

Ing. Alfonso de la O CARREÑO



**Memoria de la investigación geofísica
preliminar por el método eléctrico,
en la Cuenca de México**



Sobretiro del Anuario 1943 de la
COMISION IMPULSORA Y COORDINADORA
DE LA INVESTIGACION CIENTIFICA
Mexico, D. F.



MEMORIA DE LA INVESTIGACION GEOFISICA PRELIMINAR POR EL METODO ELECTRICO, EN LA CUENCA DE MEXICO

*Ing. Alfonso de la O CARREÑO **

INTRODUCCION

Entre los trabajos de investigación que la Comisión Impulsora y Coordinadora de la Investigación Científica, ha estado llevando a cabo en el subsuelo de la Cuenca de México, se encuentran los de Geofísica Eléctrica encomendados al suscrito, que consistieron en un conjunto de sondeos en diversos lugares de la Ciudad de México y sus alrededores, convenientemente escogidos. El objeto que se persigue con esta investigación preliminar es el de ver las posibilidades de los métodos eléctricos para el estudio de la estratigrafía de la Cuenca ya que de ser sus resultados efectivos, se contaría con un poderoso auxiliar en la investigación de conjunto que se está llevando a cabo, dada su rapidez y economía.

Los lugares aceptados son cuatro y figuran en el plano adjunto (Anexo No. 1), donde se da su localización respecto a la Ciudad de México y las referencias que permiten fácilmente identificarlos.

Dichos lugares son los siguientes:

No. 1.—Al norte de la Ciudad entre Atzacapotzalco y la Colonia Pro-Hogar, en terrenos del Ejido de Santa Bárbara que fueron de la hacienda de San Antonio Tula a cuyo lugar puede llegarse fácilmente tomando por la calzada nueva que conecta con la carretera de Laredo. Al llegar al monumento conmemorativo de la Ciudad de México se toma la antigua calzada Vallejo y después la de Atzacapotzalco que conduce al casco de la hacienda que

* Investigador de la Comisión Impulsora y Coordinadora de la Investigación Científica.— Jefe de la Oficina de Geología de la Comisión Nacional de Irrigación.

queda al sur de la calzada. Se entra por un camino de tierra que pasa frente al casco y se está ya, después de poco andar, en el Sitio No. 1, localizado al sur de otro camino normal al de la hacienda.

No. 2.—Se toma la calzada de Balbuena y luego la Avenida del Taller que atraviesa la Colonia Alvaro Obregón; dicha avenida desemboca en la zona occidental del Campo Militar, en donde se encuentra el Sitio No. 2, que está referenciado a dos bases de reflectores eléctricos que ahí se encuentran. En este sitio se observó otra estación testigo a 50 m. al norte de la fundamental, cuyos sondeos serán comparados entre sí.

No. 3.—Este sitio se encuentra a unos 300 m. al sur de la antigua hacienda de Narvarte al este de la prolongación de la Calle de Uxmal, que es por ahora el límite oriental de la urbanización de la Colonia Narvarte. En este lugar también fué observada otra estación testigo a 50 m. al norte de la fundamental. Ambas están referenciadas a dos coladeras de la acera del este. La calzada de Xola conduce muy bien a este lugar.

No. 4.—La estación No. 4 se encuentra en la Alameda Central, en el lado norte de la calzada del centro, cerca de las pérgolas.

Los sondeos observados serán controlados posteriormente mediante perforaciones para comprobar sus resultados.

El estado actual del desarrollo de la Geofísica Aplicada no permite obtener indicaciones directas o específicas de las formaciones o accidentes geológicos objeto de su investigación, solamente en ciertos casos y métodos como el de Radiactividad y el Análisis de Gases. Sin embargo una vez conocidas las características geológicas de una zona explorada y correlacionadas con las observaciones geofísicas, es posible obtener indicaciones propiamente directas; tal sucede por ejemplo en los cortes eléctricos en pozos ya perforados (Electrical Coring) o en la determinación de capas "índices" en sondeos eléctricos o en la geofísica sísmica.

Por lo que toca al gran relleno sedimentario de la Cuenca de México, sabemos que es muy complejo e inconstante. Las capas de arcillas, arenas y en algunos casos de tobas de muy variada composición granulométrica, grado de saturación y composición litológica varían mucho en espesor y también en extensión a rumbo, siendo en muchos de los casos de forma lenticular. Por lo tanto es de esperarse notables variaciones en distancias relativamente cortas. Así pues, el estudio sistemático por medio de perforaciones sería sumamente costoso pues tendrían que hacerse un número muy grande de ellas. Pero perforaciones bien escogidas podrían controlar un conjunto de sondeos

eléctricos que se practicaran a distancias cada vez más alejadas de tales perforaciones hasta el momento en que se viera que el carácter de las observaciones y curvas francamente cambiara. De este modo serían muy útiles tales sondeos en la investigación de la Cuenca de México.

Como veremos después, en la discusión e interpretación de las observaciones, creo que hemos obtenido resultados muy halagadores, si se tienen en cuenta los contrastes eléctricos no muy marcados entre las capas del gran relleno de la Cuenca. Realmente entre los trabajos que yo conozco sobre la aplicación de los métodos eléctricos, no he tenido noticia de que se hayan aplicado en condiciones tan desfavorables con resultados concretos y claros.

FUNDAMENTOS TEORICOS DE LOS PROCEDIMIENTOS EMPLEADOS

Considero necesario exponer brevemente los fundamentos teóricos en que se basan los procedimientos empleados en esta investigación.

Dichos procedimientos son tres modalidades del llamado "Método de las Relaciones de Caídas de Potencial", dos de ellas conocidas ya en la Geofísica Aplicada y la tercera elaborada en la teoría y aplicación por el que esto escribe y de la cual tiene en preparación una memoria detallada que enviará próximamente a la Sección de Geofísica del A.I.M.E.

En general los métodos geoelectricos pueden clasificarse en tres grandes grupos:

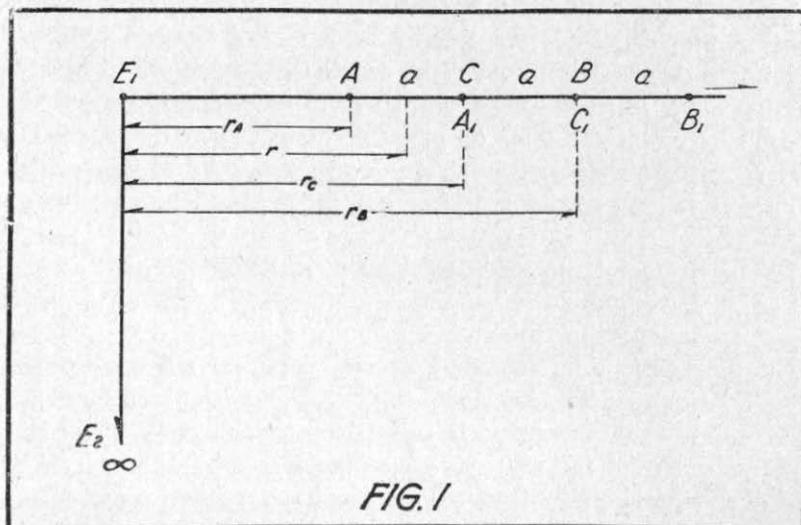
- 1.—Los basados en la medida del potencial eléctrico.
- 2.—Los electromagnéticos.
- 3.—Los Radio-métodos.

El de Relaciones de Caídas de Potencial, pertenece al primer grupo, en el que están comprendidos además los de: Self-Potencial, Cartas de Equipotenciales y Perfiles de Potencial, Eltran y Resistividad propiamente dichos.

Las ventajas del método aplicado sobre los otros métodos eléctricos conocidos, es el de permitir tanto en los sondeos verticales como en secciones transversales la determinación no sólo de las variaciones de las relaciones de caídas de potencial, sino también las de la resistividad aparente y del gradiente de potencial, por lo que la interpretación se facilita más debido a que dichas funciones se complementan mutuamente. Por otra parte su gran sensibilidad permite establecer la diferenciación entre dos formaciones geológicas cuyas propiedades eléctricas ofrezcan poco contraste entre sí. Desde luego que se necesitan equipos adecuados para aprovechar todas las ventajas que este método ofrece.

He tenido oportunidad de aplicarlo en ciertos problemas de la Geología del Petróleo como en la localización de fallas y fracturas; también en el estudio de boquillas para la construcción de presas; en la investigación de aguas subterráneas, etc.

En las tres variantes que aquí expongo brevemente se resuelve el problema de las tres capas de las cuales la superior es la atmósfera. La resolución de este problema permite a su vez extenderla al caso de las capas múltiples. Los tres medios se consideran homogéneos e isotrópicos, con propiedades diferentes entre sí. En el caso de la atmósfera se le considera de conductibilidad nula o de resistividad infinita. Los tres medios se consideran de extensión infinita a rumbo y separados por planos horizontales, pero puede considerarse también el plano de separación inferior inclinado. La capa intermedia se considera de espesor finito mientras que las otras dos de espesores infinitos.



El estudio de la distribución de un campo eléctrico artificial ya sea estable o cuasi-estable, generado éste por una corriente alterna, en el que pueda desprejarse el "skin-effect" y la polarización elíptica, permite establecer las funciones que dan las variaciones de las Relaciones de Caídas de Potencial, del Gradiente y Resistividad por medio de las cuales es posible determinar el espesor de la capa intermedia o la profundidad a la capa inferior.

Dicho campo se forma entre dos punto-electrodos E_1 y E_2 (Ver Fig.

No. 1) en la superficie de separación con la atmósfera, suficientemente alejados entre sí para que en la distribución del campo en las cercanías de uno de ellos pueda despreciarse el efecto del otro. Muchos son los dispositivos que se utilizan para el estudio de la distribución del campo que dependen fundamentalmente de la forma en la que se midan las caídas de potencial. En el método de Relaciones de Caídas de Potencial, se miden dichas caídas entre tres electrodos A, C y B en una línea normal a la de los electrodos primarios E_1 y E_2 .

Variante No. 1.—(Normal con equidistancia constante) En esta variante ya sea que se trate de sondeos o secciones (Perfiles), la distancia (a) entre AC y CB permanece constante, incrementándose sucesivamente la distancia r_c al electrodo central C, para ir ganando profundidad.

Para cada valor de r_c se miden las relaciones $\frac{\Delta V_{Ac}}{\Delta V_{cB}}$ que se acostumbra llamar simplemente A/B las cuales se comparan con la relación normal, dividiendo ésta entre A/B obteniéndose una serie de valores que son los que se estudian e interpretan.

Se demuestra que la relación normal, es decir, la que correspondería a un medio isótropo y homogéneo, tiene por expresión general:

$$F = \frac{r_B(r_c - r_A)}{r_A(r_B - r_c)} \quad (1)$$

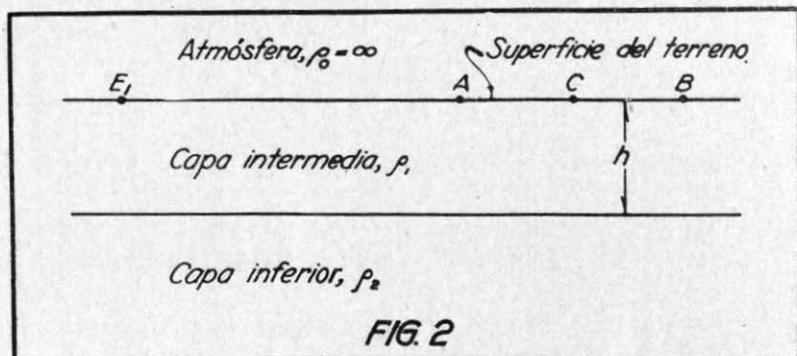
que para el caso que estamos considerando (a , constante) se convierte simplemente en:

$$F = \frac{r_B}{r_A} = \frac{r_c + a}{r_c - a} \quad (2)$$

Conviene que las relaciones sucesivas A/B estén ligadas entre sí para lo cual los incrementos sucesivos de r_c serán precisamente iguales a la equidistancia (a); se procede en esta forma para obtener de ellos también la variación continua de la resistividad aparente. En efecto si en un punto se determinó la relación A/B y se supone una caída de potencial ΔV_{AC} arbitraria entre los electrodos A y C, la caída ΔV_{cB} entre C y B tendrá por valor B/A (ΔV_{AC}) que servirá para el cálculo de la caída en la siguiente posición la que se ha medido una nueva relación A_1/B_1 cuando C ocupa la posición C_1 y así sucesivamente. La expresión general de la resistividad aparente es:

$$\rho_a = \frac{2\pi r_c r_A}{r_c - r_A} \left(\frac{\Delta V}{I} \right) = 2\pi B \left[\left(\frac{r}{a} \right)^2 - \frac{1}{4} \right] \frac{\Delta V}{I} \quad (3)$$

que corresponde no a la distancia r_c , sino a la distancia media r , entre A y C , resultando además ρ_a en valores relativos no reales, supuesto que las caídas de potencial sucesivas parten de un valor arbitrario. Por eso en la ecuación número 3 puede suponerse el factor $2\pi/l$ igual a la unidad u otra constante cualesquiera.



En el caso que estamos considerando la expresión del potencial para un punto cualesquiera en la superficie de separación entre la atmósfera y la capa intermedia tiene por expresión general:

$$v = \frac{\rho_1 I}{2\pi} \left[\frac{1}{r} + 2 \sum_{n=1}^{\infty} \frac{K^n}{\sqrt{r^2 + (2nh)^2}} \right] \quad (4)$$

En la cual:

I , es la intensidad de la corriente que emerge de E_1

r , la distancia del punto considerado a E_1

h , profundidad de la capa intermedia

ρ_1 , la resistividad de dicha capa

$K = \frac{\rho_2 - \rho_1}{\rho_2 + \rho_1}$, coeficiente de reflexión eléctrico respecto a la capa inferior.

ferior.

n , el número infinito de imágenes de I .

Con ayuda de la ecuación 4, es posible calcular las caídas de potencial entre AC y CB y de ellas las relaciones A/B que tienen por expresión general:

$$\frac{A}{B} = \frac{\frac{(r_c - r_A)h}{r_A r_c} + \sum_{n=1}^{\infty} \left(\frac{K^n}{\sqrt{\frac{1}{4} \left(\frac{r_A}{h}\right)^2 + n^2}} - \frac{K^n}{\sqrt{\frac{1}{4} \left(\frac{r_c}{h}\right)^2 + n^2}} \right)}{\frac{(r_B - r_c)h}{r_c r_B} + \sum_{n=1}^{\infty} \left(\frac{K^n}{\sqrt{\frac{1}{4} \left(\frac{r_c}{h}\right)^2 + n^2}} - \frac{K^n}{\sqrt{\frac{1}{4} \left(\frac{r_B}{h}\right)^2 + n^2}} \right)} \quad (5)$$

cuando $Q_1 = Q_2$, $K = 0$ y la ecuación número 5 se convierte en la número 1.

En la variante que estamos considerando, a es constante y las cantidades r_A y r_B pueden ponerse en función de r_c , ésto es:

$$r_A = r_c - a \quad \text{y} \quad r_B = r_c + a$$

En este caso las relaciones r_c/h y r_c/a son variables, mientras que a/h es constante. Si llamamos:

$x = r_c/h$ y $c = a/h$ nos resulta $r_c/a = x/c$ entonces la relación A/B de acuerdo con la ecuación No. 5, corregida ya por relación normal tiene por expresión general:

$$F \frac{B}{A} = \frac{\left(\frac{x+c}{x-c}\right) \frac{\frac{c}{(x+c)x} + \sum_{n=1}^{\infty} \left(\frac{K^n}{\sqrt{\frac{x^2}{4} + n^2}} - \frac{K^n}{\sqrt{\left(\frac{x+c}{2}\right)^2 + n^2}} \right)}{\left(\frac{c}{(x-c)x} + \sum_{n=1}^{\infty} \left(\frac{K^n}{\sqrt{\left(\frac{x-c}{2}\right)^2 + n^2}} - \frac{K^n}{\sqrt{\frac{x^2}{4} + n^2}} \right)} \right)}{\quad} \quad (6)$$

Ecuación que una vez fijado el valor de (c) servirá para calcular y construir gráficas de interpretación, para diferentes valores de K , que varía entre $(+1)$ y (-1) , haciendo variar n , generalmente hasta 10 y la profundidad siguiente:

Demostró el que esto escribe (1) que la expresión general de la resistividad aparente (Ec. 3), en el problema que estamos considerando, es la relativa (x) .

(1) Una Nueva Expresión Teórica de la Resistividad Aparente en el Problema Geofísico de las Dos Capas.—Primer Congreso Nacional de Matemáticas (Saltillo, Coah. Nov. 1942).

$$\rho_0 = \rho_1 \left\{ 1 + 2 \left[\left(\frac{r}{a} \right)^2 - \frac{1}{4} \right] \sum_{n=1}^{\infty} \left[\frac{K^n}{\sqrt{\left(\frac{r}{a} - \frac{1}{2} \right)^2 + \left(\frac{2nh}{a} \right)^2}} - \frac{K^n}{\sqrt{\left(\frac{r}{a} + \frac{1}{2} \right)^2 + \left(\frac{2nh}{a} \right)^2}} \right] \right\} \quad (7)$$

Para la variante que estamos analizando, la relación h/a es constante y puede fijarse de antemano, pero r/a es variable y la interpretación se dificulta pues tendría que construirse una serie de familias de gráficas para un número muy grande valores de h/a , haciendo variar en cada caso las relaciones r/a . Las dificultades de cálculo para la interpretación se subsanan con el procedimiento ideado por el que esto escribe y que consiste en la variante o modalidad No. 3.

Variante No. 2. (Normal con equidistancia variable).—En esta modalidad, la equidistancia (a) no es constante sino se incrementa a medida que aumenta r_c , guardando una cierta relación fija con ella que se establece de antemano. En este caso, además de ser variable la relación r_c/h también lo es a/h . Si llamamos M a la relación constante r_c/a tendremos:

$$M = \frac{r_c}{a} = \frac{x}{c} \quad \text{o} \quad c = \frac{x}{M} = \frac{a}{h}$$

En este caso la ecuación (6) se convierte en la siguiente aplicable en el caso que estamos considerando.

$$\frac{B}{A} F = \frac{(M+1)}{(M-1)} \frac{\frac{1}{x(M+1)} + \sum_{n=1}^{\infty} \left(\frac{K^n}{\sqrt{\frac{x^2}{4} + n^2}} - \frac{K^n}{\sqrt{\left(\frac{M+1}{M}\right)^2 \frac{x^2}{4} + n^2}} \right)}{\frac{1}{x(M-1)} + \sum_{n=1}^{\infty} \left(\frac{K^n}{\sqrt{\left(\frac{M-1}{M}\right)^2 \frac{x^2}{4} + n^2}} - \frac{K^n}{\sqrt{\frac{x^2}{4} + n^2}} \right)} \quad (8)$$

En la aplicación práctica, he encontrado muy convenientes los valores 3 y 5 para M . La ecuación No. 8 es interpretable rigurosamente y los incrementos de r_c y a pueden hacerse tan pequeños como se quiera. En la presente investigación incrementamos a de 0.50 m. en 0.50 m. y de metro en metro.

Como en esta variante los valores observados A/B no están ligados entre sí, sino independientes, no es posible obtener una curva de la variación continua de la resistividad partiendo de la ecuación No. 7, teniendo que contentarse solamente con las relaciones de caídas de potencial.

Variante No. 3.—Hemos visto que en la variante No. 1 se obtienen

los valores de A/B ligados entre sí y que puede obtenerse una curva continua de ρ pero difícilmente interpretable. Por otra parte dicho método es poco sensible y efectivo, debido a que al ir incrementándose la profundidad r_c como (a) permanece constante, las caídas de potencial son cada vez menores siendo poco apreciables e inciertas desde cuando r_c es igual a unas 10 veces el valor de a .

La segunda variante tiende a evitar esta dificultad y defecto, puesto que la equidistancia (a) es incrementada al mismo tiempo que r_c , pero en cambio proporciona valores desligados de las relaciones A/B lo que impide obtener la variación continua de ρ .

Las anteriores razones indujeron al que esto escribe a idear una nueva variante y modalidad a modo de obtener no sólo las relaciones A/B ligadas entre sí y por lo tanto una variación continua de la resistividad aparente interpretable, sino también conservar la sensibilidad en las observaciones.

Ya expuse en otra ocasión (2) detalladamente esta nueva modalidad que aquí sintetizaré.

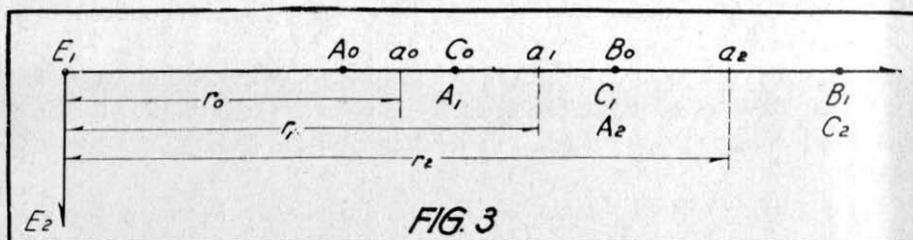
El artificio consiste en lo siguiente:

Podemos ver que en la ecuación No. 7 que da la variación de la resistividad aparente, se tienen dos relaciones variables r/a y h/a ; si fijamos la primera de ellas que podemos llamar R , la relación h/a puede expresarse en función de la distancia media r , esto es: $h/a = Rh/r$ con lo cual nuestra ecuación quedará expresada solamente en función de esta relación y podrá ser fácilmente interpretable. Esto implica que al incrementarse la profundidad, aumenten todas las cantidades que intervienen de modo que se conserve la relación $R = r/a$ constante creciendo las separaciones entre AC y CB, que llamaremos respectivamente a_A y a_B de modo que las relaciones de caídas de potencial queden ligadas.

En la Fig. 3, $A_0 C_0 B_0$ representa la posición inicial de los electrodos de potencial, siendo la relación entre la distancia r_0 y la separación a_0 igual a R ; en la siguiente observación, las posiciones de los electrodos de potencial son $A_1 C_1 B_1$, correspondiendo ahora los dos primeros a las anteriores C_0 y B_0 , la nueva distancia r_1 conservará también la relación R con la separación a_1 y así sucesivamente.

Es posible expresar para una observación o posición cualesquiera (m)

(2) Nueva Modalidad en la Teoría y Aplicación del Método de las Relaciones de Caídas de Potencial de la Geofísica Eléctrica.—Ia. Asamblea Regional de la Sociedad Matemática Mexicana. (Cuernavaca, Mor., Nov. 1943.)



todas las cantidades que intervienen en esta variante, en función de la separación inicial a_0 y de la relación fija R como sigue:

$$a_A = a_M = a_0 \left(\frac{R+0.5}{R-0.5} \right)^m \quad (9)$$

$$a_B = a_{m+1} = a_0 \left(\frac{R+0.5}{R-0.5} \right)^{m+1} \quad (10)$$

$$r_A = a_0 \left(\frac{R+0.5}{R-0.5} \right)^m (R-0.5) \quad (11)$$

$$r_m = a_0 R \left(\frac{R+0.5}{R-0.5} \right)^m \quad (12)$$

$$r_{cm} = a_0 \left(\frac{R+0.5}{R-0.5} \right)^m (R+0.5) \quad (13)$$

$$l_{Bm} = a_0 \left(\frac{R+0.5}{R-0.5} \right)^{m+1} (R+0.5) \quad (14)$$

En este caso la relación normal, partiendo de la ecuación No. 1 y teniendo en cuenta los valores de las ecuaciones 9, 10, 11, 13 y 14, quedará expresada por la sencilla ecuación:

$$F = \frac{R + \frac{1}{2}}{R - \frac{1}{2}} \quad (15)$$

En este caso la ecuación que nos da las relaciones de caídas de potencial corregidas por relación normal es:

$$\frac{B}{A} F = F \frac{\frac{1}{x} (F-1) + \sum_{n=1}^{\infty} \left(\frac{K^n}{\sqrt{\left(\frac{x}{2}\right)^2 + n^2}} - \frac{K^n}{\sqrt{\left(\frac{Fx}{2}\right)^2 + n^2}} \right)}{\frac{1}{x} (F-1) + \sum_{n=1}^{\infty} \left(\frac{K^n}{\sqrt{\left(\frac{x}{2F}\right)^2 + n^2}} - \frac{K^n}{\sqrt{\left(\frac{x}{2}\right)^2 + n^2}} \right)} \quad (16)$$

En esta ecuación $x = r_c/h$

La expresión general de la resistividad aparente será, haciendo igual a la unidad el factor $2\pi/I$

$$\rho_a = a_A \left(R^2 - \frac{1}{4} \right) \Delta v \quad (17)$$

que nos da como en los casos anteriores la variación relativa de la resistividad.

APLICACION DE LA TEORIA ANTERIOR EN LA PRESENTE INVESTIGACION

La variante No. 1 (método normal con equidistancia constante) se aplicó para tener una primera idea general de la variación de las dos funciones en cada sondeo, es decir, las relaciones de caídas de potencial y la resistividad aparente.

La variante No. 2 (método normal con equidistancia variable) se empleó con valores de 3 y 5 para la relación $M = r_c/a$; para dichos valores de M la ecuación No. 8 toma las dos formas siguientes:

$$M = 3:$$

$$\frac{B}{A} F = 2 \frac{\frac{1}{4x} + \sum_{n=1}^{\infty} \left(\frac{K^n}{\sqrt{\frac{x^2}{4} + n^2}} - \frac{K^n}{\sqrt{\frac{4x^2}{9} + n^2}} \right)}{\frac{1}{2x} + \sum_{n=1}^{\infty} \left(\frac{K^n}{\sqrt{\frac{x^2}{9} + n^2}} - \frac{K^n}{\sqrt{\frac{x^2}{4} + n^2}} \right)} \quad (18)$$

$$\frac{B}{A} F = 1.5 \frac{\frac{1}{6x} + \sum_{n=1}^{\infty} \left(\frac{K^n}{\sqrt{\frac{x^2}{4} + n^2}} - \frac{K^n}{\sqrt{\frac{9x^2}{25} + n^2}} \right)}{\frac{1}{4x} + \sum_{n=1}^{\infty} \left(\frac{K^n}{\sqrt{\frac{4x^2}{4} + n^2}} - \frac{K^n}{\sqrt{\frac{x^2}{4} + n^2}} \right)} \quad (19)$$

La variante No. 3 se aplicó utilizando para la relación $r/a=R$ valores también de 3 y 5 y en ocasiones de 8.

Para los valores particulares de 3 y 5, las ecuaciones 7 y 16 toman las siguientes formas especiales respectivamente:

$$R = 3:$$

$$\frac{\rho_2}{\rho_1} = 1 + 17.5 \sum_{n=1}^{\infty} \left[\frac{K^n}{\sqrt{6.25 + \left(\frac{6nh}{r}\right)^2}} - \frac{K^n}{\sqrt{12.25 + \left(\frac{6nh}{r}\right)^2}} \right] \quad (20)$$

$$\frac{B}{A} F = 1.4 \frac{\frac{0.286}{x} + \sum_{n=1}^{\infty} \left(\frac{K^n}{\sqrt{0.25x^2 + n^2}} - \frac{K^n}{\sqrt{0.49x^2 + n^2}} \right)}{\frac{0.400}{x} + \sum_{n=1}^{\infty} \left(\frac{K^n}{\sqrt{0.1275x^2 + n^2}} - \frac{K^n}{\sqrt{0.25x^2 + n^2}} \right)} \quad (21)$$

$$R = 5:$$

$$\frac{\rho_2}{\rho_1} = 1 + 49.5 \sum_{n=1}^{\infty} \left[\frac{K^n}{\sqrt{20.25 + \left(\frac{10nh}{r}\right)^2}} - \frac{K^n}{\sqrt{30.25 + \left(\frac{10nh}{r}\right)^2}} \right] \quad (22)$$

$$\frac{B}{A} F = 1.2222 \frac{\frac{0.181818}{x} + \sum_{n=1}^{\infty} \left(\frac{K^n}{\sqrt{0.25x^2 + n^2}} - \frac{K^n}{\sqrt{0.373x^2 + n^2}} \right)}{\frac{0.22222}{x} + \sum_{n=1}^{\infty} \left(\frac{K^n}{\sqrt{0.167x^2 + n^2}} - \frac{K^n}{\sqrt{0.25x^2 + n^2}} \right)} \quad (23)$$

EQUIPO ELECTRICO USADO

Se utilizó un gradiómetro de resistencia construido por la "Heiland-Research Co." de Denver, Colo., E.U.A., de acuerdo con el diseño del Dr. C. A. Heiland. Los gradiómetros de resistencia pertenecen a los dispositivos con puente de corriente alterna, con resistencias ajustables en los brazos simétricos del puente y con galvanómetro central. Es posible en estos aparatos hacer el ajuste de las diferencias de fase en las medidas de las dos caídas sucesivas de potencial. Tienen además un sistema de amplificación y a diferencia de otros aparatos, la frecuencia con que trabajan es muy baja, apenas de 25 ciclos, lo que permite mayor penetración.

DISCUSION E INTERPRETACION DE LAS OBSERVACIONES

Con el fin de obtener valores de las relaciones de caídas de potencial y de la resistividad depurados de las influencias por irregularidades superficiales o efectos de anisotropía lateral, cada serie se repitió con el campo eléctrico primero a un lado cambiándose después al lado contrario de la

estación, es decir a 180° , obteniéndose para su análisis y cálculo la serie promedio, de modo que las observaciones fueron en general:

- I.—2 Series, método normal con equidistancia constante de 10 m.
- II.—2 Series, método normal con equidistancia variable, con relación $M = 3$ y con incrementos de 0.50 m. y de 1.0 m.
- III.—2 Series, método del autor con relación $R = 3$ y separación inicial $a_0 = 1$ m.
- IV.—2 Series, método del autor con relación $R = 3$ y separación inicial $a_0 = 1.00$ m.
- V.—2 Series, método del autor con relación $R = 5$ y separación inicial $a_0 = 0.50$ m.
- VI.—2 Series, método del autor con relación $R = 8$ y separación inicial $a_0 = 1.00$ m. (excepcionalmente).

En las estaciones testigos sólo se aplicó el procedimiento IV.

En esta investigación preliminar creí conveniente proceder en tal forma con el fin de saber cuáles procedimientos conviene aplicar en adelante si se prosigue esta investigación, llegándose a la conclusión de que son suficientes los procedimientos II y V, siendo por lo tanto en lo sucesivo mucho más rápida la observación de un sondeo.

Los cálculos de interpretación se hicieron con ayuda de diferentes diagramas del que esto escribe, preparados desde hace tiempo partiendo de las ecuaciones ya mencionadas en esta memoria.

SONDEO EN LA ESTACION No. 1

Quizá el sitio más cómodo para la observación fué éste debido a que está alejado de perturbaciones eléctricas locales y que el terreno superficialmente tiene una gran conductibilidad pasando la energía fácilmente al subsuelo.

En el Anexo No. 2, figura un resumen de las gráficas medias de observación tanto de ρ como de BF/A . La fundamental es la referente a la variante No. 3, con $R = 5$ y $a_0 = 0.50$ m. Los cálculos indican 18 contactos entre formaciones, algunos de ellos no muy precisos. Dentro de cierta tolerancia dichos contactos se comprueban partiendo de otras gráficas y con otros procedimientos. En el anexo No. 3, figuran, por vía de ilustración, gráficas que dan la resolución de algunas de las profundidades de los contactos con sus respectivos coeficientes de reflexión K . El resumen de estas determinaciones figura en la tabla siguiente:

ESTACION No. 1.—Resumen de los contactos encontrados.
(Profundidades) en los cálculos de interpretación

Resistividad		RELACIONES B/A F	
$R = 5$	$a_0 = 0.50 \text{ m.}$	$R = 3.$	$a_0 = 1 \text{ m.}$
Tagg	Longacre	Tagg	$M = 3.$
			Incrementos de 1 m.
2.10 m.			
2.90		2.70	
3.10		3.08	
3.33		3.45	
4.10			4.00
4.45		4.30	
4.95			
5.75			
6.25			6.00
			8.00 (D)
12.70			12.00
13.00			
14.30 (D)		14.70	
28.00 (D)			30.00
35.00			34.00
38.00	37.25		38.00
50.00	46.25		
	55.50 (D)		
	59.50 (D)		
65.00	67.50 (D)		
77.50 (D)	81.00 (D)		

(D) Significa dudoso. Sin embargo en algunos casos como 14.30 y 28.00 se comprobaron por otros procedimientos.

Como una ayuda para la interpretación se hizo un intento para calcular las resistividades medias individuales de las capas o conjunto de capas, aplicando la ley de Kirchhoff para dos resistencias conectadas en paralelo, de modo que la resistividad media ρ_m de dos capas sucesivas de espesores h_1 y h_2 y de resistividades ρ_1 ρ_2 la determinaremos por la relación:

$$\frac{H}{\rho_m} = \frac{h_1}{\rho_1} + \frac{h_2}{\rho_2} \quad (24)$$

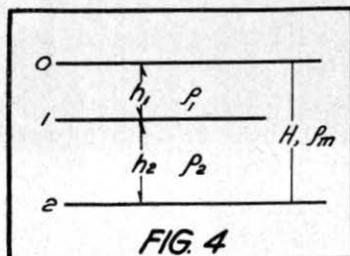


FIG. 4

de la que despejaremos el valor de ρ_2 de la capa inferior. Los espesores son conocidos y también ρ_1 de la capa o conjunto de capas hasta antes de la considerada así como ρ_m que es la resistividad media de las dos capas para el conjunto $h_1 + h_2 = H$ para el contacto 2 deducido de los mismos cálculos de interpretación. Entonces se tendrá en general

Entonces se tendrá en general

$$\rho_2 = \frac{h_2}{\frac{H}{\rho_m} - \frac{h_1}{\rho_1}} \quad (25)$$

Con esta ecuación se calcularon los valores que figuran en el resumen final que aquí se da, en el que figura la probable columna estratigráfica:

$\Sigma h = H$	h	Q m hasta la prof. H	Q de cada capa o conjunto.	Probable columna estratigráfica
2.10	2.10	1237	1237	Tierra vegetal y arcilla.
2.90	0.80	1237		
3.10	0.20	1237	1988	Tres capas de arcilla relativamente húmeda.
3.33	0.23	1432		
4.10	0.77	1564	2610	Arcilla menos húmeda.
4.45	0.35	1432		
4.95	0.50	1781	5480	Dos capas de arcilla algo compacta.
5.75	0.80	2684		
6.25	0.50	2072	5650	Dos capas de arcilla.
12.70	6.45	3565	11620	Formación muy compacta tal vez de tobas arenosas • arcillas arenosas.
13.00	0.30	4851		
14.30	1.30	4227	9840	Estratos compactos tal vez de tobas o areniscas arcillosas.
28.00	13.70	5478		
35.00	7.00	5210		
38.00	3.00	5431	5290	Arcilla húmeda tal vez con intercalaciones de arenas.
50.00	12.00	4913	3775	
65.00	15.00	4340	3125	Arcillas probablemente saturadas, con intercalaciones de lechos arenosos y de grava que forman acuíferos.
77.50	12.50	4340	4340	

En el Anexo No. 4 se da una gráfica de la variación de Q

SONDEO EN LA ESTACION No. 2

En este sitio se observó en la superficie del terreno resistencia alta para dejar paso a la energía eléctrica y no se contó con la gran sensibilidad que en el Sitio No. 1.

En el anexo No. 5 se dan las gráficas eléctricas de este sondeo; en el mismo anexo figuran las que corresponden a la estación testigo que fué aquí observada también a la que me referiré después.

Los cálculos de interpretación acusan en este sitio 10 contactos 3 de ellos algo dudosos. (Véanse ejemplos ilustrados en el anexo 7). Como en el sitio anterior fué calculada la resistividad media de cada capa o serie, dando su equivalente geológico para formar la probable columna estratigráfica. En el siguiente cuadro figuran en forma de resumen los resultados obtenidos y en el anexo No. 6 una gráfica de la resistividad media de cada capa o serie.

RESULTADOS OBTENIDOS EN LA ESTACION No. 2

$\Sigma h = H$	h	Q m hasta la prof. H	Q de cada capa o se- rie.	Probable columna estratigráfica
2.25	2.25	1100	1100	Arcilla salitrosa con algo de tierra vegetal en la superficie.
8.00	5.75	1309	1430	Arcilla húmeda.
11.00	3.00	1332	1395	Arcilla probablemente saturada.
16.00	5.00	1373	1470	Arcilla húmeda.
27.00	11.00	1705	2638	Arcilla menos húmeda.
33.00 (D)	6.00	1869	6770	Capas de arcilla y arenas algo compactas.
36.00 (D)	3.00	2098		
42.90	6.90	2885	12770	Serie heterogénea de arcillas y arenas compactas.
50.00	17.10	3491		
87.00 (D)	27.00	4076		

Es interesante ver que las curvas eléctricas de la estación testigo (Anexo 5) son muy semejantes a las de la estación fundamental, aunque naturalmente no con los mismos valores de las relaciones y la resistividad aparente.

La gráfica de las variaciones de las relaciones es bastante semejante a la correspondiente de la estación fundamental con valores sistemáticamente menores que en ésta, sucediendo lo contrario con los valores de ρ que son siempre mayores. De todas maneras estas gráficas nos indican la semejanza estratigráfica de ambos sitios que desde luego son bien diferentes a los de la estación del norte o sea la No. 1. En una exploración sistemática se haría

la comparación y correlación de sondeos de una misma zona analíticamente; por ahora sólo se ha hecho una comparación cualitativa para ilustrar sobre la posibilidad del método. Del mismo modo se procedió al comparar en la estación número 3, el sondeo fundamental.

SONDEO DE LA ESTACION No. 3

Las gráficas que corresponden a este sitio son las Nos. 8, 9 y 10.

En el primero de estos anexos figuran las gráficas eléctricas de la estación fundamental y su testigo. Puede observarse la notable semejanza tanto de la de relaciones de caídas de potencial como de la de resistividad aparente, siendo valores más grandes en la estación testigo.

Este sitio es muy interesante por los marcados contrastes entre las capas o series de ellas. La interpretación dió 13 contactos de diferentes capas, tres de ellos dudosos. Se da el resumen anexo con las profundidades de estos contactos así como de la resistividad de cada capa o serie y la probable columna estratigráfica. El Anexo 9 ilustra como en los casos anteriores las determinaciones de las profundidades y en el No. 10 se da la gráfica de la resistividad de cada capa o serie.

RESULTADOS OBTENIDOS EN LA ESTACION No. 3

$\Sigma h = H$	h	Q_m hasta la prof. H	Q de cada capa o serie.	Probable columna estratigráfica
1.70		1237		Tierra vegetal, escombros y arcilla.
2.30	2.30	1237	1237	
3.15	0.85	1082	850	Arcilla húmeda.
5.45	2.30	755	534	Arcilla impregnada.
14.50	9.05	662	616	Arcilla menos impregnada.
15.40	0.90	686	1636	Capa compacta probablemente con arena y grava.
20.60	5.20	729	895	Arcilla húmeda.
28.40	7.80	909	2620	Arcillas algo compactas.
31.20	2.80	813	391	Acuífero probablemente con arenas y gravas.
35.80 (D)		989		
39.60		1237		
41.50 (D)		1092	4380	Serie heterogénea de lechos de arcilla y arenas en parte compactas.
66.00 (D)	34.80	1424		

SONDEO DE LA ESTACION No. 4

Este lugar corresponde a la Alameda Central de la Ciudad de México, de acuerdo con los deseos de la C.I.C.I.C.

Las observaciones en ella demostraron que es posible trabajar con el equipo de que se dispone en condiciones verdaderamente desventajosas dadas las múltiples influencias provocadas por las redes eléctricas urbanas y el tránsito de tranvías. Para observar en las mejores condiciones posibles se operó durante las noches. La baja frecuencia (25 ciclos) con la que operamos eliminó muchas de dichas interferencias, sin embargo, la penetración es mucho más limitada que en el resto de las estaciones operando en igualdad de condiciones.

Los resultados se dan en la tabla adjunta y en los Anexos 11, 12 y 13. Se determinaron hasta 11 contactos, existiendo dos zonas muy interesantes, la primera probablemente saturada sobre todo entre los 7.85 m. y 15.00 m. La otra con una capa de mayor resistividad que se inicia desde los 25 m. y que corresponde a una serie de capas más consolidadas que las superiores, quizá arcillas o arenas con arcillas.

Después de los 46.70 m. se inicia nuevamente una serie de estratos bastante saturados.

RESULTADOS OBTENIDOS EN LA ESTACION No. 4

$\Sigma h = H$	h	Q m hasta la prof. H	Q de cada capa o serie.	Probable columna estratigráfica
1.75 2.65 4.00	4.00	875	875	Formación heterogénea de escombros y arcilla.
4.35 6.00 7.85	3.85	676	546	Serie de arcillas húmedas.
15.00	7.15	460	341	Arcillas saturadas
17.60 (a)				Arcillas menos saturadas
25.00 (b) 46.70 (b)	49.00	620	493	Formación algo compacta probablemente arcillas arenosas.
64.00				Arcillas semi saturadas.

(a) Valores de la curva de resistividad para $R = 5$ y $a_0 = 0.50$ m.

(b) Valores de BF/A en el método normal para $a = 10$ m. constante y $M = 3$ con incrementos de a de 0.50 m. y 1.00 m.

CONCLUSIONES

1.—Que fué posible obtener una serie de contactos que detallan la probable estratigrafía en cada estación a pesar de los pequeños contrastes eléctricos entre algunas capas.

2.—Los sondeos indican diferencias claras de la sucesión sedimentaria entre los cuatro sitios estudiados si se comparan entre sí.

3.—Los sondeos testigos de las estaciones Nos. 3 y 4 indican la semejanza con los que corresponden a los sondeos fundamentales indicando claramente la posibilidad de correlación por los métodos empleados.

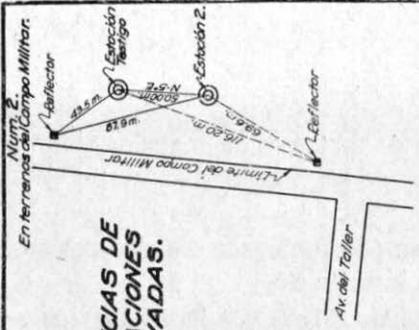
4.—Hasta las profundidades a que llegaron los sondeos no se encontró la roca sobre la que descansan las formaciones sedimentarias.

5.—Que con algo de dificultad pudo operarse hasta en la zona urbana dentro de la ciudad.

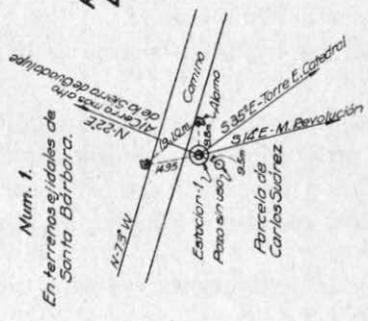
Conviene hacer notar que en una exploración ya sistemática de conjunto la columna geológica se obtendría mediante perforaciones convenientemente distribuídas haciéndose el estudio de correlación en cada zona por medio de sondeos eléctricos hasta un límite en el cual se viera el cambio del subsuelo francamente indicado por dichos sondeos.

Es conveniente que el muestreo durante las perforaciones, se haga con mucho cuidado.

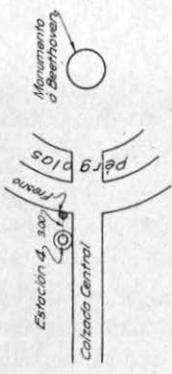
Cooperaron como ayudantes del suscrito en esta investigación los Sres. Ings. Alfredo Franco U. y Raúl Oliveros G.



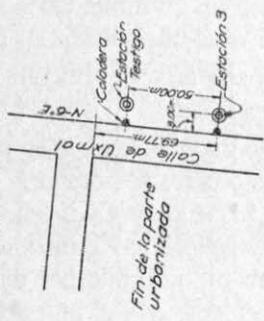
REFERENCIAS DE LAS ESTACIONES OBSERVADAS.



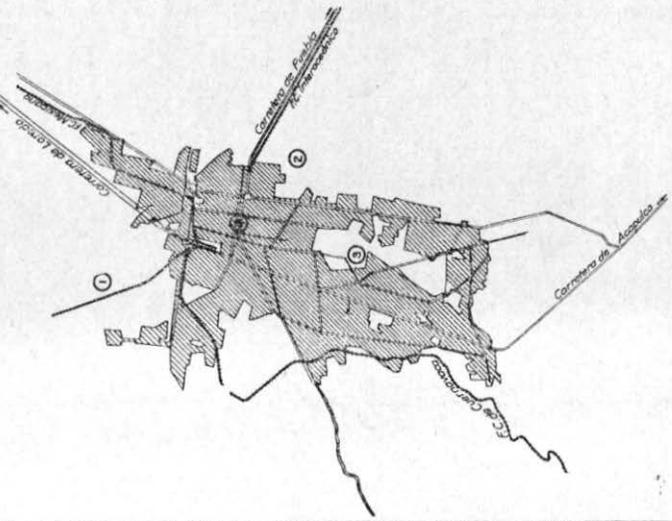
Num. 4
En la Alameda Central



Num. 3
En la Colonia Narvarte

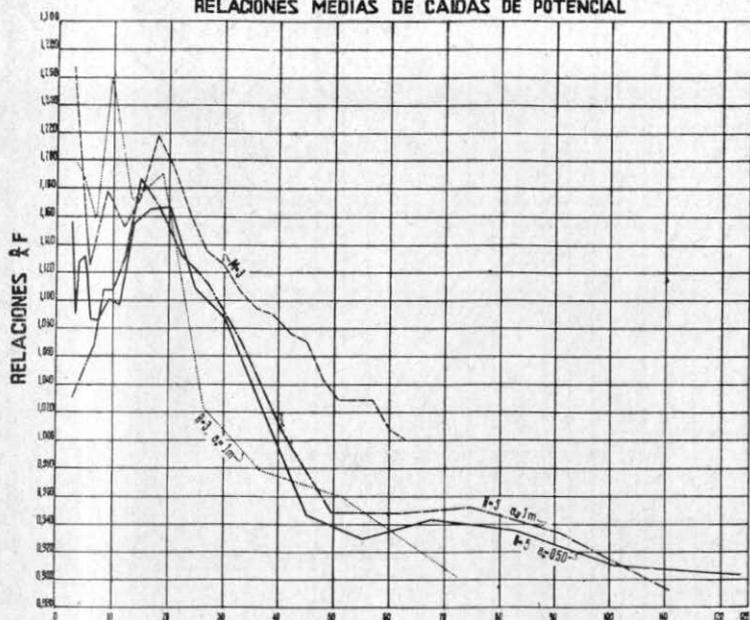


CIUDAD DE MEXICO.

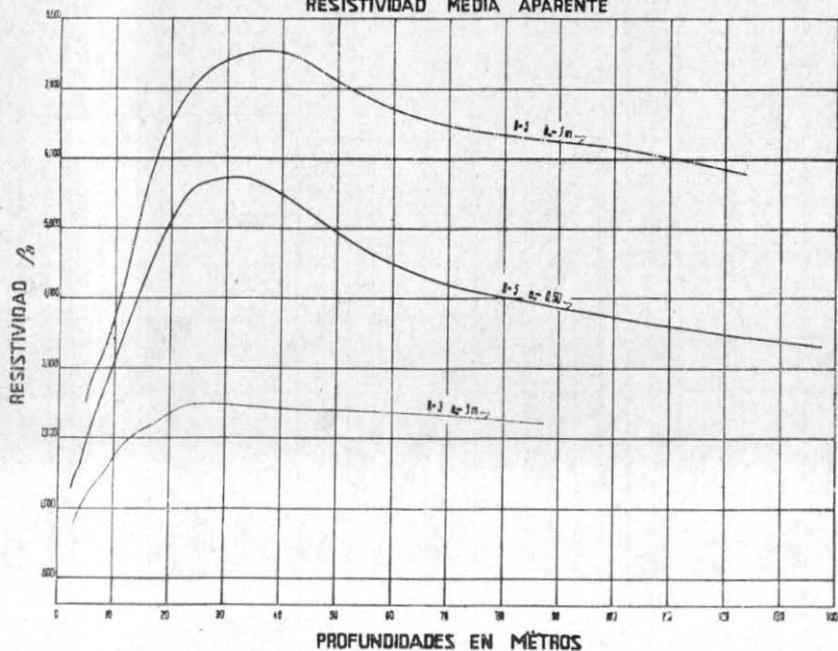


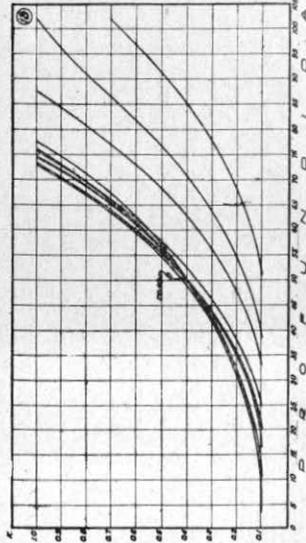
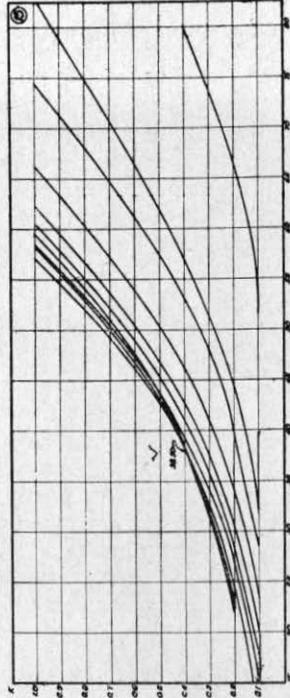
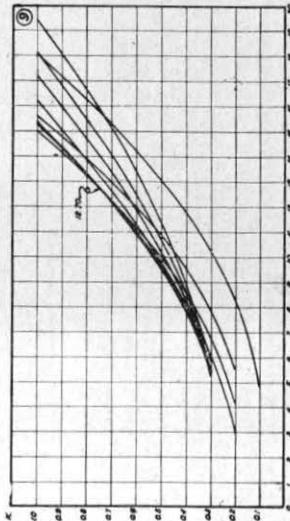
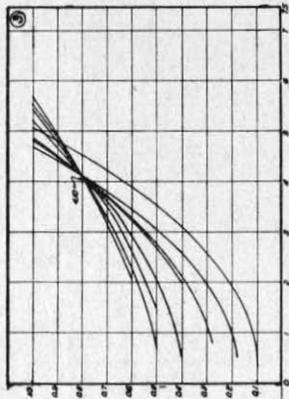
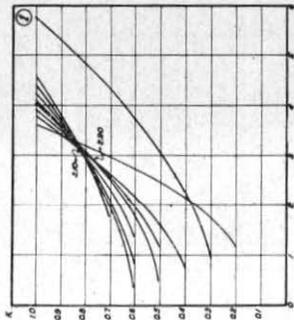
COMISION IMPULSORA Y COORDINADORA DE LA INVESTIGACION CIENTIFICA
INVESTIGACION GEOMETRICA DE LA CUENCA DE MEXICO
LOCALIZACION DE LOS SONDEXOS ELECTRICOS
Investigador: ING. ALVARO DE LA O. CASANOVA
Ayudantes: ING. ANTONIO MARTINEZ S. ING. ALVARO MARTINEZ S.
MEXICO, D.F. 1957-1963

RELACIONES MEDIAS DE CAIDAS DE POTENCIAL



RESISTIVIDAD MEDIA APARENTE

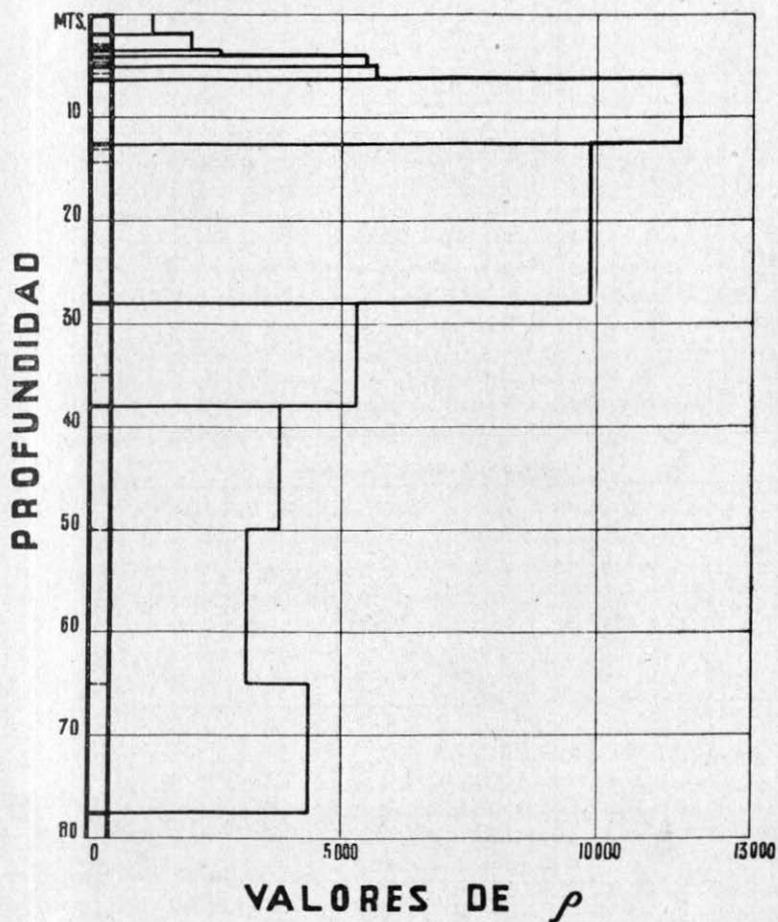




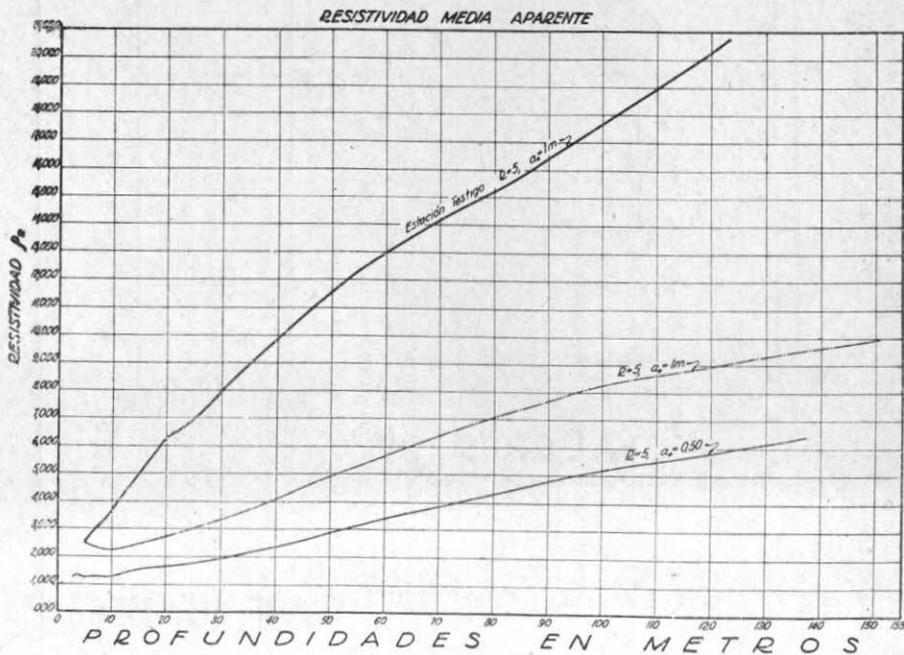
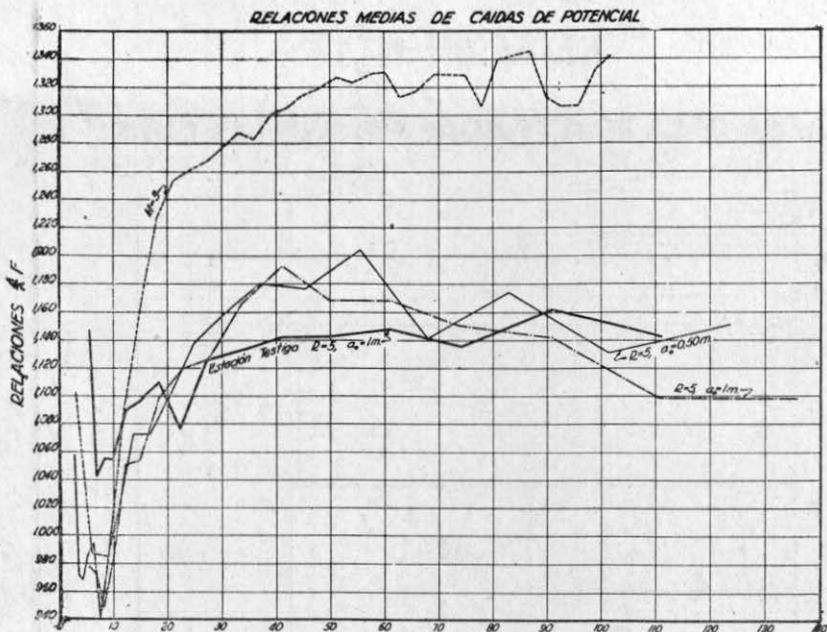
ESTACION N°1
GRAFICAS QUE DAN LA
PROFUNDIDAD DE VARIOS CONTACTOS

ESTACION N° 1

GRAFICA DE LA RESISTIVIDAD MEDIA DE LAS CAPAS

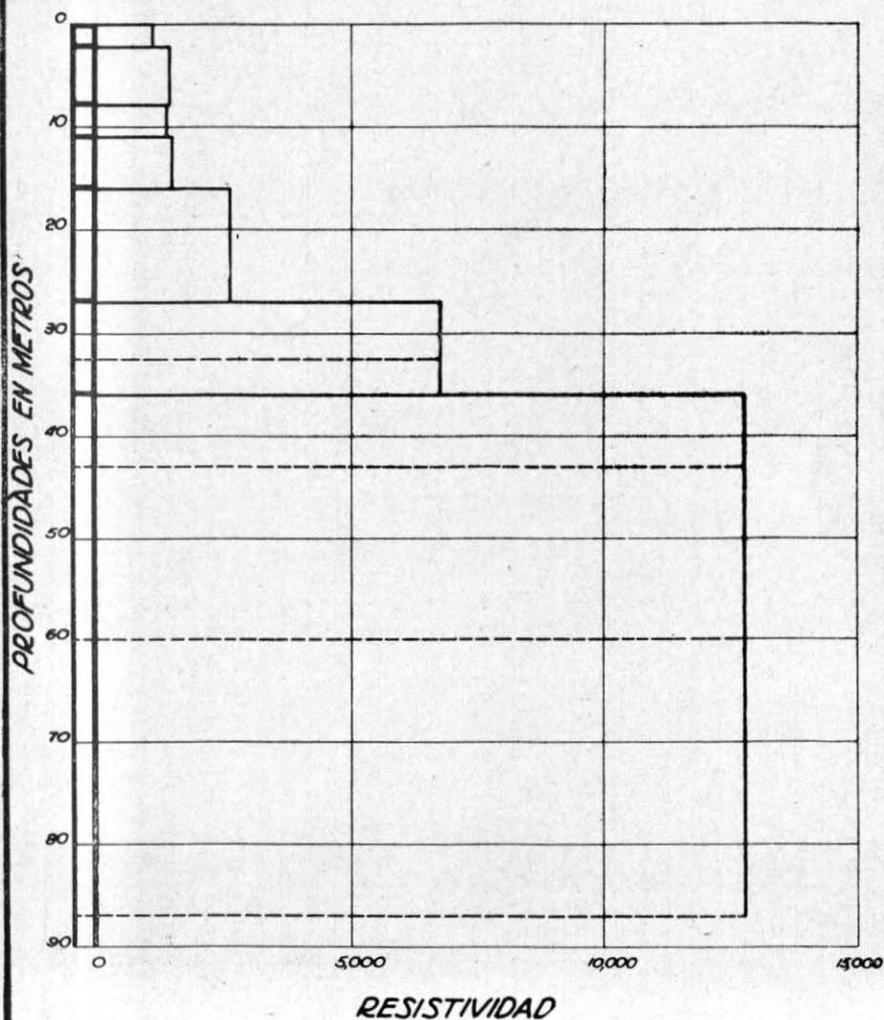


ANEXO N°4

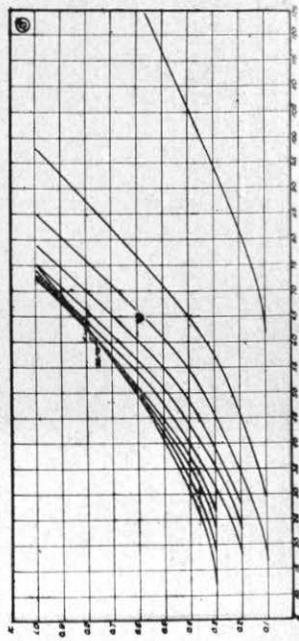
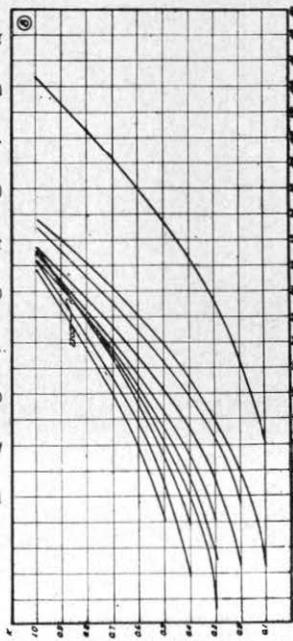
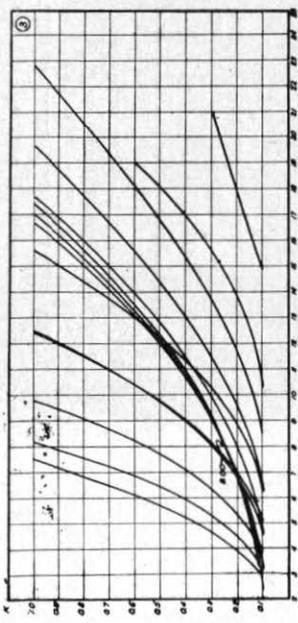
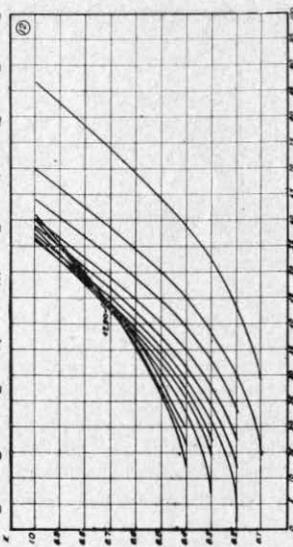
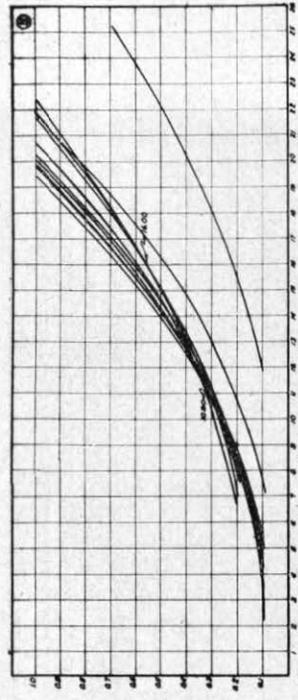


ESTACION N°2

GRAFICA DE LA RESISTIVIDAD MEDIA DE LAS CAPAS

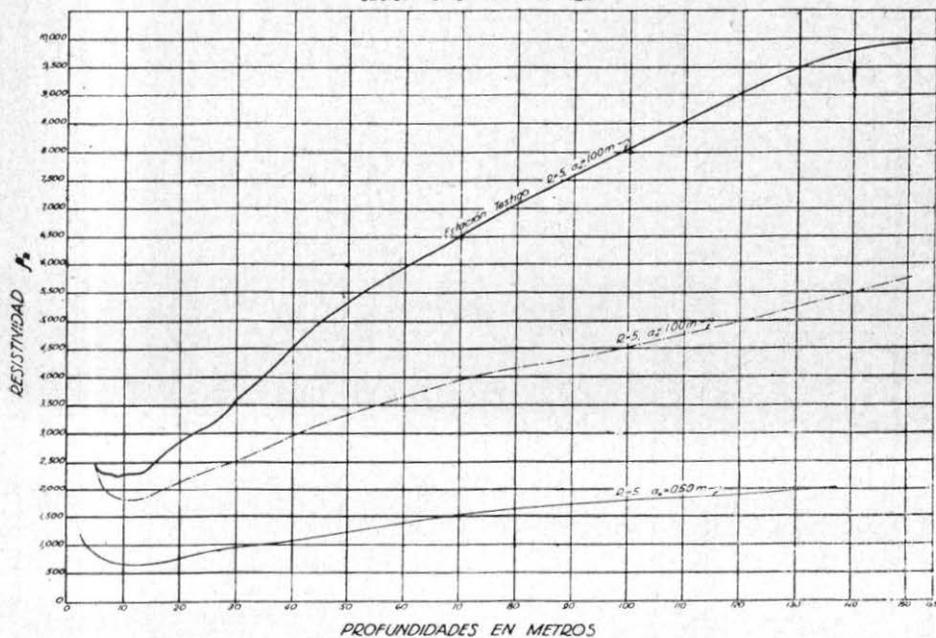
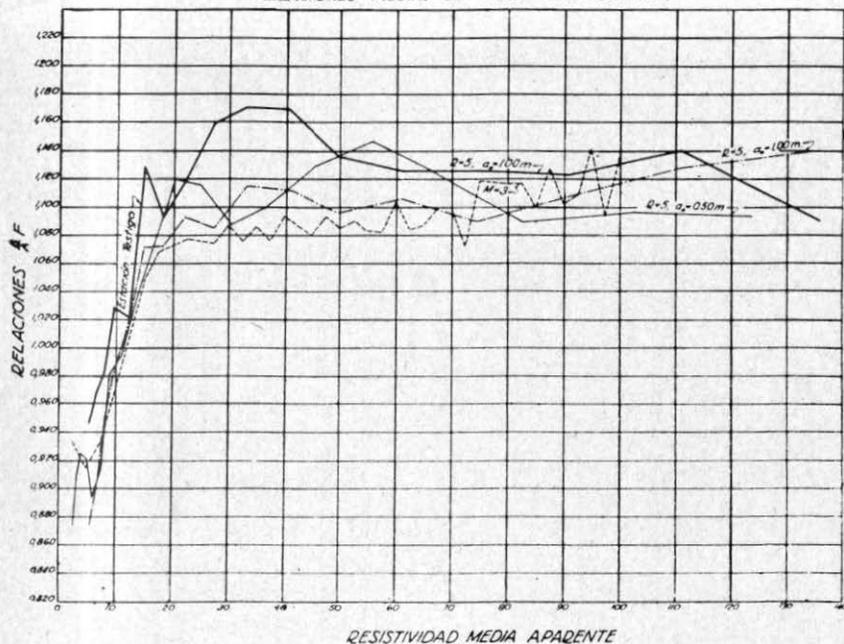


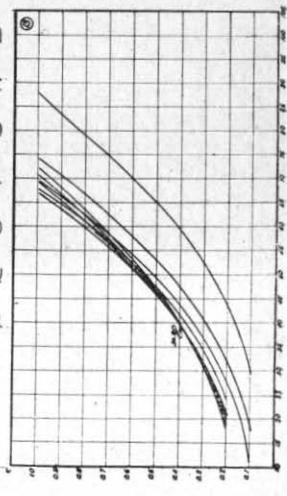
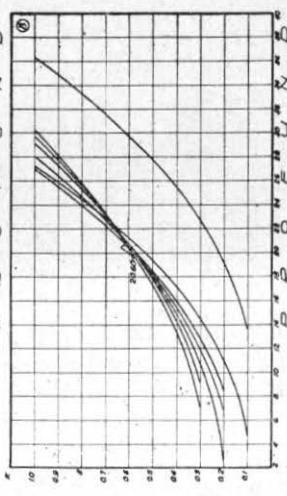
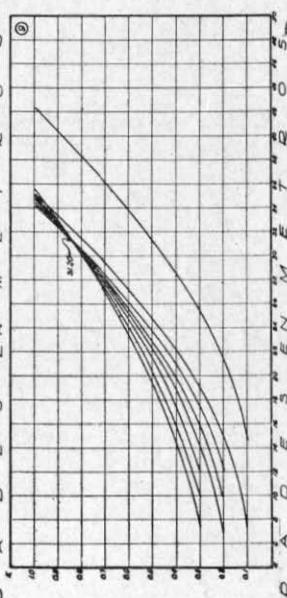
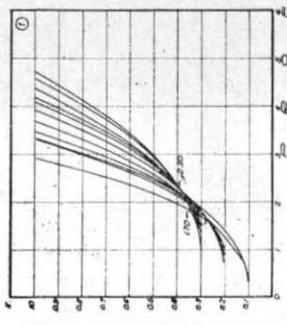
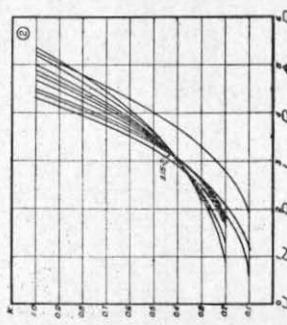
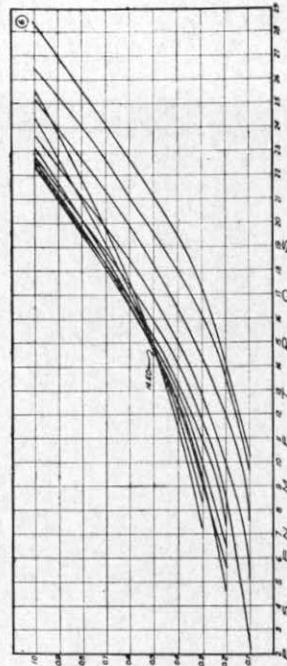
ANEXO N°6



ESTACION N°2
 GRAFICAS QUE DAN LA -
 PROFUNDIDAD DE VARIOS CONTACTOS

RELACIONES MEDIAS DE CAIDAS DE POTENCIAL

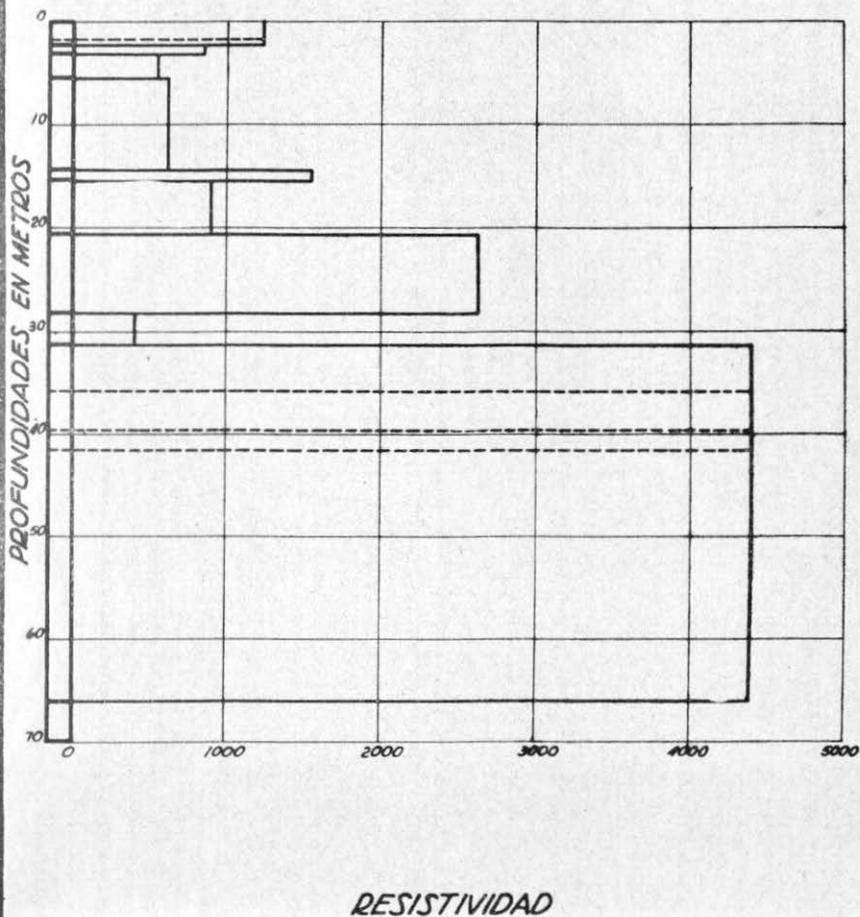




ESTACION N°3
 GRAFICAS QUE DAN LA
 PROFUNDIDAD DE VARIOS CONTACTOS

ESTACION N°3

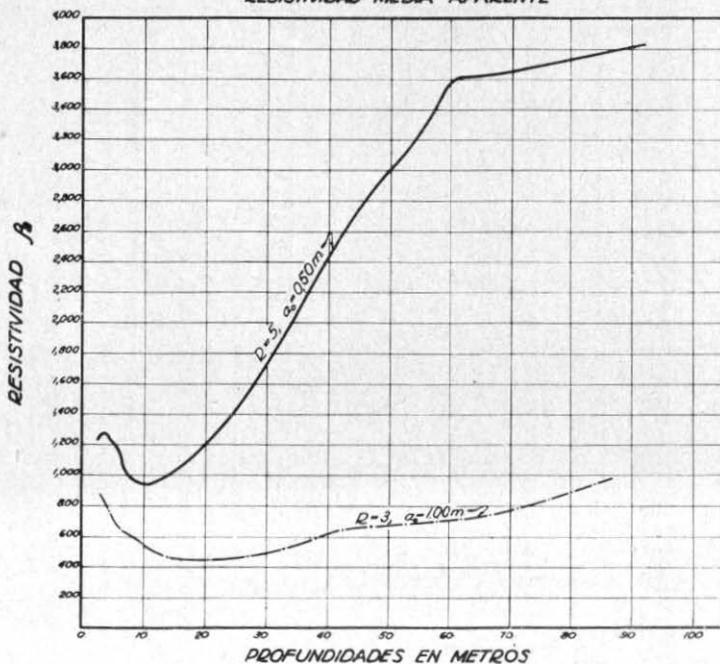
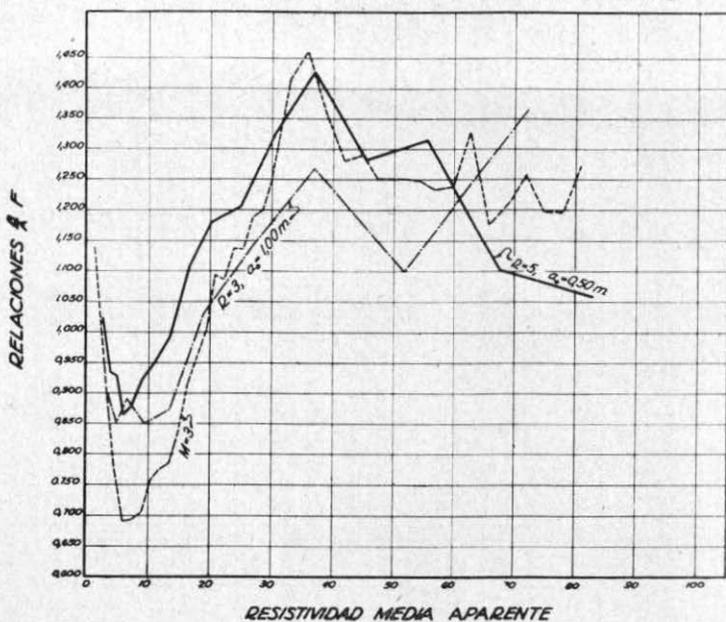
GRAFICA DE LA RESISTIVIDAD MEDIA DE LAS CAPAS



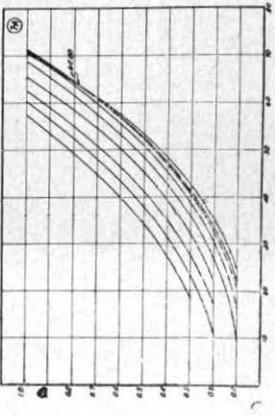
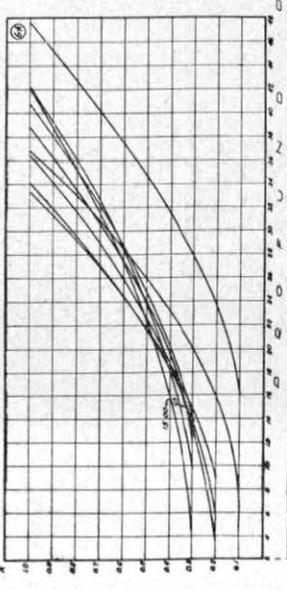
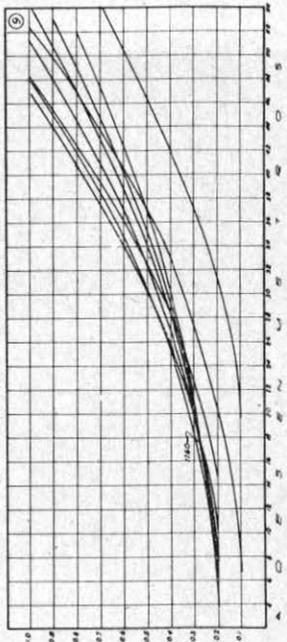
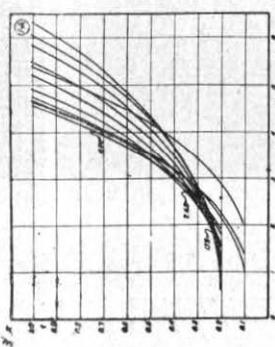
ANEXO N°10

ESTACION N°4 - GRAFICAS ELECTRICAS ANEXO N° 11

RELACIONES MEDIAS DE CAIDAS DE POTENCIAL

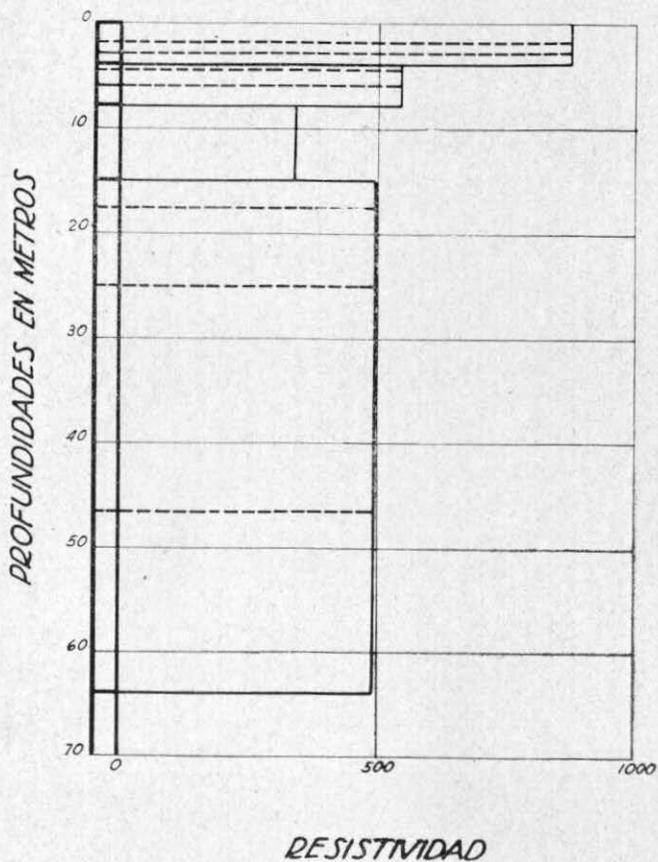


ESTACION N°4
GRAFICAS QUE DAN LA
PROFUNDIDAD DE VARIOS CONTACTOS



ESTACION N°4

GRAFICA DE LA RESISTIVIDAD MEDIA DE LAS CAPAS



ANEXO N°13

