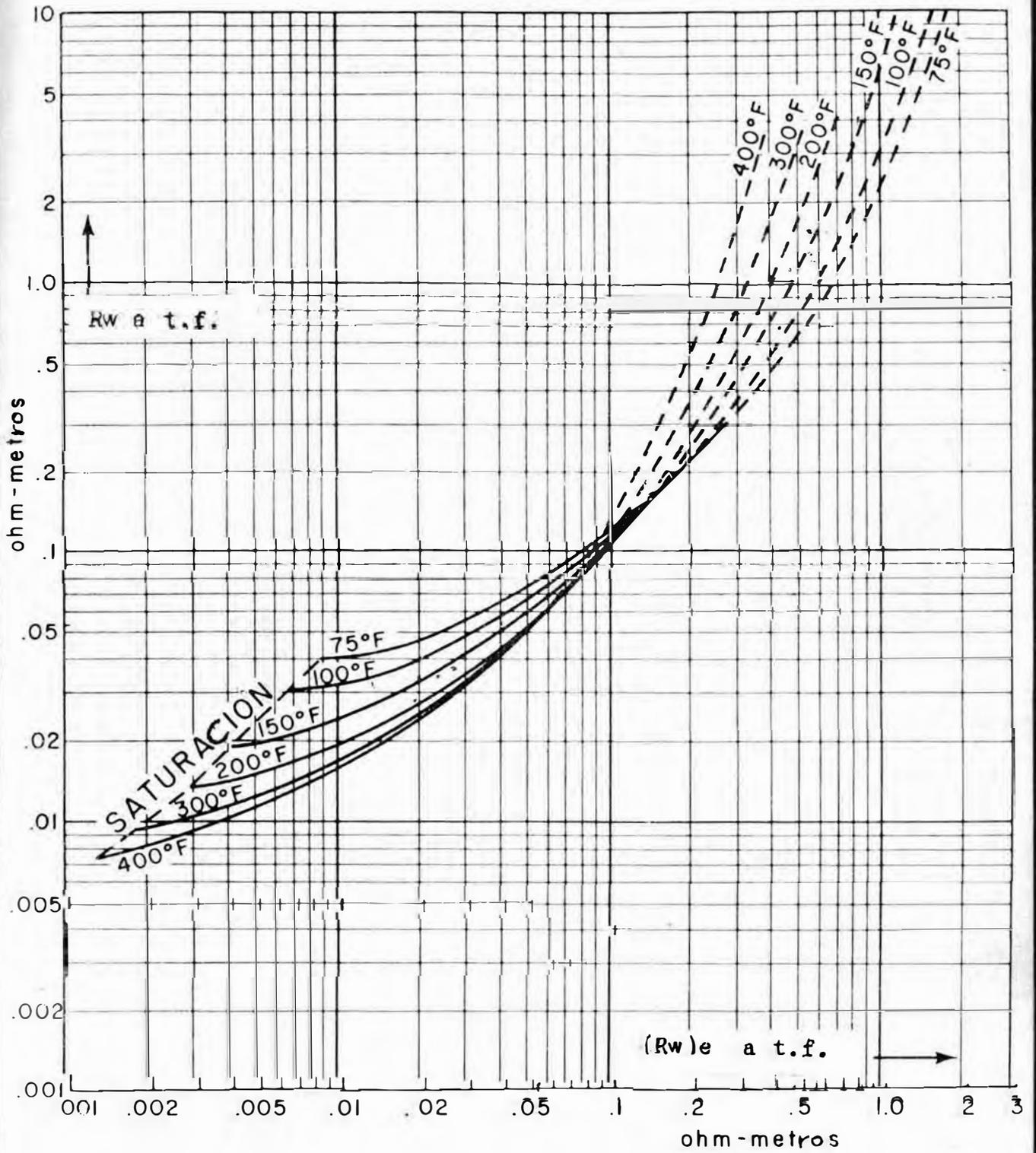


Figura 2A

RESISTIVIDAD DE LA COSTRA DE LODO Rmc

En formaciones de arena, el tamaño del pozo es generalmente el tamaño de la broca ó más pequeño. La razón de porque el tamaño del pozo puede ser más pequeño que el diámetro de la broca, es debido a que después de la extracción de la broca, una costra filtrante se forma, de manera que reduce el diámetro del pozo. Esto puede ser observado en el perfil caliper corrido en cualquier pozo.

Esto no sucede en formaciones de dolomita y caliza, pero en las que existe yeso ó anhídrita, el diámetro del pozo es generalmente mayor debido a la actividad de solución del lodo sobre estos materiales.

La resistividad de la costra de lodo es usada en este trabajo en conjunción con las lecturas de resistividad tomadas del micro-perfil para hallar la resistividad de la zona lavada Rx.

Como se mencionó anteriormente, Rmc se obtiene del registro de la Compañía de servicio y es corregida a la temperatura de formación.

RESISTIVIDAD DE LA ZONA LAVADA R_{x0}

La resistividad de la zona lavada es normalmente determinada de un perfil de tipo de contacto y espaciamento corto. Tales dispositivos están comercialmente disponibles y adoptan diferentes nombres según la compañía de servicio, así existen:

- "Microlog" _____ Schlumberger
- "Minilog" _____ Lane Wells
- "Contactlog" _____ Welex
- "Micro-survey log" _____ PGAC
- "Micro-contact log" _____ Bird Well

En el presente trabajo el "Microlog" es usado para indicar la resistividad de esta zona. Hemos dicho, que a medida que se realiza la perforación de un pozo, el agua es empujada hacia adentro por el filtrado de barro cuando se trata de formaciones acuíferas, pero cuando la formación contiene petróleo, quedará cierta cantidad de petróleo residual que no puede ser lavado por el filtrado; entonces la formación contendrá filtrado de lodo y petróleo residual, llamándose de esta manera R_{x0} la resistividad de la zona lavada en estas últimas condiciones y R_{x0s} , la resistividad de la misma zona cuando está 100% saturada con filtrado de lodo.

Para la aplicación del método del Índice de Resistividad se asume que $R_{x0} = R_{x0s}$.

La llamada zona lavada se extiende generalmente sobre una distancia mínima de aproximadamente 3 pulgadas con respecto a la pared del pozo excepto en el caso de invasión muy poco profunda. A mayor distancia de la pared del pozo, la formación no es contaminada por este filtrado y los poros se encuentran llenos con el fluido original, esto se verá más adelante.

Para la determinación de la resistividad de la zona lavada, las lecturas de la micro-inversa (1" * 1" de espaciamento) y la micro-normal (2" de espaciamento) son divididas por la resistividad del revoque ó costra de le- do R_{mc} , previamente hallada a la temperatura de formación. Estas razones son luego usadas para hallar R_x con la siguiente fórmula derivada de la fig. 3 (Referencia 4):

$$R_x = R_{mc} (\exp(0.5625 - 1;079 * \ln(1.955 - 0.06725 * Z))) \quad (8)$$

Donde: $Z = 2 * Y - X$ (9)

Y a su vez X é Y son funciones de $R_{1" * 1"}/R_{mc}$ y de $R_{2"}/R_{mc}$ respectivamente como sigue a continuación:

$$X = \exp(3.04 + 0.1052 * \ln(\frac{R_{1" * 1}}{R_{mc}} - 1)) - \exp(4.04 - 2.273 * \ln(\frac{R_{1" * 1}}{R_{mc}})) + \exp(14.65 - 7.89 * \ln(\frac{R_{1" * 1}}{R_{mc}} + 3)) + d \quad (10)$$

Para:

$$\frac{R_{1*1}}{R_{mc}} \text{ mayor que } 1.5, d = 5.05 - 3.33\left(\frac{R_{1*1}}{R_{mc}}\right) \quad (10-A)$$

Para:

$$\frac{R_{1*1}}{R_{mc}} \text{ mayor que } 1.50 \text{ pero menor que } 11, d = 0.0 \quad (10-B)$$

Para:

$$\frac{R_{1*1}}{R_{mc}} \text{ mayor que } 11, d = 0.15 \quad (10-C)$$

$$Y = \exp\left(3.105 + 0.087 \cdot \ln\left(\frac{R_2}{R_{mc}} - 1\right)\right) - \exp\left(1.795 - 0.838 \cdot \ln\left(\frac{R_2}{R_{mc}} - 1\right)\right) + \exp\left(17.88 - 13.48 \cdot \ln\left(\frac{R_2}{R_{mc}} + 2\right)\right) + d' \quad (11)$$

Para:

$$\frac{R_2}{R_{mc}} \text{ menor que } 1.4, d' = 1.0 \quad (11-A)$$

Para:

$$\frac{R_2}{R_{mc}} \text{ mayor que } 1.4 \text{ pero menor que } 2.2, d' = 1.3 \quad (11-B)$$

Para:

$$\frac{R_2}{R_{mc}} \text{ mayor que } 2.2 \text{ pero menor que } 12, d' = 1.0 \quad (11-C)$$

Para:

$$\frac{R_2}{R_{mc}} \text{ mayor que } 12, d' = 1.6 - 0.05\left(\frac{R_2}{R_{mc}}\right) \quad (11-D)$$

Después de haber hallado la resistividad de la zona lavada R_{xo} , el siguiente paso es determinar la relación R_{xos}/R_o usando la siguiente ecuación derivada del nomograma de la fig. 4 (Referencia 4):

$$\frac{R_{xos}}{R_o} = \frac{R_{mf}}{\exp(0.572 - 0.924 \ln Th) + \exp(-22.22 * SP / (460 + Th) + \ln(R_{mf} - \exp(0.572 - 0.924 \ln Th)))}$$

(12)

Donde: Th , es la temperatura de formación ó del horizonte en particular

R_{mf} , es la resistividad del filtrado de lodo a la temperatura de formación.

SP , es el potencial espontáneo desarrollado en la capa

Diam. del Hueco
8"

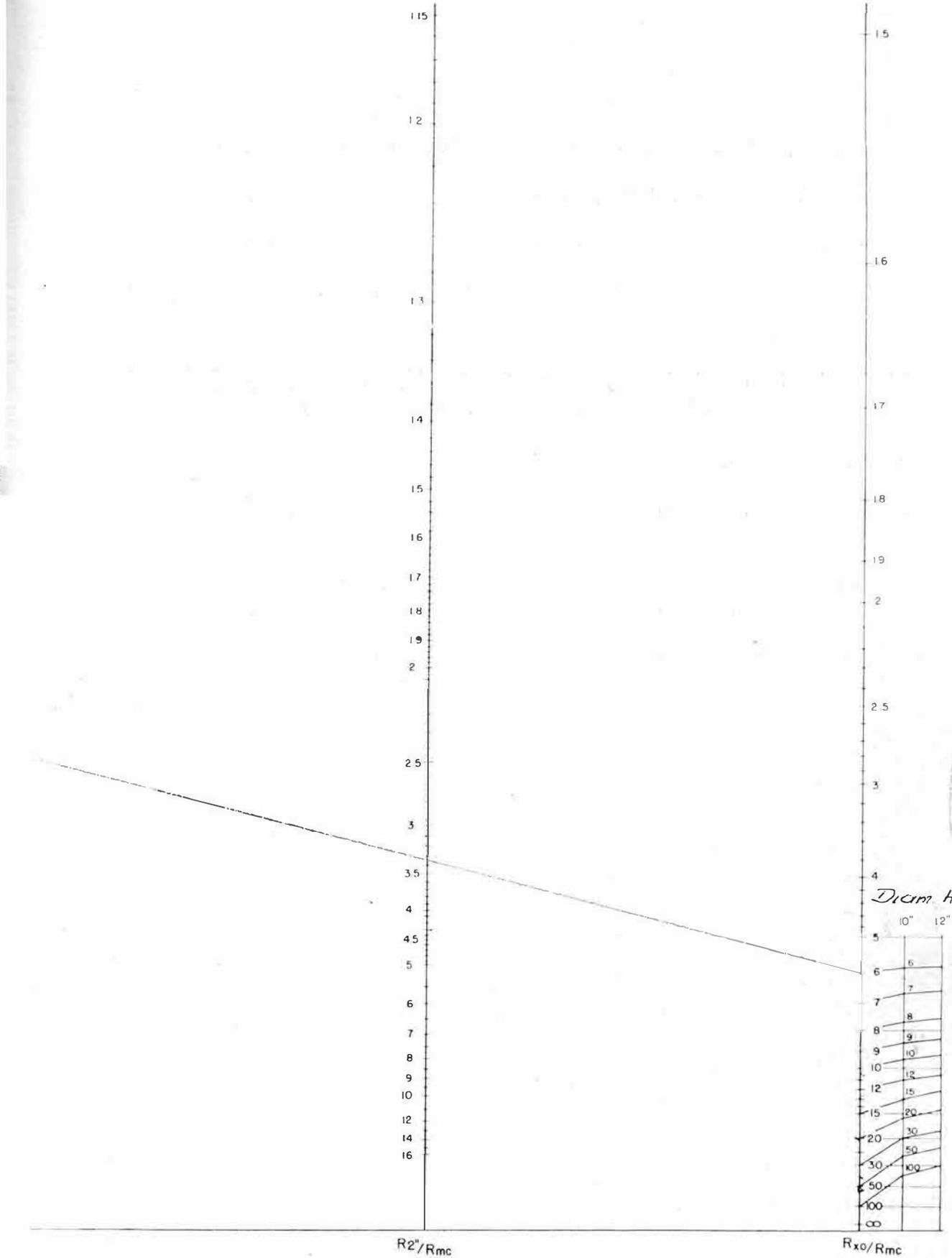


FIG. 3

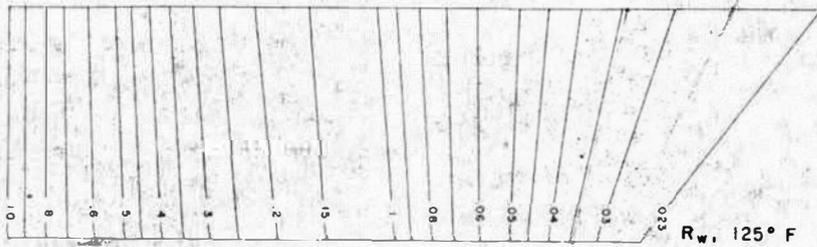
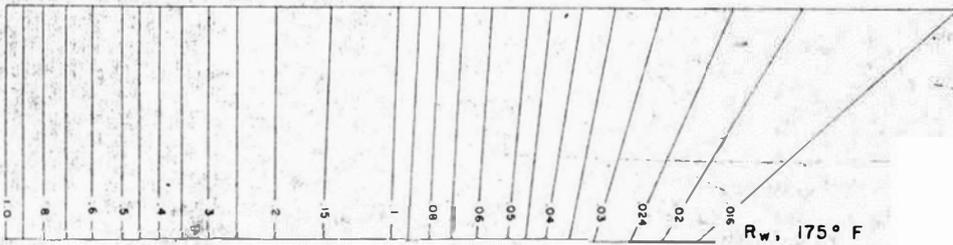
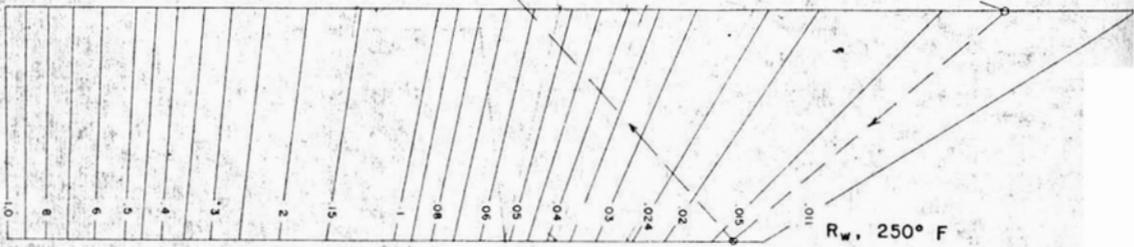
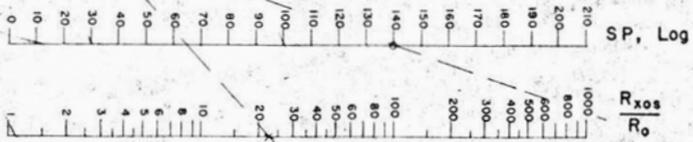
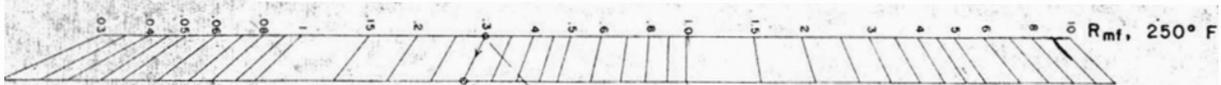


FIGURA 4

RESISTIVIDAD DE LA FORMACION

FORMACION SATURADA CON HIDROCARBUROS Y AGUA DE

FORMACION R_t

La resistividad de la zona no contaminada, o sea, más allá de la zona invadida por el filtrado de lodo es denominada resistividad verdadera.

No existe un dispositivo de perfilaje universal para esta medida, cada herramienta tiene sus inconvenientes y ventajas bajo condiciones específicas. En muchos casos ya sea una curva de espaciamento largo del perfil eléctrico, un perfil eléctrico enfocado, ó un perfil de inducción son usados.

Se ha escogido para nuestros cálculos, la curva lateral de 18'8" de espaciamento para obtener la resistividad verdadera R_t , la cual es necesaria para evaluar la saturación relativa de hidrocarburos.

FORMACION 100% SATURADA CON AGUA DE FORMACION R_o

La resistividad de la misma zona anterior, pero cuando ella está totalmente saturada con agua de formación es conocida como R_o y, es calculada conociendo la razón de resistividades R_{xos}/R_o y la resistividad de la zona lavada R_{xo} .

Si no se sabe definitivamente que la formación contiene hidrocarburos, la zona invadida es asumida que está completamente saturada con filtrado de lodo de perforación, de tal manera que resulta que R_{xos} es igual a R_{xo} , entonces tenemos que:

$$R_{xos}/R_o = R_{xo}/R_o \quad y$$

$$\boxed{R_o = R_{xo}/(R_{xos}/R_o)} \quad \text{_____} \quad (13)$$

La determinación de R_t como de R_o son primordiales, ya que sobre ellas se basa el funcionamiento del método del Índice de Resistividad aquí expuesto.

FACTOR DE RESISTIVIDAD DE FORMACION F

Cuando una formación no arcillosa está completamente saturada con agua de resistividad R_w , su resistividad como se mencionó anteriormente es R_o ; luego, la relación R_o/R_w será una constante independiente del valor de R_w , esta constante es conocida como Factor de Resistividad de Formación ó comunmente llamado Factor de Formación F ; entonces tenemos que:

$$\boxed{F = R_o/R_w} \quad \text{_____} \quad (14)$$

POROSIDAD ϕ

Porosidad es la fracción ocupada por poros ó huecos del

volumen total de una roca, por ejemplo una sustancia densa y uniforme como un pedazo de vidrio tendrá porosidad cero, sin embargo una esponja tiene una porosidad elevada.

Lo que nos interesa hallar es la porosidad intergranular ó efectiva, la cual permite el paso de fluidos.

A través de cuantiosas experiencias sobre muestras de rocas, se ha establecido que el factor de resistividad de una formación puede ser relacionado con la porosidad mediante una simple fórmula empírica como:

$$F = a/\phi^m \quad (15)$$

Donde a y m son constantes; también de las determinaciones de laboratorio se le han asignado a estas constantes diferentes valores; así por ejemplo W.O. Winsauer propuso:

$$F = 0.62/\phi^{2.15} \quad (15-A)$$

Archie propuso: $F = 1/\phi^2$ (15-B)

la cual es bastante adecuada para formaciones consolidadas, tales como arenas duras y calizas. También existe otra:

$$F = 0.81/\phi^2 \quad (\text{Ref. 1}) \quad (15-C)$$

la cual proporciona muy buenas aproximaciones tanto para formaciones blandas como para las consolidadas, además simplifica los cálculos.

Sin embargo, estas constantes pueden ser determinadas por medio de observaciones locales, utilizaremos en el presente trabajo la siguiente fórmula derivada de la (15-C):

$$\boxed{\phi = \sqrt{0.81/F}} \quad \text{_____} \quad (16)$$

INDICE DE RESISTIVIDAD RI

A través de todo lo dicho anteriormente se ha mencionado lo que significa el Índice de Resistividad el que, es el punto objetivo de la Tesis y que es de gran provecho para el analista de perfiles eléctricos, ya que permite tener una herramienta capaz de ayudar en las decisiones, punto determinante del análisis de perfiles ó de cualquier otra actividad en la cual se movilizan grandes capitales como en la Industria del Petróleo.

El RI se halla dividiendo la resistividad verdadera de formación por la resistividad de la misma zona saturada en un 100% con agua de formación, entonces:

$$\boxed{RI = Rt/Ro} \quad \text{_____} \quad (17)$$

Por ejemplo una comparación de un RI = 29 y un RI = 1.1 para el intervalo más bajo de un pozo cualquiera, sugiere la presencia de hidrocarburos en el intervalo superior y agua en el inferior.

Quizás, durante ó a través de diferentes análisis de perfiles se hallen IR mayores que 1.0 pero que pertenecen a formaciones acuíferas. Esto podría deberse a un error sistemático en las lecturas del perfil, violación de las asunciones etc. Pero en general RI mayores que 1.0 indican presencia de hidrocarburos. Faltaría saber, en que proporción existen estos hidrocarburos; ello puede lograrse con lo explicado a continuación para la saturación.

SATURACION DE AGUA Sw

En general, la saturación de una roca es la fracción de su volumen poroso efectivo ocupado por el fluido en consideración.

En los trabajos con perfiles eléctricos es costumbre considerar al agua de formación como el líquido saturante debido a que conduce la corriente eléctrica. Entonces, la saturación de agua es la fracción de volumen poroso que contiene agua de formación; esto conduce a que si una formación contiene únicamente agua, tendrá una saturación de agua de 100%.

Conociendo la saturación de agua, por lógica deducción sabremos cual es la saturación de hidrocarburos, ayudándonos

esto a conocer más aún la potencialidad de las formaciones en evaluación. Para determinar Sw usaremos la ecuación propuesta por Archie (Ref. 8):

$$Sw = (R_o/R_t)^{1/n} \quad (18)$$

Archie dedujo que para arenas consolidadas como para las no-consolidadas n es igual a 2, entonces:

$$Sw = (R_o/R_t)^{1/2} \quad (18-A)$$

También:

$$Sw = (I/RI)^{1/2} \quad (18-B)$$

RESERVAS DE PETROLEO N

Ahora que ya hemos podido establecer la saturación de fluidos en la formación, podemos encontrar mediante una simple relación, las reservas de petróleo expresadas en barriles en la superficie mediante un reemplazo de términos. Los perfiles eléctricos no nos van a resolver el problema de reservas, pero nos proporcionaran información básica que permitirá una buena evaluación inicial de reservas. Básicamente las reservas de petróleo pueden ser expresadas por:

$$N(STB/acre-pie) = \frac{7758 * \phi (1 - Sw)}{B_o} \quad (19)$$

Reemplazando (14) en (16):

$$\phi = (0.81R_w/R_o)^{1/2} \quad (19-A)$$

Reemplazando (18-A) y (19-A) en (19) hallamos:

$$N(\text{STB/acre-pie}) = \frac{6982.2}{B_o} \left\{ \left(\frac{R_w}{R_o} \right)^{1/2} - \left(\frac{R_w}{R_t} \right)^{1/2} \right\} \quad (20)$$

Donde: N, son reservas de petróleo (STB/acre-pie)

B_o, es el factor de volumen original

R_w, es la resistividad del agua de formación en ohm-metros

R_o, es la resistividad de la formación 100% saturada con agua de formación, en ohm-m.

R_t, es la resistividad verdadera de formación en ohm-metros

Sin embargo, en el programa Fortran se ha utilizado la fórmula (19) para simplificar los cálculos. Además se ha asumido que B_o tiene un valor definido y constante para los intervalos analizados; así mismo se asume un reservorio definido (100 acres) en extensión.

Para escoger el número ó digamos las capas a ser analizadas, utilizamos la curva SP y nos ayudamos con la curva normal corta y el micro-perfil para correlacionar y verificar las profundidades tope y de fondo de cada capa. O sea que, utilizando la curva SP diferenciamos los contactos entre las formaciones porosas y las lutitas mediante la definición de la línea de lutitas en el perfil (las lecturas tomadas del SP y tabuladas en las tablas 1 y 1-A son los valores absolutos).

Los datos obtenidos directamente de la lectura SP no son los que usaremos, ya que ellos están afectados por algunos factores tales como; espesor de capa y diámetro del pozo. Las lecturas serán corregidas (en el programa Bortran) mediante la siguiente fórmula derivada de la fig. 7 (Gráfico A-8 referencia 1):

$$C = 1 + \left(\frac{R16/Rm}{3e*e} \right) (0.45 + 0.02e) \quad (21)$$

Esta fórmula es válida para diámetros de pozos entre las 8 y 9 pulgadas (segun Schlumberger). El factor obtenido multiplicará al valor leído del perfil.

Cuando las dos curvas normales dan valores, en un intervalo de interés que es casi uniforme, un promedio aritmético de las deflexiones máximas dan buenas lecturas promedio, así mismo para las otras curvas, salvo indicación.

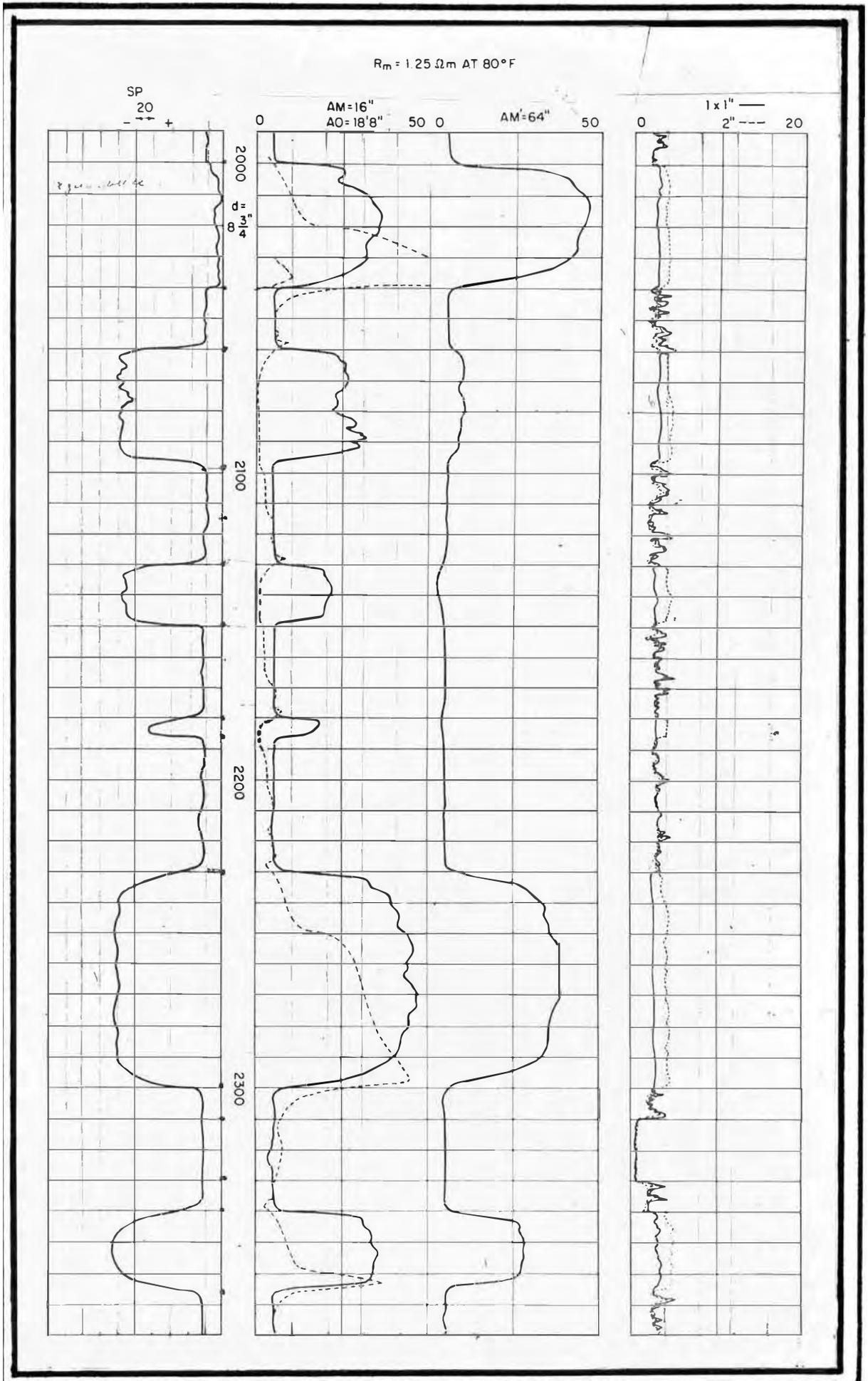


FIGURA 5

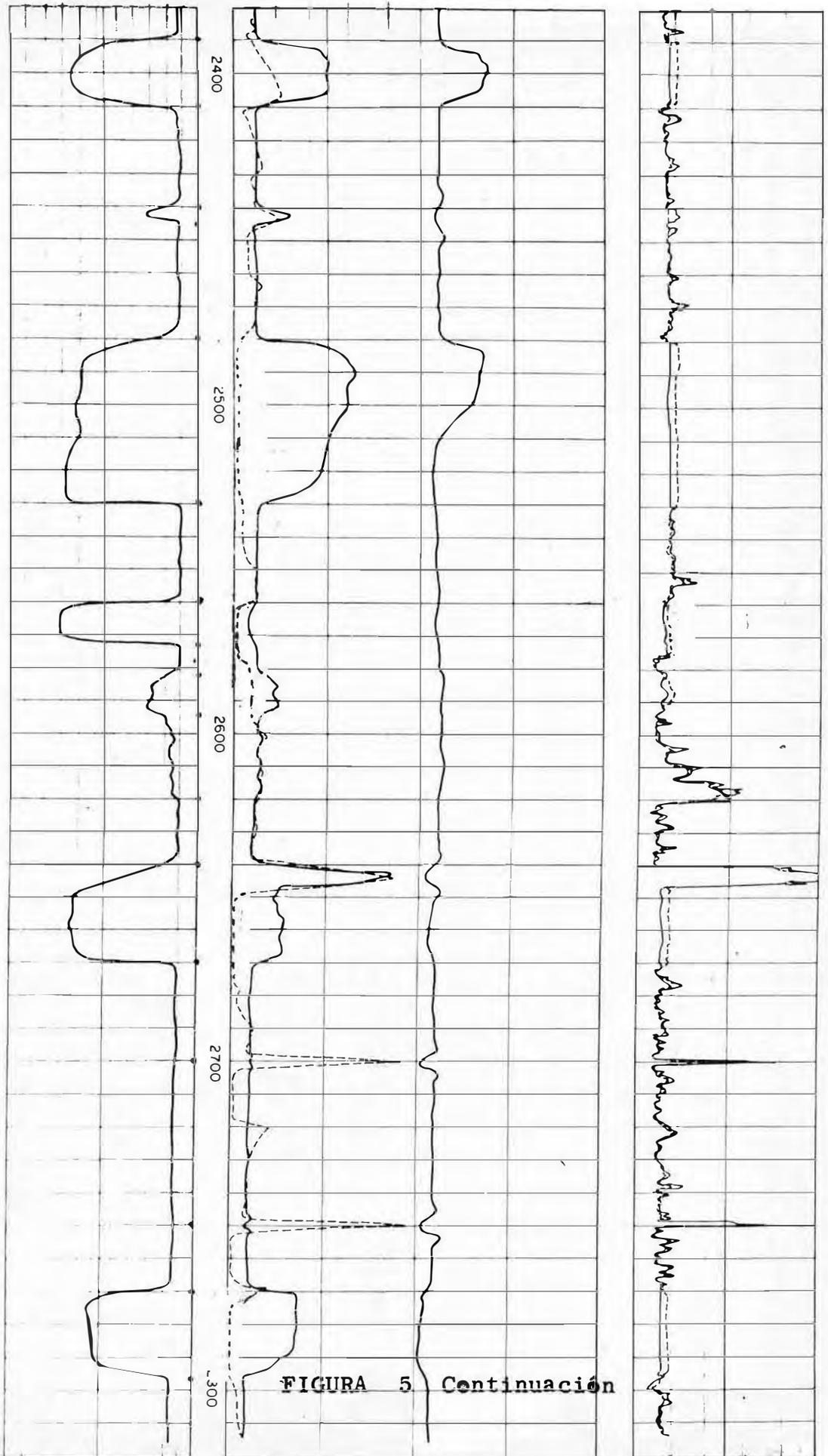
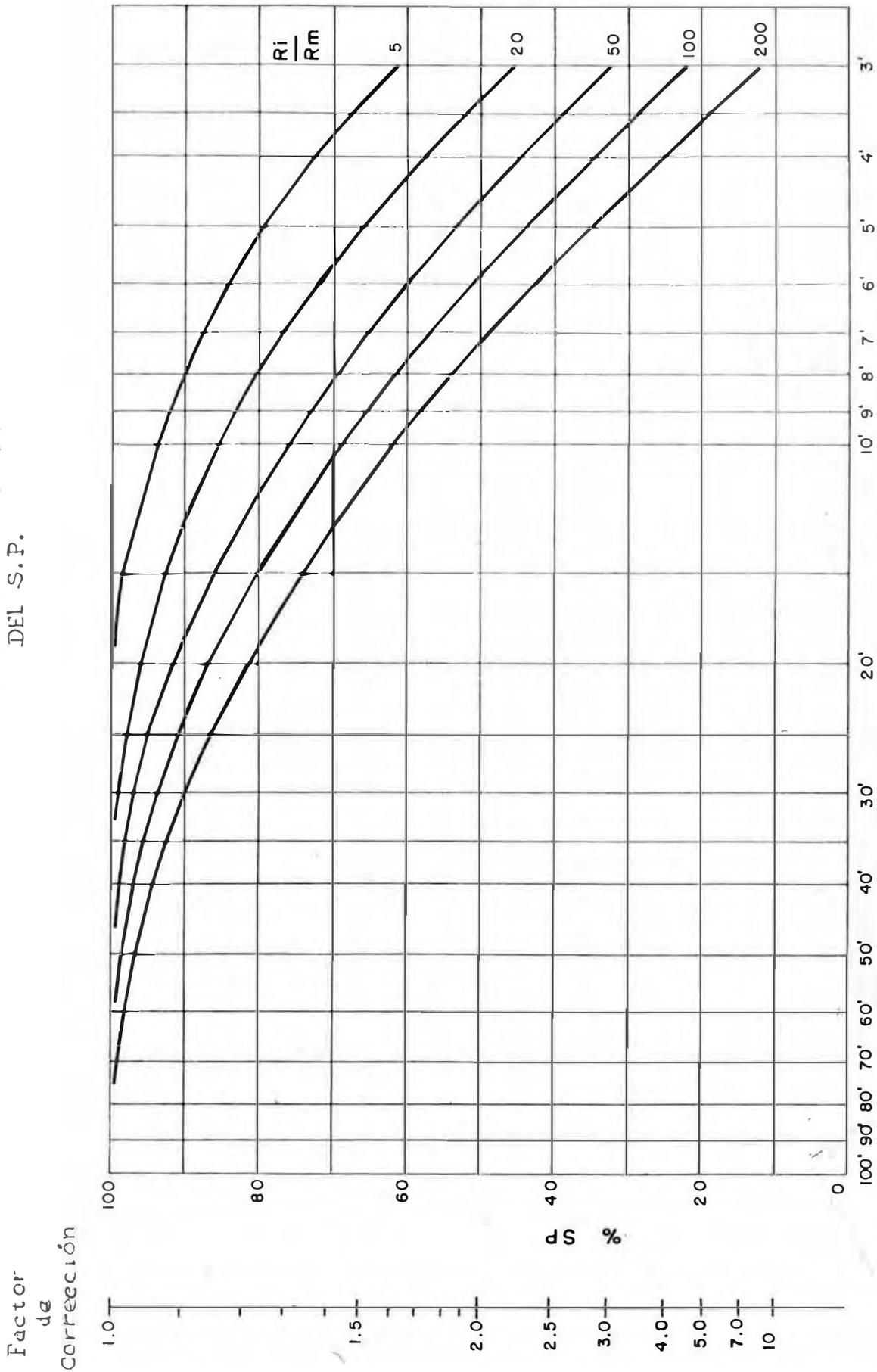


FIGURA 5 Continuación

GRAFICO DE CORRECCION
DEL S.P.



ESPESOR DE CAPA

FIG. 7

T A B L A N° 1

TABULACION DE LOS DATOS TOMADOS DE LOS PERFILES ELECTRICOS

POZO RPC-1

Capa N°	Profundidad (pies)		SP (mv)	Normal Corta R 16" ohm-m.	Micro-inversa R 1"*1" ohm-m.	Micro-normal R 2" ohm-m.	Lateral R 18'8" Rt ohm-m.
	Tepe	Fondo					
1	2060	2096	100	28	3.	4.	0.8
2	2130	2148	95	21	2.6	3.9	1.2
3	2180	2186	65	18	2.8	4.	1.2
4	2230	2299	105	45	2.5	4.	37.0*
5	2340	2364	105	34	3.5	4.8	35.0**
6	2390	2409	118	25	3.	4.	1200***
7	2440	2445	40	15	3.2	4.	20.0***
8	2480	2530	120	30	3.5	4.5	0.7
9	2560	2572	130	12	2.8	3.8	0.6
10	2581	2593	35	12	3.	4.	4.8
11	2650	2670	118	13	3.	4.	0.7
12	2770	2793	98	18	3.	4.	0.8

*Obtenido por la regla del punto medio

**Obtenido por la regla del pico máximo

***Obtenido por la regla de máximo-mínimo

T A B L A N° 1-A

TABULACION DE LOS DATOS TOMADOS DE LOS PERFILES ELECTRICOS

POZO RPC-2

Capa N°	Profundidad (pies)		SP (mv)	Normal Corta R 16" ohm-m.	Micro- inversa R 1"*1" ohm-m.	Micro- normal R 2" ohm-m.	Lateral R 18'8" Rt ohm-m.
	Tope	Fondo					
1	2636	2644	60	20	5.8	7.8	12
2	2645	2665	40	20	11	13	33
3	2900	2910	99	35	8.	10.	18
4	2911	2930	72	35	9	11	28
5	2940	2980	80	40	3	4	38
6	3100	3120	66	50	9	11	28
7	3125	3145	66	38	11	13	28
8	3150	3180	120	30	5.5	7.5	33

C A P I T U L O I V

F O R M U L A C I O N D E L P R O G R A M A E N

L E N G U A J E F O R T R A N I V
◆◆◆*****

C O N C E P T O D E P R O G R A M A

Veamos el concepto de "programa" a través del sgte. ej.:

Si se tiene el problema:

Calcular $Y = \frac{ax^2 + b}{mx + n}$ para t juegos de datos

(a, b, m, n) y $x = x_0 + (i - 1)r$, $(i = 1 \dots k)$

Con n grupos de datos (x_0, r, k)

Luego el número de veces que se calcularía Y es

$$N = t \cdot (k_1 \dots k_n) = t \cdot n$$

Si N es menor que 10, uno mismo podría realizar los cálculos. Si N está entre 10 y 100, se le puede confiar esta operación a personal sin mayor preparación, dándole por supuesto una serie de instrucciones.

Perosi N es mucho mayor que 100, entonces el problema es más difícil, ya que el continuo cálculo sería monótono para cualquier operador y los resultados no serán entonces tan confiables. Entonces esto último puede ser el caso de un problema computable. Al operador ó calculador anterior se le proporcionó una serie de instrucciones, las cuales también se le tendrán que dar a la computadora en un lenguaje intelegible para ella, viniendo a convertirse esta serie de instrucciones en el P ROGRAMA; y para que el programa trabaje será necesario proporcionarle datos.

En la confección del programa "fuente", se han seguido una serie de fundamentos y reglas de la Programación Fortran IV. La computación electrónica en estos tiempos es usada en casi todas las ramas de la ciencia (Medicina, Ingeniería etc) y en la Administración de Negocios. Las computadoras realizan menos trabajo que el que se requiere para resolver el problema en sí, es por ello que se recomienda siempre conocer a fondo el problema. Toda la formulación matemática, ya sean funciones trigonométricas, ecuaciones diferenciales, integrales, raíces cuadradas, logaritmos, etc., se deben expresar como operaciones aritméticas, ya que la computadora puede hacer solo esta clase de operaciones.

Las computadoras digitales como se mencionó anteriormente, son de uso general, operan a gran velocidad, son exactas(ó sea que no se equivocan), tienen capacidad lógica de decisión(limitada), se aprenden de memoria las instrucciones almacenando gran cantidad de información.

En líneas generales, un Centro de Computo consta de:
-La memoria principal de la computadora; guarda información indispensable(que se necesita en forma inmediata) en forma binaria codificada, esto es, se utilizan solo dos símbolos usados en el sistema binario de numeración, en forma de núcleos magnéticos que se magnetizan en dos sentidos lo que da solo dos situaciones posibles.

A cada una de las formas que se puede magnetizar el núcleo se llama BIT (BINARY DIGIT), ellos tienen característica destructiva, o sea que toda extracción no la altera, pero cualquier ingreso de información destruye la anterior; ejemplo:

Memoria

I			
		J	

$I = 2$ (2 se almacena en celda de memoria de nombre I)

$J = 3$ (igualmente)

$I = I + 4$ (el valor anterior se suma con 4 y da 6 que es el valor actual de I)

$J = J + I^2$ (el valor anterior de J se suma al valor actual de I elevado al cuadrado, resultando 39 que es el valor actual de J)

- La Unidad Central de Procesamiento (CPU); este es el cerebro de la computadora y donde se hacen todas las operaciones aritméticas y lógicas. Es sumamente rápida. La 360/40 de la UNI realiza alrededor de 10^7 operaciones por segundo.
- La Unidad de Control; controla el flujo de información dentro de la computadora.
- Las memorias auxiliares, guardan información que no puede ser guardada en la memoria principal, el uso de esta información no es tan inmediata. Son reemplazables (disco, cinta).
- La unidad de entrada, sirve para enviar información a la computadora.

-La unidad de salida, sirve para extraer información de la computadora.

PROPOSICIONES

En la solución ó mejor dicho en la programación de un problema con Fortran, uno de los procedimientos consiste en una serie de proposiciones, las cuales especifican las operaciones aritméticas, la lectura de información, la escritura de resultados y las decisiones a realizarse. Las ecuaciones de operaciones ejecutables deben ser escritas en Fortran como proposiciones de asignación, que en su forma son iguales a cualquier ecuación de la práctica común pero, en Fortran tienen un significado distinto; en realidad es una orden dada a la maquina para que ejecute la operación de la derecha, y asigne este valor a la única variable de la izquierda, perdiéndose el antiguo valor de esta. Ejemplo:

$$Z = 24*ALFA - (3.1416*BETA)/RHO$$

Aquí se ejecutan todas las operaciones ordenadas, según un orden de prioridades (de izquierda a derecha y efectuándose primero las operaciones dentro de paréntesis) y este valor se le ^{se} asigna a la variable Z cuyo antiguo valor se pierde, y cuando se nombra a Z, querrá decirse el valor dado más recientemente a la variable llamada Z

Además las proposiciones se dividen en:

-ejecutables; mandan hacer una operación ó acción definida.

-no ejecutables; solo sirven de información tal como Dimension, Format, etc.

En la confección del programa se ha considerado además:

Constantes, que son cualquier número que aparezca en una **Proposición** en forma explícita, pueden ser:

Constante Entera, como su nombre lo dice es un número entero, ejemplos: 2, 84, 256, 0

Constante Real, cualquier número real racional, ejemplos: 12.7, 0.03, $4.92E-7 = 0.000000492$

Variables, es una cantidad a la cual se le dá un nombre, permitiéndosele que varíe, pueden ser:

Variable Entera, es la que puede tomar cualquier valor permitido para una constante entera. Solo puede tener 6 letras ó dígitos, la primera de las cuales debe ser I, J, K, L, M ó N (el número de 6 es típico en Fortran), ejemplos:

I, KLM, L123, MONICA

Variable Real, se representan dentro de la computadora igual que una constante real, o sea fracción multiplicada por diez; debe comenzar con una letra que no sea I, K, L, M, ó N ejemplos: AYAX, R573, CLAUDY.

OPERACIONES

Las que se usan son las cinco operaciones aritméticas básicas:

<u>Nombre</u>	<u>Simbolo Fortran</u>
Suma	+
Resta	
Multiplicación	*
División	/
Exponenciación	**

El único signo de agrupación usado en Fortran es el paréntesis () y, su uso indica grupos como los que se realizan en matemática corriente.

FUNCIONES

Las funciones matemáticas usadas tienen un nombre preasignado en Fortran, y para hacer uso de ellas, basta solo con escribir su nombre seguido de paréntesis que encierra el argumento; aquí se usan las siguientes:

<u>Función Matemática</u>	<u>Nombre Fortran</u>
Exponencial	EXP
Logaritmo natural	ALOG

Este programa pretende ser de la forma más general posible, de modo que, solo se hagan leer los datos indispensables y se cambien el mínimo número de tarjetas. El programa se ha escrito inicialmente en forma gráfica en un diagrama de flujo, siguiendo un orden de secuencias determinado por lo que se desea llevar a cabo; luego esto se traduce a un Lenguaje Programado u Orientado (simbólico) y se escribe en hojas de codificación. Existen diferentes tipos de lenguajes programados, así tenemos:

Fortran; de uso científico

Cobol y RPG; de uso comercial

PL/I; combinación de Fortran y Cobol

Algol; similar al Fortran, se usa en Europa.

La información en cada línea de las hojas de codificación se perfora en una tarjeta y el conjunto de ellas se denomina "Programa Fuente". Los símbolos o caracteres del Fortran son:

-Alfabéticos: letras del alfabeto Inglés desde A a Z además del signo \$, total 27 caracteres.

-Numéricos: dígitos decimales desde el 0 hasta 9, total 10 caracteres.

-Especiales: + * / () = . , total 10 caracteres

En total 47 caracteres en base a los cuales se generan las palabras o abreviaciones.



FIGURA 9.

TRANSFERENCIA DE CONTROL

En este como en cualquier otro programa, a menudo las sentencias ó proposiciones no se ejecutan en el orden en que estan escritos, sino que llegado a cierta parte del programa donde es necesario que se cumplan determinadas condiciones, es necesario hacer una "transferencia de control" Esto se puede lograr en forma:

-Incondicional: mediante la proposición GO TO n, donde n es el número de proposición que se quiere ejecutar a continuación, ejemplo: GO TO 3

-Condicional: se puede lograr con un IF lógico, cuya forma general es IF(e) S; donde (e) es una expresión lógica y S es cualquier otra proposición excepto otro IF lógico ó un DO. El IF lógico usa los siguientes operadores de relación:

<u>Operador de Relación</u>	<u>Significado</u>
.LT.	Menor que...
.LE.	Menor ó igual que..
.EQ.	Igual a...
.NE.	No igual a...
.GT.	Mayor que...
.GE.	Mayor ó igual que..

Ejemplo:

```
IF(X.GT.10.) GO TO 3
4 R = 3.1416/A
3 A = 2.4*Y
```

Esto quiere decir que si la expresión lógica es cierta (Si X es mayor que 10.) se ordena que la siguiente proposición sea la N^o 3; si no es cierto (Si X es menor ó igual a 10.) la siguiente proposición ejecutable es la que sigue al IF lógico, en este caso la N^o 4. Existen otras clases de IF pero ellos no son usados en este programa.

DIMENSION

Cuando en un programa como en este, se usan variables con subíndices se debe proporcionar al compilador cierta información al respecto:

-Que variables tienen subíndice?

-Cuantos subíndices tiene cada una de las variables con subíndices?

-Cual es el valor máximo de cada subíndice?

Todo esto se soluciona con la proposición DIMENSION; Cada variable con subíndice debe mencionarse en este tipo de proposición; y esto tiene que hacerse antes de que aparezca la variable con subíndice. Frecuentemente la proposición DIMENSION es escrita al principio del programa.

Ejemplo:

DIMENSION X(100), A(800), B(3,5)

El compilador asignará ó reservará 100 lugares en la memoria para el arreglo unidimensional de nombre X; 800 para el arreglo A y $3*5 = 15$ para el arreglo bidimensional de nombre B.

Se debe tener cuidado de que ningún subíndice sea mayor que el valor máximo especificado en DIMENSION; de que ninguno sea menor que 1, no permitiéndose los subíndices cero ó negativos. Los subíndices pueden ser constantes ó variables enteras.

PROPOSICION DO

Llamada también proposición de iteración, porque hace posible que se ejecute repetidamente la parte de un programa, cambiando automáticamente de variable entera en cada repetición. Está asociada con las variables con subíndices.

Se representa de la siguiente forma:

$DO\ n\ i = m_1, m_2, m_3$ donde n es el número de la última proposición ejecutable dentro del campo del DO, la debe estar después del DO; i, es el nombre de una variable entera sin subíndice y sin signo.

m_1 , m_2 , m_3 son constantes enteras sin signo ó variable entera sin subíndice ni signo. A veces m_3 no se menciona, entendiéndose entonces que es 1; n , i , m_1 , m_2 , y m_3 son llamados parámetros del DO, ejemplo:

DO 40 K = 2,30 en este caso:

$n = 40$, es el rango del DO

$i = K$

$m_1 = 2$, es el valor inicial de i

$m_2 = 30$, es el valor de comparación

$m_3 = 1$, es el valor incremental.

Cuando se ha ejecutado la última proposición del DO, en este caso la N^o 40, se incrementa el valor de K en $m_3 = 1$ y se repiten todas las operaciones dentro del DO hasta que $K = m_2 = 30$ inclusive; después de esto se realiza la siguiente proposición a continuación del DO sea cual fuere.

En el uso de la proposición DO? se tienen que observar ciertas reglas, las cuales son:

- La primera proposición en el recorrido de un DO debe ser una ejecutable.
- En el recorrido de un DO, se puede incluir otro, llamado DO interior; para ello es necesario que todas las proposiciones en el recorrido del DO interior, estén también dentro del recorrido del DO exterior, pu-

diendo ser que ambos recorridos terminen en la misma proposición.

- La última sentencia de un DO no puede ser GO TO, IF, RETURN, STOP, PAUSE, DO. Con excepción de RETURN, todas las otras mencionadas pueden estar dentro del DO y si tienen que ser la última proposición (caso GO TO, IF) se reemplazan por CONTINUE, la cual es una proposición "muda" que no origina alguna acción cuando se ejecuta el programa objeto, solo satisface esta regla
- Ninguna proposición interior puede volver a definir ó alterar cualquier parámetro del DO.
- Está prohibido hacer transferencias de control desde fuera hacia dentro de un DO sin haber realizado antes el DO; también está prohibido hacer transferencias desde un DO exterior a un DO interior.

LECTURA - IMPRESION

A menudo se le ordena a la máquina que lea ó escriba uno ó un conjunto de datos ó variables. Para ello se pueden emplear las siguientes palabras inglesas

```
READ(5,8) A,X,Y
WRITE(6,4) A,X,Y,Z,W
8 FORMAT(3F5.1)
4 FORMAT('B',//1x,4F6.2,E15.6)
```

Lo que nos indica que la unidad 5 (en WATF IV) leerá las variables A,X,Y de acuerdo al formato especificado en la proposición 8 y, que la unidad 6 imprimirá los valores de A,X,Y,Z,W de acuerdo al formato especificado en la proposición 4.

La proposición FORMAT(cuyos números de proposición son 8 y 4 en nuestro caso) tienen por función dar información al programa objeto y, pueden ser puestos en cualquier sitio en el fajo del programa fuente.

8 FORMAT quiere decir, que se leeran las tres variables (A,X,Y) las cuales son reales y tienen cada una un campo de 5 lugares, el último de los cuales es decimal.

4 FORMAT quiere decir que:

' \backslash ' ,se avanzará un renglón antes de iniciar la impresión

// ,se dejarán dos renglones en blanco entre cada impresión, indica también el fin de la impresión de un renglón.

lx ,se dejará una columna en blanco como margen a la izquierda.

4F6.2, se escribirán los ~~4~~ primeros resultados en forma real con un campo de 6 lugares, siendo 2 de ellos decimales.

E15.6, se escribirá el último resultado en forma exponencial con un campo de 15 lugares, siendo 6 de ellos decimales

STOP

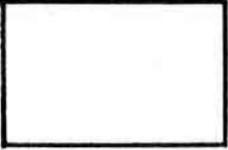
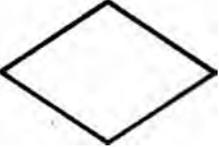
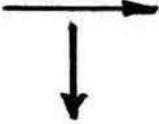
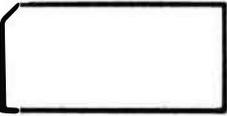
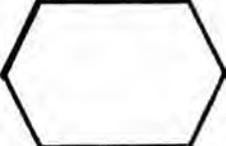
Esta proposición se utiliza cuando es necesario parar la ejecución del programa objeto. Normalmente existe un STOP a la finalización de los cálculos en el programa.

END

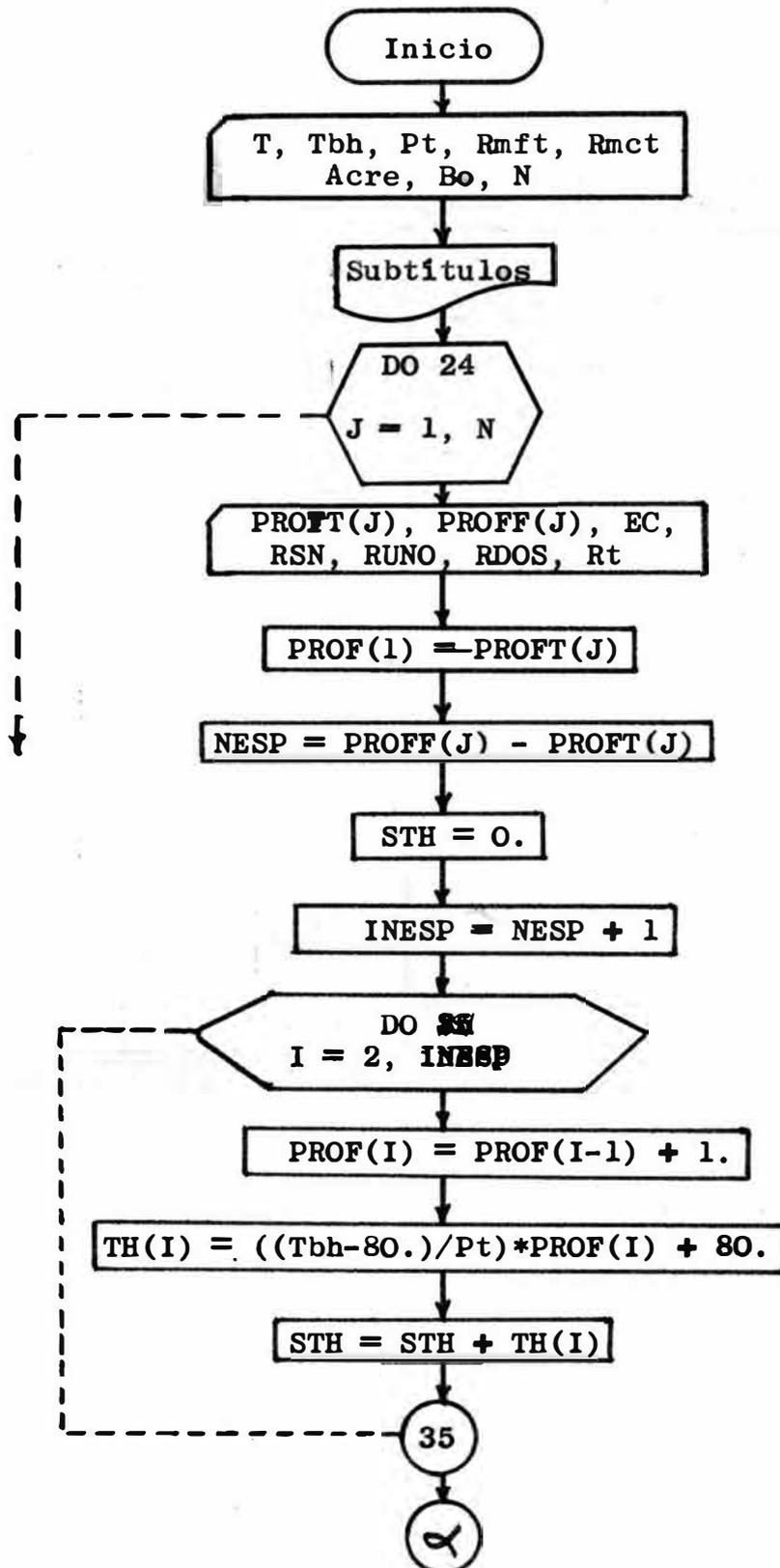
Es una proposición no ejecutable, que define el fin de un programa fuente para el compilador. Físicamente debeseer la última proposición de cada programa, no debe tener número de proposición. En un programa, solo debe haber una proposición END;

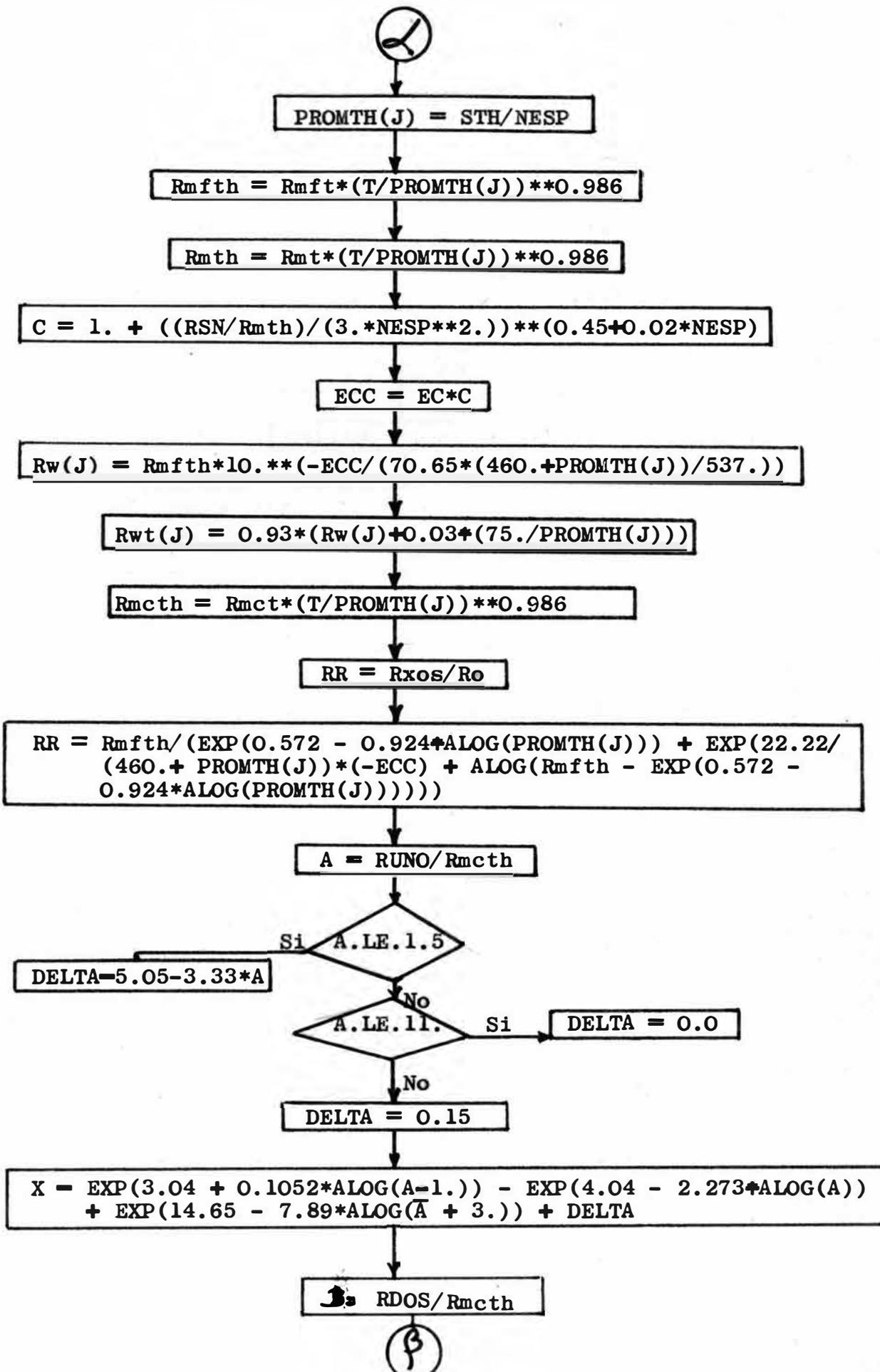
DIAGRAMA DE FLUJO

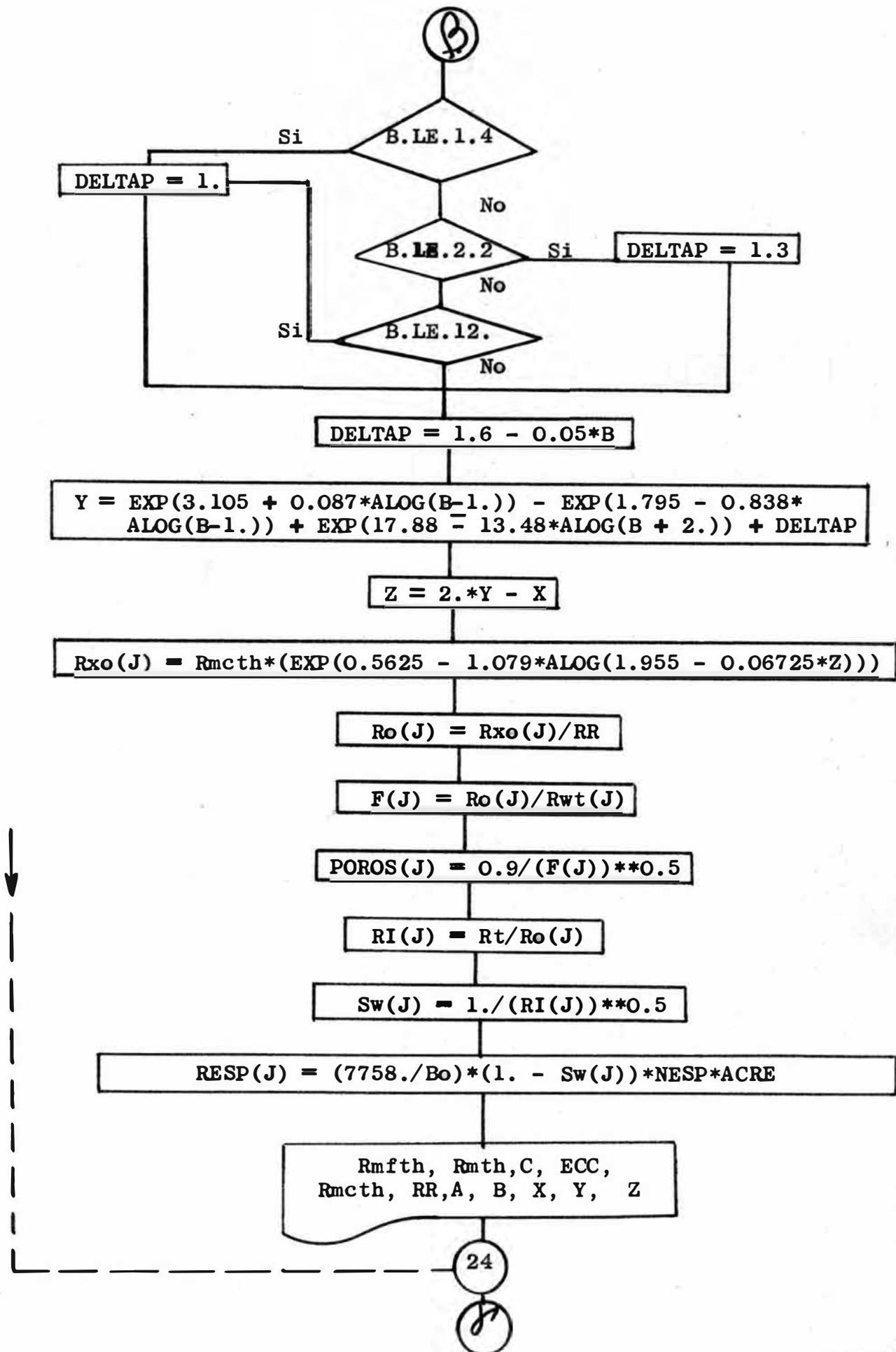
A través de los diagramas de flujo, se puede visualizar rápidamente la secuencia lógica y el objetivo del programa. Está conformado por una serie de figuras las cuales son las dibujadas en la siguiente página.

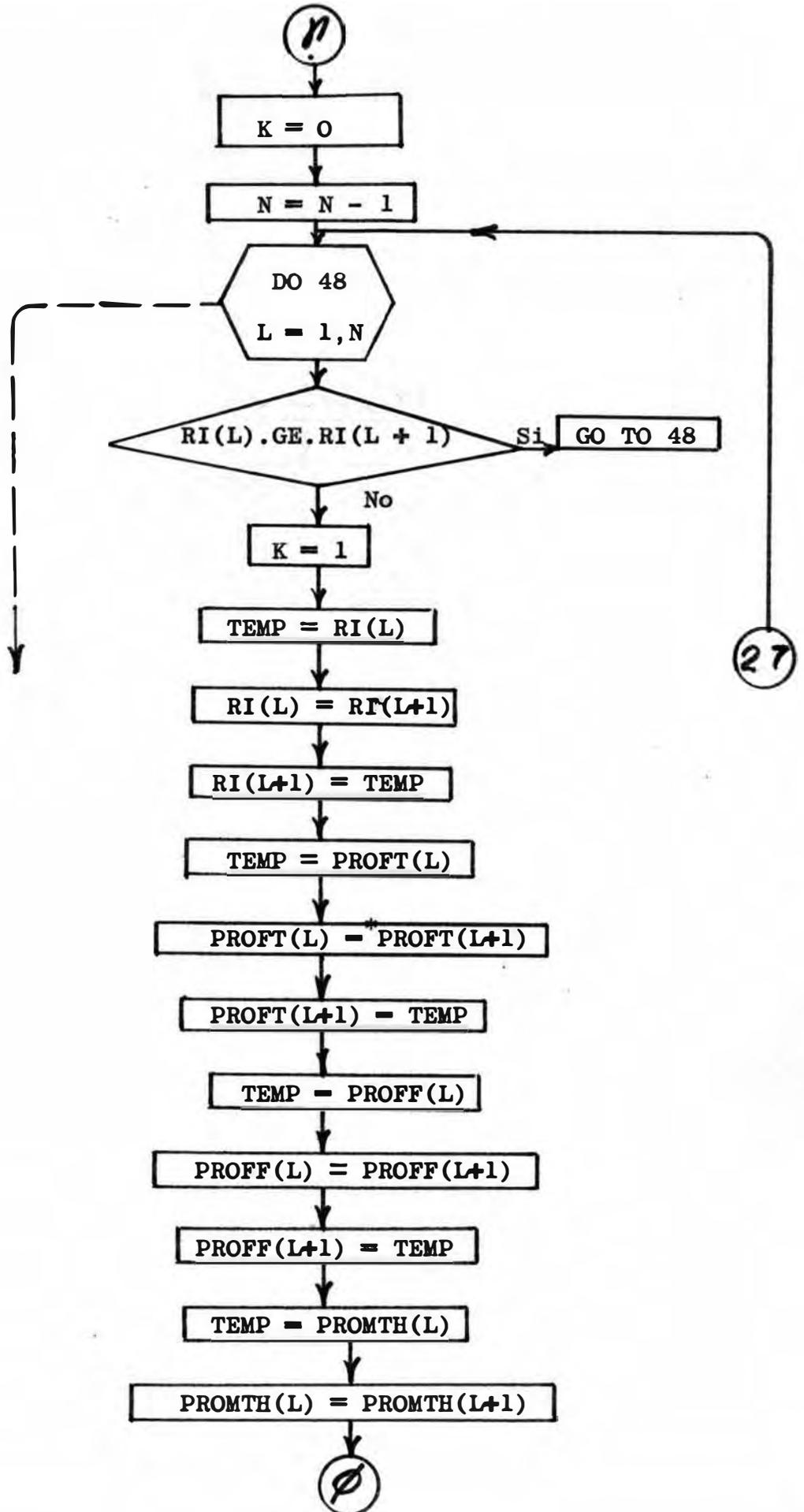
<u>Simbolo</u>	<u>Significado</u>
	Cualquier operación aritmética ó lógica
	Decisión
	Terminal: inicial ó final
	Conector
	Dirección del flujo
	Lectura por tarjeta
	Impresión
	Preparación

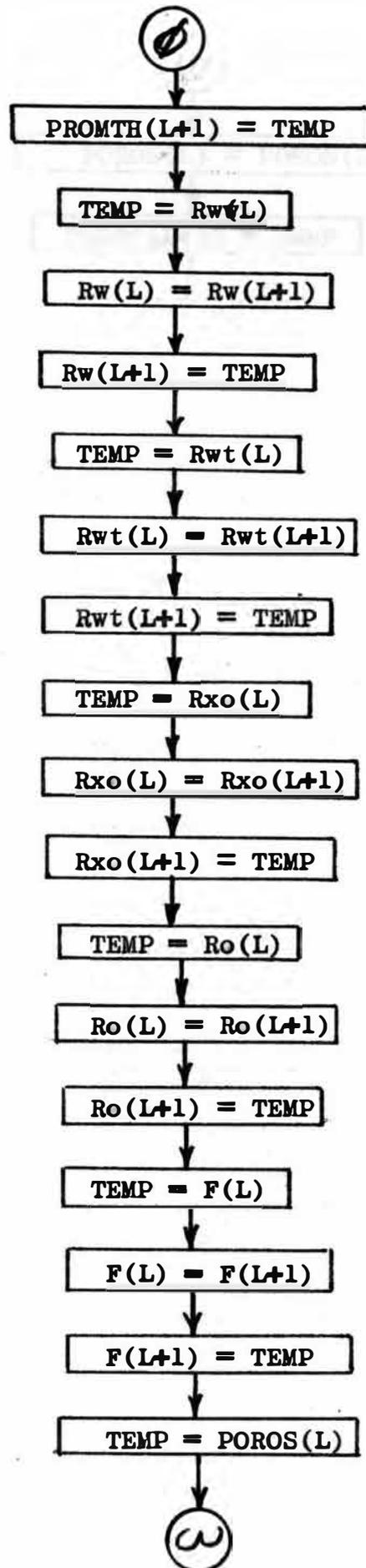
El diagrama de flujo de nuestro programa es el sgte.:

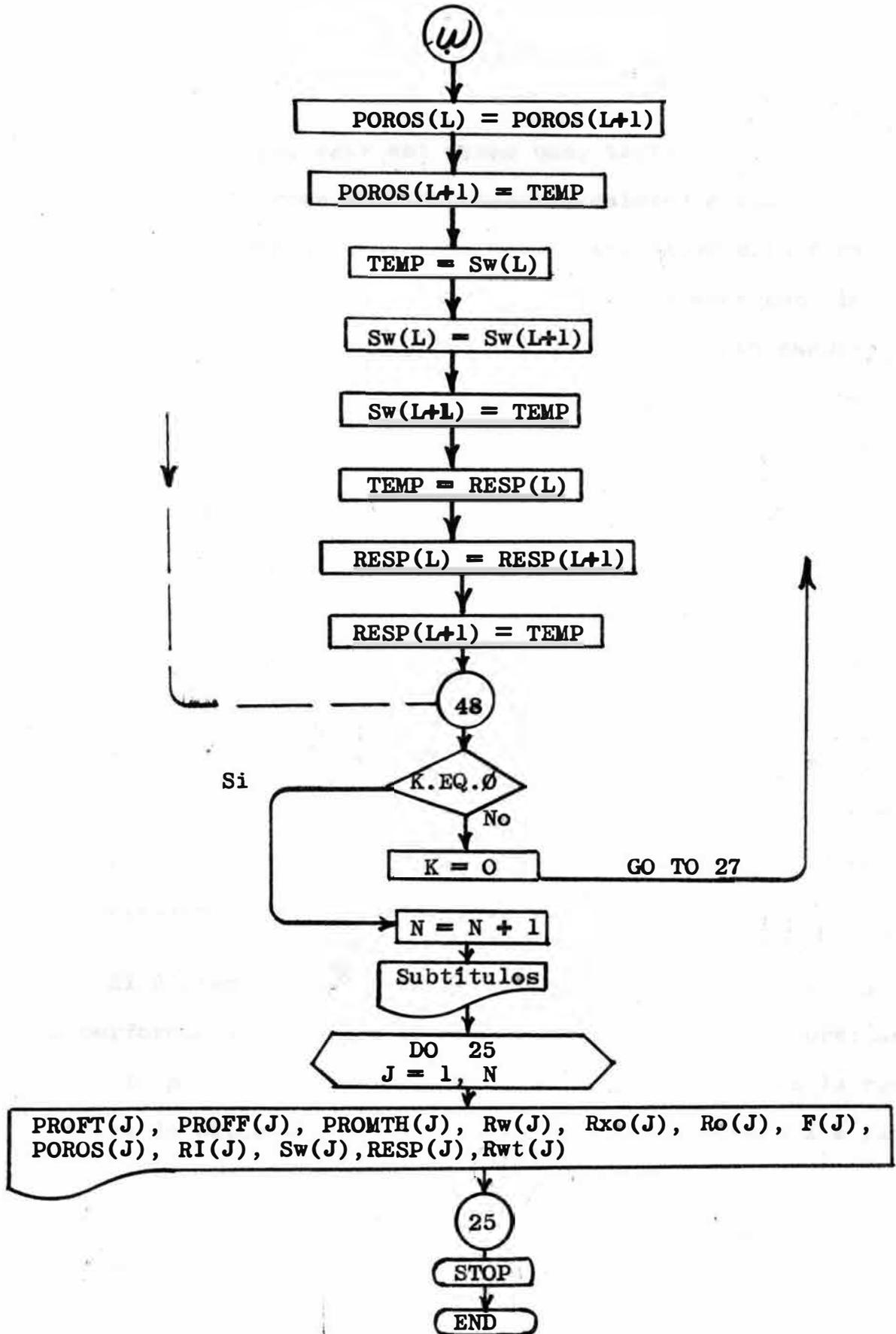












Conviene mencionar así mismo que, tanto en las hojas de codificación como en las tarjetas, existen campos de escritura limitadas por columnas numeradas. En el primer campo, que abarca desde la columna 1 a la 5, se escriben; la letra C(en la primera) para los comentarios(no procesables sólo imprimibles en el listado) y los números de las proposiciones.

En el 2º campo que abarca solo la 6ª columna, se escriben solo caracteres que indican que dicha tarjeta es continuación de la anterior(las tarjetas de continuación solo pueden llegar hasta un máximo de 19 en Fortran y de 5 en WATF IV). En el tercer campo que abarca desde la columna 7 a la 72, se escriben ó perforan las proposiciones en sí, en este campo se pueden perforar las proposiciones como se desee, no empezando necesariamente de la columna 7, y usando los espacios en blanco de acuerdo a cada criterio.

El último campo abarca desde la columna 73 a la 80, y lo perforado ahí tampoco es procesado por la computadora; se usa solo para identificar el programa, sin embargo en la escritura de datos se pueden utilizar desde la columna 1 a la 80.

A continuación se han insertado las hojas de codificación del programa.

Estas hojas de codificación, son solamente un ejemplo de su uso; la primera representa la codificación de las primeras proposiciones del programa, y la segunda la codificación de datos.

No se han incluido todas las hojas de codificación ya que la computadora, además de los resultados nos ofrece la impresión en forma de listado, de todas las proposiciones, ya sean ejecutables ó no como en el caso de los comentarios.

F?	Factor de Formación
POROS,	Porosidad.....Ø %
RI,	Indice de Resistividad
Sw,	Saturación de agua.....%
RESP,	Reservas de Petroleo.....STB
Bo,	Factor de volumen de formación original
ACRE,	Extensión superficial del reservorio.....Acres
N,	Número de capas
EC,	Lectura de la curva SP; ; ;mv.
RSN,	Lectura de la curva de resistividad normal corta.....ohm-m
RUNO,	Lectura de la curva de resistividad micro-inversa.....ohm-m
RDOS,	Lectura de la curva de resistividad micro-normal.....ohm-m
Rt,	Lectura de la curva lateral.....ohm-m
NESP,	Espesor de cada capa.....pies
INESP,	Número de iteraciones para cada capa
STH,	Suma de las temperaturas de una capa pie/pie. ^o F
C,	Factor de corrección del SP
ECC,	Potencial espontáneo corregido.....mv.
RR,	Rxos/Ro
A,	RUNO/Rmcth
B,	RDOS/Rmcth
K,	Indicador de un cambio de lugar en el ordenamiento de las variables.

TEMP, Variable temporal

X, Y, Z, DELTA, DELTAP, Parámetros usados para la obtención de Rxo.

C A P I T U L O V

A N A L I S I S D E L O S R E S U L T A D O S

Como se mencionó anteriormente, las arenas que contengan hidrocarburos, serán aquellas que muestren un Índice de Resistividad (RI) mayor que 1.0; pero en la práctica pueden aparecer capas con RI ligeramente mayores que 1.0 que son acuíferas.

En estos casos las capas con mayores RI son las que se escogen, ya que en ellas se encuentran las mayores posibilidades de hallar hidrocarburos, dejándose las capas con RI más pequeños para las capas acuíferas.

Como el Índice de Resistividad es una función de la saturación de agua (Sw), en la práctica, se deberán escoger aquellas capas que presenten una Sw menor ó igual a 0.7, ó sea las que tengan un Índice de Resistividad mayor que 2.0

Los resultados parciales, no necesitan mayormente ser analizados pero, han sido incluidos solo como referencia ó cualquier chequeo posterior. Ellos estan listados en las tablas N^{OS} 2 y 2-A

En las tablas N^{OS} 3 y 3-A, aparecen tabulados, los resultados de acuerdo a un orden decreciente del Índice de Resistividad. Como se puede apreciar para el caso del pozo

RPC-1, cuatro son las capas cuyos RI predominan sobre los RI de las otras, siendo entonces estas cuatro capas las que nos interesan en cuanto a selección de zonas con potencial petrolífero; ellas son (en el mismo orden establecido por el programa):

Capa N^o 1, 2340-2364, RI = 34.5
Capa N^o 2, 2390-2409, RI = 20.8
Capa N^o 3, 2230-2299, RI = 20.0
Capa N^o 4, 2440-2445, RI = 13.2

Para el caso del pozo RPC-2, tenemos que de las ocho capas analizadas, seis de ellas son arenas que contienen hidrocarburos, sobre todo las dos primeras cuyos altos Indices de Resistividad nos indican que son arenas con una buena saturación de hidrocarburos; las cuatro siguientes podríamos catalogarlas como arenas de "bajo contenido de hidrocarburos"? pero que también pueden ser puestas en producción ya que su saturación de hidrocarburos está dentro del límite establecido anteriormente. Entonces tenemos para este pozo las siguientes capas:

Capa N^o 1, 2940-2980, RI = 47.6
Capa N^o 2, 3150-3180, RI = 22.7
Capa N^o 3, 2900-2910, RI = 9.7
Capa N^o 4, 2911-2930, RI = 5.3
Capa N^o 5, 3100-3120, RI = 4.2

Capa N^o 6, 2636-2644, RI - 3.9

El orden en el cual estas arenas pueden ser puestas en producción quedará al criterio del personal designado para ello; no siendo ello ya competencia de este trabajo.

Como se puede apreciar algunas son capas de Índice de Resistividad bastante elevado, lo que nos lleva a la conclusión de que pueden ser bastante ricas en hidrocarburos.

Las demás zonas, cuyos RI oscilan entre 1.0 y 1.45 las tomamos como acuíferas, ya que además presentan una saturación de agua bastante elevada, algunas casi 100%.

Las probables reservas de petróleo (en el caso de que el hidrocarburo presente sea líquido) calculadas para estas zonas acuíferas vienen así a convertirse en no producibles; ya que la saturación de aceite no alcanza la mínima saturación requerida para su movilización. Esta mínima saturación según lo establecido anteriormente sería de :

$$\text{Saturación de petróleo } (S_o) = 0.3 \quad (S_w = 0.7)$$

A continuación se incluye el listado-impreso por la computadora-del programa para cada uno de los casos.

C A P I T U L O VI

C O N C L U S I O N E S

La experiencia adquirida al emplear el método del Índice de Resistividad, para seleccionar capas con contenido de hidrocarburos, ha demostrado que la selección de zonas para el análisis no se debe concretar solamente a las que probablemente contienen aceite ó gas, sino también a las que se piensa que contienen agua.

De hecho, para obtener la máxima información, un RI debería ser computado para cada zona porosa atravesada por la broca. Desafortunadamente, muchas horas de esfuerzo concentrado por un analista experimentado pueden ser requeridas para computar estos índices en un pozo que contenga numerosas zonas porosas. Por lo tanto sería impráctico que el analista haga por si mismo cálculos para todas las zonas porosas en todos los pozos.

La velocidad y flexibilidad de las computadoras digitales, ofrece una solución a los problemas de computación para cada zona porosa, haciendo rápido uso de todos los datos de perfilaje disponibles; además una computación repetitiva resulta tediosa; con la aplicación de computadoras, el geólogo ó el ingeniero de petróleo, podrían trabajar más eficientemente con los resultados obtenidos de ellas; combinando su experiencia con estos resultados para llegar en forma segura y rápida a decisiones correctas.

Tambien es bueno anotar que, una buena lectura de los datos de los perfiles, darán resultados más ajustados a lo real y, que igualmente se pueden hacer otras combinaciones de perfiles.

Como se nota al final del listado de cada programa los tiempos de ejecución de ellos es del orden de los segundos, lo que nos muestra una vez más cuan rápida es la computadora y por consiguiente lo ventajoso de su uso.

A P E N D I C E I

VERIFICACION DE LA FORMULA N° 2
◆◆◆*****

Un ejemplo ayudará en la verificación de todas las fórmulas incluidas en este apéndice.

Para la N° 2; supongamos que conocemos la resistividad de una solución a 75 °F $R_1 = 0.3$ ohm-m, y queremos hallar la resistividad a 175 °F

Aplicando nuestra fórmula:

$$R_2 \text{ a } 175 \text{ } ^\circ\text{F} = 0.3(75/175)^{0.986} \\ = 0.3*0.434$$

R_2 a 175 °F = 0.1302 que es un valor bastante aproximado al obtenido directamente del gráfico y que es

$$R_2 = 0.130 \text{ (Ver fig. \#2)}$$

Con la misma fórmula se pueden hallar las resistividades del lodo, ó de la costra de lodo a la temperatura de formación.

VERIFICACION DE LA FORMULA N° 7-A

Dados $R_w = 0.02$ y $t = 100$ °F, aplicando la fórmula:

$$R_{wt} = 0.93(R_w + 0.03*75/t)$$

$$R_{wt} = 0.93(0.02 + 0.03*75/100) = \underline{0.03952}$$

El gráfico 2A arroja un valor de $R_{wt} = \underline{0.040}$

Otro ejemplo sería; dados $R_w = 0.04$ y $t = 150$ °F

$$R_{wt} = 0.93(0.04 + 0.03*75/150)$$

$R_{wt} = 0.051$, el mismo gráfico 2A da un

valor de $R_{wt} = 0.051$

VERIFICACION DE LA FORMULA N° 8

Nuestros datos serán:

$$R_{1''*1''} = 4.5 ; R_{2''} = 5.0 ; R_{mc} = 1.5$$

Luego, $R_{1''*1''}/R_{mc} = 3$ y $d = 0$ (según 10-B)

$$R_{2''}/R_{mc} = 3.33 \text{ y } d' = 1.0 \text{ (según 11-C)}$$

Reemplazando términos tenemos:

En (10)

$$X = \exp(3.04 + 0.1052*\ln(2)) - \exp(4.04 - 2.273*\ln(3)) + \exp(14.65 - 7.89*\ln(6)) + 0.$$

$$X = e^{3.1129} + e^{1.5429} + e^{0.52} = 22.5 - 4.69 + 1.682$$

$$\underline{X = 19.492}$$

En (11)

$$Y = \exp(3.105 + 0.087*\ln(2.33)) - \exp(1.795 - 0.838*\ln(2.33)) + \exp(17.88 - 13.48*\ln(9.5)) + 1;0$$

$$Y = e^{3.178} - e^{1.08} + e^{-4.677} + 1.0 = 23.9 - 2.96 + 0.0094 + 1$$

$$\underline{Y = 21.9494}$$

En (9)

$$Z = 2*21.9494 - 19.492 - \underline{24.4068}$$

En (8)

$$R_{xo} = 1.5(\exp(0.5625 - 1.079 \cdot \ln(1.955 - 0.06725 \cdot 24.4068)))$$

$$R_{xo} = 1.5(\exp(0.5625 + 1.2499))$$

$$= 1.5 \cdot 6.0$$

$$\underline{R_{xo} = 9.0}$$

Del gráfico obtenemos: (Fig. #3)

$$\underline{R_{xo} = 9.0} \quad \text{l.q.q.d.}$$

VERIFICACION DE LA FORMULA N° 12

Asumiremos los siguientes datos:

$$T_h = 250 \text{ }^\circ\text{F}; R_{mf} \text{ a } 250 \text{ }^\circ\text{F} = 0.3; SP = -140 \text{ mv.}$$

Del gráfico obtenemos un valor de

$$\underline{RR = R_{xos}/R_o = 22} \quad (\text{Fig. \#4})$$

Aplicando nuestros datos a la fórmula obtenemos:

$$R_{xos}/R_o = \frac{0.3}{\exp(0.572 - 0.924 \cdot \ln(250)) + \frac{\exp(22.22(-140) + \frac{60 + 250}{\ln(0.3 - \exp(0.572 - 0.924 \cdot \ln(250)))})}{}}$$

$$R_{xos}/R_o = \frac{0.3}{\exp(-4.528) + \exp(-4.381 + \ln(0.3 - \exp(-4.528)))}$$

$$R_{xos}/R_o = \frac{0.3}{0.01073 + \exp(-5.619)}$$

$$R_{xos}/R_o = \frac{0.3}{0.01433}$$

$$\underline{RR = R_{xos}/R_o = 21}$$

VERIFICACION DE LA FORMULA N^o 21

Asumamos: $e = 10$ pies, $R_{16}/R_m = 50$

Del gráfico obtenemos un factor de corrección de:

$$\underline{C = 1.31}$$

Reemplazando datos en la ecuación obtenemos:

$$C = 1 + (50/3*100)^{(0.45 + 0.02*10)}$$

$$C = 1 + (0.166)^{0.65}$$

$$\underline{C = 1.31} \quad \text{l.q.q.d.}$$

Las diferencias entre las lecturas de los gráficos y los resultados de las ecuaciones, pueden deberse ya sea a que la ecuación representativa no es muy exacta ó a errores de lectura en el gráfico. A pesar de esto, nuestros resultados nos ofrecen una buena aproximación para nuestro propósito.

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

- "Log Interpretation Chart Book", Schlumberger
- "Log Interpretation Principles", Schlumberger
- "Handbook of well log analisis", Pirson
- "Electric log interpretation is more easier by the use of nomographs", Oil and gas journal
Noviembre 1958 , Southwick
- "Digital computer programing for automatic analisis of well logs"
Journal of Petroleum Technology
Enero 1964, Southwick
- "Application of computers to the interpretation of well logs"
Journal of P. T. Abril 1961, Tuman
- "The universal log interpretation computer program"
SPE 1183 Oct. 3-6 1965, Breintenbach
- "Modern log analisis"
Journal of P.T. Dic. 1962, Tixier
- "The electrical ressstivity log as an aid in determing some reservoirs characteristics"
Journal of P.T. 1942, Archie
- "A cuantitative analisis of the electrochemical component of the SP curve" AIME 1949, Wyllie
- "Fundamentals of logging"
Abril 2-3 1956, University of Kansas
- "Programación Fortran IV", Mc Cracken
- "Formation Evaluation", AIME, 1960
- "Well logging", AIME 1958
- "Fortran IV language IBM System 360/ , IBM
- "Intróduction to numerical methods and fortran programing", Mc Calla