



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

FACULTAD DE INGENIERIA

**EFFECTO DE UN CONTACTO LATERAL
EN CURVAS DE SONDEOS ELECTRICOS**

TRABAJO ESCRITO

PARA OBTENER EL TITULO DE:

INGENIERO GEOFISICO

P R E S E N T A:

RODRIGUEZ HERRERA SERGIO ENRIQUE

MEXICO, D. F.

1985.



Universidad Nacional
Autónoma de México

UNAM



UNAM – Dirección General de Bibliotecas Tesis Digitales Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS © PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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

I N D I C E

	Pág.
INTRODUCCION	1
CAPITULO I TEORIA DE UN CONTACTO LATERAL EN UN ME DIO DE DOS CAPAS.	3
I.1. Teoría del sondeo eléctrico para un medio es- tratificado	3
I.2. Solución del problema directo para un contac- to lateral en un medio de dos capas	10
I.3. Programa "CONTACTOS"	23
.1 Solución de las integrales.	23
.2 Descripción y acceso al programa "Contac- tos".	25
.3 Pruebas y resultados del programa "Contac- tos".	31
CAPITULO II APLICACION A LA INTERPRETACION DE SON- DEOS ELECTRICOS.	39
II.1. Sustrato con resistividad infinita.	40
.1 Los electrodos se abren paralelos al per- fil	40
.2 Los electrodos se abren perpendiculares - perfil.	46
II.2. Sustrato con resistividad cero.	52
.1 Los electrodos se abren paralelos al per- fil	56
.2 Los electrodos se abren perpendiculares - al perfil	58

	Pág.
CAPITULO III POSIBILIDAD DE CORREGIR EL EFECTO DE UN CONTACTO	64
III.1. Métodos usados para corregir el traslape - de una curva tipo Schlumberger	64
III.2. Desarrollo de la fórmula de corrección del efecto lateral	69
III.3. Comparación de los diferentes métodos de - corrección del traslape en presencia de un contacto lateral	79
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.	107
APENDICE A	109
APENDICE B	120
BIBLIOGRAFIA.	157

INTRODUCCION

El crecimiento de la sociedad a través del paso del tiempo conlleva a una búsqueda para satisfacer todas las necesidades que este crecimiento origina, de tal forma que se trate de encontrar el equilibrio entre el hombre y el medio que lo rodea.

Del interés humano por conocer y aprovechar este medio en que se desenvuelve, surge la ciencia de la Geofísica, cuyo principal objetivo es explorar y conocer las estructuras del interior de la tierra, en base a la aplicación de técnicas físicas y matemáticas.

La Geofísica como tal, se divide en un gran número de disciplinas que forman a su vez toda una ciencia. Una de estas ramas de la Geofísica es la prospección Geoeléctrica, cuyos orígenes vienen dados a finales del siglo pasado y --- principios de este con los trabajos realizados por los Hermanos Schlumberger principalmente. Sin embargo, la prospección Geoeléctrica como todas las ciencias en la actualidad, ha tenido un crecimiento muy acelerado en los últimos años, buscando encontrar y desarrollar nuevos métodos que resuelvan de manera más eficiente los problemas a los que se enfrenta.

La prospección Geoeléctrica tiene en la actualidad mayor aplicación en la Geohidrología y en la Geotécnica, sin que esto limite únicamente a estos campos su utilidad. A pesar de su intenso desarrollo, la prospección Geoeléctrica se encuentra todavía ante diversos problemas que dificultan su aplicación, uno de los cuales es estudiado en este-

trabajo, buscando aportar una solución.

El tema abordado en este trabajo, es el análisis del problema ocasionado por los contactos laterales en la curva de resistividades aparentes. Este problema, ya ha sido estudiado por diferentes autores, entre ellos Mundry (1984), Koefoed (1979), Alpin (1966), etc.; sin embargo, el problema que es bastante complejo no ha podido encontrar una solución totalmente satisfactoria hasta el momento.

Para su estudio en este trabajo, se realizó un programa -- que resolviera el problema directo cuando se tiene un contacto lateral en la primera capa y un sustrato con resistividad cero o infinito en la segunda capa. Posteriormente se simularon diferentes sondeos, variando las condiciones del corte geoelectrico, de tal forma que se puedan analizar los efectos producidos por el contacto lateral en las curvas obtenidas, así como el modelo de interpretación final. Los resultados son discutidos.

Por último se estudian y se comparan los diferentes métodos propuestos para corregir el traslape cuando este se encuentra en presencia de un contacto lateral. Así mismo, se desarrolla y se aplica una nueva técnica llamada de descomposición para corregir el efecto de un contacto lateral sobre la curva de resistividad aparente

I. TEORIA DE UN CONTACTO LATERAL EN UN MEDIO DE DOS CAPAS

I.1. TEORIA DEL SONDEO ELECTRICO PARA UN MEDIO ESTRATIFICADO.

La teoría del sondeo eléctrico vertical, ha sido tratada de manera muy amplia por diferentes autores como son: Orellana, 1981; Koefoed, 1979; etc. A continuación se presenta de una manera bastante breve, la solución del problema directo para medios estratificados, de tal forma que sirva como introducción para lo que será mas adelante la solución del problema directo cuando existe un contacto lateral en la primera capa.

El problema directo en la prospección geoelectrica, consiste en determinar el potencial en superficie en la frontera tierra-aire. El problema es resuelto (Orellana, 1981) para una fuente puntual de corriente situada en dicha superficie y posteriormente, se puede extender por superposición a varias fuentes.

Consideremos un medio estratificado de N capas (Fig. I.1.1) donde cada estrato es homogéneo e isotropo, por lo cual se cumple en cada uno de ellos la ecuación de Laplace.

$$\nabla^2 U = 0$$

(I.1.1)

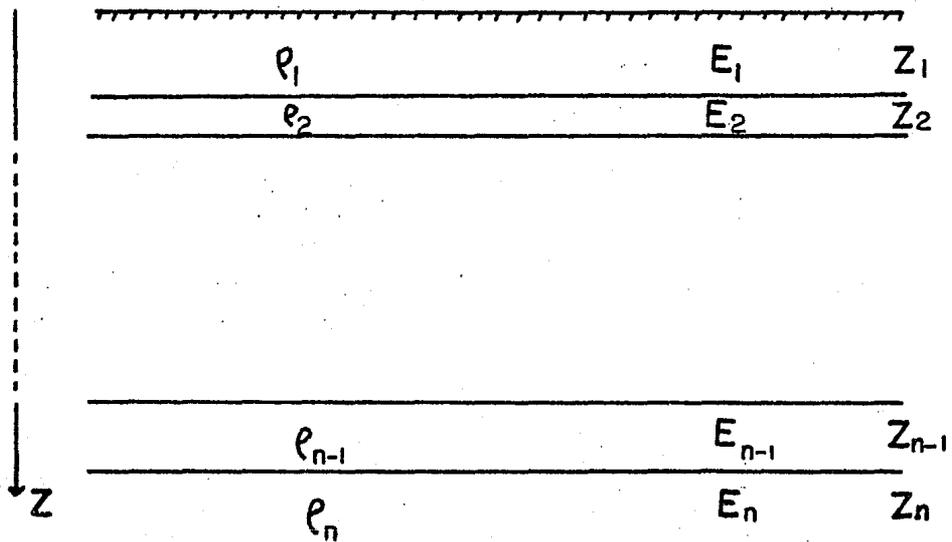


Fig. I.1.1. MEDIO ESTRATIFICADO DE N CAPAS

A excepción de la primera capa, en donde por existir fuentes se tiene que sumar una solución particular a la solución general. El potencial producido por una fuente puntual en un medio estratificado para $Z = 0$ se expresa como (Koefoed, 1979).

$$U = \frac{I\rho_1}{2\pi} \int_0^{\infty} K(\lambda) J_0(\lambda r) d\lambda \quad (I.1.2)$$

Donde $K(\lambda)$ es la llamada función Kernel ó función característica y es función de los espesores y resistividades del medio estratificado, que puede ser obtenido por la aplicación de la relación de recurrencia de Pekeris que se expresa de la siguiente manera (Koefoed, 1979).

$$K_i = \frac{K_{i+1} + \rho_i \tanh(\lambda E_i)}{\rho_i + K_{i+1} \tanh(\lambda E_i)} \quad (I.1.3)$$

Para obtener la resistividad aparente, se utilizan arreglos electródicos muy variados. Entre los dispositivos más utilizados y tal vez más difundidos en la prospección geoelectrónica, se encuentran el dispositivo Schlumberger y el dispositivo Wenner. Figuras I.1.2 y I.1.3 respectivamente.

El dispositivo Schlumberger pertenece a un grupo de dispositivos conocidos como tetraelectródicos, el cual consiste de dos electrodos de corriente (A y B) que se desplazan de manera equidistante al centro u origen "O" para cada abertura, de tal forma que siempre se conserve la relación $AO=OB=AB/2$ y de dos electrodos de potencial (M y N) que se mantendrán fijos a una distancia que conserve la siguiente relación:

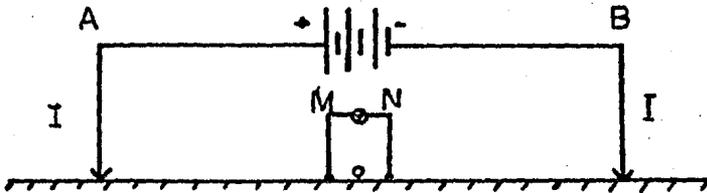


Fig. I.1.2. DISPOSITIVO TETRAELECTRODICO SCHLUMBERGER.

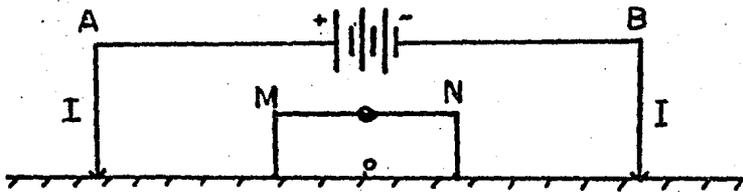


Fig. I.1.3. DISPOSITIVO TETRAELECTRODICO WENNER.

$$\overline{MN} = \overline{AB}/5$$

ADEMAS

$$\overline{MO} = \overline{ON} = \overline{MN}/2$$

La resistividad aparente para este dispositivo viene dada por (Orellana, 1981).

$$\rho_{a,s} = \pi r^2 \frac{|E|}{I} \quad (I.1.4)$$

Donde $|E|$ es el módulo del campo eléctrico. En la práctica el módulo del campo eléctrico se expresa como

$$|E| = \frac{\Delta U}{MN} \quad (I.1.5)$$

El campo eléctrico se obtiene a partir de derivar la ecuación I.1.2.

$$|E| = -\frac{\partial U}{\partial r} = -\frac{I\rho}{2\pi} \frac{\partial}{\partial r} \int_0^{\infty} k(\lambda) J_0(\lambda r) d\lambda$$

$$|E| = \frac{I\rho}{2\pi} \int_0^{\infty} k(\lambda) J_1(\lambda r) \lambda d\lambda \quad (I.1.6)$$

Donde $J_1(\lambda r)$ es la función Bessel de primera especie y orden 1.

Sustituyendo I.1.6 en I.1.4

$$\rho(r)_{a,s} = \rho r^2 \int_0^{\infty} k(\lambda) J_1(\lambda r) \lambda d\lambda \quad (I.1.7)$$

Expresión que indica la resistividad aparente medida por un dispositivo tipo Schlumberger en un medio estratificado.

El dispositivo Wenner, también tetraelectrónico, consiste a su vez de dos electrodos de corriente (A y B) y dos de potencial (M y N) que se irán abriendo de manera simétrica al origen "O" conservando la relación.

$$\overline{AM} = \overline{MN} = \overline{NB}$$

y cuya resistividad aparente estará dada por (Orellana, -- 1981)

$$\rho_{a,w} = 2\pi r \frac{\Delta U}{I} \quad (I.1.5)$$

En este caso ΔU representa la diferencia de potencial entre puntos situados a las distancias r y $2r$ de los electrodos de corriente

$$\Delta U = \frac{I\rho}{\pi} \int_0^{\infty} k(\lambda) J_0(\lambda r) d\lambda - \frac{I\rho}{\pi} \int_0^{\infty} k(\lambda) J_0(2\lambda r) d\lambda$$

Finalmente

$$\rho_{a,w}(r) = 2\rho r \int_0^{\infty} k(\lambda) J_0(\lambda r) d\lambda - 2\rho r \int_0^{\infty} k(\lambda) J_0(2\lambda r) d\lambda \quad (I.1.9)$$

De esta forma, se puede observar que la curva de resistividades aparentes no solo depende de los datos que especifica el corte considerado, sino del tipo de dispositivo eléctrico con el que se hayan efectuado las mediciones.

Dicha curva representa gráficamente en escala logarítmica, la solución del problema directo, esto es, dado un corte geoelectrónico, expresa la serie de valores de la resistivi-

dad aparente que se obtendrán con un dispositivo electródico determinado.

A continuación se presentan las propiedades más importantes de esta curva:

a) Continuidad. Esto es, que siempre que las resistividades del corte sean finitas, la función $\rho_a(r)$ es continua.

b) Asíntotas horizontales. La función $\rho_a(r)$ tiende respectivamente para $r \rightarrow 0$ y $r \rightarrow \infty$ a los límites ρ_i y ρ_n .

c) Fallo de la ley simétrica de cortes recíprocos. En las curvas de resistividad aparente no se cumple el principio de simetría con respecto al eje de abscisas.

d) Asíntotas oblicuas. En el caso límite $\rho_n \rightarrow \infty$ la CRA, en su representación logarítmica posee una asíntota rectilínea, de pendiente + 1. Esta asíntota no existe en el caso descendente.

I.2. SOLUCION DEL PROBLEMA DIRECTO PARA UN CONTACTO LATERAL EN UN MEDIO DE DOS CAPAS.

Con base en la teoría de un medio estratificado de N capas, se puede iniciar el análisis para un medio de dos capas, el cual contenga una discontinuidad lateral constituida por un contacto vertical que divide la primera capa en dos regiones de resistividades respectivas ρ_1 y ρ_2 (Figura I.2.1).

El modelo puede ser considerado de extensión vertical infinita o se puede considerar la existencia de una segunda capa con resistividad, ya sea cero o infinito, esto es, - un sustrato totalmente conductor o totalmente resistivo.

El cálculo del potencial eléctrico que sirva para determinar la resistividad aparente, se desarrollará utilizando el método de las imágenes, aunque no de la forma convencional, sino que en esta ocasión la variante será el uso de la ecuación I.1.2.

Por otra parte, se conoce que utilizando el método de las imágenes se encuentra el potencial dado por (Orellana, -- 1981).

$$U = \frac{\rho_1 I}{2\pi} \left[\frac{1}{r} + 2 \sum_{n=1}^{\infty} \frac{k^n}{(r^2 + 4n^2 E^2)^{1/2}} \right] \quad (I.2.1)$$

Serie que resuelve el problema, pero la cual es de convergencia muy lenta por lo que es recomendable el uso de la solución por medio de la ec. I.1.2.

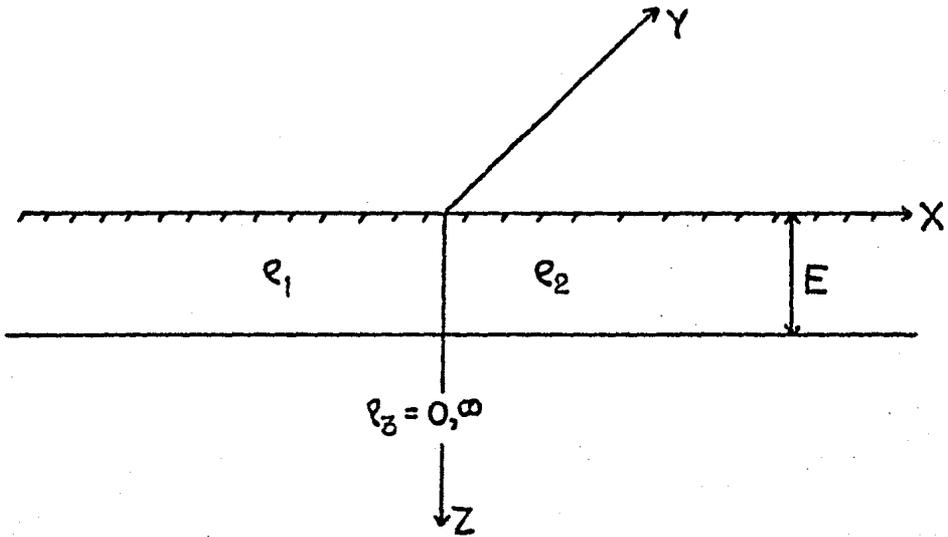


Fig. I.2.1. MODELO DE UN CONTACTO LATERAL EN UN MEDIO DE DOS CAPAS.

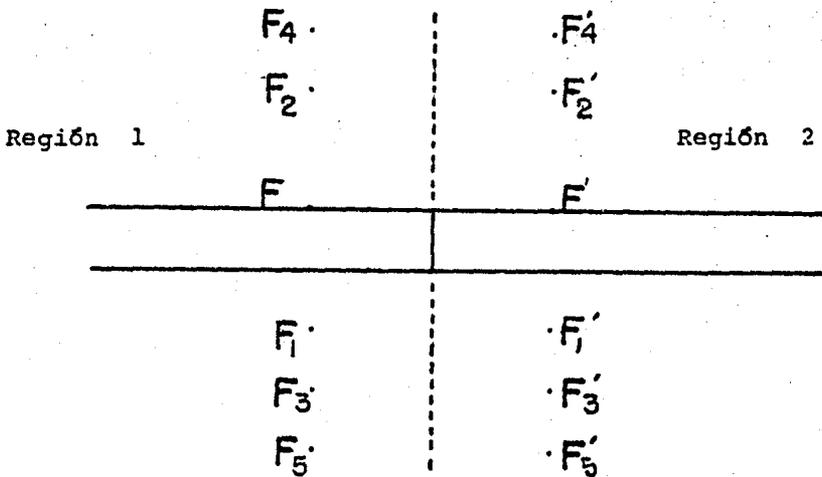


Fig. I.2.2. SE OBSERVA COMO SE FORMAN LAS IMAGENES DE LA FUENTE PUNTUAL (F), DEBIDAS AL CONTACTO LATERAL.

Para mostrar la equivalencia entre las ecuaciones I.1.2 y I.2.1, únicamente será necesario obtener la expresión de la ec. I.1.2, para el caso particular de un medio de dos-capas, esto es, usando la ec. I.1.3.

$$k_1 = \frac{1 + P_1 \tanh(\lambda E)}{1 - P_1 \tanh(\lambda E)} \quad ; \quad k_n = 1$$

Cambiando la expresión a su forma exponencial

$$K(\lambda) = \frac{1 + R_{12} e^{-2\lambda E}}{1 - R_{12} e^{-2\lambda E}} \quad (I.2.2)$$

Desarrollando la ec. I.2.2. en forma de división sintética

$$\frac{1 + R_{12} e^{-2\lambda E}}{1 - R_{12} e^{-2\lambda E}} = 1 + 2R_{12} e^{-2\lambda E} + 2R_{12}^2 e^{-4\lambda E} + \dots$$

Sustituyendo en la ec. I.1.2.

$$V = \frac{P_1 E}{2\pi} \int_0^{\infty} (1 + 2R_{12} e^{-2\lambda E} + 2R_{12}^2 e^{-4\lambda E} + \dots + 2R_{12}^n e^{-2n\lambda E}) J_0(\lambda r) d\lambda \quad (I.2.3)$$

Utilizando la igualdad de Weber-Lipschitz (Orellana, 1981)

$$\int_0^{\infty} e^{-2\omega\lambda E} J_0(\lambda r) d\lambda = \frac{1}{(r^2 + 4n^2 E^2)^{1/2}} \quad (I.2.4)$$

Se obtiene

$$V = \frac{P_1 E}{2\pi} \left[\int_0^{\infty} J_0(\lambda r) d\lambda + \int_0^{\infty} 2R_{12} e^{-2\lambda E} J_0(\lambda r) d\lambda + \dots \right. \\ \left. \dots + \int_0^{\infty} 2R_{12}^n e^{-2n\lambda E} J_0(\lambda r) d\lambda + \dots \right]$$

$$U = \frac{\rho_1 I}{2\pi} \left\{ \frac{1}{r} + \frac{2R_{12}}{(r^2 + 4E^2)^{1/2}} + \frac{2R_{12}^2}{(r^2 + 16E^2)^{1/2}} + \dots + \frac{2R_{12}^N}{(r^2 + 4N^2E^2)^{1/2}} + \dots \right\}$$

Agrupando

$$U = \frac{\rho_1 I}{2\pi} \left[\frac{1}{r} + 2 \sum_{n=1}^{\infty} \frac{R_{12}^n}{(r^2 + 4n^2E^2)^{1/2}} \right] \quad (I.2.5)$$

En base al concepto del método de las imágenes, si se coloca una fuente puntual en el medio de resistividad ρ_1 el contacto lateral dará origen a un potencial anómalo, tanto en la región uno como en la región dos. El potencial anómalo de la región uno proviene de una fuente ficticia colocada en la región dos y para la región dos la fuente ficticia se encuentra en la región uno. La demostración de la existencia de ambas fuentes ficticias, viene dada por resolver la ecuación de Laplace I.1.1 en coordenadas cilíndricas como se muestra en la figura I.2.2.

Si se considera el caso en que el potencial es medido en la misma región (en este caso región uno) en donde se encuentra colocada la fuente puntual, se tendrá la siguiente solución:

Para el medio ρ_1

$$U_1 = \int_0^{\infty} A(\lambda) e^{\lambda x} J_0(\lambda r) d\lambda \quad (I.2.6)$$

Para el medio ρ_2

$$U_2 = \int_0^{\infty} B(\lambda) e^{-\lambda x} J_0(\lambda r) d\lambda \quad (I.2.7)$$

Mas aparte la solución particular debida a la fuente de la superficie

$$U_p = \frac{I h}{2\pi} \int_0^{\infty} e^{-\lambda(x+h)} J_0(\lambda r) d\lambda \quad (I.2.8)$$

Donde $A(\lambda)$ y $B(\lambda)$ son funciones específicas para cada problema dependiendo de las condiciones de frontera, que en este caso serán

a) El potencial eléctrico debe ser continuo en el contacto vertical.

$$U_1 = U_2 \quad \text{para } x=0 \quad (I.2.9)$$

b) La densidad de corriente debe ser continua en el contacto vertical.

$$\frac{\partial U_1}{\partial x} = \frac{\rho_1}{\rho_2} \frac{\partial U_2}{\partial x} \quad \text{para } x=0 \quad (I.2.10)$$

Aplicando la ec. I.2.9.

$$\int_0^{\infty} \frac{I \rho_1}{2\pi} e^{-\lambda h} J_0(\lambda r) d\lambda + \int_0^{\infty} A(\lambda) J_0(\lambda r) d\lambda = \int_0^{\infty} B(\lambda) J_0(\lambda r) d\lambda$$

Simplificando

$$\frac{\rho_1 I}{2\pi} e^{-\lambda h} + A(\lambda) = B(\lambda) \quad (I.2.11)$$

Aplicando la ec. I.2.10

$$\frac{\partial U_p}{\partial x} = \frac{\rho_1 I}{2\pi} \int_0^{\infty} -\lambda e^{-\lambda(x+h)} J_0(\lambda r) d\lambda \quad (I.2.12)$$

$$\frac{\partial U_1}{\partial x} = \int_0^{\infty} A(\lambda) \lambda e^{\lambda x} J_0(\lambda r) d\lambda \quad (\text{I.2.13})$$

$$\frac{\partial U_2}{\partial x} = \int_0^{\infty} -B(\lambda) \lambda e^{-\lambda x} J_0(\lambda r) d\lambda \quad (\text{I.2.14})$$

Sumando

$$- \lambda \frac{\rho_1 \Gamma}{2\pi} e^{-\lambda h} + A(\lambda) \lambda = \frac{\rho_1}{\rho_2} [- \lambda B(\lambda)]$$

$$\frac{\rho_1 \Gamma}{2\pi} e^{-\lambda h} + A(\lambda) = - \frac{\rho_1}{\rho_2} B(\lambda) \quad (\text{I.2.15})$$

Despejando $B(\lambda)$ de (I.2.11) y (I.2.15)

$$B(\lambda) = T_{21} \frac{\rho_1 \Gamma}{2\pi} e^{-\lambda h} \quad (\text{I.2.16})$$

Donde

$$T_{21} = \frac{2\rho_2}{\rho_1 + \rho_2} \quad (\text{I.2.17})$$

Resolviendo ahora para $A(\lambda)$

$$A(\lambda) = R_{21} \frac{\rho_1 \Gamma}{2\pi} e^{-\lambda h} \quad (\text{I.2.18})$$

Donde

$$R_{21} = \frac{\rho_2 - \rho_1}{\rho_1 + \rho_2} \quad (\text{I.2.19})$$

Siendo R_{12} el coeficiente de reflexión y T_{21} el coeficiente de transmisión, el cual a su vez demuestra la existencia de una fuente ficticia producida por el contacto lateral y conocida como fuente imagen.

Finalmente para encontrar el potencial bastará sustituir la ec. I.2.18. en la ec. I.2.6.

$$U_1 = \frac{\rho_1 I}{2\pi} R_{12} \int_0^{\infty} e^{\lambda(\lambda-h)} J_0(\lambda r) d\lambda \quad (\text{I.2.20})$$

Utilizando la ec. I.2.4.

$$U_1 = \frac{\rho_1 I}{2\pi} \frac{R_{12}}{[(\lambda-h)^2 + r^2]^{1/2}} \quad (\text{I.2.21})$$

Que representa el potencial en la región de resistividad ρ_1 . Para el potencial en la región ρ_2 se sustituye $B(\lambda)$ (ec. I.2.16) en la ec. I.2.7.

$$U_2 = \frac{\rho_1 I}{2\pi} T_{21} \int_0^{\infty} e^{-\lambda(\lambda+h)} J_0(\lambda r) d\lambda \quad (\text{I.2.22})$$

y por I.2.4.

$$U_2 = \frac{\rho_1 I}{2\pi} \frac{T_{21}}{[(\lambda+h)^2 + r^2]^{1/2}} \quad (\text{I.2.23})$$

Así, el potencial para un medio de dos capas proviene de una serie de imágenes infinitas de acuerdo a la expresión I.2.1. Debido a la presencia del contacto lateral, cada una de las fuentes imagen del medio de dos capas dará origen a otra fuente imagen que también será una suma infinita. Expresando ambas series infinitas en forma integral, el potencial para una fuente puntual para la geometría de la figura I.2.3, se expresa como:

$$U_1 = \frac{I\rho_1}{2\pi} \frac{1}{r} + R_{12} \int_0^{\infty} \frac{I\rho_1}{2\pi} J_0(\lambda r) d\lambda \quad (\text{I.2.24})$$

$0 < x < \infty$

$$U_2 = \frac{\pm \rho_i}{2\pi} T_{21} \int_0^{\infty} J_0(\lambda r) d\lambda \quad (\text{I.2.25})$$

$$0 < \lambda < \infty$$

Donde

$$r = (x - x_s)^2 + (y - y_s)^2 \quad ; \quad x_s \text{ y } y_s \quad \text{Coordenadas de la Fuente}$$

$$r_i = (x - x_{s,i})^2 + (y - y_{s,i})^2 \quad ; \quad x_{s,i} \text{ y } y_{s,i} \quad \text{Coordenadas de la Fuente Imagen.}$$

Para obtener la resistividad aparente considerando un dispositivo tetraelectrónico (Fig. I.2.3), el cual consista de dos electrodos de corriente (A y B) y dos electrodos de potencial (M y N); se asume un desarrollo semejante tomando en cuenta una A' y B' son las imágenes de los electrodos de corriente producidos por el contacto lateral.

Por otra parte, el potencial en los electrodos M y N estará dado por U_M y U_N de la siguiente forma:

$$U_M = U_M^A + U_M^B \quad (\text{I.2.26})$$

$$U_N = U_N^A + U_N^B \quad (\text{I.2.27})$$

Siendo U_M^A el potencial en el electrodo M producido por el electrodo A y U_M^B el potencial en el electrodo M debido al electrodo de corriente B. Así mismo, se tomarán las con-

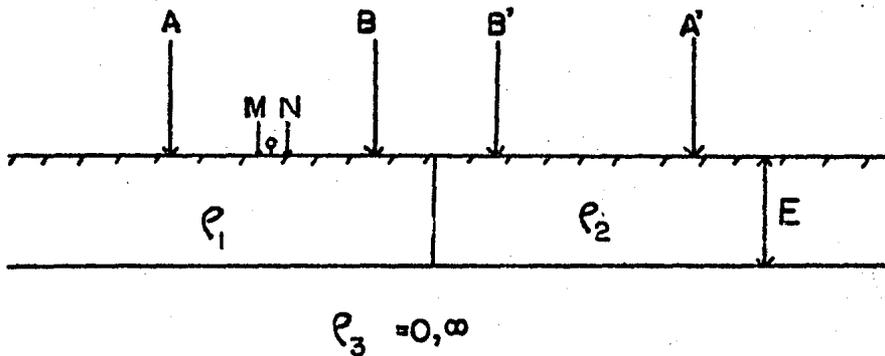


Fig. I.2.3. REPRESENTACION DE UN DISPOSITIVO ELECTRODICO COLOCADO EN LA REGION 1, ASI COMO SUS ELECTRODOS IMAGEN EN LA REGION 2.

$$r_1 = \overline{AM}$$

$$r_2 = \overline{AN}$$

$$r_3 = \overline{BM}$$

$$r_4 = \overline{BN}$$

$$r_5 = \overline{A'M}$$

$$r_6 = \overline{A'N}$$

$$r_7 = \overline{B'M}$$

$$r_8 = \overline{B'N}$$

sideraciones para U_n^A y U_n^B .

Se debe aclarar que el potencial medido en el electrodo M producido por el electrodo A (U_M^A) es la suma del potencial debido al electrodo A ($U_M^{(A)}$) más el potencial producido por el electrodo imagen A' ($U_M^{(A')}$). Por lo que se obtiene

$$U_M^A = U_M^{(A)} + U_M^{(A')} \quad (\text{I.2.28})$$

De igual manera

$$U_M^B = U_M^{(B)} + U_M^{(B')} \quad (\text{I.2.29})$$

$$U_N^A = U_N^{(A)} + U_N^{(A')} \quad (\text{I.2.30})$$

$$U_N^B = U_N^{(B)} + U_N^{(B')} \quad (\text{I.2.31})$$

Quedando, debido a la ec. I.2.24

$$U_M^{(A)} = \frac{\rho_1 I}{2\pi} \left\{ \int_0^\infty k(\lambda) J_0(\lambda r_1) d\lambda \right\} \quad (\text{I.2.32})$$

$$U_M^{(A')} = \frac{\rho_1 I R_{1,2}}{2\pi} \left\{ \int_0^\infty k(\lambda) J_0(\lambda r_5) d\lambda \right\} \quad (\text{I.2.33})$$

El factor de reflexión $R_{1,2}$ se encuentra definido como

$$R_{1,2} = \frac{\rho_1 - \rho_2}{\rho_1 + \rho_2} \quad (\text{I.2.34})$$

Análogamente

$$U_M^{(B)} = - \frac{\rho_2 I}{2\pi} \left\{ \int_0^\infty k(\lambda) J_0(\lambda r_3) d\lambda \right\} \quad (\text{I.2.35})$$

$$U_M^{(B')} = - \frac{\rho_2 I R_{1,2}}{2\pi} \left\{ \int_0^\infty k(\lambda) J_0(\lambda r_7) d\lambda \right\} \quad (\text{I.2.36})$$

$$U_N^{(A)} = \frac{\rho I}{2\pi} \left\{ \int_0^{\infty} k(\lambda) J_0(\lambda r_2) d\lambda \right\} \quad (\text{I. 2.37})$$

$$U_N^{(A')} = \frac{\rho I R_{12}}{2\pi} \left\{ \int_0^{\infty} k(\lambda) J_0(\lambda r_2) d\lambda \right\} \quad (\text{I. 2.38})$$

$$U_N^{(B)} = -\frac{\rho I}{2\pi} \left\{ \int_0^{\infty} k(\lambda) J_0(\lambda r_4) d\lambda \right\} \quad (\text{I. 2.39})$$

$$U_N^{(B')} = -\frac{\rho I}{2\pi} \left\{ \int_0^{\infty} k(\lambda) J_0(\lambda r_6) d\lambda \right\} \quad (\text{I. 2.40})$$

El signo negativo en las ecuaciones I.2.35, I.2.36, --- I.2.39 y I.2.40, representa la corriente proveniente del electrodo de corriente negativo.

Ahora, es posible calcular ya el potencial U_m sustituyendo las ecuaciones I.2.32-36 en la ecuación I.2.26

$$U_M = \frac{\rho I}{2\pi} \left\{ \int_0^{\infty} k(\lambda) J_0(\lambda r_1) d\lambda + R_{12} \int_0^{\infty} k(\lambda) J_0(\lambda r_5) d\lambda \right. \\ \left. - \int_0^{\infty} k(\lambda) J_0(\lambda r_3) d\lambda - R_{12} \int_0^{\infty} k(\lambda) J_0(\lambda r_7) d\lambda \right\} \quad (I.2.41)$$

De la misma forma se sustituye I.2.37 - 40 en I.2.27 para obtener U_N

$$U_N = \frac{\rho I}{2\pi} \left\{ \int_0^{\infty} k(\lambda) J_0(\lambda r_2) d\lambda + R_{12} \int_0^{\infty} k(\lambda) J_0(\lambda r_6) d\lambda \right. \\ \left. - \int_0^{\infty} k(\lambda) J_0(\lambda r_4) d\lambda - R_{12} \int_0^{\infty} k(\lambda) J_0(\lambda r_8) d\lambda \right\} \quad (I.2.42)$$

Finalmente el potencial total quedará expresado por la diferencia entre los potenciales U_M y U_N respectivamente.

$$U = U_M - U_N \quad (I.2.43)$$

Sustituyendo las ec. I.2.41 y I.2.42 en I.2.43

$$U = \left[\frac{\rho I}{2\pi} \left\{ \int_0^{\infty} k(\lambda) J_0(\lambda r_1) d\lambda + R_{12} \int_0^{\infty} k(\lambda) J_0(\lambda r_5) d\lambda \right. \right. \\ \left. \left. - \int_0^{\infty} k(\lambda) J_0(\lambda r_3) d\lambda - R_{12} \int_0^{\infty} k(\lambda) J_0(\lambda r_7) d\lambda \right\} \right] \\ - \left[\frac{\rho I}{2\pi} \left\{ \int_0^{\infty} k(\lambda) J_0(\lambda r_2) d\lambda + R_{12} \int_0^{\infty} k(\lambda) J_0(\lambda r_6) d\lambda \right. \right. \\ \left. \left. - \int_0^{\infty} k(\lambda) J_0(\lambda r_4) d\lambda - R_{12} \int_0^{\infty} k(\lambda) J_0(\lambda r_8) d\lambda \right\} \right]$$

Reagrupando

$$\begin{aligned}
 U = & \frac{\rho_1 I}{2\pi} \left\{ \int_0^{\infty} K(\lambda) J_0(\lambda r_1) d\lambda + \int_0^{\infty} K(\lambda) J_0(\lambda r_4) d\lambda \right. \\
 & - \left[\int_0^{\infty} K(\lambda) J_0(\lambda r_3) d\lambda + \int_0^{\infty} K(\lambda) J_0(\lambda r_2) d\lambda \right] \\
 & + R_{12} \left[\int_0^{\infty} K(\lambda) J_0(\lambda r_5) d\lambda + \int_0^{\infty} K(\lambda) J_0(\lambda r_6) d\lambda \right. \\
 & \left. \left. - \left(\int_0^{\infty} K(\lambda) J_0(\lambda r_0) d\lambda + \int_0^{\infty} K(\lambda) J_0(\lambda r) d\lambda \right) \right] \right\} \quad (I.2.44)
 \end{aligned}$$

De tal forma que la ecuación I.2.44 representa entonces - el potencial producido por un dispositivo tetraelectródico cualquiera en un medio de dos capas, cuya primera capa contenga un contacto lateral.

Es importante subrayar que en este método, a diferencia - de las expansiones en series como las utilizadas por ---- Mooney et All. (1966) y Alpin et All. (1966), no es necesario utilizar una curva asintótica para obtener los valores de resistividad aparente en los casos de encontrarse - con un sustrato totalmente conductor ($\beta_3 = 0$) o con un -- sustrato totalmente resistivo ($\beta_3 = \infty$), lo que puede con siderarse como una ventaja en el cálculo.

I.3. PROGRAMA " CONTACTOS "

I.3.1. SOLUCION DE LAS INTEGRALES

Aunque la expresión I.2.44 que representa el potencial -- eléctrico para un medio de dos capas con un contacto late-- ral, puede parecer bastante complicada debido a el número elevado de integrales, estas sin embargo, pueden ser fá-- cilmente solucionadas por la aplicación de un método numé-- rico. En esta ocasión las integrales son evaluadas por - medio de la técnica del filtrado digital, cuyos princi--- pios fueron dados por Ghosh en 1971, (Ghosh, 1971), donde el concepto más importante radica en convertir la expre--- sión que representa el potencial en una integral de convo-- lución de tal forma que las expresiones son relaciones li-- neales y por lo tanto la función de resistividades aparen-- te generada por cualquier arreglo electródico será tam--- bién una relación lineal.

Dentro del programa "Contactos", se utiliza el programa - de cómputo "ZHANKS" (Anderson, 1978) como subrutina para-- la solución de las integrales obtenidas en la ecuación -- I.2.44. El diseño de los coeficientes del filtro de An-- derson, está basada en la demostración de cómo la función Kernel puede ser solucionada como una transformada de --- Hankel del mismo orden, de manera que puede ser expresada como

$$K(b) = \int_0^{\infty} K(\lambda) J_n(b\lambda) d\lambda, \quad b > 0 \quad (I.3.1)$$

Para el diseño del filtro, primero se hace uso de la -- transformación

$$x = \ln(b) \quad (I.3.2)$$

$$y = \ln(1/\lambda) \quad (I.3.3)$$

Las cuales son sustituidas en la ec. I.3.1 y multiplicando por e^x

$$e^x k(e^x) = \int_{-\infty}^{\infty} \kappa(e^{-y}) \left[e^{x-y} J_n(e^{x-y}) \right] dy \quad (I.3.4)$$

La ec. I.3.4 tiene la forma de una integral de convolu---lución donde $\kappa(e^{-y})$ representa la función de entrada, $e^x k(e^x)$ es la función de salida y el término que se encuentra en los paréntesis es la llamada función respuesta del filtro. Haciendo uso del teorema de convolución, la respuesta del filtro puede ser determinada por el uso de un par de funciones conocidas que sean la entrada y la salida. Anderson encontró experimentalmente que la precisión del filtro mejora con el uso de filtros diseñados con integrales definidas conocidas que tengan un decrecimiento rápido. Anderson utilizó las siguientes funciones:

$$\int_0^{\infty} \lambda \exp(-a\lambda^2) J_0(b\lambda) d\lambda = \left[\exp(-b^2/4a) \right] / (2a) \quad (I.3.5)$$

$$\int_0^{\infty} \lambda^2 \exp(-a\lambda^2) J_1(b\lambda) d\lambda = \left[\exp(-b^2/4a) \right] / (2a) \quad (I.3.6)$$

Donde

$$a > 0, \quad b > 0$$

Finalmente, la aplicación de los pesos del filtro para un Kernel arbitrario en la ec. I.3.1 están dados por la suma de convolución para $b > 0$ ($\alpha = \ln b$).

$$k(b) = \left\{ \sum_{i=N_1}^{N_2} W_i k [\exp(A_i - x)] \right\} / b \quad (I.3.7)$$

Donde W_i son los pesos del filtro, $(A_i - x)$ son los valores defasados de la Abscisa para $i = N_1, \dots, N_2$ y $N_1 \geq 1, N_2 \leq 283$.

I.3.2. DESCRIPCION Y ACCESO AL PROGRAMA "CONTACTOS"

En base a la teoría desarrollada en la sección I.2, se -- realizó un programa escrito en Fortran 77 que se incluye dentro del Anexo A, el cual fué utilizado en una digital-Vax 11/780. Este programa genera la curva de resistividad aparentes a partir del uso de cualquier tipo de dispositivo tetraelectrónico.

El programa "Contactos" se encuentra formado por el programa fuente y por la subrutina "ZHANKS" descrita en la sección anterior. El acceso al programa deberá ser de la siguiente forma:

VARIABLES DE ENTRADA

Npuntos: Número de aberturas
IIFLAG : Indicador para seleccionar el tipo de curva de resistividad aparente requerida. Se debe indicar de la siguiente manera:

- 1, DISPOSITIVO SCHLUMBERGER
- 2, DISPOSITIVO WENNER
- 3, DISPOSITIVO DIPOLAR RADIAL
- 4, DISPOSITIVO DIPOLAR AZIMUTAL

XA, YA: Coordenadas del electrodo A de corriente
 XB, YB: Coordenadas del electrodo B de corriente
 XM, YM: Coordenadas del electrodo M de potencial
 XN, YN: Coordenadas del electrodo N de potencial
 ρ_1, ρ_2 : Resistividades de ambos lados del contacto
 ρ_3 : Resistividad del sustrato (únicamente 0 ó ∞)
 E : Espesor de la primera capa.

NOTA: Todos los formatos de lectura son formatos libres.

Para indicar la posición de los electrodos, se debe considerar la Fig. I.3.1.

Las tarjetas para los datos de entrada se deberán leer de la siguiente forma:

Tarjeta 1: NPuntos, IIFLAG

Tarjeta 2: (X_{Ai}, Y_{Ai}), i=1, ... NPuntos

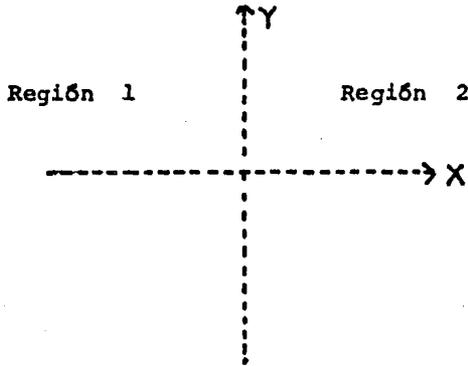


Fig. I.3.1. (ARRIBA) DIAGRAMA DE REFERENCIA PARA IDENTIFICAR LAS COORDENADAS DE LOS ELECTRODOS. EL EJE Y DIVIDE LA REGION 1 DE LA REGION 2. (ABAJO) Fig. I.3.2. CURVA EXTRAIDA DE ALPIN (ALPIN, 1966. LAMINA 45).

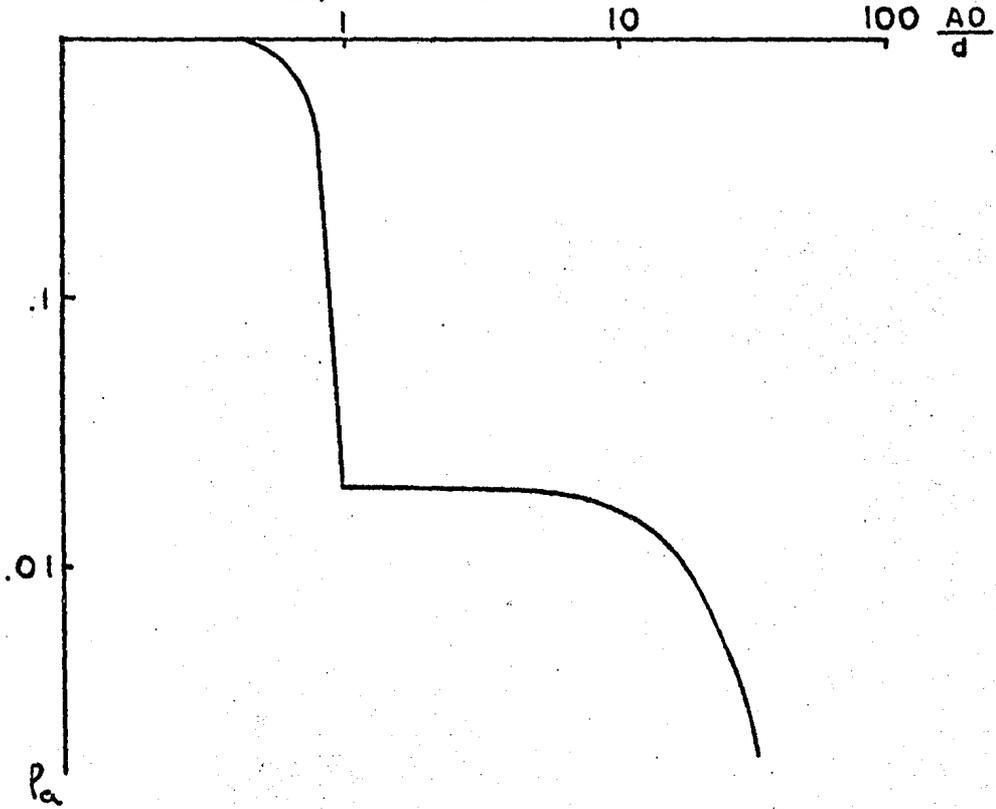


Tabla 1.3.1

```

10 1
1.0 -2.0 -1.0 3.0 -9.0 3.0 -7.0 2.0 0.0 -10.0
1.0 2.0 3.0 3.0 0.0 3.0 7.0 0.0 0.0 10.0
-1.0 -1.0 -1.0 -1.0 -1.0 -1.0 -1.0 -1.0 -1.0 -1.0
-1.0 -1.0 -1.0 -1.0 -1.0 -1.0 -1.0 -1.0 -1.0 -1.0
100-100-0-10
    
```

Tabla 1.3.2

ESPECIFICACIONES DEL MEDIO

ENCL= 0.100000 ANCH= 0.100000 HOC= 0.000000 ED ENCL= 10.

CURVA DE RESISTENCIAS INAPERTA DE LA BARRERA

I	DISTANCIA ELECTRODICA	RESISTENCIA APARTE
1	1.0000	10.0000
2	2.0000	10.0000
3	3.0000	10.0000
4	4.0000	10.0000
5	5.0000	10.0000
6	6.0000	10.0000
7	7.0000	10.0000
8	8.0000	10.0000
9	9.0000	10.0000
10	10.0000	10.0000

COORDENADAS DE LOS ELECTRODOS

I	XA	YA	XB	YB	XH	YH	XC	YC
1	-1.00	0.00	1.00	0.00	-0.10	0.00	0.10	0.00
2	-1.00	0.00	1.00	0.30	-0.10	0.00	0.10	0.30
3	-3.00	0.00	3.00	0.00	-0.10	0.00	0.10	0.00
4	-4.00	0.00	4.00	0.00	-0.10	0.00	0.10	0.00
5	-5.00	0.00	5.00	0.00	-0.10	0.00	0.10	0.00
6	-6.00	0.00	6.00	0.00	-0.10	0.00	0.10	0.00
7	-7.00	0.00	7.00	0.00	-0.10	0.00	0.10	0.00
8	-8.00	0.00	8.00	0.00	-0.10	0.00	0.10	0.00
9	-9.00	0.00	9.00	0.00	-0.10	0.00	0.10	0.00
10	-10.00	0.00	10.00	0.00	-0.10	0.00	0.10	0.00

Tabla 1.3.1. EJEMPLO DE UN ARCHIVO DE ENTRADA Y Tabla 1.3.2, UN FORMATO DE SALIDA DEL PROGRAMA "CONTACTOS".

Tarjeta 3: $(X_{Bi}, Y_{Bi}), i=1, \dots, N_{\text{puntos}}$
 Tarjeta 4: $(X_{Mi}, Y_{Mi}), i=1, \dots, N_{\text{puntos}}$
 Tarjeta 5: $(X_{Ni}, Y_{Ni}), i=1, \dots, N_{\text{puntos}}$
 Tarjeta 6: $\rho_1, \rho_2, \rho_3, E$

En la tabla I.3.1 se muestra un ejemplo de un archivo de - datos de entrada para el programa "Contactos".

Los resultados generados por el programa se imprimen de -- acuerdo a la Tabla I.3.2.

El algoritmo del programa puede ser descrito de acuerdo a - la Fig. I.3.3.

Es importante aclarar que la colocación o arreglo de los - electrodos es indiferente, así como el ángulo con que el - dispositivo cruce el contacto.

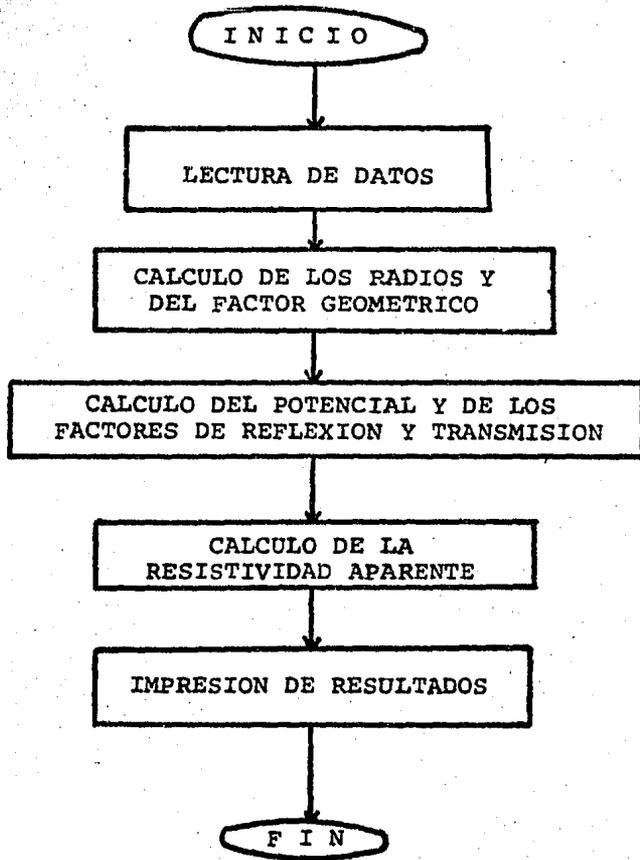


Fig. I.3.3 DIAGRAMA DE BLOQUES DEL PROGRAMA
" CONTACTOS "

Para el cálculo del potencial se obtiene la función Kernel a partir de la aplicación de la relación de recurrencia de Pekeris (ec. I.1.3), modificándose únicamente en el uso de la resistividad de la primera capa, dependiendo de región en que se localiza el electrodo de potencial.

Posteriormente se hace el cálculo de la resistividad aparente para cada una de las aberturas. Cabe hacer notar en este punto, que el programa es capaz de calcular la curva de resistividades aparentes para cualquier tipo de dispositivo tetraelectródico, no únicamente los mencionados en la sección de lectura de datos, modificando únicamente el cálculo de la distancia electródica, lo cual no tiene nada -- que ver con el cálculo de las resistividades aparentes. Se incluyeron únicamente estos cuatro dispositivos por ser de los más comunes.

1.3.3. PRUEBAS Y RESULTADOS DEL PROGRAMA "CONTACTOS"

Para comprobar el funcionamiento correcto del programa --- "Contactos", se realizaron diferentes pruebas, de las cuales se presentan las siguientes:

- 1) Se hace $\rho_1 = \rho_2$ y se compara la curva con la obtenida por un medio estratificado horizontal de dos capas.
- 2) Se hace que el espesor E tienda a infinito. Los resultados con comparados con los obtenidos por la fórmula propuesta por Orellana. (Orellana, 1981).

TABLE 1.3 E

ESPECIFICACIONES DEL MEDIO

RH= 0.100000 R=0.000000 RND= 0.000000 ESPECIES= 101

CURVA DE RESISTENCIAS APARENTES BOLA-BERBERCA

I	DISTANCIA CENTIMETROS	RESISTENCIA MINUTOS
1	1.0000	77.0000
2	2.0000	77.0000
3	3.0000	77.0000
4	4.0000	77.0000
5	5.0000	77.0000
6	6.0000	77.0000
7	7.0000	77.0000
8	8.0000	77.0000
9	9.0000	77.0000
10	10.0000	77.0000

PARAMETROS DEL MODELO LOGARITMICO EN UNO
CAPA: R=0.0000 RESISTENCIA= 0.000000

1	10.00000	100.000	0.0000000
2	1000.000	0.000	

FILTRO ENLARGADO - FILTRO DE BARRA PARA SERIE PURIFICACION DE AGUA

CURVA DE RESISTENCIAS APARENTES
TIPO BOLA-BERBERCA

DISTANCIA	RESISTENCIA MINUTOS
1.000	75.000
2.000	77.000
3.000	77.000
4.000	75.000
5.000	77.000
6.000	75.000
7.000	73.000
8.000	70.000
9.000	67.000
10.000	64.000

COMPARACION ENTRE EL PROGRAMA "CONTACTOS" Y EL PROGRAMA "FILTER" PARA UN
MEDIO HORIZONTAL DE DOS CAPAS.

3) Comparación de curvas obtenidas por el programa "Contactos" y las presentadas por Alpin (Alpin et All, 1966).

4) Se efectúa la prueba de reciprocidad.

Para la primera prueba se utiliza un medio donde

$$\begin{aligned} \rho_1 &= 30 \Omega \cdot m & \epsilon &= 20 \\ \rho_2 &= 30 \Omega \cdot m \\ \rho_3 &= \infty \end{aligned}$$

Los resultados se presentan en la tabla I.3.3, donde se comparan con los obtenidos por el programa "FILTER" ---- desarrollado por Pedro González V. (González, 1983).

En la segunda prueba donde el espesor de la capa que contiene el contacto vertical se hace muy grande ($E \rightarrow \infty$), se hace uso de la solución para un contacto lateral, dada por Orellana (Orellana, 1981).

$$U_1 = \frac{I\rho}{2\pi} \left(\frac{1}{\chi} + \frac{k}{2\chi_0 - \chi} \right) \quad (I.3.8)$$

$$U_2 = \frac{I\rho}{2\pi} \frac{1-k}{\chi} \quad (I.3.9)$$

Para un dispositivo tetraelectródico, las ecuaciones quedarán:

$$U_{1M}^A = \frac{I\rho}{2\pi} \left(\frac{1}{\Gamma_{AM}} + \frac{k}{2\Gamma_A - \Gamma_{AM}} \right) \quad (I.3.10)$$

$$U_{2M}^A = \frac{I\rho}{2\pi} \frac{1-k}{\Gamma_{AM}} \quad (I.3.11)$$

$$U_{1M}^B = \frac{I\rho}{2\pi} \left(\frac{1}{\Gamma_{BM}} + \frac{k}{2\Gamma_B - \Gamma_{BM}} \right) \quad (I.3.12)$$

$$U_{2M}^B = \frac{I\rho_1}{2\pi} \frac{1-k}{r_{DM}} \quad (I.3.13)$$

$$U_{1N}^A = \frac{I\rho_1}{2\pi} \left(\frac{1}{r_{AN}} + \frac{k}{2r_A - r_{AN}} \right) \quad (I.3.14)$$

$$U_{2N}^A = \frac{I\rho_1}{2\pi} \frac{1-k}{r_{AN}} \quad (I.3.15)$$

$$U_{1N}^B = \frac{I\rho_1}{2\pi} \left(\frac{1}{r_{BN}} + \frac{k}{2r_B - r_{BN}} \right) \quad (I.3.16)$$

$$U_{2N}^B = \frac{I\rho_1}{2\pi} \left(\frac{1-k}{r_{BN}} \right) \quad (I.3.17)$$

Los resultados obtenidos por ambos métodos, son presentados en la Tabla I.3.4.

En el caso de la comparación de curvas del programa "Contactos" con las curvas presentadas por Alpin, se tendrá que hacer una comparación gráfica, debido a que Alpin no presenta valores numéricos de sus curvas. La Fig. I.3.2. presenta una curva obtenida por Alpin (Lámina 45 Alpin - 1966) y en la Tabla I.3.5 se presentan los valores de la curva obtenida utilizando el programa "Contactos". Si se grafican se puede observar que los valores generan una curva idéntica a la de Alpin.

Finalmente, se hizo la prueba de reciprocidad para lo cual se obtuvieron los valores de resistividad aparente para un dispositivo de tipo Schlumberger, intercambiando los electrodos de corriente por los de potencial. Los resultados se presentan en la Tabla I.3.6.

TABLA I.3.4

ESPECIFICACIONES DEL MEDIO

RHO1= 10. RHO2= 0.10E+03 RHO3= 0.10E+10 ESPESOR= 0.10E+10

CURVA DE RESISTIVIDADES APARENTE WENNER

I	DISTANCIA ELECTRODICA	RESISTIVIDAD APARENTE	RESISTIVIDAD APARENTE (ORELLANA)
1	5.0000	10.0001	9.99867
2	7.0000	10.0003	10.00030
3	9.0000	10.0006	10.00062
4	10.0000	10.0009	10.00086
5	20.0000	10.0070	10.00696
6	40.0000	10.0582	10.05116
7	50.0000	10.1163	10.11731
8	70.0000	10.3516	10.35187
9	90.0000	10.8489	10.84896
10	100.0000	11.2634	11.26343
11	200.0000	13.3782	13.37818
12	400.0000	15.7191	15.72344
13	500.0000	28.2531	28.25321
14	700.0000	38.6005	38.60039
15	900.0000	43.1487	43.14788
16	1000.0000	44.5876	44.58699

COMPARACION ENTRE EL PROGRAMA "CONTACTOS" Y LA FORMULA PROPUESTA POR ORELLANA (1981) PARA UN CONTACTO DE ESPESOR INFINITO.

TABLA I-3.5

ESPECIFICACIONES DEL MEDIO

RHO1= 1.0 RHO2= 0.10E-01 RHO3= 0.00E+00 ESPESOR= 10.

CURVA DE RESISTIVIDADES APARENTE ULLMER

I	RESISTENCIA ELECTRODICA	RESISTIVIDAD APARENTE
1	0.50000	0.8252
2	0.80000	0.5285
3	1.00000	0.3000E+01
4	3.00000	0.1800E+01
5	4.00000	0.1745E+01
6	5.00000	0.1749E+01
7	6.00000	0.1715E+01
8	7.00000	0.1673E+01
9	8.00000	0.1615E+01
10	9.00000	0.1571E+01
11	10.0000	0.1487E+01
12	30.0000	0.8550E+02
13	30.0000	0.3159E+02
14	40.0000	0.9723E+03
15	50.0000	0.2052E+03
16	60.0000	0.7739E+04
17	70.0000	0.2017E+04
18	80.0000	0.5110E+05
19	90.0000	0.1257E+05
20	100.000	0.3681E+05
21	200.000	0.5211E+09
22	300.000	0.6510E+09
23	400.000	0.5751E+09
24	500.000	0.6800E+09
25	600.000	0.6958E+09
26	700.000	0.7072E+09
27	800.000	0.7056E+09
28	900.000	0.7089E+09
29	1000.000	0.7112E+09

VALORES DE RESISTIVIDAD APARENTE GENERADOS POR EL PROGRAMA "CON-TACTOS" PARA LA CURVA 45 DE ALPIN (1966).

TABLA I.3.6

ESPECIFICACIONES DEL MEDIO

RHO1= 50. RHO2= 0.30E+03 RHO3= 0.10E+09 ESPESOR= 15.

CURVA DE RESISTIVIDADES APARENTE SCHLUMBERGER

I	DISTANCIA ELECTRONICA	RESISTIVIDAD APARENTE
1	1.0000	66.5150
2	2.0000	63.7060
3	3.0000	61.7064
4	4.0000	60.2878
5	5.0000	59.3207
6	6.0000	58.7213
7	7.0000	58.4377
8	8.0000	58.4379
9	9.0000	58.7007
10	14.5000	78.0543
11	20.0000	86.6579
12	30.0000	109.0602
13	40.0000	142.4822
14	50.0000	178.0441
15	60.0000	213.3853
16	70.0000	248.2474
17	80.0000	282.7371
18	90.0000	316.9663
19	145.0000	463.6860
20	200.0000	547.7043
21	300.0000	793.9652
22	400.0000	1389.1412

PRUEBA DE RECIPROCIDAD REALIZADA CON EL PROGRAMA "CONTACTOS". EN ESTA TABLA LOS ELECTRODOS FIJOS SON LOS DE POTENCIAL.

TABLA I.3.6 (CONTINUACION)

ESPECIFICACIONES DEL MEDIO

RHO1= 50. RHO2= 0.30E+03 RHO3= 0.10E+09 ESPESOR= 15.

CURVA DE RESISTIVIDADES APARENTE SCHLUMBERGER

I	DISTANCIA ELECTRODICA	RESISTIVIDAD APARENTE
1	0.5000	66.5150
2	0.5000	63.8070
3	0.5000	61.8074
4	0.5000	60.3888
5	0.5000	59.4217
6	0.5000	58.8222
7	0.5000	58.5387
8	0.5000	58.5389
9	0.5000	58.8017
10	0.5000	78.2126
11	0.5000	86.8346
12	0.5000	109.2171
13	0.5000	142.6270
14	0.5000	178.1813
15	0.5000	213.5175
16	0.5000	248.3761
17	0.5000	282.8634
18	0.5000	317.0910
19	0.5000	463.8595
20	0.5000	547.8942
21	0.5000	994.1569
22	0.5000	1389.3525

EN ESTA OCASION LOS ELECTRODOS FIJOS SON LOS DE CONSULTA.

II. APLICACION A LA INTERPRETACION DE SONDEOS ELECTRICOS.

Las curvas de resistividad aparente obtenidas a partir de un sondeo eléctrico, pueden ser muy alteradas en el caso en que se tenga la presencia de un contacto lateral cercano al lugar en que se realiza el sondeo.

Uno de los problemas mas graves en la interpretación de curvas de resistividad aparente, es el tratar de identificar estos efectos para obtener de esta manera una información mas veraz. De manera general, la decisión de la existencia de un contacto lateral se deja a consideración y experiencia del intérprete. Sin embargo, como se podrá estudiar a continuación las alteraciones producidas por un efecto lateral, pueden ser muy variadas y debidas a diferentes factores, como pueden ser el contraste de resistividades con el sustrato inmediato a la capa del contacto, el tipo de dispositivo utilizado, el sentido en que se abren los electrodos, el ángulo con que se cruza el contacto, la distancia a la que se encuentra el sondeo del contacto, etc.

Para analizar mas detenidamente cada uno de estos factores y debido a consideraciones teóricas del Programa, este capítulo se ha dividido en el estudio de curvas con sustrato totalmente conductor o sustrato totalmente resistivo. Estos a su vez se subdividen en dos casos, dispositivos que abren sus electrodos paralelos al perfil (Fig. II.1) y dispositivos que abren sus electrodos perpendiculares al perfil (Fig. II.2).

II.1. SUSTRATO CON RESISTIVIDAD INFINITA.

El efecto de un contacto vertical cuando se tiene un sustrato totalmente resistivo puede ser un caso facil de --- identificar cuando se pasa de una región de resistividad menor a una región de resistividad mayor, debido a que -- una característica importante que se observa en la curva de resistividad aparente es que su pendiente es mayor de 45°, lo cual no puede ser posible de acuerdo a las propiedades de la curva de resistividad aparente (Cap. I.1).

II.1.1. LOS ELECTRODOS SE ABREN PARALELOS AL PERFIL

A manera de ejemplo se presenta el siguiente caso: Utilizando el programa "Contactos" se generan curvas sintéticas de resistividad aparente, realizando nueve diferentes sondeos en un medio con los siguientes parámetros:

$$\begin{aligned} \rho_1 &= 10 \Omega \cdot m & \epsilon &= 30 m \\ \rho_2 &= 100 \Omega \cdot m \\ \rho_3 &= \infty \end{aligned} \quad (II.1.1)$$

El arreglo electródico utilizado es un arreglo tipo Schlumberger, cuyos electrodos de corriente se irán abriendo paralelos al perfil. La línea de sondeos cruzará el contacto con un ángulo de 30° con respecto al eje "X" y los centros de sondeo se localizarán a diferentes distancias del contacto, simulando de esta forma un tendido como los que se realizan en la práctica. Las curvas de resistividad --

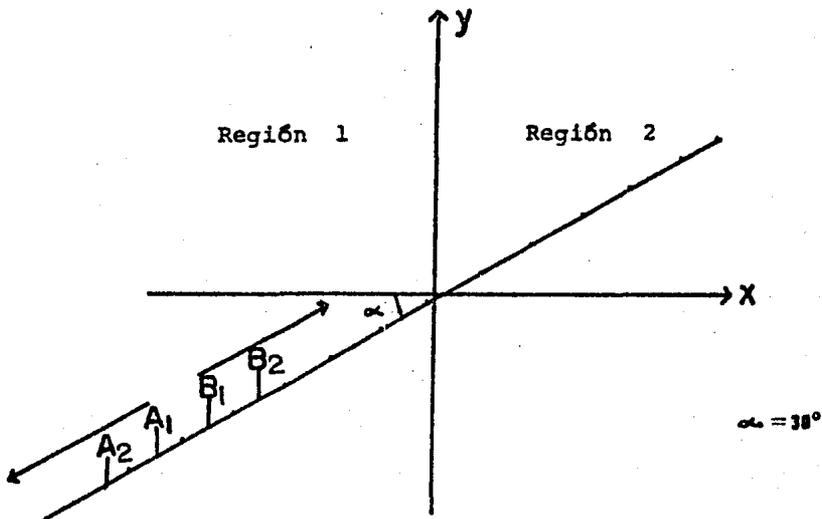


Fig. II.1. DISPOSITIVO CUYOS ELECTRODOS ABREN PARALELOS AL PERFIL. LAS FLECHAS INDICAN LA DIRECCION EN QUE SE ABREN LAS ALAS Y LOS PUNTOS MARCAN LOS CENTROS DE SONDEO.

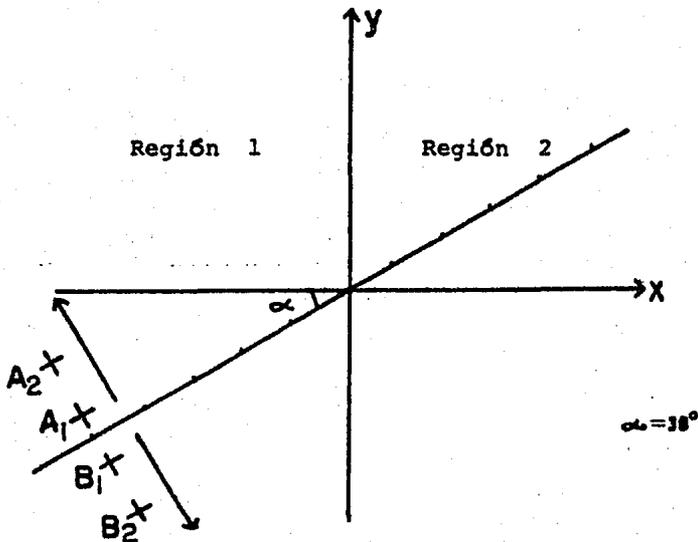


Fig. II.2. DISPOSITIVO CUYOS ELECTRODOS ABREN PERPENDICULARES AL PERFIL. LAS FLECHAS INDICAN LA DIRECCION EN QUE SE ABREN LAS ALAS Y LOS PUNTOS MARCAN LOS CENTROS DE SONDEO.

aparente obtenidas serán interpretadas de la manera habitual, es decir, considerando una curva obtenida a partir de un medio estratificado horizontal. En la interpretación se hace uso del programa "INVNOS" desarrollado por - Andres Tejero A. (Tejero, 1984). Para obtener un mejor análisis del efecto del contacto en la curva de resistividad aparente se inician los sondeos desde una distancia - muy alejada al contacto, lo que permitirá observar mejor el momento en que este se manifiesta y a su vez cual puede ser la posible causa. El primer centro de sondeo se localizará a 2020 m. de distancia del contacto y posteriormente se hacen los siguientes con una separación de - 500 m. entre cada centro de sondeo. De esta manera los sondeos se irán acercando al contacto hasta cruzarlo y finalmente volver a alejarse de él. La abertura mínima de cada sondeo es $AB/2 = 1$ m. y la máxima $AB/2 = 1000$ m. Los resultados obtenidos se analizarán de la siguiente forma:

- 1ª) Se construyen las curvas de resistividad aparente.
- 2ª) Se construye la pseudosección.
- 3ª) Se construye un modelo a partir de la interpretación obtenida.

Una de las primeras observaciones importantes se puede obtener a partir de las curvas de resistividad aparente, ya que estas muestran una deformación en la parte final de la curva. Esta deformación presenta las siguientes características:

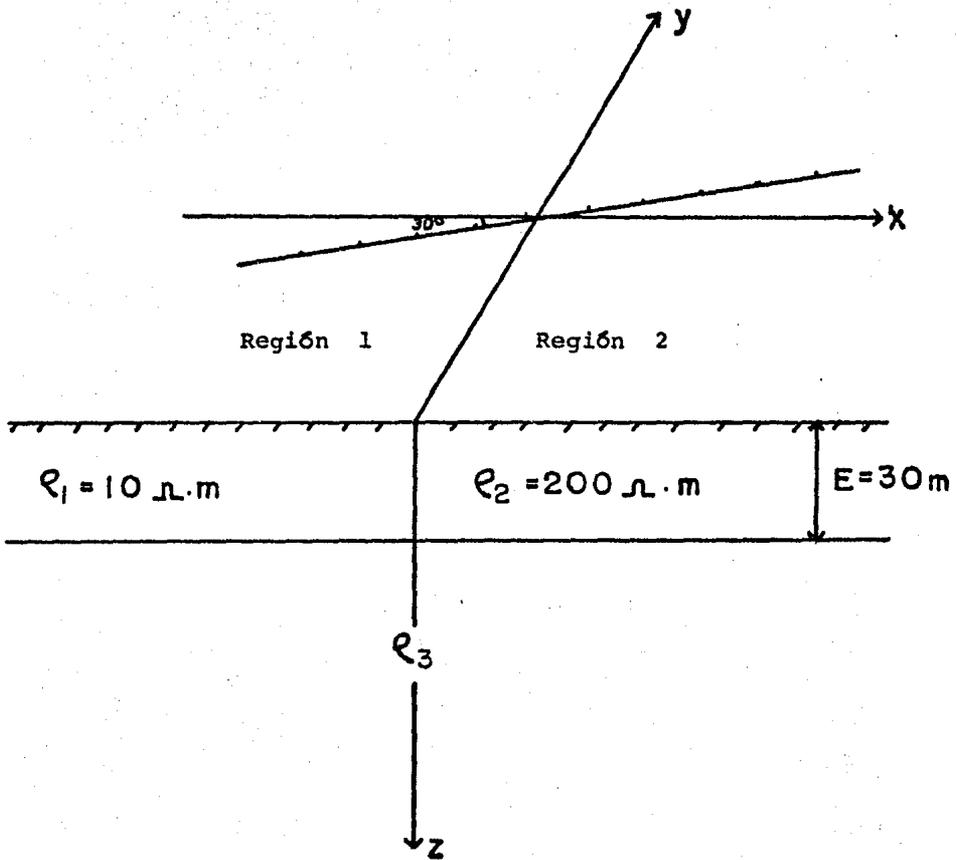


Fig. II.1.1. MODELO GEOELECTRICO CONSIDERADO PARA GENERAR LAS CURVAS DE RESISTIVIDAD APARENTE. LOS PUNTOS INDICAN EL PERFIL DE SONDEOS ELECTRICOS.

a) Conforme los electrodos de potencial se acercan al contacto la deformación de la curva se manifiesta más grande.

b) Si los electrodos de potencial se encuentran - del lado del contacto donde la resistividad es menor (en este caso región 1), la deformación de la curva se mostrará con un aumento en su pendiente, por lo general mayor - de 45° . (Fig. B-4).

c) Si los electrodos de potencial se encuentran - del lado del contacto donde la resistividad es mayor (Región 2), la deformación de la curva será en sentido inverso, es decir, su pendiente decrecerá haciendo más difícil su interpretación (Fig. B-6).

La construcción de la pseudosección (Fig. II.1.2), revela sin embargo de una manera bastante clara, la existencia - del contacto lateral, aunque no el de su posición exacta. En la pseudosección se puede observar un apilamiento de - líneas muy marcado, lo cual puede indicar inmediatamente la existencia del contacto, además de que permite observar claramente el contraste de resistividades.

En el modelo obtenido a partir de la interpretación (Fig. II.7), se manifiesta el resultado de las alteraciones debidas al contacto en las curvas de resistividad aparente - produciendo la existencia de una capa intermedia o capa - ficticia marcada con líneas punteadas, lo cual puede acarrear errores de consideraciones importantes. Sin embargo, una posibilidad de disminuir el error en la interpretación puede lograrse al analizar de manera conjunta la -

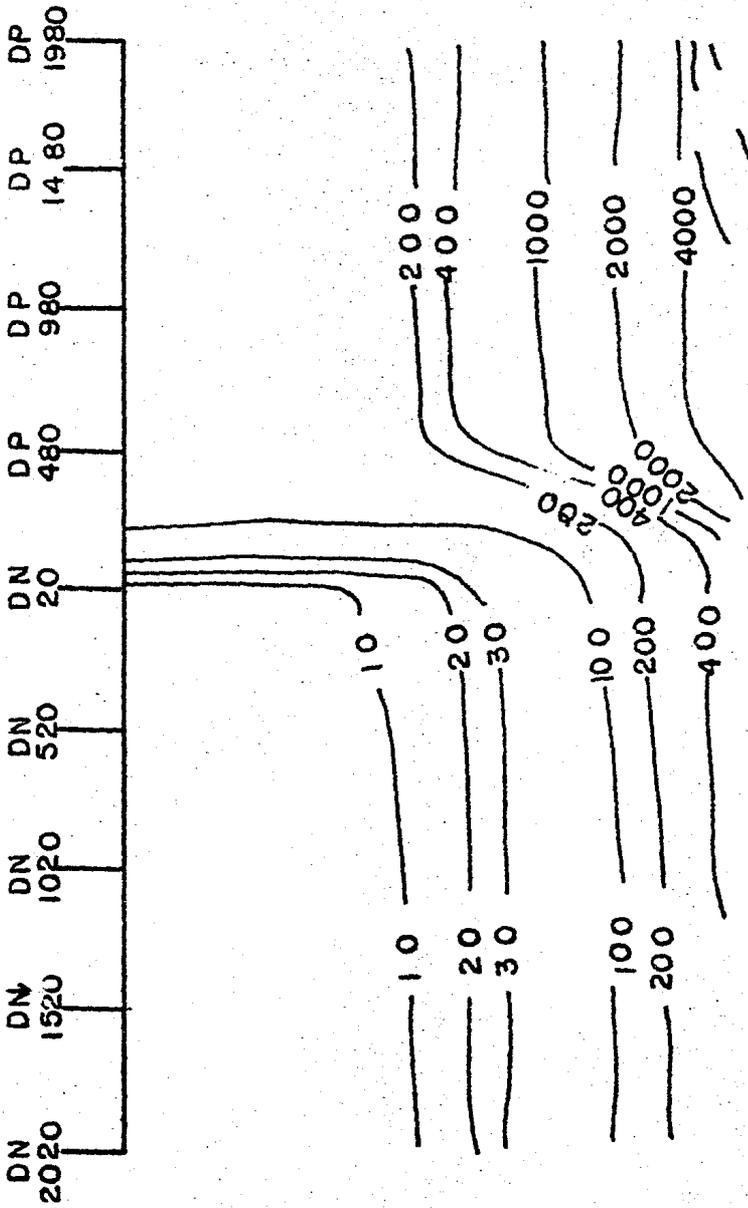


Fig. II.1.1.2. PSEUDOSECCION OBTENIDA A PARTIR DE SONDEOS PARALELOS AL PERFIL SOBRE UN MEDIO CON SUSTRATO DE RESISTIVIDAD INFINITA.

pseudosección y el modelo de interpretación. Es muy claro observar como la capa ficticia no se refleja en la -- pseudosección, lo que permite eliminarla del modelo de interpretación, el cual quedaría finalmente como se indica con línea continua en la Fig. II.1.3 y que a su vez representa un modelo cercano al modelo real.

II.1.2. LOS ELECTRODOS SE ABREN PERPENDICULARES AL PERFIL.

En esta sección se utilizará el mismo modelo de la Fig. - II.1.1, pero ahora los sondeos se llevarán a cabo abriendo los electrodos de manera perpendicular al perfil, aunque los centros de sondeo seguirán siendo los mismos. El dispositivo considerado será nuevamente un Schlumberger, - el cruce con el contacto se hará también formando un ángulo de 30° con el eje "X", así como las aberturas mínima y máxima de los electrodos volverán a ser de $AB/2 = 1m.$ y $AB/2 = 1000 m.$ respectivamente.

El objetivo será el de realizar una comparación en las -- curvas obtenidas cuando cambia la forma en que se cruza - un contacto lateral.

En primer lugar se puede observar que las curvas de resistividad aparente graficadas en papel bilogarítmico presentan el mismo tipo de alteración que las obtenidas cuando los electrodos abren paralelos al perfil. En la Fig. B-13 se muestra la curva obtenida a 520 m. de distancia del -- contacto, estando los electrodos de potencial sobre la región de resistividad ρ_1 . Por su parte la Fig. B-15, muestr

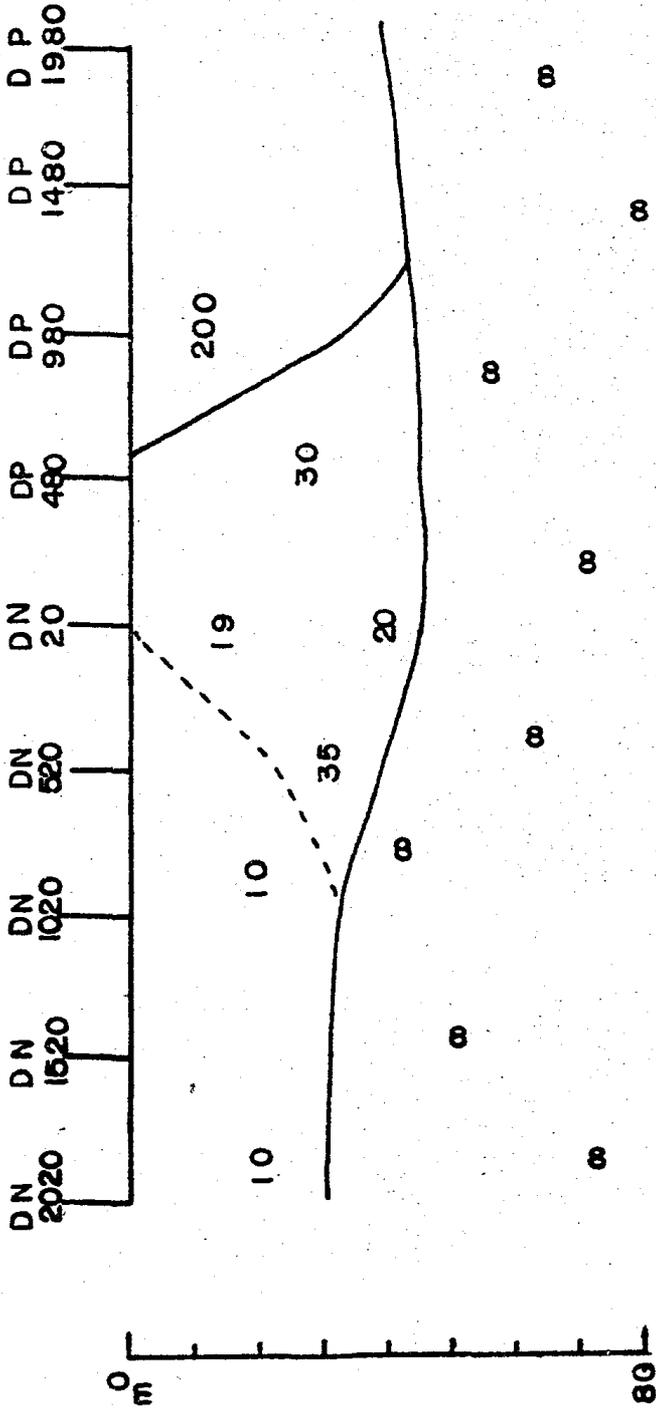


Fig. II, 1, 1, 3. MODELO DE INTERPRETACION OBTENIDO A PARTIR DE SONDEOS PARALELOS AL PERFIL SOBRE UN MEDIO CON SUSTRATO DE RESISTIVIDAD INFINITA. LAS LINEAS CONTINUAS MUESTRAN LA INTERPRETACION CONJUNTA CON LA PSEUDOSECCION. LA LINEA PUNTEADA REPRESENTA LA INTERPRETACION SI SE HICIERA POR AGRUPACION DE DATOS.

tra la curva obtenida a 480 m. de distancia del contacto sobre la región de resistividad ρ_2 .

Por otra parte, la pseudosección mostrada en la Fig. --- II.1.4, muestra características muy similares a la obtenida en la sección anterior; sin embargo, la interpretación obtenida es un poco diferente (Fig. II.1.5) ya que en esta ocasión el efecto del contacto se observa menos marcado, formando únicamente un pequeño lente en el lugar preciso del contacto.

Haciendo el análisis conjugando el modelo interpretado y la pseudosección podría eliminarse el pequeño lente formado, ya que esta no se marca dentro de la pseudosección y la interpretación quedaría como se indica con la línea -- continua en la Fig. II.1.5, obteniéndose un modelo muy -- aproximado al modelo real.

Como se puede apreciar el efecto del contacto es menor en este caso y se puede notar observando las curvas de resistividad aparente, en las cuales, para este caso de cruce con los electrodos perpendiculares al perfil, la distorsión no se marca con la misma intensidad en todas las curvas del sondeo.

Otra observación importante es que el efecto del contacto es mas fácil de identificar cuando los electrodos de potencial se encuentran colocados en la región inmediata al contacto donde la resistividad es menor, puesto que al -- observar que la curva aumenta su pendiente de 45°, inmediatamente se puede asociar este efecto con un contacto lateral en el subsuelo. Por el contrario, cuando los ---

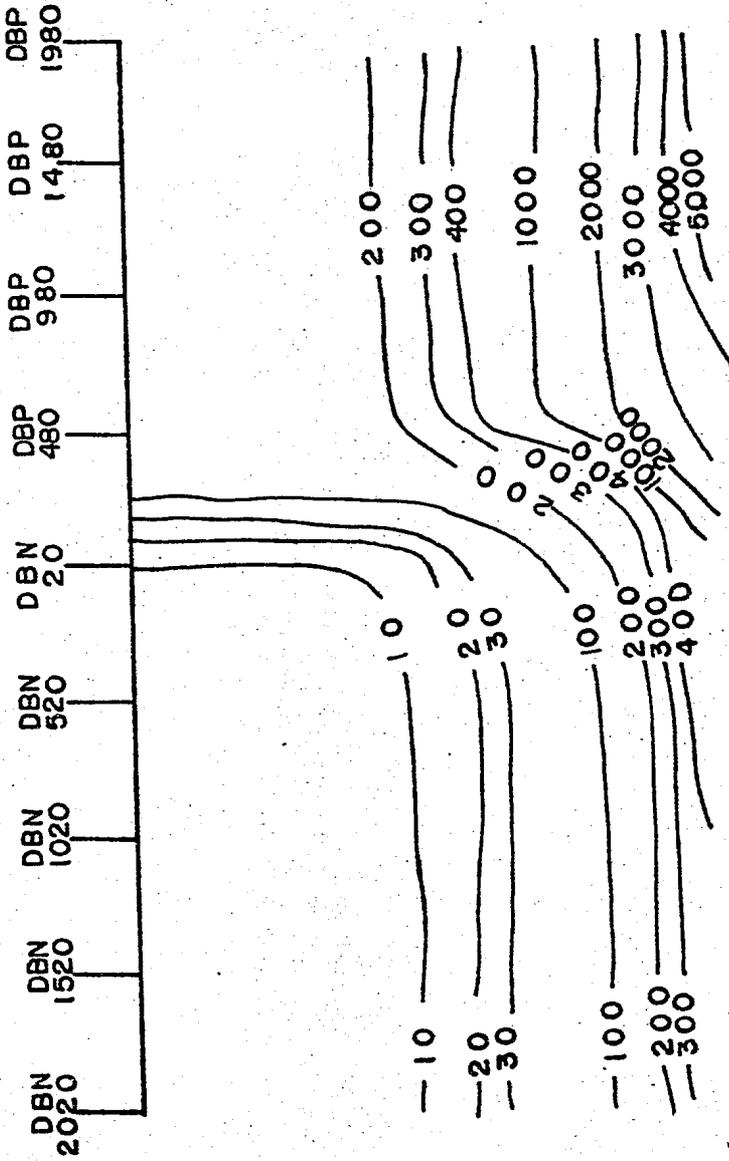


Fig. II.1.4. PSEUDOSECCION OBTENIDA A PARTIR DE SONDEOS PERPENDICULARES AL PERFIL SOBRE UN MEDIO CON SUSTRATO DE RESISTIVIDAD INFINITA.

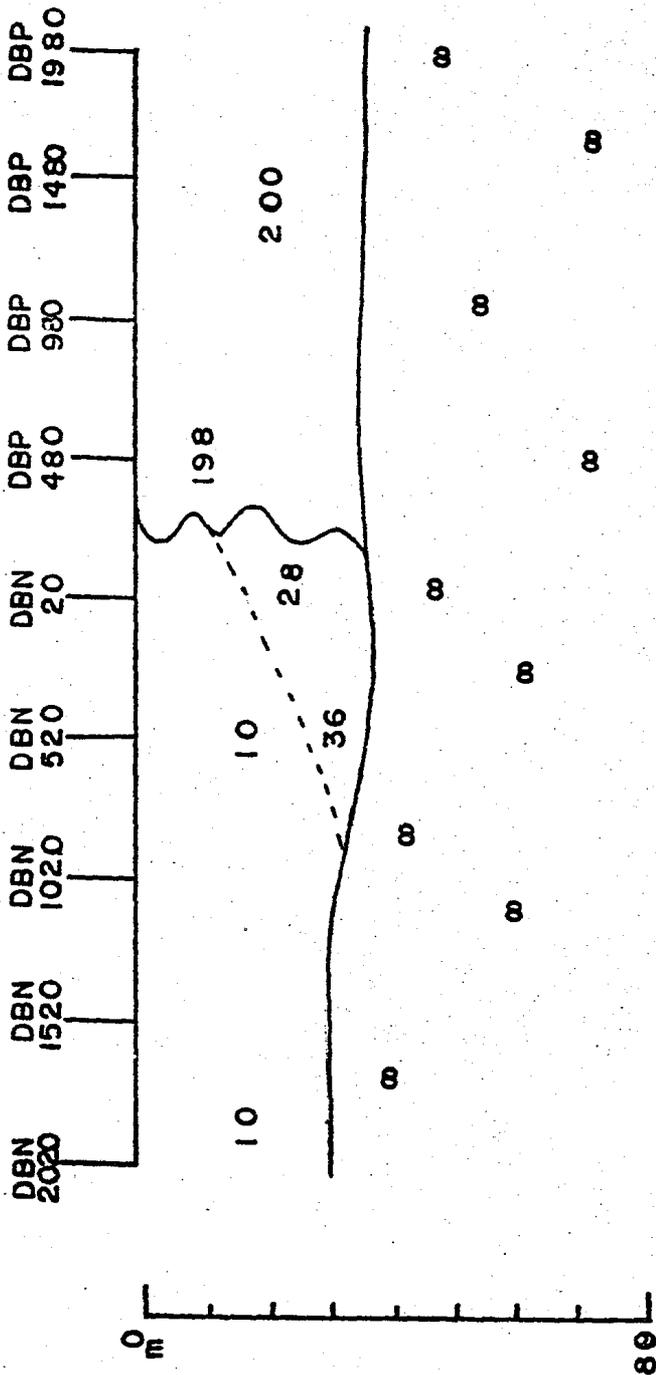


Fig. II.1.1.5. MODELO DE INTERPRETACION OBTENIDO A PARTIR DE SONDEOS PERPENDICULARES AL PERFIL SOBRE UN MEDIO CON SUSTRATO DE RESISTIVIDAD INFINITA. LAS LINEAS CONTINUAS MUESTRAN LA INTERPRETACION CONJUNTA CON LA PSEUDOSECCION. LA LINEA PUNTEADA REPRESENTA LA INTERPRETACION SI SE HICIERA POR AGRUPACION DE DATOS.

eléctrodos de potencial se encuentran en la región de resistividad mayor, la curva puede aparentar la existencia de una capa debido a que su pendiente disminuye, lo que implica que la interpretación será más complicada.

También es importante hacer notar que el efecto del contacto está mas relacionado con la posición de los eléctrodos de potencial, no así con los eléctrodos de corriente, los cuales tienen menos influencia.

Otro aspecto interesante es que el efecto de un contacto lateral no se manifiesta únicamente cuando se cruza el -- contacto, sino que este se hace presente aunque ningún -- eléctrodo haya hecho contacto con la discontinuidad. En este caso, el contacto que cuenta con un espesor de 30 m. se manifiesta muy claramente desde el sondeo que se encuentra a 1520m. de distancia, y de manera muy ténue, casi imperceptible en los sondeos que se encuentran a 2020m. y 1980 m. de distancia. El lector interesado puede analizar las curvas del Anexo B.

Por otra parte, en lo que respecta a la posición del contacto surge otro problema, ya que cuando este ha logrado ser identificado, por lo general su posición no está definida correctamente debido a que en la pseudosección y en el modelo de interpretación el efecto aparece desplazado de su posición verdadera. Este efecto no puede ser eliminado, la mayor aproximación se logra cuando algún centro de sondeo se localiza exactamente sobre el contacto lateral, lo cual es muy poco probable.

II.2. SUSTRATO CON RESISTIVIDAD CERO.

El efecto de un contacto lateral cuando el sustrato es -- conductor, puede ser muy diferente al caso estudiado ante riormente de sustrato totalmente resistivo. Es importante recordar que en este caso la curva de resistividad apa rente sí puede tener pendiente mayor de -45° , lo cual impi de el reconocimiento del contacto lateral como podía ha-- cerse en el caso cuando se trataba de sustrato aislante.- Además, el comportamiento de la corriente en ambos casos-- no es el mismo, una diferencia muy importante es que el - efecto del contacto lateral cuando el sustrato es de re-- sistividad cero no se manifiesta a distancias tan grandes del contacto como en el caso en que se tenía sustrato to-- talmente resistivo. En el caso anterior el contacto que-- contaba con 30 m. de espesor se alcanzaba a manifestar -- hasta una distancia de 1500 m., en este otro caso, el mis-- mo contacto no logra manifestarse más allá de 100 m. de - distancia. Este efecto puede ser comprobado calculando - el potencial debido a la imagen (U^I) cuando el radio -- tiende a infinito, es decir, cuando el potencial se mide-- lejos del contacto.

La función Kernel de acuerdo a la ec. I.1.3, para cuando-- el sustrato es de resistividad cero queda de la siguiente forma:

$$K_1(\lambda) = \rho \tan h(\lambda E) \quad (II.2.1)$$

Sustituyendo la expresión anterior en la ec. I.2.24, se obtiene:

$$U^I = \frac{I R_{12}}{2\pi} \int_0^{\infty} \rho_1 \tanh(\lambda \epsilon) J_0(\lambda r) d\lambda \quad (\text{II.2.2})$$

Haciendo un cambio de variable

$$\omega = \lambda r \quad (\text{II.2.3})$$

$$d\omega = r d\lambda \quad (\text{II.2.4})$$

Sustituyendo λ en II.2.2.

$$k_1\left(\frac{\omega}{r}\right) \rho_1 \tanh\left(\frac{\omega \epsilon}{r}\right) \quad (\text{II.2.5})$$

Utilizando II.2.4 y II.2.5 en II.2.2

$$U^I = \frac{I \rho_1 R_{12}}{2\pi r} \int_0^{\infty} \rho_1 \tanh\left(\frac{\omega \epsilon}{r}\right) J_0(\omega) d\omega \quad (\text{II.2.6})$$

Si consideramos que $r \rightarrow \infty$ entonces

$$\tanh\left(\frac{\omega \epsilon}{r}\right) \approx \frac{\omega \epsilon}{r} \quad (\text{II.2.7})$$

Por lo tanto

$$U^I = \frac{I R_{12}}{2\pi r} \int_0^{\infty} \frac{\rho_1 \omega \epsilon}{r} J_0(\omega) d\omega \quad (\text{II.2.8})$$

Finalmente

$$U^I = \frac{I \rho_1 E R_{12}}{2\pi r^2} \int_0^\infty \omega J_0(\omega) d\omega \quad (\text{II.2.9})$$

Por las propiedades de la función Bessel (Watson, 1962)

$$\int_0^\infty \omega J_0(\omega) d\omega = 1 \quad (\text{II.2.10})$$

De manera que

$$U^I = \frac{I \rho_1 E R_{12}}{2\pi r^2} \quad (\text{II.2.11})$$

Pero como $r \rightarrow \infty$

$$U^I \approx 0 \quad (\text{II.2.12})$$

Expresión que nos demuestra que el potencial imagen cuando el sustrato es totalmente conductor tiende a ser cero cuando el radio tiende a infinito, es decir, que el efecto del contacto no se manifiesta a grandes distancias -- cuando el sustrato es de resistividad cero $\rho \cdot m$.

Análogamente se puede demostrar que el efecto de un contacto lateral cuando el sustrato es aislante si existe, - aunque la distancia al contacto sea muy grande, debido a que en esta ocasión el potencial imagen no dependerá del radio.

Esto es, la función Kernel quedará para el caso del sustrato aislante como

$$k_1(\lambda) = \frac{\rho_1}{T_{0n}(\lambda\epsilon)} \quad (\text{II.2.13})$$

La expresión para el potencial será

$$U = \frac{IR_{12}}{2\pi} \int_0^{\infty} \frac{\rho_1}{T_{0n}(\lambda\epsilon)} J_0(\lambda r) d\lambda \quad (\text{II.2.14})$$

Derivando con respecto a R, se tiene que el campo eléctrico $|E_r|$ es

$$|E_r| = -\frac{\partial U}{\partial r} = -\frac{IR_{12}}{2\pi} \int_0^{\infty} \frac{\rho_1}{\tanh(\lambda\epsilon)} (-J_1(\lambda r)) \lambda d\lambda$$

$$|E_r| = \frac{IR_{12}}{2\pi} \int_0^{\infty} \frac{\rho_1}{\tanh(\lambda\epsilon)} \quad (\text{II.2.15})$$

Haciendo un cambio de variable de $\omega = \lambda r$ se obtiene la ecuación

$$|E_r| = \frac{IR_{12}}{2\pi} \int_0^{\infty} \frac{\rho_1}{\tanh\left(\frac{\omega}{r}\right)} J_1(\omega) \frac{\omega}{r^2} d\omega \quad (\text{II.2.16})$$

Si $r \rightarrow \infty$ entonces $\tanh\left(\frac{\omega}{r}\right) \rightarrow \frac{\omega}{r}$ por lo tanto

$$|E_r| = \frac{IR_{12}}{2\pi\epsilon r} \int_0^{\infty} J_1(\omega) d\omega \quad (\text{II.2.17})$$

De tal manera que

$$|E_r| = \frac{I R_{12} \rho_1}{2\pi E} \frac{1}{r} \quad (\text{II.2.18})$$

Integrando $|E_r|$ con respecto a R para encontrar el potencial se obtiene que

$$U(r) = - \int_{r_2}^r \frac{I R_{12} \rho_1}{2\pi E} \frac{dr}{r}$$

$$U(r) = \frac{I R_{12} \rho_1}{2\pi E} \text{LN}(r) \quad (\text{II.2.19})$$

Expresión que representa la influencia del contacto en -- las medidas.

II.2.1. LOS ELECTRODOS SE ABREN PARALELOS AL PERFIL

En esta ocasión el modelo geológico, utilizado será el -- mismo de la sección anterior; sin embargo, por la falta -- de manifestación del contacto los sondeos se realizarán -- cada 30 m., iniciando a 125 m. del contacto en la región -- de resistividad ρ_1 , y finalizando a 115 m. de distancia -- del contacto sobre la región ρ_2 . La abertura mínima de -- cada sondeo es de $AB/2 = 1$ m. y la máxima de $AB/2 = 995$ m.

El dispositivo electródico es un Schlumberger que cruza - el contacto con un ángulo de 30° respecto al eje "X". El análisis se hará de la misma forma:

1ª) Construcción de curvas de resistividad aparente en papel bilogarítmico.

2ª) Construcción de la pseudosección.

3ª) Construcción de un modelo de interpretación.

En este caso, las curvas afectadas por el contacto presentan la aparición de una capa ficticia que puede ser de -- dos formas distintas:

a) La capa ficticia puede presentar una resistividad mayor a la de la primera capa para el caso en que el centro del sondeo se encuentre muy cerca del contacto y - sobre la región de resistividad menor (región 1 en este - caso). En la Fig. B-23 se muestra una curva de resistivi- dad aparente, tomada de un sondeo a 5 m. del contacto so- bre la región de resistividad $\rho_1 = 10 \Omega\text{-m}$. Esta curva --- muestra una segunda capa (capa ficticia) con una resisti- vidad aproximada de $40 \Omega\text{-m}$, la cual es producida por el - efecto de la región 2 ($\rho_2 = 200 \Omega\text{-m}$).

b) La capa ficticia puede presentar una resistivi- dad menor a la resistividad de la primera capa. Este ca- so es mas frecuente, pues se puede presentar en ambas re- giones. Un ejemplo se muestra en la Fig. B-24, la cual - representa un sondeo realizado a 25 m. de distancia del - contacto sobre la región 2.

c) Un tercer caso puede presentarse como un aumento del espesor de la primera capa, tal como se observa en la Fig. B-22, en la cual la curva de resistividad aparente presenta un espesor de 50 m. aproximadamente, siendo - que en realidad se trata de un espesor de 30 m. Este -- efecto suele suceder a distancias cercanas al contacto, - en esta ocasión la curva presentada pertenece a un sondeo realizado a 35 m. del contacto sobre la región 1.

La pseudosección revela claramente la existencia del contacto vertical (Fig. II.2.1), aunque se pudiera considerar una capa ficticia entre la resistividad ρ_2 y la del sustrato, lo cual podría aparentar una falla donde un bloque subió y el otro bajó. Sin embargo, en el modelo de interpretación no se presenta tan clara la solución, pues debido a la formación de las capas ficticias mencionadas anteriormente, el modelo presenta una serie de lentes inexistentes (Fig. II.2.2), mostrados con línea punteada. Con líneas continuas se presenta la interpretación realizada conjuntamente con la pseudosección.

II.2.2. LOS ELECTRODOS SE ABREN PERPENDICULARES AL PERFIL.

En esta sección se utilizará el mismo modelo de la sección II.2.1, con la única diferencia de que los electrodos se abrirán en sentido perpendicular al perfil.

En este caso, la deformación de las curvas de resistividad aparente es menos perceptible que en la sección anterior. Las figuras B-32 y B-33, muestran las curvas ob-

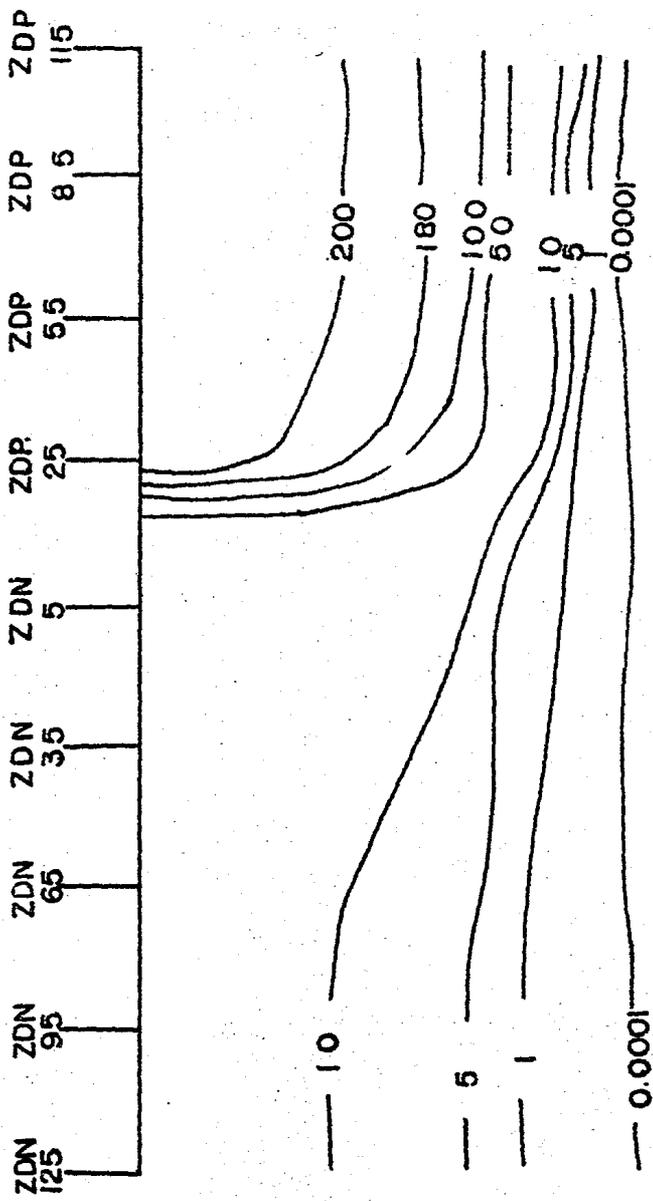


Fig. II.2.1.1. PSEUDOSECCION OBTENIDA A PARTIR DE SONDEOS PARALELOS AL PERFIL SOBRE UN MEDIO CON SUSTRATO DE RESISTIVIDAD CERO.

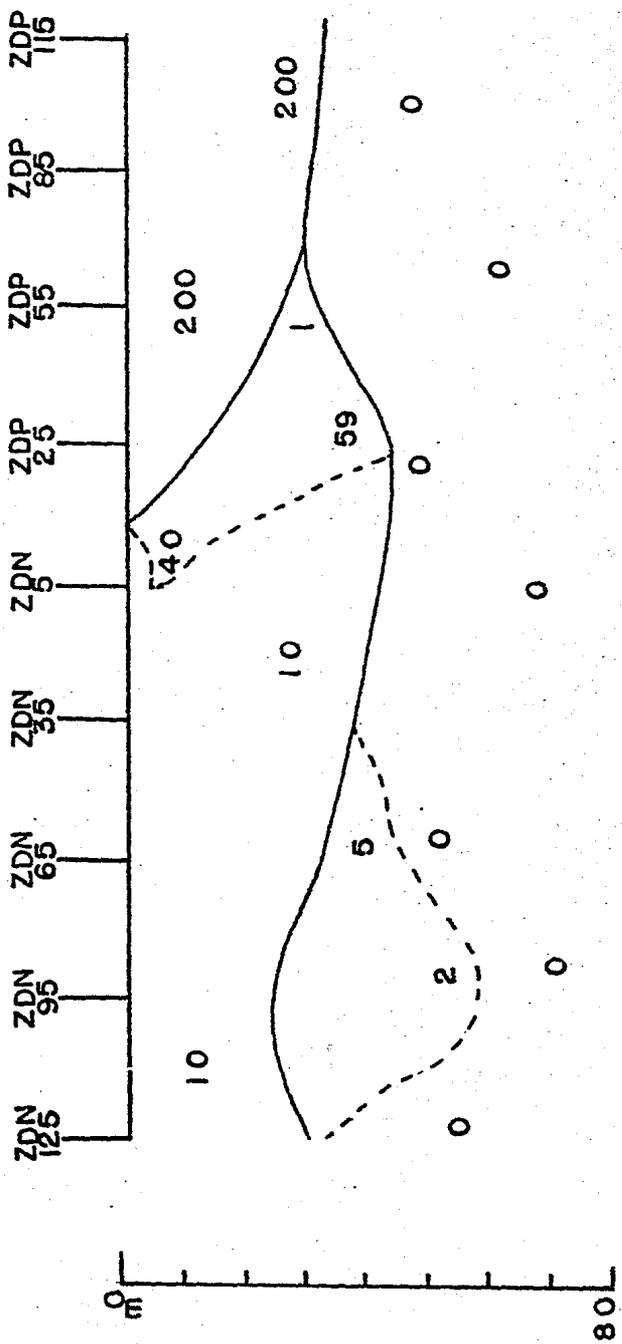


Fig. II, 2, 2. MODELO DE INTERPRETACION OBTENIDO A PARTIR DE SONDOS PARALELOS AL PERFIL SOBRE UN MEDIO CON SUSTRATO DE RESISTIVIDAD CERO. LAS LINEAS CONTINUAS MUESTRAN LA INTERPRETACION CONJUNTA CON LA PSEUDOSECCION. LA LINEA PUNTEADA REPRESENTA LA INTERPRETACION SI SE HICIERA POR AGRUPACION DE DATOS.

tenidas a partir del sondeo realizado a 5 m. de distancia del contacto sobre la región 1, y a 25 m. de distancia -- del contacto sobre la región 2.

Esto implica que el espesor de la capa ficticia es menor que cuando los electrodos se abren perpendiculares al perfil, lo cual se puede observar muy claramente en el modelo de interpretación (Fig. II.2.4) donde únicamente las curvas debidas a sondeos inmediatos al contacto presentan notoriamente el efecto. Nuevamente se presenta la interpretación realizada a base de agrupación de valores con línea punteada, y con línea continua la interpretación -- con la pseudosección.

Sin embargo, la pseudosección (Fig. II.2.3) se presenta casi idéntica a la de la Fig. II.2.1, mostrando la existencia del contacto de una manera muy fácil de identificar. Nuevamente, una recomendación importante es el uso de la pseudosección junto con el modelo de interpretación antes de dar un resultado final, ya que su uso puede aclarar la interpretación.

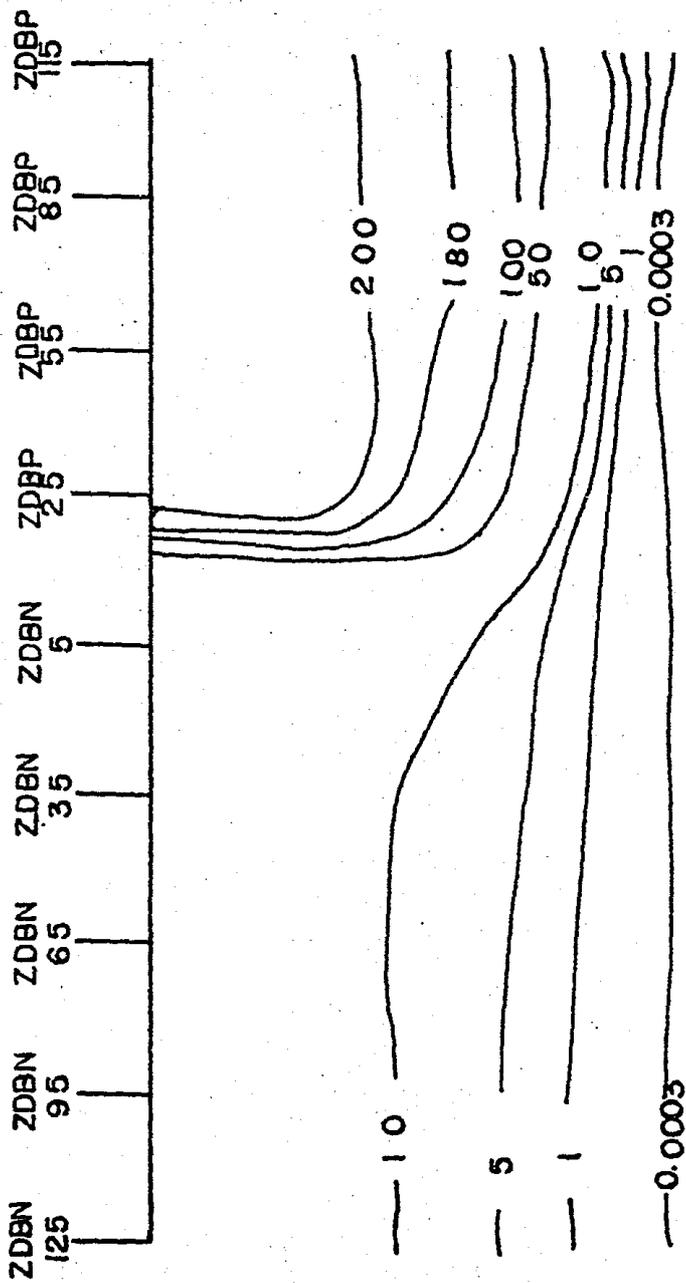


Fig. 11.2.3. PSEUDOSECCION OBTENIDA A PARTIR DE SONDEOS PERPENDICULARES AL PERFIL SOBRE UN MEDIO CON SUSTRATO DE RESISTIVIDAD CERO.

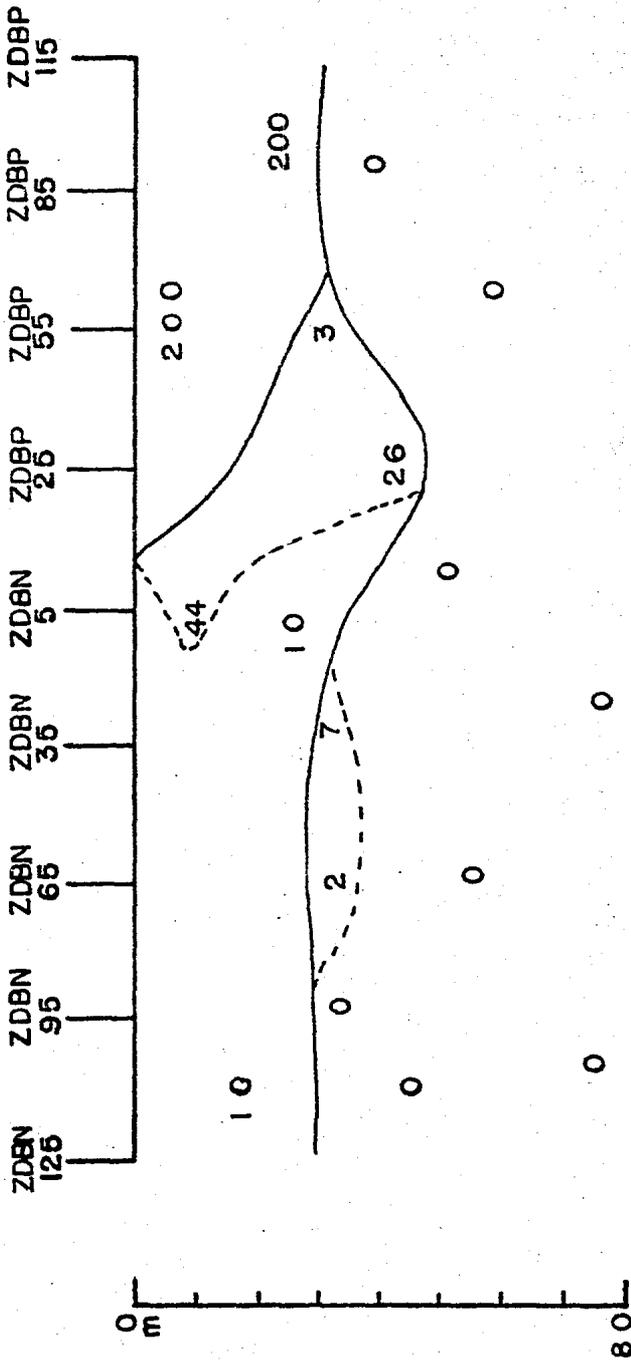


Fig. II.2.4. MODELO DE INTERPRETACION OBTENIDO A PARTIR DE SONDEOS PERPENDICULARES AL PERFIL SOBRE UN MEDIO CON SUSTRATO DE RESISTIVIDAD CERO. LAS LINEAS CONTINUAS MUESTRAN LA INTERPRETACION CONJUNTA CON LA PSEUDOSECCION. LA LINEA PUNTEADA REPRESENTA LA INTERPRETACION SI SE HICIERA POR AGRUPACION DE DATOS.

POSIBILIDAD DE CORREGIR EL EFECTO DE UN CONTACTO LATERAL,

III.1. METODOS USADOS PARA CORREGIR EL TRASLAPE DE UNA CURVA TIPO SCHLUMBERGER.

El traslape en las curvas de tipo Schlumberger se produce cuando por efectos de falta de sensibilidad en los instrumentos es necesario aumentar las aberturas de los electrodos de potencial, lo cual produce un "salto" en la curva de resistividad obtenida. Este "salto" se debe a dos causas:

1^a) Porque se deja de cumplir con las condiciones del dispositivo tipo Schlumberger que establece que la -- distancia MN debe ser muy pequeña ($AB \geq 5 MN$) en comparación con la abertura de los electrodos de corriente -- (Orellana, 1981) para que el error sea despreciable, de -- tal forma que se cumpla con la condición de medir el campo eléctrico.

2^a) Debido a las heterogeneidades del subsuelo -- que pueden llegar a incrementar el tamaño del "salto".

Este efecto de traslape es muy común en el trabajo de campo, por lo que se han propuesto diferentes y variadas técnicas para corregir el "salto", sin embargo, son pocas -- las técnicas basadas en conceptos firmes para su aplicación. Entre las técnicas más conocidas y más utilizadas -- se tienen las siguientes:

a) El método de continuación de la curva. Este método consiste en unir las secciones de curvas obtenidas por el traslape, eliminando de esta manera los "saltos" y obteniéndose así una sola curva. Sin embargo, esta técnica de corrección es obvio que no puede ser correcta debido a que se están falseando los parámetros del corte, de tal forma que la curva obtenida no tiene nada que ver con el corte geoelectrico que se desea representar.

b) El método de promediación consiste en unir las secciones de la curva trazando una línea que suavice el "salto" debido al traslape y considerar que esta representa la curva del corte observado. Aunque este método es muy recurrido, no tiene ninguna base en que apoyarse, debido a que las diferentes secciones de la curva no fueron calculadas bajo las mismas condiciones. De esta forma al realizar la promediación se alteran los parámetros originales del corte.

c) Método de Orellana. Orellana (1981) propone para el caso de un traslape, considerar fija la parte de la curva obtenida con la abertura de electrodos mayor y desplazar verticalmente la otra parte de la curva hasta que ambas esten unidas. Otra variante de este método es el dejar fija la sección de la curva que se considere mas segura y desplazar las restantes.

Este método es mas correcto que los anteriores, sin embargo, aunque los espesores casi no se cambian, se pueden falsear las resistividades al desplazar la curva, alterando así los parámetros del corte geoelectrico. Además, si existe un contacto lateral, su efecto no se elimina.

d) Método de Filtrado Lineal. Koefoed (1979) propone una corrección para el traslape debido a la finites de los electrodos de potencial por medio del diseño de -- filtros lineales, de tal forma que se pueda convertir la resistividad aparente de una configuración simétrica en la resistividad aparente de una configuración tipo Schlumberger.

Para el problema del traslape debido a heterogeneidades del terreno, Koefoed propone desplazar horizontalmente, -- después de haber realizado la corrección por finites, hasta que las dos secciones de la curva se unan y así considerar una curva limpia del efecto del traslape y del contacto lateral. Sin embargo, este método propuesto para eliminar el efecto del contacto solo es justificable para cuando las aberturas de los electrodos son mucho mayores que el espesor de la discontinuidad. Por otra parte, se puede dar el caso que al desplazar las curvas se deformen los espesores del corte o que al desplazar las secciones horizontalmente nunca lleguen a unirse.

e) Método de Mundry. Mundry (1980) propone una -- corrección para el traslape debido a la finites de los electrodos, basada en la relación AB/MN de los electrodos y en la pendiente de la curva de resistividad aparente -- graficada en papel bilogarítmico, para lo cual construye curvas gráficas que facilitan la corrección.

Para la construcción de estas curvas teóricas Mundry expresa la resistividad aparente (ρ_a) de una configuración Schlumberger como:

$$\rho_a^{(2)}(L/2) = \frac{(L/2)^2 - (a/2)^2}{a} \int_{L-a/2}^{L+a/2} \frac{\rho_a^{(0)}(r)}{r^2} dr \quad (\text{III.1.1})$$

De tal forma que

$$\rho_a^{(2)} / \rho_a^{(0)} = \frac{1 - (a/L)^2}{2a/L} \cdot \ln \frac{1 + a/L}{1 - a/L} \quad (\text{III.1.2})$$

Donde la expresión III.1.2, fué utilizada para construir las curvas de la figura III.1.1, la cual muestra la relación $\rho_a^{(2)} / \rho_a^{(0)}$ para diferentes pendientes en función de la relación AB/MN. La curva $\rho_a^{(0)}$ se toma como el segmento de curva que fué medido con la relación AB/MN mayor antes del cambio de la distancia MN. Aunados a la gráfica se incluyen un Goniometro para calcular la pendiente de la curva facilmente y la corrección Δ en milímetros para una curva graficada en papel bilogarítmico de módulo 83.3 mm.

Esta técnica propuesta por Mundry es muy efectiva para corregir el efecto del traslape únicamente cuando este se debe a que la abertura de electrodos no cumple con la relación $AB \geq 5 MN$; pues se puede demostrar que cuando se cumple con esta relación y la tierra es estratificada horizontalmente el "salto" producido al realizar el traslape es despreciable y su corrección no es significativa.

Para el caso de inhomogeneidades, Mundry propone una corrección similar a la Koefoed.

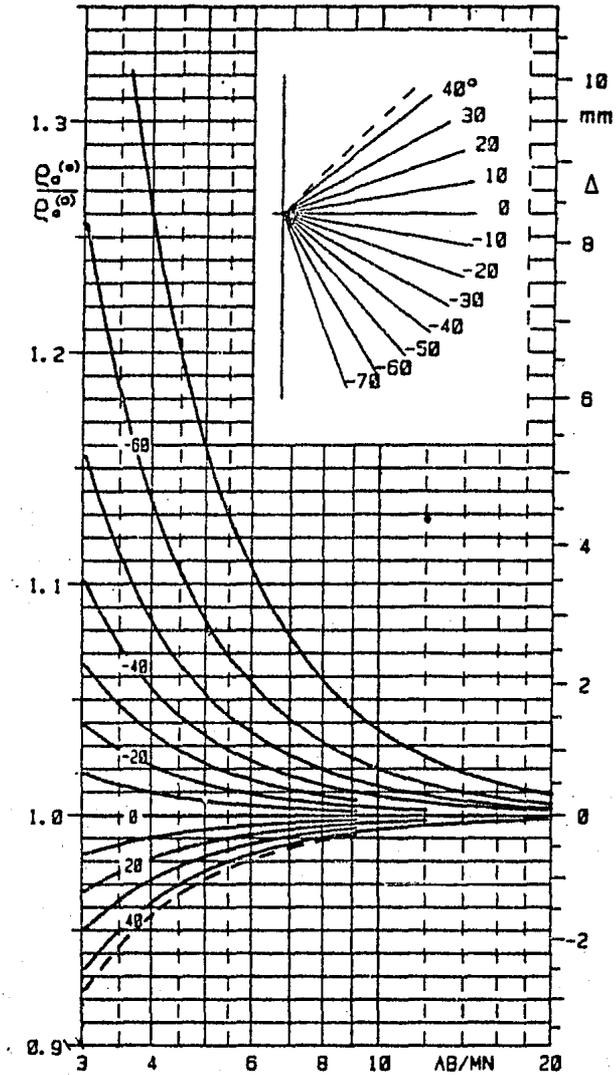


Fig. III.1.1. CURVAS GRAFICAS CONSTRUIDAS POR MUNDY PARA LA CORRECCION DEL EFECTO DE FINITES DEL -- TRASLAPE (EXTRAIDO DE MUNDY, 1980).

En la siguiente sección se desarrolla una fórmula propuesta para eliminar los efectos producidos por un contacto lateral en la curva de resistividades, para cuando el contacto se presenta de manera regional, es decir, que es muy grande en comparación con la abertura de los electrodos de potencial.

III.2. DESARROLLO DE LA FORMULA DE CORRECCION DEL EFECTO LATERAL.

El problema que causa un contacto lateral sobre la curva de resistividad aparente ha sido estudiado en múltiples ocasiones y sus efectos son muy conocidos. Por ejemplo, la creación de estratos ficticios (Mundry, 1984). Sin embargo, no existe una técnica clara que permita "limpiar" la curva de resistividad aparente que se desea interpretar, de este tipo de efectos.

Basados en la técnica de descomposición de medios (Habberjam, 1974), se propone una técnica que permita precisamente, la eliminación de los efectos producidos por discontinuidades laterales, de tal forma que la curva de resistividades represente únicamente el corte geoelectrico a profundidad.

La teoría de descomposición de medios propuesta por Habberjam et All (1974) se puede resumir de la siguiente manera:

El proceso consiste en formar modelos complejos a partir de modelos sencillos y fáciles de obtener, combinando es-

tos últimos por medio de operaciones matemáticas simples, de tal forma que los espacios combinados respeten las condiciones de frontera. Para la aplicación de esta técnica se proponen dos reglas, las cuales hay que seguir para -- llevar a cabo la combinación de medios.

a) La primera regla trata sobre la combinación de medios que contengan interfaces verticales y paralelas. - Este tipo de medios pueden ser combinados por un simple - producto aritmético.

b) La segunda regla estudia la composición de medios combinando espacios horizontales y verticales, para lo cual se utilizarán sustracciones y multiplicaciones como operaciones básicas.

Esta técnica de descomposición de medios ya ha sido utilizada de forma indirecta en diferentes conceptos por -- ejemplo, la corrección topográfica. Esta corrección se - define como (Rijo, 1980).

$$\rho_c = \frac{\Delta V_{obs}}{\Delta V_{cal}} \quad (III.2.1)$$

Donde ρ_c es la resistividad aparente corregida.
 ΔV_{obs} es el potencial medido en campo.
 ΔV_{cal} es el potencial calculado para una tierra-homogénea y rugosa.

Multiplicando y dividiendo la ec. III.2.1 por K/I siendo K el factor geométrico e I la intensidad de corriente se obtiene

$$\rho_c = \frac{\rho_{obs}}{\rho_{cal}} \quad (III.2.2)$$

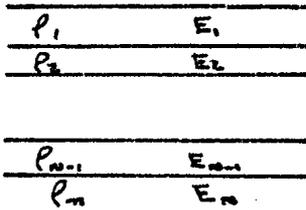


Fig. III.2.1a. MODELO ESTRATIFICADO HORIZONTALMENTE DE N CAPAS CON TOPOGRAFIA PLANA

Fig. III.2.1b. MEDIO HOMOGENEO CON TOPOGRAFIA RUGOSA.

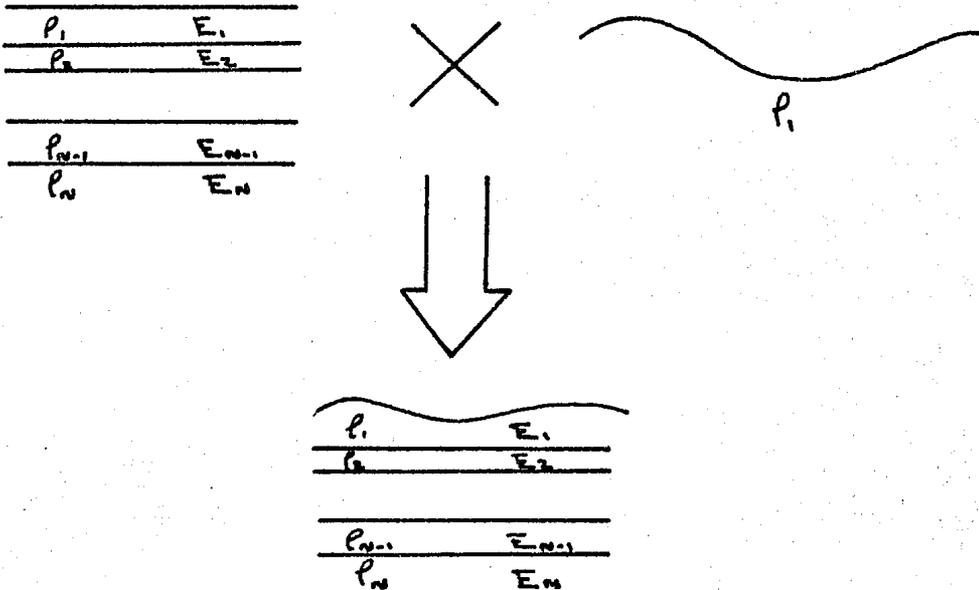


Fig. III.2.1c. MODELO DE N CAPAS CON TOPOGRAFIA RUGOSA FORMADO POR EL METODO DE DESCOMPOSICION.

Despejando ρ_{obs}

$$\rho_{obs} = \rho_c \times \rho_{cal} \quad (III.2.3)$$

La ec. III.2.3 define la resistividad obtenida en campo - como el producto de una resistividad corregida, es decir, el medio que se desea ver (Fig. III.2.1a) por una resistividad calculada con la topografía rugosa y un medio homogéneo de resistividad ρ (Fig. III.2.1b), de tal forma que si se desea obtener la resistividad corregida (Fig. - III.2.1), únicamente bastará con despejarla de la fórmula.

De manera similar, se puede construir un medio que contenga un contacto vertical en la primera capa y una segunda capa de espesor infinito (Fig. III.2.2a) a partir de un medio horizontal de dos capas (Fig. III.2.2b) y un medio con una discontinuidad como el mostrado en la Fig. III.2.2c.

El corte de la Fig. III.2.2a, será el representado por la curva de campo (ρ_{obs}), el medio de la Fig. III.2.2b, se nombrará como medio horizontal (ρ_H) y el corte de la -- Fig. III.2.2c, será el medio vertical (ρ_V).

Si se multiplica ρ_H y ρ_V y se normaliza con respecto a ρ , se obtendrá la curva observada (Fig. III.2.3) aplicando - el concepto de descomposición de medios antes mencionados, esto es

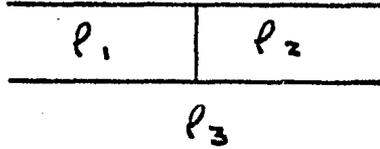


Fig. III.2.2a. MEDIO DE DOS CAPAS CON CONTACTO VERTICAL (ρ_{obs})

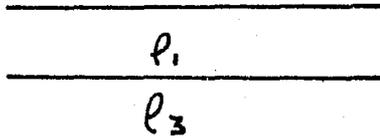


Fig. III.2.2.b. MODELO DE DOS CAPAS ESTRATIFICADO HORIZONTALMENTE (ρ_h).

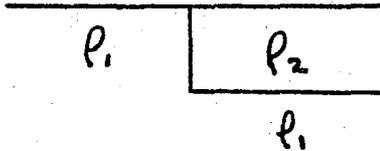


Fig. III.2.2c. MODELO DE UNA TIERRA QUE CONTIENE UNA DISCONTINUIDAD VERTICAL. (ρ_v).

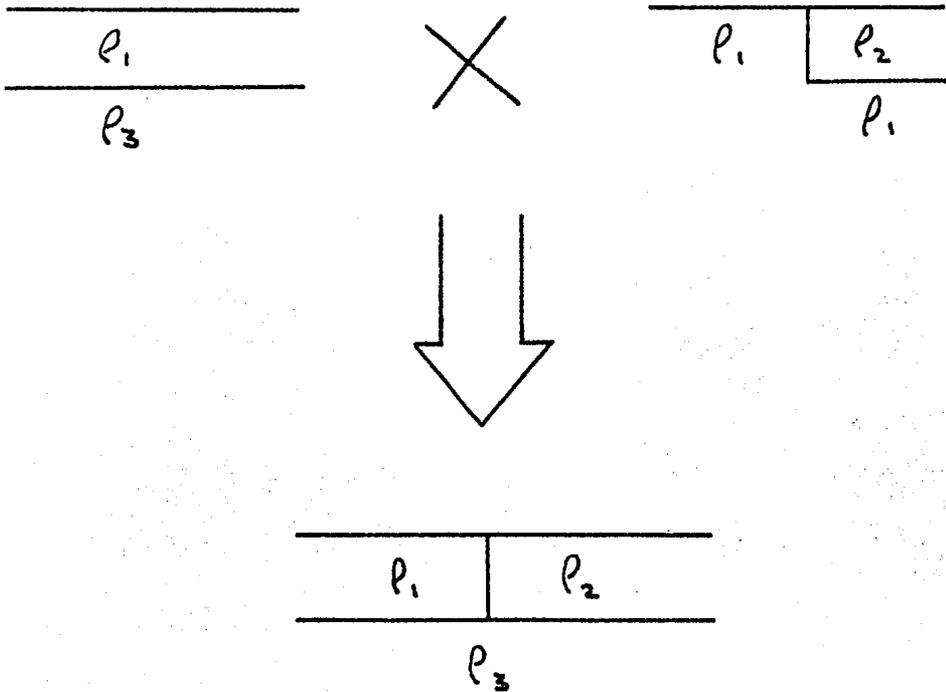


Fig. III.2.3. CONSTRUCCION DE UNA TIERRA DE DOS CAPAS CON CONTACTO VERTICAL EN BASE AL METODO DE DES-composicion.

$$\rho_{obs} = \frac{\rho_H \times \rho_V}{\rho_i} \quad (\text{III.2.4})$$

Si se cuenta con un programa que modele el medio vertical ρ_V , la ec. III.2.4, es suficiente para poder obtener el medio horizontal buscado, despejando ρ_H de III.2.4 de la siguiente forma:

$$\rho_H = \frac{\rho_i \rho_{obs}}{\rho_V} \quad (\text{III.2.5})$$

Sin embargo, si no se cuenta con un programa de modelado, el medio vertical puede ser construido a partir de una nueva descomposición de la siguiente forma: Se considera un medio horizontal ρ_H de dos capas con resistividad ρ_2 y ρ_1 respectivamente (Fig. III.2.4a) y un medio que contenga un contacto vertical de espesor infinito con resistividades ρ_1 y ρ_2 de cada lado del contacto (ρ_V') como se observa en la Fig. III.2.4b.

Los pasos a seguir para la formación del nuevo medio son los siguientes:

a) A partir de la regla 2 de Habberjam se normaliza ρ_H con respecto a ρ_1 y se le resta 1. Se hace lo mismo para el medio ρ_V' (Fig. III.2.5a) quedando

$$\frac{\rho_H}{\rho_1} - 1 \quad (\text{III.2.6})$$

$$\frac{\rho_V'}{\rho_1} - 1 \quad (\text{III.2.7})$$

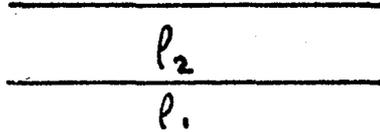


Fig. III.2.4a. MODELO DE UNA TIERRA DE DOS CAPAS HORIZONTALES CON RESISTIVIDADES - ρ_1 y ρ_2 RESPECTIVAMENTE (ρ_H)

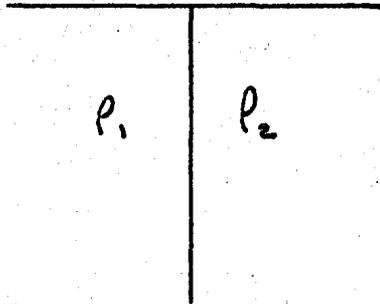


Fig. III.2.4b. MODELO DE UN CONTACTO VERTICAL DE ESPESOR INFINITO (ρ_V)

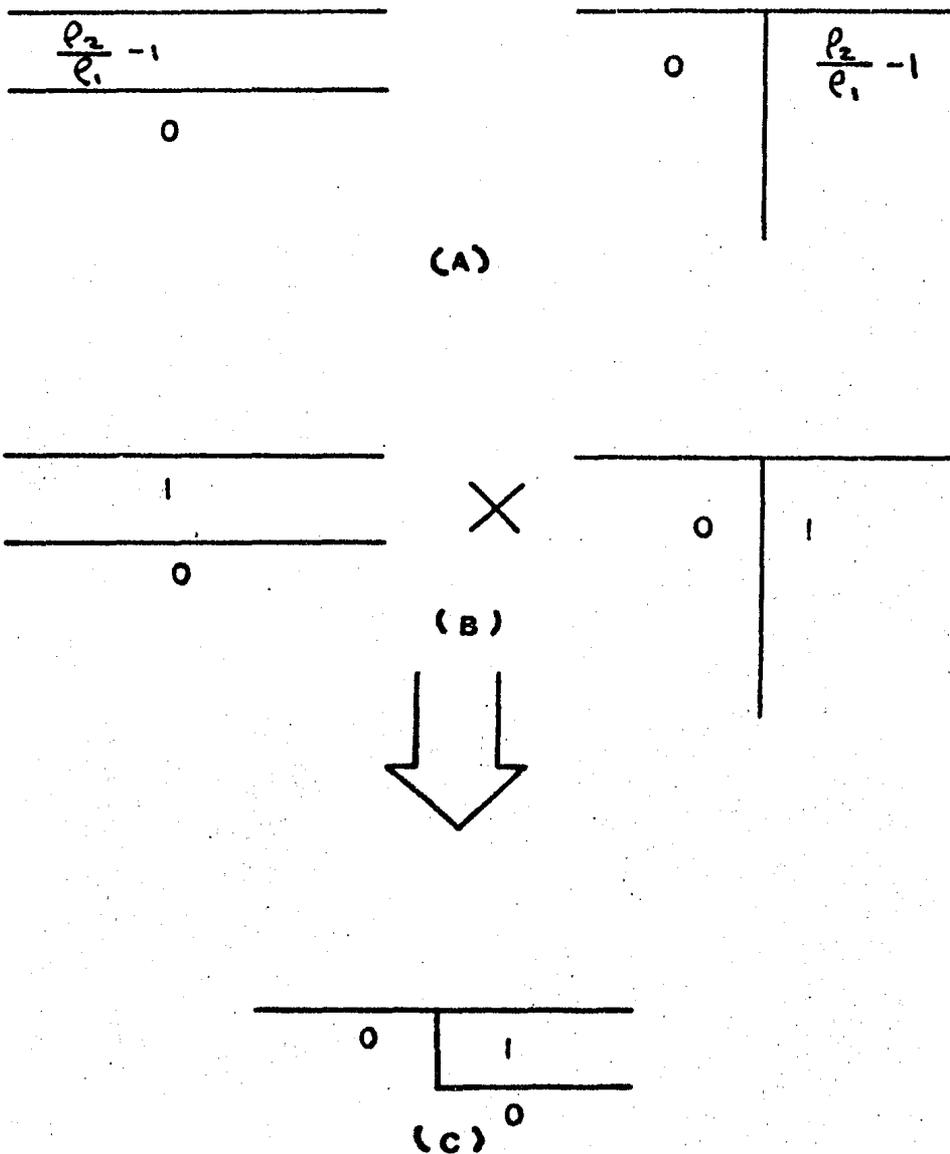


Fig. III.2.5. SECUENCIA PARA LA FORMACION DEL MEDIO ρ_v EN BASE AL METODO DE DESCOMPOSICION. a) SE NORMALIZA CON RESPECTO A ρ_1 Y SE RESTA 1. b) SE MULTIPLICA POR $\rho_1 / (\rho_2 - \rho_1)$ c) SE MULTIPLICAN AMBOS MEDIOS ENTRE SI.

b) Por la regla 1 de Habberjam se multiplican -- III.2.6 y III.2.7 por el factor $(\rho_1 / (\rho_2 - \rho_1))$ respectivamente (Fig. III.2.5b),

$$\left(\frac{\rho_H}{\rho_1} - 1 \right) \left(\frac{\rho_1}{\rho_2 - \rho_1} \right) \quad (\text{III.2.8})$$

$$\left(\frac{\rho_V}{\rho_1} - 1 \right) \left(\frac{\rho_1}{\rho_2 - \rho_1} \right) \quad (\text{III.2.9})$$

c) Por la regla 2, se multiplica III.2.8 y III.2.9 (Fig. III.2.5c).

$$\left[\left(\frac{\rho_H - 1}{\rho_2 - \rho_1} \right) \left(\frac{\rho_V - \rho_1}{\rho_2 - \rho_1} \right) \right] \quad (\text{III.2.10})$$

d) Finalmente, se invierte el proceso quedando -- (Fig. III.2.6).

$$\rho_V = \left[\frac{(\rho'_H - \rho_1)(\rho'_V - \rho_1)}{\rho_1(\rho_2 - \rho_1)} + 1 \right] \rho_1 \quad (\text{III.2.11})$$

De esta forma la ec. III.2.11 representa el modelo vertical que puede ser sustituido en la ec. III.2.4, obteniendo

$$\rho_H = \frac{\rho_C}{\frac{(\rho'_H - \rho_1)(\rho'_V - \rho_1)}{\rho_1(\rho_2 - \rho_1)} + 1} \quad (\text{III.2.12})$$

Así, la expresión III.2.12 representa el medio horizontal de la Fig. III.2.2b, para cuando el dispositivo se encuentra sobre la región 1 y el cual puede ser obtenido a partir de la curva de campo obtenida del medio que conten

ga un contacto lateral (Fig. III.2.2a) después de haber -
realizado la corrección.

Un caso particular de corrección, cuando se trabaja con -
un medio que contenga un contacto lateral y sustrato cero,
es aplicar la corrección por medio de la ecuación III.2.5,
tomando el medio vertical simplemente como un medio con -
un contacto vertical de espesor infinito como se muestra-
en la Fig. III.2.2c. Esto simplifica bastante los cálcu-
los y se obtienen buenos resultados.

La ecuación quedaría como

$$P_H = \frac{P_i P_{obs}}{P_V} \quad (\text{III. 2.13})$$

III.3. COMPARACION ENTRE LOS DIFERENTES METODOS DE CORRECCION DEL TRASLAPE EN PRESENCIA DE UN- CONTACTO LATERAL.

Con objeto de hacer una comparación entre las diferentes-
técnicas mencionadas anteriormente para corregir el trasla-
pe, se presentan diferentes ejemplos, los cuales son co-
rregidos aplicando algunas de estas técnicas. En estas -
curvas se contemplan los diferentes aspectos que afectan-
a un traslape como son: Aberturas de eléctrodos de poten-
cial mayores a $AB/5$ y efectos producidos por contactos la-
terales. Además, algunas curvas presentan dos traslapes,
uno de ellos en distancias electródicas cortas, para que-

$$\begin{array}{|c|} \hline 0 \\ \hline \frac{\rho_2 - \rho_1}{\rho_1} \\ \hline 0 \end{array}$$

(a)

$$\begin{array}{|c|} \hline 1 \\ \hline \frac{\rho_2}{\rho_1} \\ \hline 1 \end{array}$$

(b)

$$\begin{array}{|c|} \hline \rho_1 \\ \hline \rho_2 \\ \hline \rho_1 \end{array}$$

(c)

Fig. III.2.6. SE INVIERTE EL PROCESO DE LA Fig. III.2.5
 a) SE MULTIPLICA POR $(\frac{\rho_2 - \rho_1}{\rho_1})$ b) SU SUMA
 1. c) SE MULTIPLICA POR ρ_1 .

se puede observar claramente el efecto del contacto lateral.

En la Tabla III.2.1, se ilustran los casos que se discutirán con las diferentes técnicas:

a) Discusión Tipo 1.

En la Fig. III.3.1, se muestra la curva de resistividad-observada, obtenida del modelo geoelectrico mostrado. En la Fig. III.3.2, se observa la curva corregida por promediación. En este caso, los comentarios hechos para la curva mencionada serán extensibles para la curva continuada, debido a que su corrección es muy parecida y por lo tanto incurren en el mismo tipo de errores. En la Fig. III.3.3, se muestra la curva corregida por el método que sugiere Orellana. En la Fig. III.3.4, se encuentra la curva corregida aplicando la técnica de Mundry. Así mismo, la Fig. III.3.5, muestra la curva obtenida a partir de la aplicación de la fórmula de descomposición-propuesta en la sección anterior.

En la Tabla III.3.2, se muestran los valores de resistividad ya corregidos por la fórmula de descomposición y los valores de resistividad obtenidos de una tierra de dos capas horizontales sin contacto lateral, pero con el mismo traslape.

Se puede observar que las curvas corregidas por el método de promediación y el de Orellana acusan de manera muy

TABLA III.3.1

TIPO 1	
Relación Electródica	$\overline{AB} < 5\overline{MN}$
No. de Traslapes	2, en 7 m. y 69 m.
Modelo Geoeléctrico	$\rho_1 = 60 \Omega \cdot m$
	$\rho_2 = 40 \Omega \cdot m$
	$\rho_3 = 0 \Omega \cdot m$
	$E = 40 \text{ m.}$
TIPO 2	
Relación Electródica	$\overline{AB} < 5\overline{MN}$
No. de Traslapes	2, en 7 m. y 69 m.
Modelo Geoeléctrico	$\rho_1 = 40 \Omega \cdot m$
	$\rho_2 = 60 \Omega \cdot m$
	$\rho_3 = 0 \Omega \cdot m$
	$E = 40 \text{ m.}$
TIPO 3	
Relación Electródica	$\overline{AB} \geq 5\overline{MN}$
No. de Traslapes	1, en 69 m.
Modelo Geoeléctrico	$\rho_1 = 60 \Omega \cdot m$
	$\rho_2 = 40 \Omega \cdot m$
	$\rho_3 = 0 \Omega \cdot m$
	$E = 40 \text{ m.}$
TIPO 4	
Relación Electródica	$\overline{AB} \geq 5\overline{MN}$
No. de Traslapes	1, en 69 m.
Modelo Geoeléctrico	$\rho_1 = 40 \Omega \cdot m$
	$\rho_2 = 60 \Omega \cdot m$
	$\rho_3 = 0 \Omega \cdot m$
	$E = 40 \text{ m.}$

TABLA III.3.2

ESPECIFICACIONES DEL MEDIO

RHD1= 60. RHD3= 0.00E+00 ESPESOR= 40.

CURVA DE RESISTIVIDADES APARENTE SCHLUMBERGER

I	DISTANCIA ELECTRONICA	RESISTIVIDAD TEORICA	RESISTIVIDAD CORREGIDA
1	2.0000	59.9983	59.9979
2	3.0000	59.9943	59.9933
3	4.0000	59.9865	59.9847
4	5.0000	59.9738	59.9708
5	6.0000	59.9548	59.9502
6	7.0000	59.9284	59.9220
7	7.0000	59.9375	59.9254
8	8.0000	59.9039	59.8880
9	8.0000	59.8936	59.5761
10	9.0000	59.8606	59.8392
11	19.0000	58.6980	58.5594
12	29.0000	55.8178	55.4477
13	39.0000	51.1861	50.5173
14	49.0000	45.2776	44.3230
15	59.0000	38.7675	37.6079
16	69.0000	32.2768	31.0216
17	69.0000	36.3358	34.8504
18	79.0000	29.8374	28.0116
19	79.0000	26.2496	25.0010
20	89.0000	23.9726	22.6735
21	99.0000	18.9163	17.5373

COMPARACION ENTRE LOS RESULTADOS OBTENIDOS POR EL METODO DE DESCOM
 POSICION (RESISTIVIDAD CORREGIDA) PARA CORREGIR UN TRASLAPE, Y LOS
 RESULTADOS OBTENIDOS DE UNA TIERRA DE DOS CAPAS HORIZONIALES CON -
 EL MISMO TRASLAPE. (RESISTIVIDAD TEORICA).

marcada una distorsión debida al primer traslape, y esto se debe a que el "salto" en esta ocasión es debido únicamente al efecto del contacto, lo cual no puede ser corregido por ninguna de estas técnicas. Además, la curva corregida por Orellana aumenta las resistividades de la parte izquierda de la curva hasta en 19 m. En la curva promediada, la parte final difiere bastante de la curva teórica.

La curva corregida por Mundry no falsea las resistividades; sin embargo, no puede corregir el primer traslape debido a que su corrección propuesta para el efecto lateral solo es aplicable cuando la distancia AB es mucho mayor que el espesor del contacto. Por otra parte, el lado derecho de la curva aunque difiere un poco de la teórica, conserva su tendencia. La diferencia se debe principalmente al corrimiento horizontal hacia la izquierda, realizado para eliminar el efecto del contacto.

La curva corregida por la fórmula de descomposición muestra una curva "limpia" totalmente del efecto lateral, -- por lo que desaparece totalmente el primer traslape. -- Sin embargo, en la parte final de la curva se observa un pequeño "salto", que se debe a efecto de finites de electrodos y se puede corregir por Mundry, Koefoed o Rijo. -- Este último autor, propone interpretar la curva manteniendo los traslapes.

b) Discusión Tipo 2.

En esta ocasión la curva promediada (Fig. III.3.7) se -

muestra totalmente distorsionada, se inventan capas ficticias y en general la curva se aleja bastante del modelo real.

La curva de Orellana (Fig. III.3.8) sigue en general la tendencia de la curva aunque en la parte final decrece -- mas rápidamente. El problema radica en que al falsear -- las resistividades el medio que se observa no es el requerido, sino que se observa el medio de la región dos del -- contacto, cuando en realidad el sondeo es realizado en la región de resistividad.

Otra posibilidad de aplicar esta técnica sería dejar fija la primera parte de la curva y bajar las demás. Esto -- acercaría más la curva corregida a la teórica. El único -- problema sería saber escoger la sección de la curva que -- se debe de dejar fija.

La curva corregida por Mundry (Fig. III.3.9) es afectada -- por el primer traslape, lo que provoca que aunque la co -- rrección del segundo traslape esté bien realizada, la cur -- va se encuentra desplazada. No obstante, la tendencia de la curva es correcta, aunque las resistividades aumentan.

La curva corregida por la fórmula de descomposición (Fig. III.3.10) elimina nuevamente el efecto del contacto, de -- jando únicamente el efecto de finites de los electrodos.

c) Discusión Tipo 3.

La curva observada (Fig. III.3.11) en esta ocasión muestra distorsión en la parte izquierda debido al contacto y en la parte derecha, se observa el "salto" que ahora es más pequeño debido a que los electrodos cumplen con las condiciones del dispositivo Schlumberger.

La curva corregida por promediación (Fig. III.3.12) muestra bastante aproximación en la parte final a la curva teórica debido a que el "salto" del traslape es pequeño, pero por lo que respecta a la distorsión de la parte derecha debido al contacto, la promediación no la considera.

Las curvas corregidas aplicando las técnicas de Orellana (Fig. III.3.13) y Mundry (Fig. III.3.14) se aproximan todavía más a la curva teórica, aunque tampoco pueden corregir la distorsión de la parte izquierda de la curva. Nuevamente la técnica de Orellana desplaza las resistividades de la primera parte de la curva.

La curva corregida por la fórmula de descomposición (Fig. III.3.15) se muestra idéntica a la curva teórica. En esta ocasión no se observa el traslape debido a que el efecto de finites es despreciable. La distorsión de la parte izquierda de la curva que en todos los casos anteriores no pudo ser corregida, en esta ocasión es eliminada por completo.

d) Discusión Tipo 4.

En la curva de campo (Fig. III.3.16) el traslape se observa mayor que en la de tipo 3 debido al contraste de resistividades.

La curva promediada (Fig. III.3.17) acusa la distorsión - en la parte derecha de la curva, debido a que el "salto" - en esta ocasión es bastante grande.

En la curva corregida (Fig. III.3.18) por Orellana nuevamente se desplazan las resistividades y la parte final de la curva decae mas rápidamente.

La aplicación de la técnica de Mundry (Fig. III.3.19) nuevamente se acerca bastante a la curva teórica, sin embargo en la parte final se distorsiona la curva por el corrimiento horizontal. Esto se debe a que el "salto" se debe casi únicamente al efecto del contacto, lo que provoca -- que Mundry no lo pueda eliminar.

Por otra parte, ninguna de las técnicas anteriores pudo - eliminar el efecto del contacto de la primera parte de la curva. Sin embargo, la curva corregida con la fórmula de descomposición (Fig. III.3.20) se observa totalmente limpia de este efecto y únicamente muestra un pequeño salto - debido a la finites de electrodos.

Fig III.3.1

CURVA OBSERVADA

TIPO 1

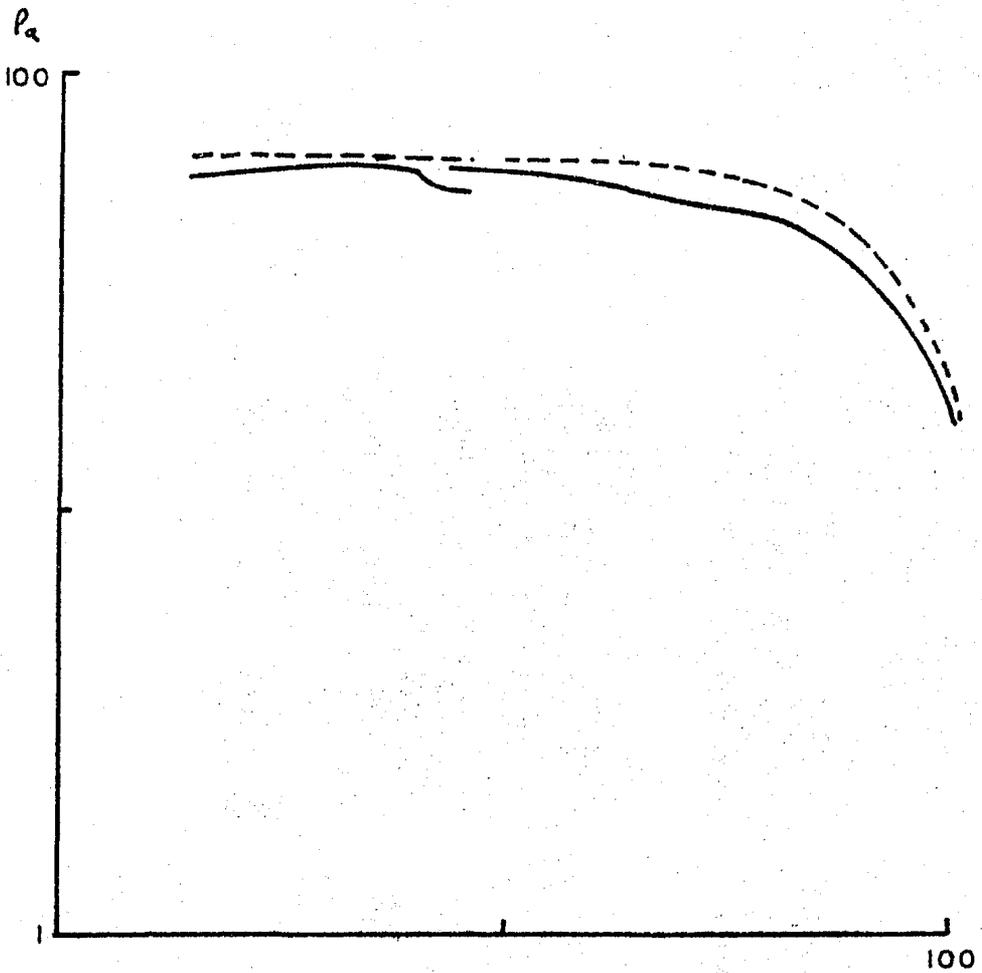


Fig III.3.2

CURVA TIPO 1

METODO DE CORRECCION: PROMEDIACION

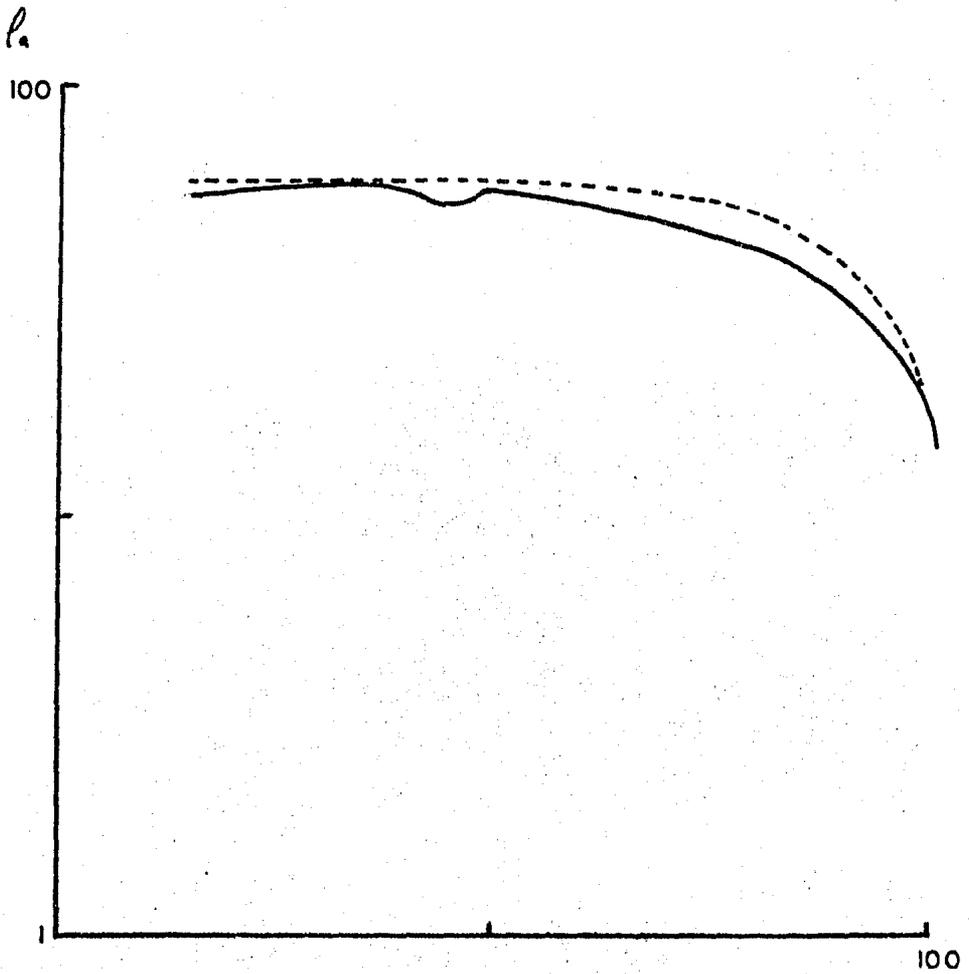


Fig. III.3.3

CURVA TIPO 1

METODO DE CORRECCION: ORELLANA

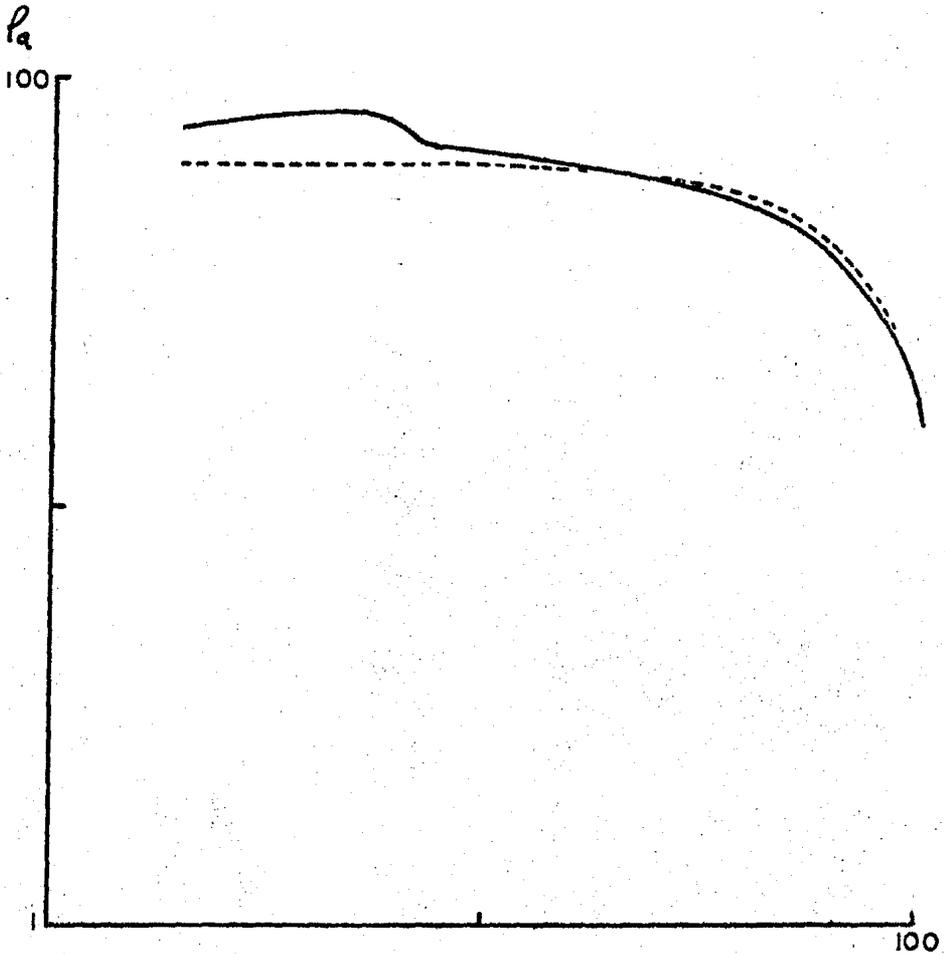


Fig III.3.4

CURVA TIPO 1

METODO DE CORRECCION: MUNDRY

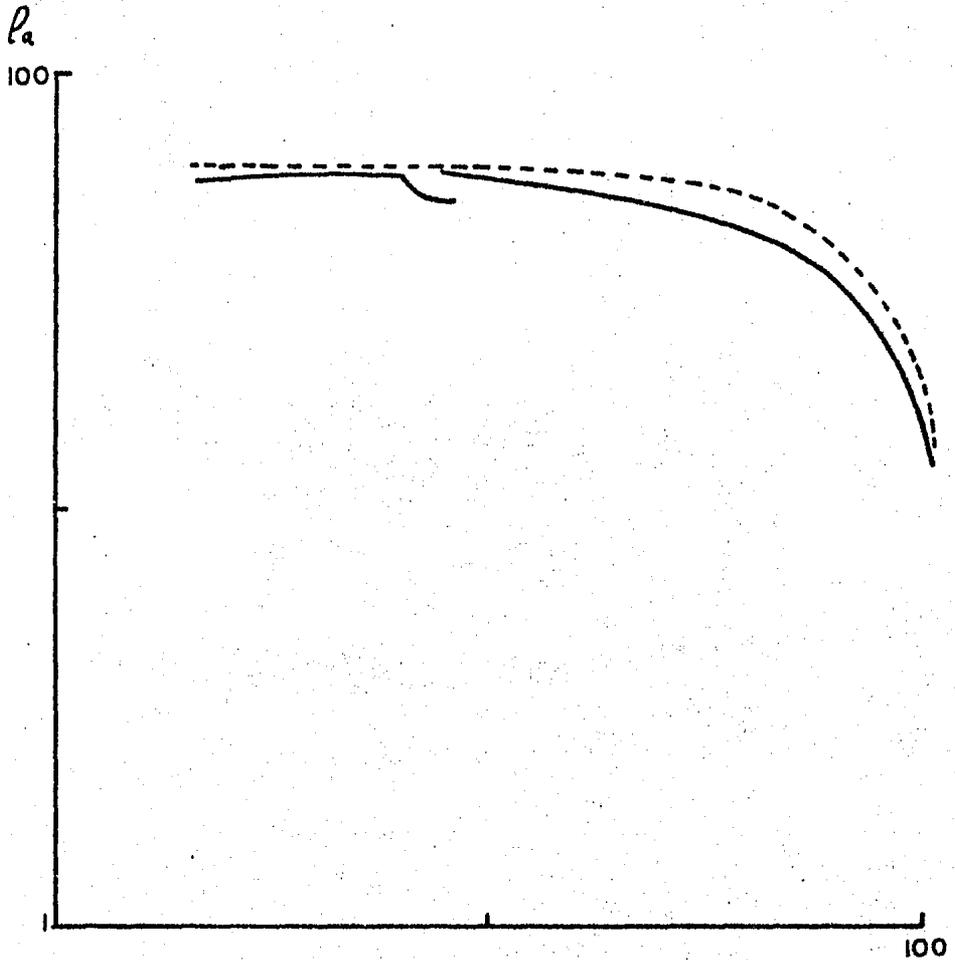


Fig III.3.5

CURVA TIPO 1

METODO DE CORRECCION: DESCOMPOSICION

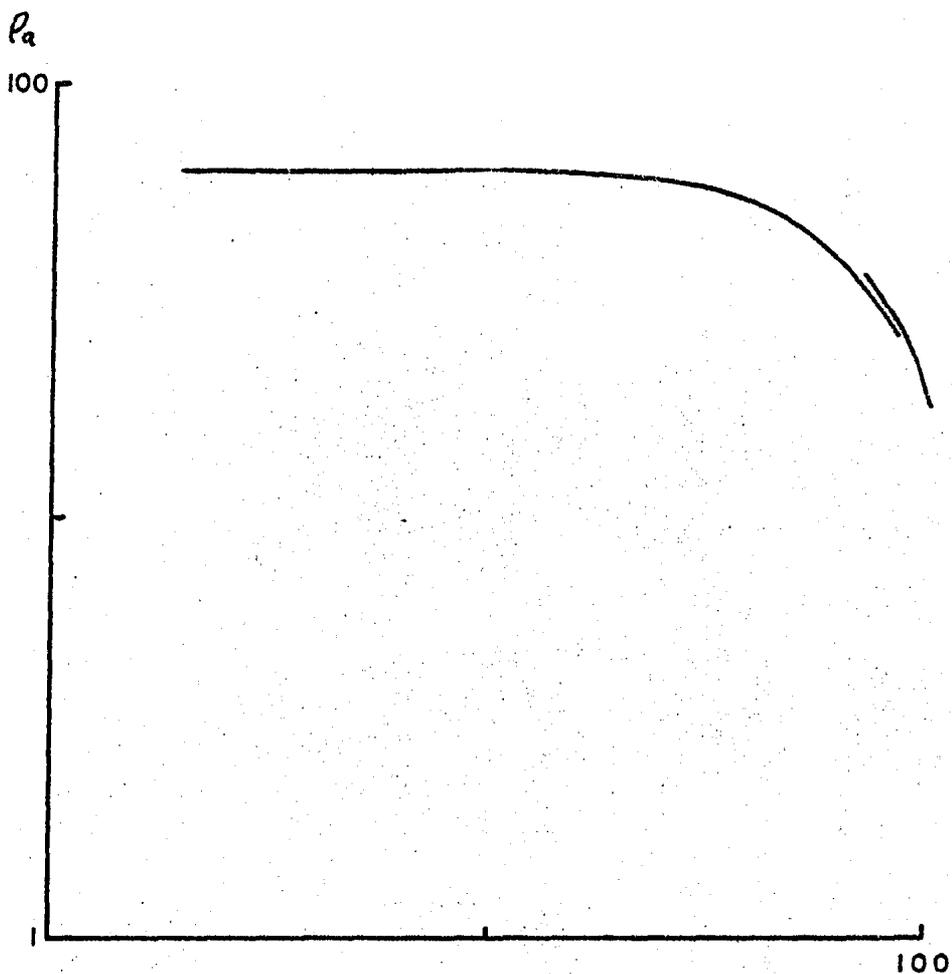


Fig III.3.8

CURVA OBSERVADA

TIPO 2

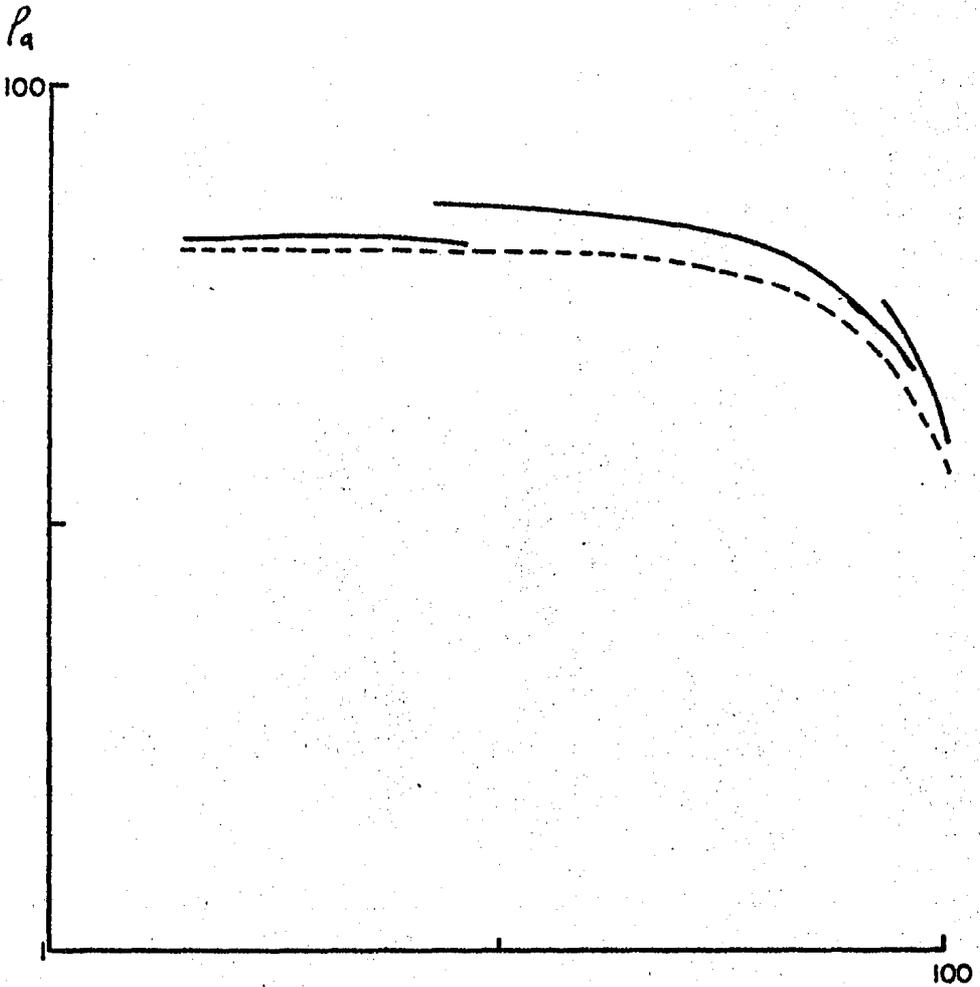


Fig III.3.7

CURVA TIPO 2

METODO DE CORRECCION: PROMEDIACION

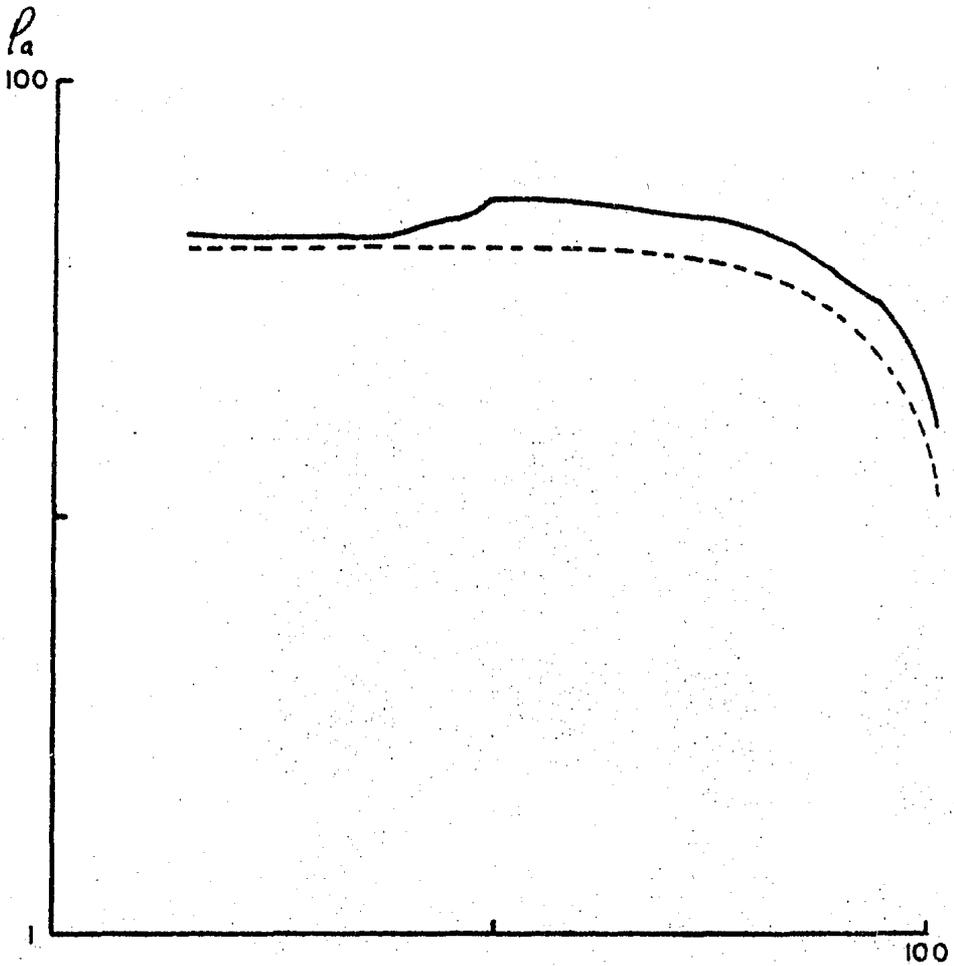


Fig III.3.8

CURVA TIPO 2

METODO DE CORRECCION: ORELLANA

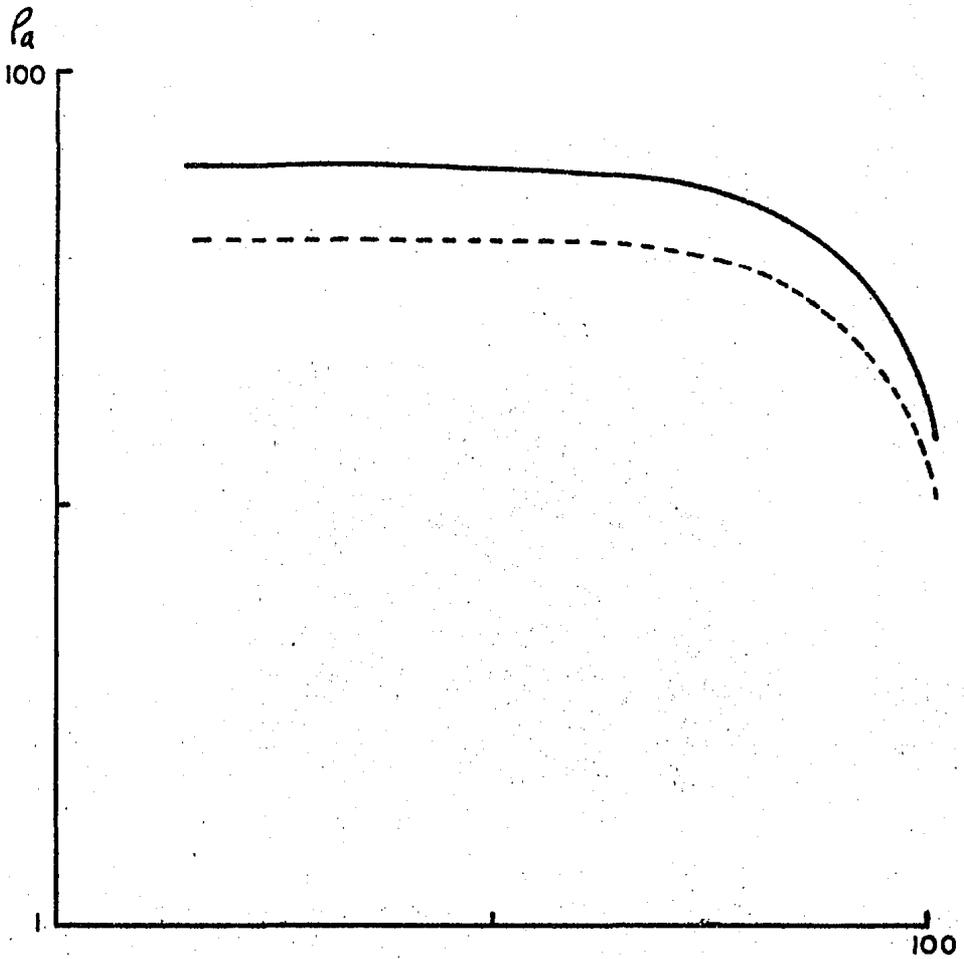


Fig 111.3.9

CURVA TIPO 2

METODO DE CORRECCION: MUNDFRY

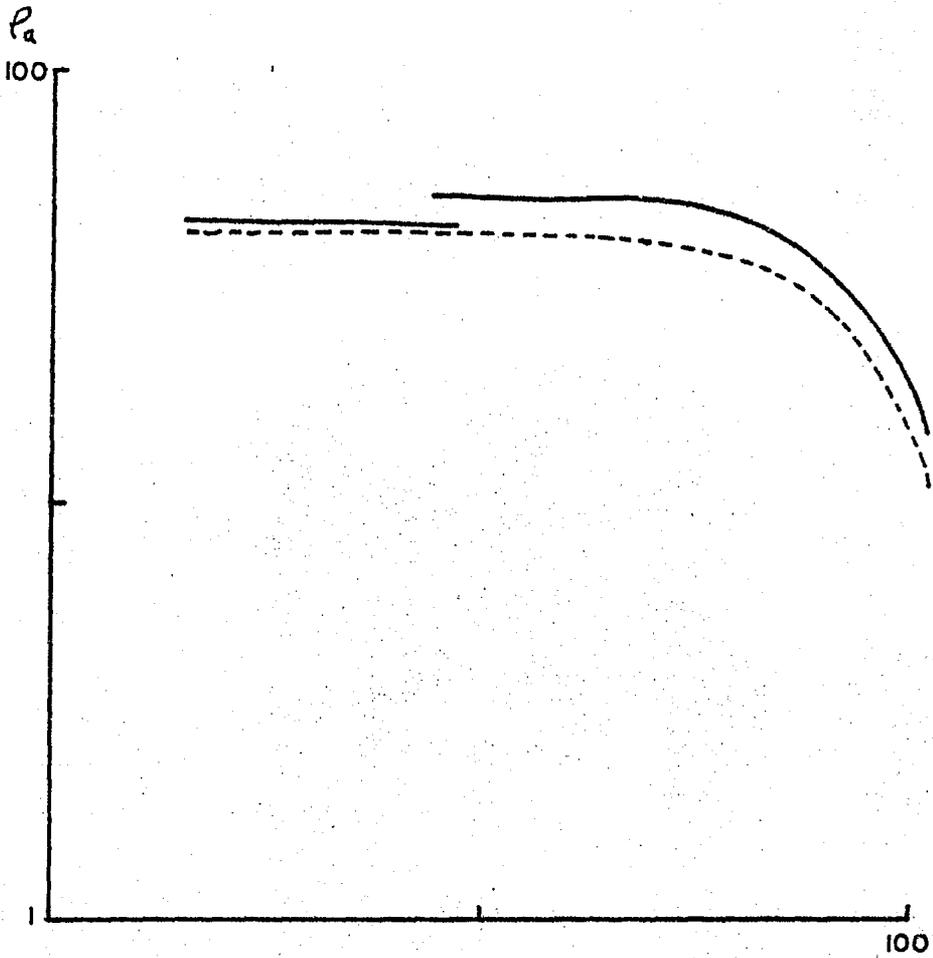


Fig III.3.10

CURVA TIPO 2

METODO DE CORRECCION: DESCOMPOSICION

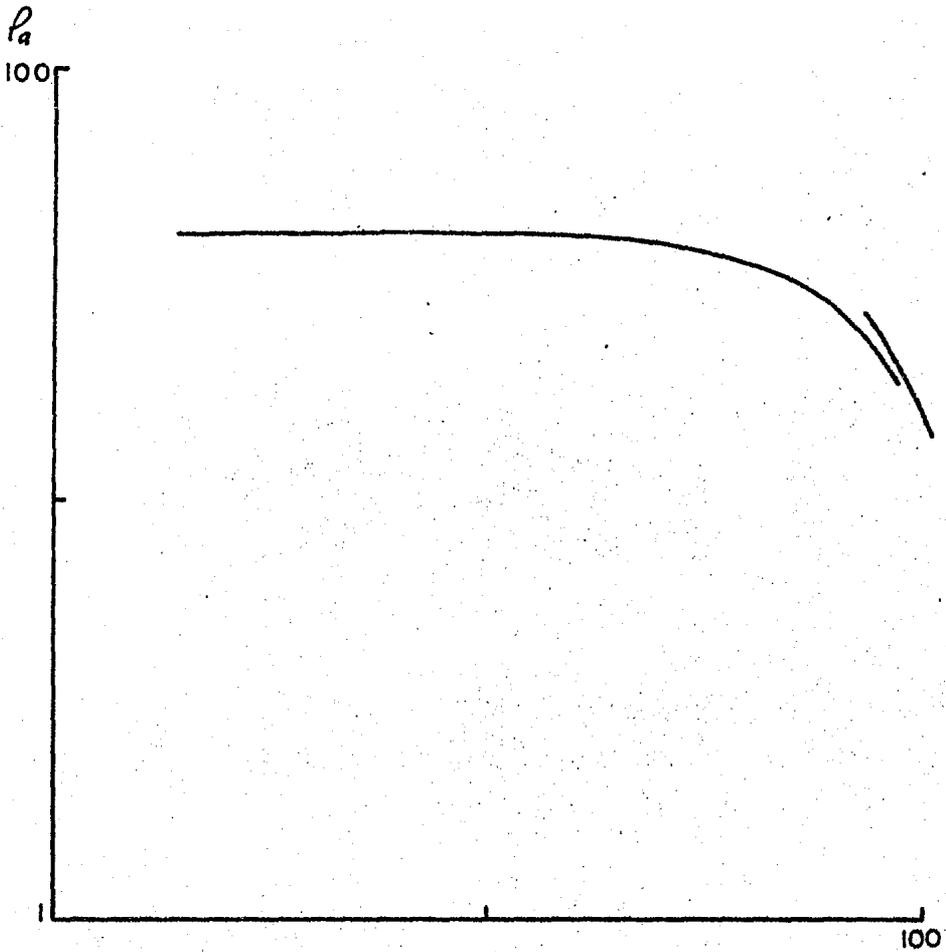


Fig 1(1.3.11)

CURVA OBSERVADA

TIPO 3

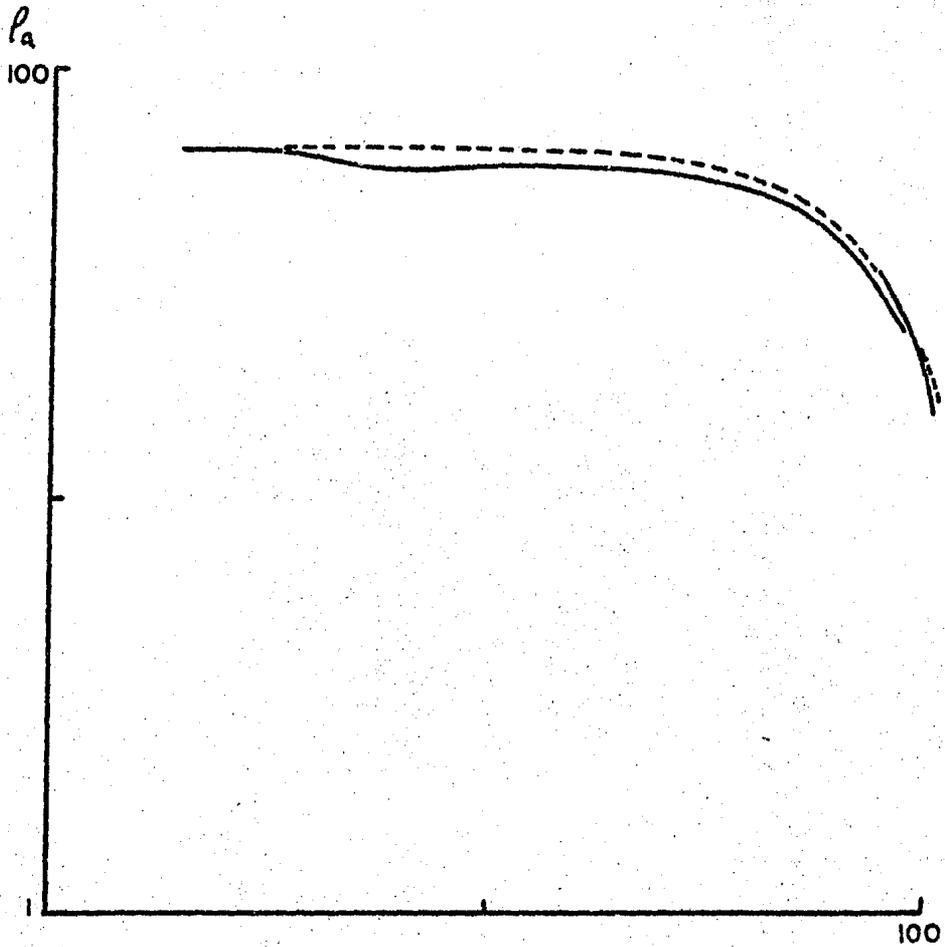


Fig III.3.12

CURVA TIPO 3

METODO DE CORRECCION: PROMEDIACION

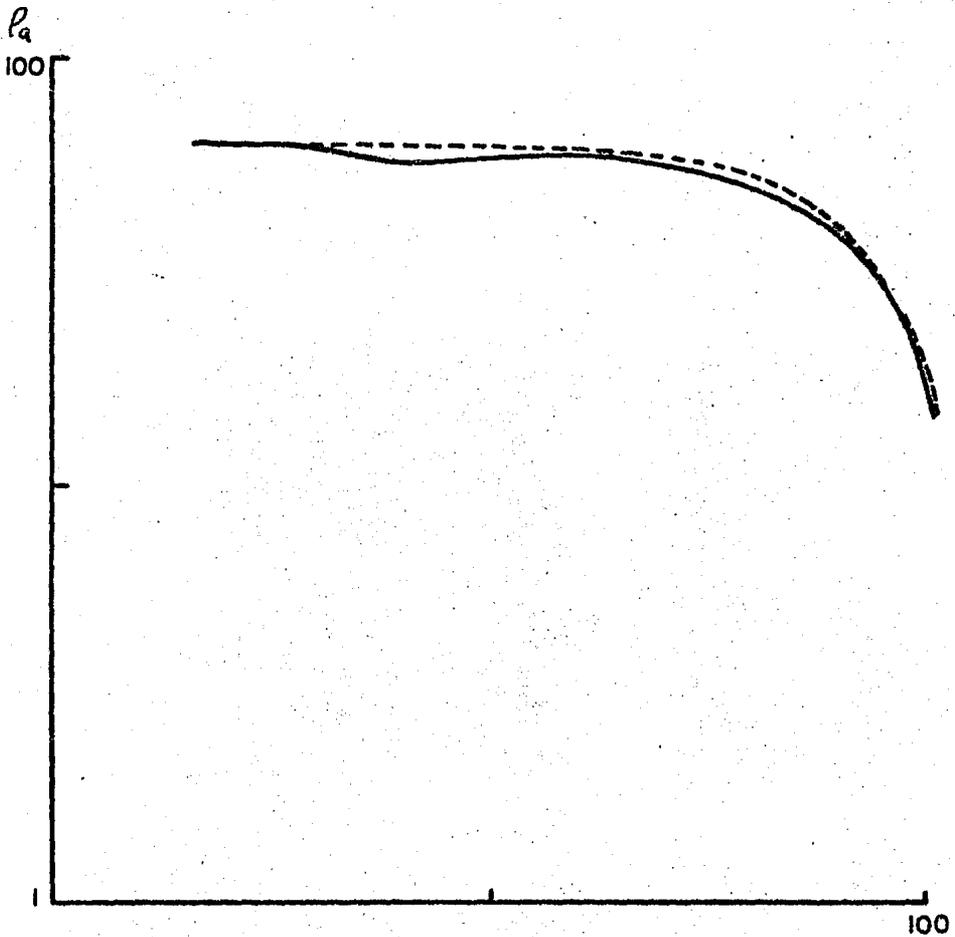


Fig 111.3.13

CURVA TIPO 3

METODO DE CORRECCION: ORELLANA

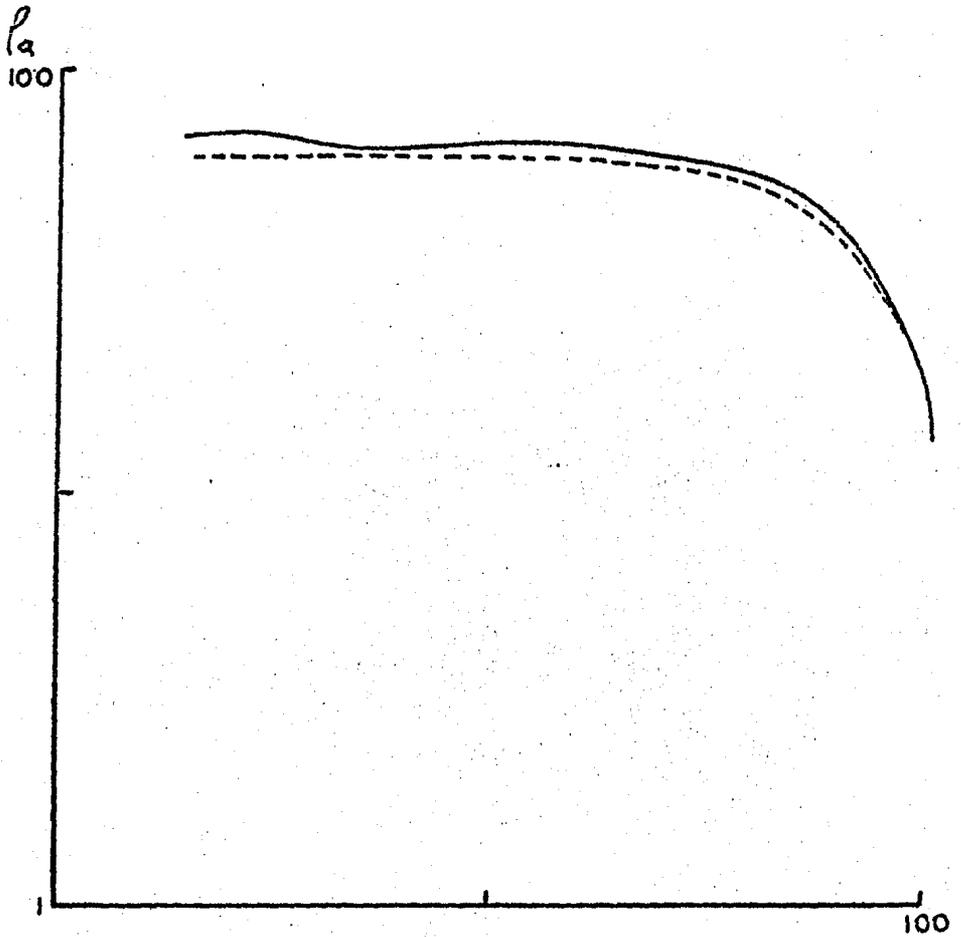


Fig III.3.14

CURVA TIPO 3

METODO DE CORRECCION: MUNDY

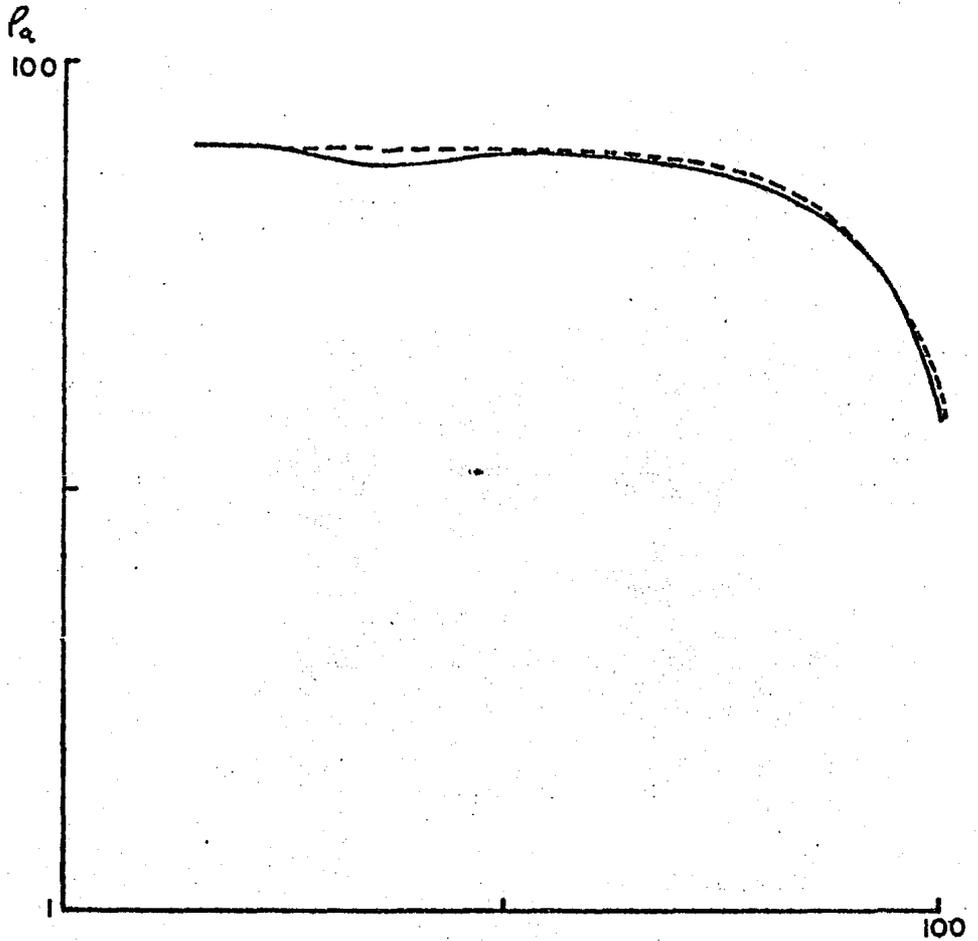


Fig III.3.15

CURVA TIPO 3

METODO DE CORRECCION: DESCOMPOSICION

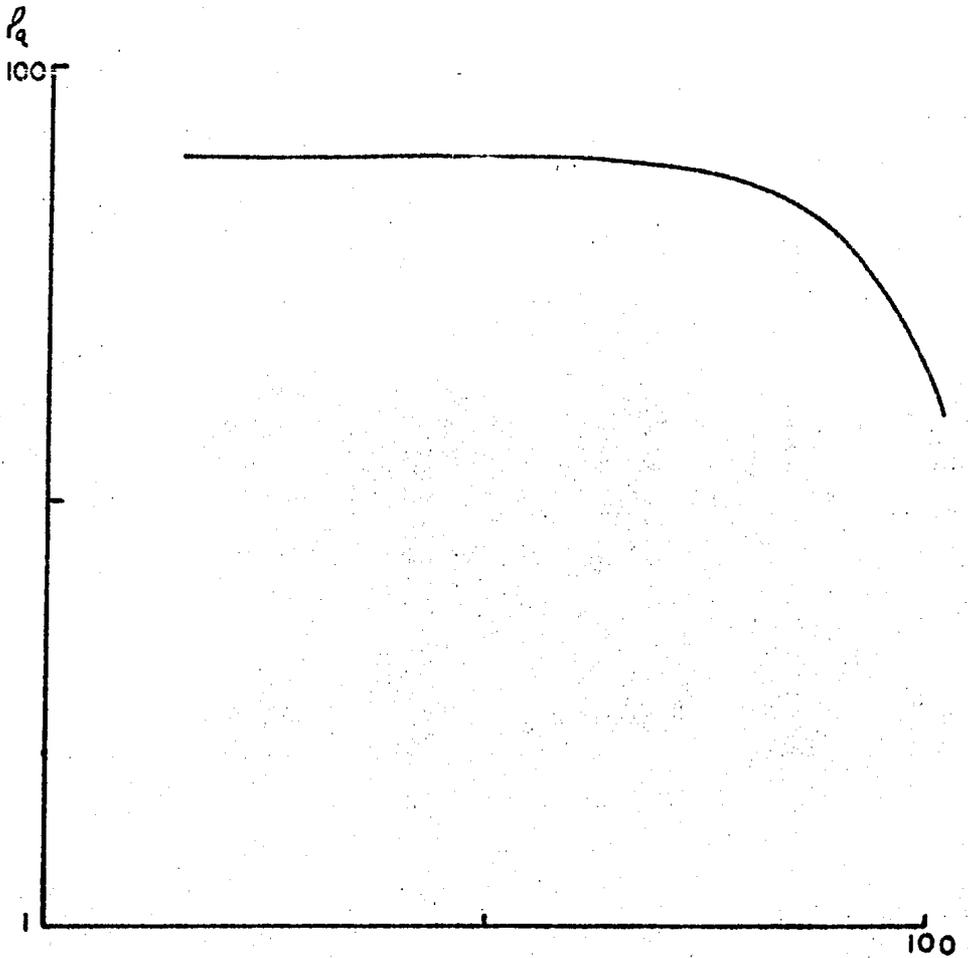


Fig III.3.18

CURVA OBSERVADA

TIPO 4

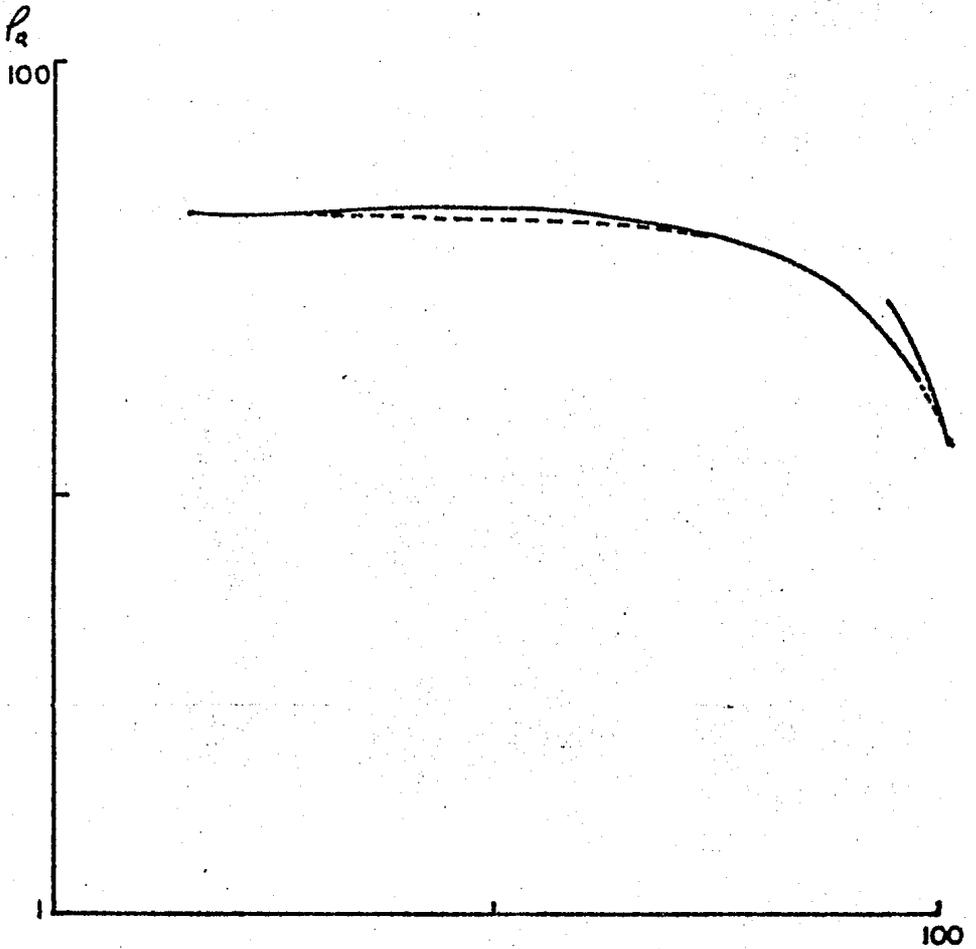


Fig III.3.17

CURVA TIPO 4

METODO DE CORRECCION: PROMEDIACION

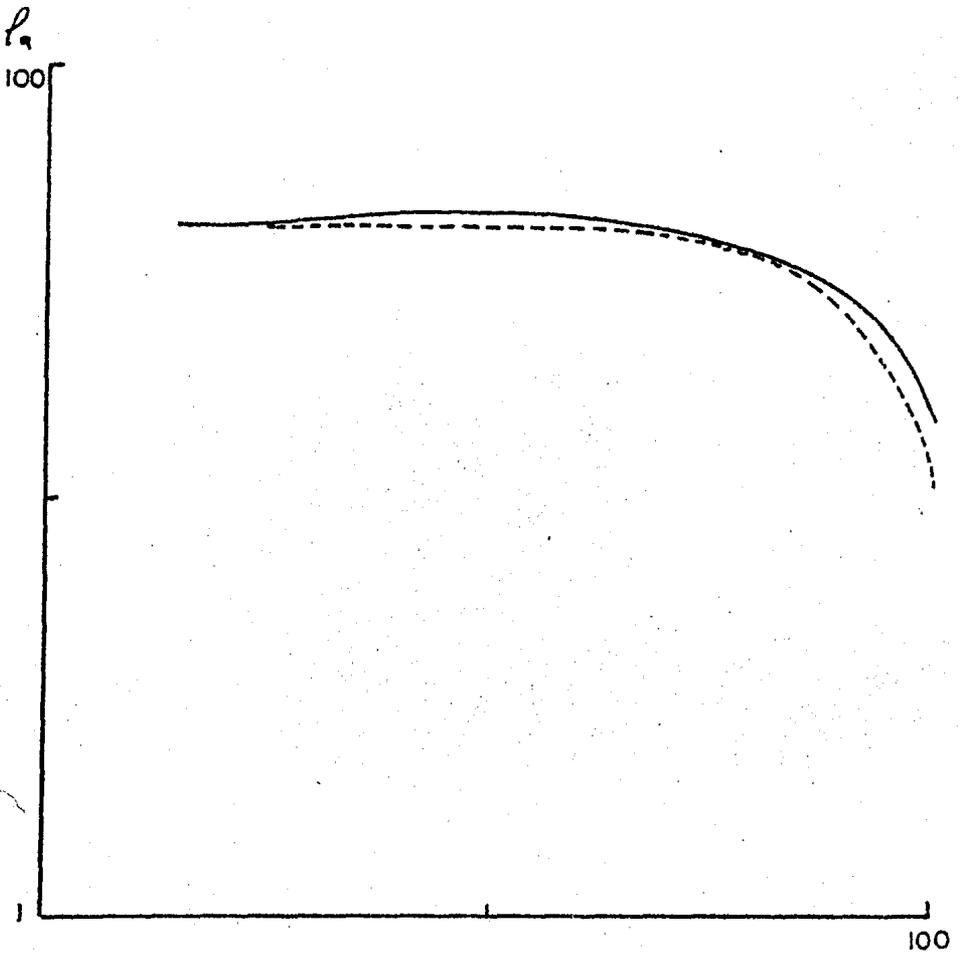


Fig III.3.18
CURVA TIPO 4

METODO DE CORRECCION: ORELLANA

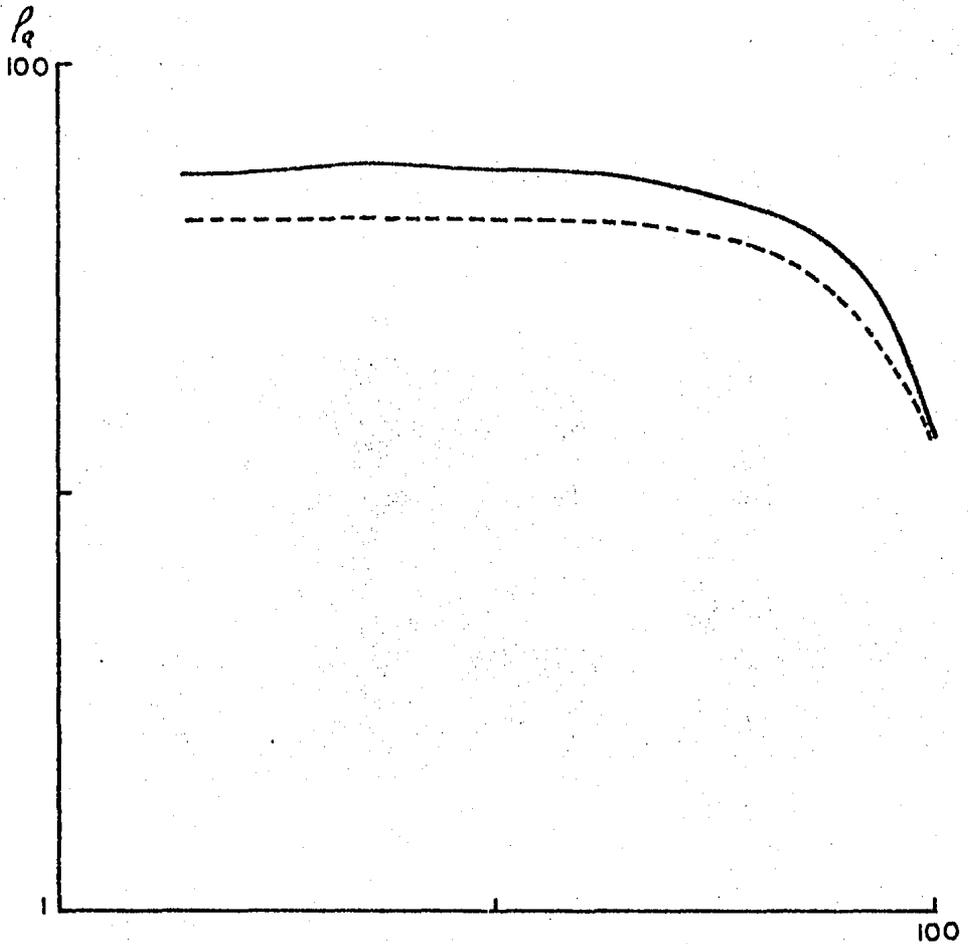


Fig III.3.18

CURVA TIPO 4

METODO DE CORRECCION: MUNDY

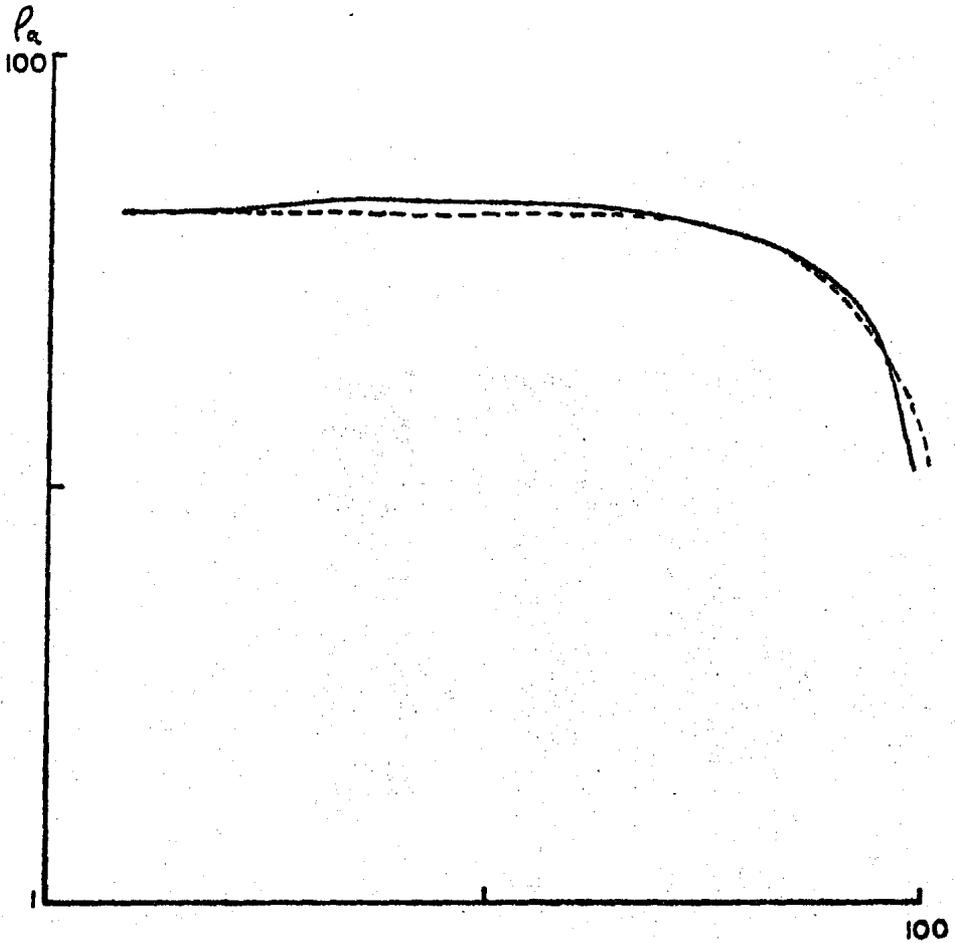
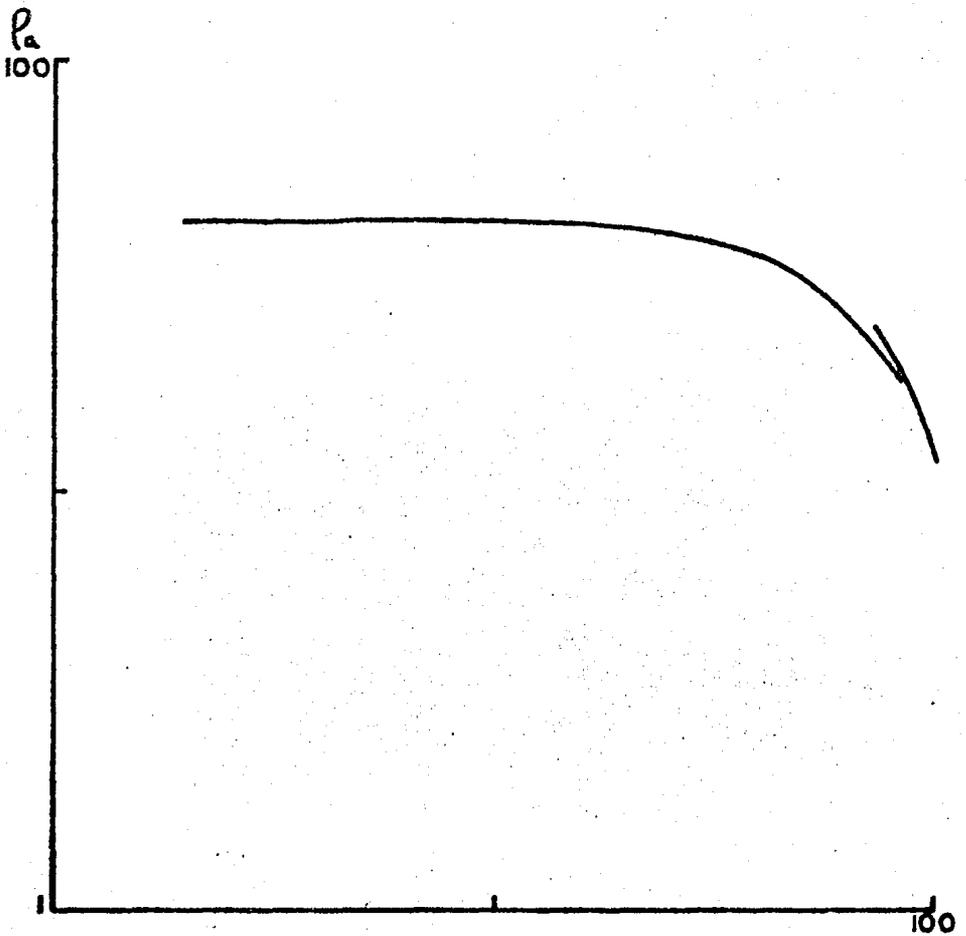


Fig III.3.28

CURVA TIPO 4

METODO DE CORRECCION: DESCOMPOSICION



CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

1) Las curvas corregidas por promediación y continuación definitivamente incurrir en errores muy graves como es inventar capas ficticias ó cambiar los parámetros del corte geoelectrico.

2) La técnica de Orellana puede ser correcta para eliminar el traslape, siempre y cuando se esté consciente de que las resistividades se pueden falsear. Además, si existe efecto de un contacto lateral, este solo se elimina cuando es muy pequeño.

3) El método propuesto por Mundry es muy sencillo de aplicar y se obtienen buenos resultados. Esta técnica funciona cuando el "salto" se debe a finites de electrodos únicamente y cuando el contacto lateral es de dimensiones despreciables.

4) El método de descomposición elimina totalmente el efecto del contacto lateral en la curva de resistividades, dejando únicamente el efecto debido a finites de electrodos. Por esta razón, puede ser combinado con el método de Mundry (1980), Koefoed (1979) o Rijo (1980) para sobrellevar dicho problema.

5) Si se combina el método de descomposición con algún otro método que elimine el efecto de finites de electrodos, se recomienda que se corrija primero el efec-

to del contacto y posteriormente el de finites, debido a que el efecto del contacto puede distorsionar la pendiente de la curva, lo que acarrearía que la corrección por finites estuviera incorrecta.

6) El problema para modelar los medios que formen la fórmula de descomposición, puede ser resuelto obteniendo los medios a partir del conocimiento Geológico -- que se tenga de la zona o utilizando la información dada en las pseudosecciones (perfil de iso-resistividades) las cuales reflejan en cierta manera la estructura del subsuelo.

7) El método de descomposición no es exclusivo de curvas tipo Schlumberger, también puede ser utilizado para tipo Wenner o cualquier otro dispositivo electródico.

8) El método de descomposición puede trabajar -- con cualquier tipo de resistividades. En este caso, se usó un sustrato cero debido a restricciones del programa. Sin embargo, es conveniente aclarar que el método es más exacto entre menos descomposiciones se hagan.

APENDICE A

PROGRAMA CONTACTOS

PROGRAMADO POR:

SERGIO E. RODRIGUEZ HERRERA

Y

ANDRES TEJERO ANDRADE

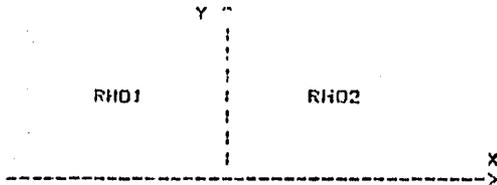
UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA
DE MEXICO

FACULTAD DE INGENIERIA

1985

C CALCULO DE LA RESISTIVIDAD APARENTE PARA UN CONTACTO
C VERTICAL UTILIZANDO UN DISPOSITIVO TETRAELECTRODICO
C CUALQUIERA SE CONSIDERA EL EJE "Y" SOBRE EL CONTACTO
C VERTICAL Y EL EJE "X" PERPENDICULAR AL CONTACTO.

C
C
C
C
C
C
C
C
C
C
C



```

C
C  NOTA: Las coordenadas de las fuentes imagenes no hay ne-
C      cesidad de teclearlas.
C
C  IIFLAG=1 CURVA DE RESISTIVIDADES APARENTE TIPO SCHLUMBERGER
C  IIFLAG=2 CURVA DE RESISTIVIDADES APARENTE TIPO WENNER
C  IIFLAG=3 CURVA DE RESISTIVIDADES APARENTE TIPO DIPOLAR RADIAL
C  IIFLAG=4 CURVA DE RESISTIVIDADES APARENTE TIPO DIPOLAR AZIMUTAL
C
C
C
C  234567
      DIMENSION  XA(50),YA(50),XB(50),YB(50),XM(50),YM(50),
*             XN(50),YN(50),RHOAP(50)
      REAL*8  RAM(50),RAN(50),RBM(50),RBN(50),RAIM(50),
*             RAIN(50),RBIM(50),RBIN(50)
      REAL*8  UAN(50),UAM(50),UBN(50),UEM(50)
      REAL*8  UAIN(50),UAIM(50),UBIN(50),UEIM(50)
      REAL*8  ZHANKS,TKERNEL,FACGED(50)
      CHARACTER NAME(4)*50
      DATA
1  NAME(1)/'CURVA DE RESISTIVIDADES APARENTE SCHLUMBERGER'/,
2  NAME(2)/'CURVA DE RESISTIVIDADES APARENTE WENNER'/,
3  NAME(3)/'CURVA DE RESISTIVIDADES APARENTE DIPOLAR RADIAL'/,
4  NAME(4)/'CURVA DE RESISTIVIDADES APARENTE DIPOLAR AZIMUTAL'/
      COMMON/TKERNEL/RHO1,RHO2,RHO3,IIFLAG,ESPESOR
      EXTERNAL TKERNEL
C
C  @@@@@@@@ LECTURA DE DATOS DE ENTRADA @@@@@@@@@@@@@@@@@@
C
      READ(5,*) NPUNTOS,IIFLAG
      READ(5,*) (XA(I),YA(I),I=1, NPUNTOS)
      READ(5,*) (XB(I),YB(I),I=1, NPUNTOS)
      READ(5,*) (XM(I),YM(I),I=1, NPUNTOS)
      READ(5,*) (XN(I),YN(I),I=1, NPUNTOS)
      READ(5,*) RHO1,RHO2,RHO3,ESPESOR
C
C  @@@@@@@@@@ CALCULO DE RADIOS Y FACTOR ODMETRICO @@@@@@@@@@@@@@@@@@
C
      DO I=1, NPUNTOS
          XAI=-XA(I)
          XBI=-XB(I)
          RAM(I)=DSQRT(DBLE((XM(I)-XA(I))**2)+DBLE((YM(I)-YA(I))**2))
          RAN(I)=DSQRT(DBLE((XN(I)-XA(I))**2)+DBLE((YN(I)-YA(I))**2))
          RBM(I)=DSQRT(DBLE((XM(I)-XB(I))**2)+DBLE((YM(I)-YB(I))**2))
          RBN(I)=DSQRT(DBLE((XN(I)-XB(I))**2)+DBLE((YN(I)-YB(I))**2))
          RAIM(I)=DSQRT(DBLE((XM(I)-XAI)**2)+DBLE((YM(I)-YA(I))**2))
          RBIM(I)=DSQRT(DBLE((XM(I)-XBI)**2)+DBLE((YM(I)-YB(I))**2))
          RAIN(I)=DSQRT(DBLE((XN(I)-XAI)**2)+DBLE((YN(I)-YA(I))**2))
          RBIN(I)=DSQRT(DBLE((XN(I)-XBI)**2)+DBLE((YN(I)-YB(I))**2))
          FACGED(I)=1/RAN(I)-1/RBM(I)-1/RAIN(I)+1/RBN(I)
          FACGED(I)=1/FACGED(I)
      ENDDO
C

```

```

C @@@@@@@@@@@@@@ CALCULO DEL POTENCIAL @@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@
C
C-CALCULA POTENCIAL DE 'A' EN CADA PUNTO DE OBSERVACION
C
      DO I=1,NPUNTOS
C-----EL ELECTRODO A ESTA EN LA REGION 1
      IF(XA(I) .LE. 0.0)THEN
        IFLAG=1
        REFLA=(RHO2-RHO1)/(RHO2+RHO1)
        TRASA=2.*RHO2/(RHO2+RHO1)
        UAN(I)=RHO1/RAN(I) + ZHANKS(0,RAN(I),TKERNEL,0.0,NEW)
        UAM(I)=RHO1/RAH(I) + ZHANKS(0,RAH(I),TKERNEL,0.0,NEW)
C-----COMPRUEBA PARA EL ELECTRODO M
        IF(XM(I) .LE. 0.0)THEN
          UAIM(I)=REFLA*(RHO1/RAIM(I)+
1             ZHANKS(0,RAIM(I),TKERNEL,0.0,NEW))
          ELSE IF(XM(I) .GT. 0)THEN
            UAIM(I)=TRASA*UAM(I)
            UAM(I) =0.0
          ENDIF
C-----COMPRUEBA PARA EL ELECTRODO N
        IF(XN(I) .LE. 0.0)THEN
          UAIN(I)=REFLA*(RHO1/RAIN(I)+
1             ZHANKS(0,RAIN(I),TKERNEL,0.0,NEW))
          ELSE IF(XN(I) .GT. 0)THEN
            UAIN(I)=TRASA*UAN(I)
            UAN(I) =0.0
          ENDIF
C-----EL ELECTRODO 'A' ESTA EN LA REGION 2
        ELSE IF(XA(I) .GT. 0.0)THEN
          IFLAG=2
          REFLA=(RHO1-RHO2)/(RHO2+RHO1)
          TRASA=2.*RHO1/(RHO2+RHO1)
          UAN(I)=RHO2/RAN(I) + ZHANKS(0,RAN(I),TKERNEL,0.0,NEW)
          UAM(I)=RHO2/RAH(I) + ZHANKS(0,RAH(I),TKERNEL,0.0,NEW)
C-----COMPRUEBA PARA EL ELECTRODO M
          IF(XM(I) .LE. 0)THEN
            UAIM(I)=TRASA*UAM(I)
            UAM(I) =0.0
          ELSE IF(XM(I) .GT. 0)THEN
            UAIM(I)=REFLA*(RHO2/RAIM(I)+
1             ZHANKS(0,RAIM(I),TKERNEL,0.0,NEW))
          ENDIF
C-----COMPRUEBA PARA EL ELECTRODO N
          IF(XN(I) .LE. 0)THEN
            UAIN(I)=TRASA*UAN(I)
            UAN(I)=0.0
          ELSE IF(XN(I) .GT. 0)THEN
            UAIN(I)=REFLA*(RHO2/RAIN(I)+
1             ZHANKS(0,RAIN(I),TKERNEL,0.0,NEW))
          ENDIF
        ENDIF
      ENDDO
C

```

```

C-ENCUENTRA POTENCIAL DE "B" EN CADA PUNTO DE OBSERVACION
C
      DO I=1,NPUNTOS
C-----EL ELECTRODO "B" ESTA EN LA REGION 1
      IF(XR(I) .LE. 0.0)THEN
        IFLAG=1
        REFLB=(RHO2-RHO1)/(RHO2+RHO1)
        TRASB=2*RHO2/(RHO2+RHO1)
        URH(I)=-(RHO1/RBM(I) + ZHANKS(O,RBM(I),TKERNEL,0.0,NEW))
        URN(I)=-(RHO1/RBN(I) + ZHANKS(O,RBN(I),TKERNEL,0.0,NEW))
C-----COMPRUEBE PARA EL ELECTRODO M
        IF(XM(I) .LE. 0.0 ) THEN
          URM(I)=-REFLB*(RHO1/RBM(I) +
1             ZHANKS(O,RBM(I),TKERNEL,0.0,NEW))
          ELSE IF(XM(I) .GT. 0 ) THEN
            URM(I)=TRASB*URH(I)
            URM(I)=0.0
          ENDIF
C-----COMPRUEBA PARA EL ELECTRODO N
        IF(XN(I) .LE. 0.0)THEN
          URN(I)=-REFLB*(RHO1/RBN(I) +
1             ZHANKS(O,RBN(I),TKERNEL,0.0,NEW))
          ELSE IF(XN(I) .GT. 0)THEN
            URN(I)=TRASB*URN(I)
            URN(I)=0.0
          ENDIF
C-----EL ELECTRODO "B" ESTA EN LA REGION 2
        ELSE IF(XR(I) .GT. 0.0) THEN
          IFLAG=2
          REFLB=(RHO1-RHO2)/(RHO2+RHO1)
          TRASB=2.*RHO1/(RHO2+RHO1)
          URH(I)=-(RHO2/RBM(I) + ZHANKS(O,RBM(I),TKERNEL,0.0,NEW))
          URN(I)=-(RHO2/RBN(I) + ZHANKS(O,RBN(I),TKERNEL,0.0,NEW))
C-----COMPRUEBA PARA EL ELECTRODO M
          IF (XM(I) .LE. 0.0) THEN
            URM(I)=TRASB*URH(I)
            URM(I)=0.0
          ELSE IF(XM(I) .GT. 0.0) THEN
            URM(I)=-REFLB*(RHO2/RBM(I) +
1             ZHANKS(O,RBM(I),TKERNEL,0.0,NEW))
          ENDIF
C-----COMPRUEBA PARA EL ELECTRODO N
          IF(XN(I) .LE. 0.0) THEN
            URN(I)=TRASB*URN(I)
            URN(I)=0.0
          ELSE IF(XN(I) .GT. 0.0)THEN
            URN(I)=-REFLB*(RHO2/RBN(I) +
1             ZHANKS(O,RBN(I),TKERNEL,0,NEW))
          ENDIF
        ENDIF
      ENDDO
C
C@@@@@@@C@@@@@@@ ENCUENTRA RESISITIVIDAD APARENTE @@@@@@@@@@@@
C

```

```

      DO I=1,NPUNTOS
        RHOAP(I)=FACGED(I)*( UAM(I)+UAIM(I)+UBM(I)+UBIM(I)-
1         (UAN(I)+UAIN(I)+UBN(I)+UBIN(I)) )
      ENDDO
C
C CCCCCCCCCCCCCCCCCC ESCRIBE RESULTADOS CCCCCCCCCCCCCCCCCC
C
      WRITE(6,6000)
      WRITE(6,6001)RHO1,RHO2,RHO3,ESPESOR
      WRITE(6,6003) NAME (IIFLAG)
      WRITE(6,6004)
      IF ( IIFLAG .LE. 2) THEN
        DO I=1,NPUNTOS
          IF(IIFLAG .EQ. 1) DIST=SQRT((XB(I)-XA(I))*2+(YB(I)-YA(I))*2)/2.
          IF(IIFLAG .EQ. 2) DIST=SQRT(((XB(I)-XA(I))*2+(YB(I)-YA(I))*2)/3.
          WRITE(6,6005) I,DIST,RHOAP(I)
        ENDDO
      ELSE ! ARREGLOS DIPOLARES
        DO I=1,NPUNTOS
          XMN2=(XM(I)+XN(I))/2.
          YMN2=(YM(I)+YN(I))/2.
          XAB2=(XA(I)+XB(I))/2.
          YAB2=(YA(I)+YB(I))/2.
          DIST=SQRT((XMN2 - XAB2)**2 + (YMN - YAB2)**2)
          WRITE(6,6005) I,DIST,RHOAP(I)
        ENDDO
      ENDIF
      WRITE(6,6006)
      WRITE(6,6007)
      DO I=1,NPUNTOS
        WRITE(6,6008)I,XA(I),YA(I),XB(I),YB(I),
1         XM(I),YM(I),XN(I),YN(I)
      ENDDO
      STOP
6000 FORMAT(//////,5X,'ESPECIFICACIONES DEL MEDIO',//)
6001 FORMAT(5X,'RHO1= ',G8.2,2X,'RHO2= ',G8.2,2X,'RHO3= ',G8.2,
1 2X,'ESPESOR= ',G8.2,//)
6003 FORMAT(T15,A50,//)
6004 FORMAT(T12,' I ',5X,'DISTANCIA ',5X,'RESISTIVIDAD',/,
1 T20,'ELECTRODICA',5X,'APARENTE',/)
6005 FORMAT(T12,I3,5X,G10.4,7X,G10.4)
6006 FORMAT(1H1,T20,'COORDENADAS DE LOS ELECTRODOS',
1 ,//)
6007 FORMAT(2X,'I',4X,'XA ',9X,'YA',9X,'XB',9X,'YB',9X,'XM',
1 2X,'YM',9X,'XN',9X,'YN',//)
6008 FORMAT(1X,I3,1X,G10.2,1X,G10.2-1X,G10.2-1X,G10.2-1X,G10.2-1X,
1 G10.2-1X,G10.2-1X,G10.2)
      END

```

```

REAL*8 FUNCTION TKERNEL(TLAMBD)
REAL*8 ARG,TLAMBDA,ITANH,FAC,BDEXP

```

C

```
COMMON/TKERNEL/RHO1,RHO2,RHO3,IFLAG,ESPESOR
ARG=DBLE(ESPESOR)*TLAMRDA
TTANH=DTANH(ARG)
IF(IFLAG.EQ.1)THEN
  FAC=DBLE(RHO1)
ELSE
  FAC=DBLE(RHO2)
ENDIF
IF (RHO3 .GT. 0) THEN
  TKERNEL=(1. + FAC/RHO3*TTANH)/(FAC/RHO3 + TTANH)
ELSE
  TKERNEL=(RHO3 + FAC*TTANH)/(FAC + RHO3*TTANH)
ENDIF
TKERNEL=FAC*(TKERNEL- 1.0D0)
RETURN
END
```

C SUBROUTINA ZHANKS

```

REAL*8 FUNCTION ZHANKS(N,B,FUN,TOL,NF,NEW)
DOUBLE PRECISION CMAX,TTMAX,C,TT,G,R,FUN
DOUBLE PRECISION F,ER,Y1,Y
DIMENSION WTO(283),WAO(76),WRO(76),WCO(76),WDO(55)
DIMENSION WT1(283),WAI(76),WRI(76),WC1(76),WRI(55)
EQUIVALENCE (WTO(1),WAO(1)),(WTO(77),WRO(1)),(WTO(153),WCO(1)),
*(WTO(229),WDO(1))
EQUIVALENCE (WT1(1),WAI(1)),(WT1(77),WRI(1)),(WT1(153),WC1(1)),
*(WT1(229),WRI(1))
EQUIVALENCE (C,TT),(CMAX,TTMAX)
C-----E=DEXP(-.280),FR=1.080/E
DATA E/1.22140275816015793400/,FR/.81873075307798185980/
C COEFICIENTES DE FILTRO DE ANDERSON.
DATA WAO/
* 2.1969101E-11, 4.1201161E-09,-6.1322980E-07, 7.2479271E-09,
* -7.9821627E-09, 8.5778983E-09,-9.1157294E-09, 9.6615250E-07,
* -1.0207946E-08, 1.0796633E-08,-1.1393033E-08, 1.2049073E-08,
* -1.2708789E-08, 1.3446466E-08,-1.4174300E-08, 1.5005577E-08,
* -1.5807160E-08, 1.6747136E-08,-1.7625961E-08, 1.8693427E-08,
* -1.9650840E-08, 2.0869789E-08,-2.1903555E-08, 2.3305308E-08,
* -2.4407377E-08, 2.6033678E-08,-2.7168773E-08, 2.9094334E-08,
* -3.0266804E-08, 3.2534013E-08,-3.3672072E-08, 3.6408936E-08,
* -3.7425027E-08, 4.0787921E-08,-4.1543242E-08, 4.6756842E-08,
* -4.8035233E-08, 5.1425075E-08,-5.0893896E-08, 5.7934877E-08,
* -5.6086570E-08, 6.5475248E-08,-6.1539913E-08, 7.4301996E-08,
* -6.7117043E-08, 8.4767837E-08,-7.2583120E-08, 9.7366568E-08,
* -7.7553611E-08, 1.1279873E-07,-8.1416723E-08, 1.3206914E-07,
* -8.3217217E-08, 1.5663185E-07,-8.1482581E-08, 1.8840593E-07,
* -7.3963141E-08, 2.3109673E-07,-5.7243707E-08, 2.8867452E-07,
* -2.6163525E-08, 3.6808773E-07, 2.7049871E-08, 4.7932617E-07,
* 1.1407365E-07, 6.3720626E-07, 2.5241961E-07, 9.6373467E-07,
* 4.6831433E-07, 1.1916346E-06, 8.0099716E-07, 1.6626013E-06,
* 1.3091334E-06, 2.3701475E-06, 2.0803829E-06, 3.4012978E-06/
DATA WRO/
* 3.2456774E-06, 4.9240402E-06, 5.0005198E-06, 7.1783540E-06,
* 7.6367633E-06, 1.0522038E-05, 1.1590021E-05, 1.5488635E-05,
* 1.7510398E-05, 2.2873836E-05, 2.6368006E-05, 3.3864387E-05,
* 3.9610390E-05, 5.0230379E-05, 5.9397373E-05, 7.4612122E-05,
* 8.8951409E-05, 1.1094809E-04, 1.3308026E-04, 1.6511335E-04,
* 1.9079671E-04, 2.4587195E-04, 2.9728181E-04, 3.6629770E-04,
* 4.4402013E-04, 5.4589361E-04, 6.6298832E-04, 8.1375348E-04,
* 9.8971624E-04, 1.2132772E-03, 1.4772052E-03, 1.8092022E-03,
* 2.2048122E-03, 2.6980811E-03, 3.2895354E-03, 4.0239744E-03,
* 4.9080203E-03, 6.0010999E-03, 7.3216878E-03, 8.9489225E-03,
* 1.0719448E-02, 1.3340696E-02, 1.6276397E-02, 1.9873311E-02,
* 2.4233627E-02, 2.9555699E-02, 3.5990069E-02, 4.3791529E-02,
* 5.3150319E-02, 6.4341377E-02, 7.7506720E-02, 9.2749987E-02,
* 1.0980561E-01, 1.2791555E-01, 1.4525830E-01, 1.5820085E-01,
* 1.6058576E-01, 1.4196085E-01, 8.9781222E-02,-1.0238278E-02,

```

* -1.5083434E-01,-2.9059573E-01,-2.9105437E-01,-3.7973244E-02,
* 3.8273717E-01, 2.2014118E-01,-4.7342635E-01, 1.9331133E-01,
* 5.3839527E-02,-1.1909845E-01, 9.9317051E-02,-6.6152628E-02,
* 4.0703241E-02,-2.4358316E-02, 1.4476533E-02,-8.6198067E-03/

DATA WCO/

* 5.1597053E-03,-3.1074602E-03, 1.8822342E-03,-1.1456545E-03,
* 7.0004347E-04,-4.2904226E-04, 2.6354444E-04,-1.6215439E-04,
* 9.9891279E-05,-6.1589037E-05, 3.7996921E-05,-2.3452250E-05,
* 1.4479572E-05,-8.9417427E-06, 5.5227518E-06,-3.4114252E-06,
* 2.1074101E-06,-1.3019222E-06, 8.0433617E-07,-4.9693681E-07,
* 3.0702417E-07,-1.8969219E-07, 1.1720069E-07,-7.2412496E-08,
* 4.4740283E-08,-2.7643004E-08, 1.7079403E-08,-1.0552634E-08,
* 6.5200311E-09,-4.0284597E-09, 2.4890232E-09,-1.5378695E-09,
* 9.5019040E-10,-5.8708696E-10, 3.6273937E-10,-2.2412348E-10,
* 1.3847792E-10,-8.5560821E-11, 5.2865474E-11,-3.2664392E-11,
* 2.0182948E-11,-1.2470979E-11, 7.7057670E-12,-4.7611713E-12,
* 2.9415274E-12,-1.8170081E-12, 1.1221034E-12,-6.9271067E-13,
* 4.2739744E-13,-2.6344388E-13, 1.6197105E-13,-9.9147443E-14,
* 6.0487998E-14,-3.6973097E-14, 2.2817964E-14,-1.4315547E-14,
* 9.1574735E-15,-5.9567236E-15, 3.9209969E-15,-2.5911739E-15,
* 1.6406939E-15,-9.8248590E-16, 3.0195409E-16,-2.3622634E-16,
* -8.0942556E-17,-3.7172363E-17, 1.9299542E-16,-3.3388160E-16,
* -4.6174116E-16,-5.8627358E-16, 7.222757E-16,-8.7972941E-16,
* 1.0211799E-15,-1.0940039E-15, 1.0789555E-15,-9.7089714E-16/

DATA WDO/

* 7.4110927E-16,-4.1700094E-16, 8.5977184E-17, 1.3396469E-16,
* -1.7838410E-16, 4.8975421E-17, 1.9390153E-16,-5.0046989E-16,
* 8.3380985E-16,-1.1544640E-15, 1.4401527E-15,-1.6637066E-15,
* 1.777129E-15,-1.7322187E-15, 1.5247247E-15,-1.1771155E-15,
* 6.9747910E-16,-1.2088956E-15,-4.8382957E-16, 1.0406292E-15,
* -1.5220450E-15, 1.9541597E-15,-2.4107408E-15, 2.9241438E-15,
* -3.5176475E-15, 4.2276125E-15,-5.0977951E-15, 6.1428456E-15,
* -7.3949962E-15, 8.8597601E-15,-1.0515959E-14, 1.2264584E-14,
* -1.3949876E-14, 1.5332490E-14,-1.6146782E-14, 1.6084121E-14,
* -1.4962523E-14, 1.2794804E-14,-9.9286701E-15, 6.8825809E-15,
* -4.0056107E-15, 1.5965079E-15,-7.2732961E-18,-4.0433218E-16,
* -6.5679455E-14, 3.3011866E-15,-7.3545910E-15, 1.2394851E-14,
* -1.7947697E-14, 2.3774303E-14,-3.0277168E-14, 3.9252831E-14,
* -5.5510504E-14, 9.0505376E-14,-1.7064873E-13/

C--END OF JO FILTER WEIGHTS

DATA WAI/

*-4.2129715E-16,5.3667031E-15,-7.1183962E-15,8.9478500E-15,
*-1.0767891E-14,1.2362265E-14,-1.3371129E-14,1.3284178E-14,
*-1.1714302E-14,8.4134738E-15,-3.7726725E-15,-1.4263077E-15,
*6.1279163E-15,-9.1102765E-15,9.9696405E-15,-9.3649955E-15,
*8.6009018E-15,-8.9749345E-15,1.1153987E-14,-1.4914821E-14,
*1.9314024E-14,-2.3172398E-14,2.5605477E-14,-2.6217555E-14,
*2.5057768E-14,-2.2489539E-14,1.9022752E-14,-1.5198084E-14,
*1.1422464E-14,-7.9323958E-15,4.8421406E-15,-2.1875032E-15,
*-3.2177842E-17,1.8637565E-15,-3.3683643E-15,4.6132219E-15,
*-5.6209538E-15,6.4192841E-15,-6.8959928E-15,6.7895792E-15,
*-6.5385935E-15,5.6125163E-15,-4.1453931E-15,2.6358827E-15,
*-9.5104370E-16,1.4600474E-16,5.6166519E-16,8.2899246E-17,
*5.0032100E-16,4.3752205E-16,2.1052293E-15,-9.5451973E-16,

#6.4004437E-15,-2.1926177E-15,1.1651003E-14,5.3415433E-16,
 #1.8044664E-14,1.0755745E-14,3.0159022E-14,3.3506136E-14,
 #5.8709354E-14,8.1475200E-14,1.25570006E-13,1.8519112E-13,
 #2.7641766E-13,4.1370823E-13,5.1506209E-13,9.1921459E-13,
 #1.3698462E-12,2.0447427E-12,3.049477E-12,4.5501001E-12,
 #6.7870250E-12,1.0126237E-11,1.5104976E-11,2.2536055E-11,
 DATA WR1/
 #3.5217358E-11,5.0153039E-11,7.4518173E-11,1.1161804E-10,
 #1.4651222E-10,2.4840923E-10,3.7058109E-10,5.5284353E-10,
 #8.2474468E-10,1.2303750E-09,1.8355034E-09,2.7302502E-09,
 #4.0849847E-09,6.0940894E-09,9.0913320E-09,1.3562651E-08,
 #2.0233058E-08,3.0184214E-08,4.5029477E-08,6.7176304E-08,
 #1.0021488E-07,1.4950371E-07,2.2307308E-07,3.3272639E-07,
 #4.9636623E-07,7.4042904E-07,1.1046805E-06,1.6380101E-06,
 #2.4585014E-06,3.6577163E-06,5.4714550E-06,8.1324233E-06,
 #1.2178782E-05,1.8166179E-05,2.7099233E-05,4.0423064E-05,
 #6.0307224E-05,8.9971508E-05,1.3428195E-04,2.0021173E-04,
 #2.9860417E-04,4.4545271E-04,6.6423156E-04,9.9073278E-04,
 #1.4767050E-03,2.2014891E-03,3.3278147E-03,4.9537292E-03,
 #7.2596911E-03,1.0786531E-02,1.5973323E-02,2.3641294E-02,
 #3.4255322E-02,5.0408141E-02,7.2927752E-02,1.0537089E-01,
 #1.4207357E-01,2.0821315E-01,3.0996815E-01,4.5688500E-01,
 #6.7334625E-01,9.8659451E-01,1.4527568E-01,-3.5723356E-01,
 *-1.8280529E-01,4.7014534E-01,7.2291233E-03,-3.0614694E-01,
 #2.4781735E-01,-1.1149185E-01,2.5945386E-02,1.0880279E-02,
 *-2.2830217E-02,2.4644647E-02,-2.2895284E-02,2.0197033E-02,
 DATA WC1/
 *-1.7488968E-02,1.5057670E-02,-1.2953925E-02,1.1153974E-02,
 *-9.6138435E-03,8.2252090E-03,-7.1628561E-03,6.1882920E-03,
 *-5.3482055E-03,4.6232056E-03,-3.9970549E-03,3.4540115E-03,
 *-2.9882670E-03,2.5840861E-03,-2.2345428E-03,1.9223047E-03,
 *-1.6709583E-03,1.4442655E-03,-1.2495408E-03,1.0205806E-03,
 *-9.3441130E-04,8.0803899E-04,-6.9275784E-04,4.9435624E-04,
 *-5.2253532E-04,4.5186652E-04,-3.9075315E-04,3.3279881E-04,
 *-2.9220916E-04,2.5267019E-04,-2.1851585E-04,1.8896332E-04,
 *-1.6340753E-04,1.4130796E-04,-1.2219719E-04,1.0367092E-04,
 *-9.1379828E-05,7.9021432E-05,-6.8334412E-05,5.9022726E-05,
 *-5.1100905E-05,4.4188914E-05,-3.8213580E-05,3.3045496E-05,
 *-2.8576354E-05,2.4711631E-05,-2.1369580E-05,1.8479110E-05,
 *-1.5980307E-05,1.3819097E-05,-1.1950174E-05,1.0234006E-05,
 *-8.9364160E-06,7.7278366E-06,-6.6827083E-06,5.7789291E-06,
 *-4.9973715E-06,4.3215167E-06,-3.7370660E-06,3.2316575E-06,
 *-2.7946015E-06,2.4166539E-06,-2.0898307E-06,1.8071890E-06,
 *-1.8427811E-06,1.5514274E-06,-1.3696576E-06,1.0160299E-06,
 *-8.7392952E-07,7.5573750E-07,-6.5353002E-07,5.6514538E-07,
 *-4.8871388E-07,4.2261921E-07,-3.6546333E-07,3.1603725E-07,
 DATA WD1/
 *-2.7329579E-07,2.3633470E-07,-2.0437231E-07,1.7673258E-07,
 *-1.5283091E-07,1.3216174E-07,-1.1428792E-07,9.8831386E-08,
 *-9.5465227E-08,7.3906734E-08,-6.3911437E-08,5.5267923E-08,
 *-4.7793376E-08,4.1329702E-08,-3.5740189E-08,3.0906612E-08,
 *-2.6726379E-08,2.3112160E-08,-1.9986424E-08,1.7283419E-08,
 *-1.4945974E-08,1.2524650E-08,-1.1176674E-08,9.6651347E-09,
 *-8.3580023E-09,7.2276490E-09,-6.2501675E-09,5.4048822E-09,

```

*-4.6739154E-09,4.0418061E-09,-3.4951847E-09,3.0224895E-09,
*-2.6137226E-09,2.2602302E-09,-1.9545596E-09,1.6902214E-09,
*-1.4616324E-09,1.2639577E-09,-1.0930164E-09,9.4519327E-10,
*-8.1736203E-10,7.0681930E-10,-6.1122713E-10,5.2856342E-10,
*-4.5707937E-10,3.9526267E-10,-3.4180569E-10,2.9557785E-10,
*-2.8560176E-10,2.2103233E-10,-1.9113891E-10,1.6528994E-10,
*-1.4294012E-10,1.2361991E-10,-8.2740936E-11/
  NONE=0
  Y1=0.7358852661479794460D0/R
  ZHANKS=0.0D0
  CHMAX=0.0D0
  NF=0
  Y=Y1
C COMIENZA LA CONVOLUCION DEL LADO DERECHO CON EL COEFICIENTE 131
  ASSIGN 110 TO M
  I=131
  Y=YKF
  GO TO 200
110  YIMAX=DMAX1(DABS(TT),TTMAX)
  I=I+1
  Y=YKE
  IF(I,LE,149) GO TO 200
  IF(TTMAX.CO,0.0D0) NONE=1
C SE ESTABLECE EL CRITERIO DE TRUNCAMIENTO
  CHAX=DEL(TO)*CHAX
  ASSIGN 120 TO M
  GO TO 200
C PRUEBA PARA EL TRUNCAMIENTO DEL FILTRO AL LADO DERECHO
120  IF(DABS(TT).LE,TTMAX) GO TO 130
  I=I+1
  Y=Y4E
  IF(I,LE,283) GO TO 200
130  Y=Y1
C SE CONTINUA CON LA CONVOLUCION DEL LADO IZQUIERDO CON EL
C COEFICIENTE 130
  ASSIGN 140 TO M
  I=130
  GO TO 200
C PRUEBA PARA EL TRUNCAMIENTO DEL FILTRO AL LADO IZQUIERDO
140  IF(DABS(TT).LE,TTMAX.AND,NONE.EQ,0) GO TO 190
  I=I-1
  Y=YKE
  IF(I,GT,0) GO TO 200
C SE NORMALIZA POR B PARA TOMAR EN CUENTA EL CAMBIO DE RANGO DE INTEGRA-
C CION.
190  ZHANKS=ZHANKS/B
  RETURN
200  B=Y
  GO TO 300
250  IF(N) 270,260,270
260  C=C*NT0(I)
  GO TO 280
270  C=C*MT(I)
280  ZHANKS=ZHANKS+C

```

```
GO TO M,(110,120,140)
C EVALUACION DE FUN
300 C=FUN(C)
    NF=NF+1
    GO TO 250
END
```

APENDICE B

Se presentan las curvas de resistividad aparente de los -- sondeos interpretados en el Capítulo II. Las curvas se encuentran graficadas en papel bilogarítmico, módulo 62 mm.- La nomenclatura utilizada es la siguiente:

DN: Sondeo realizado paralelo al perfil, sobre la región de resistividad ρ_1 . El sustrato es de resistividad infinita.

DP: Sondeo realizado paralelo al perfil, sobre la región de resistividad ρ_2 . El sustrato es de resistividad infinita.

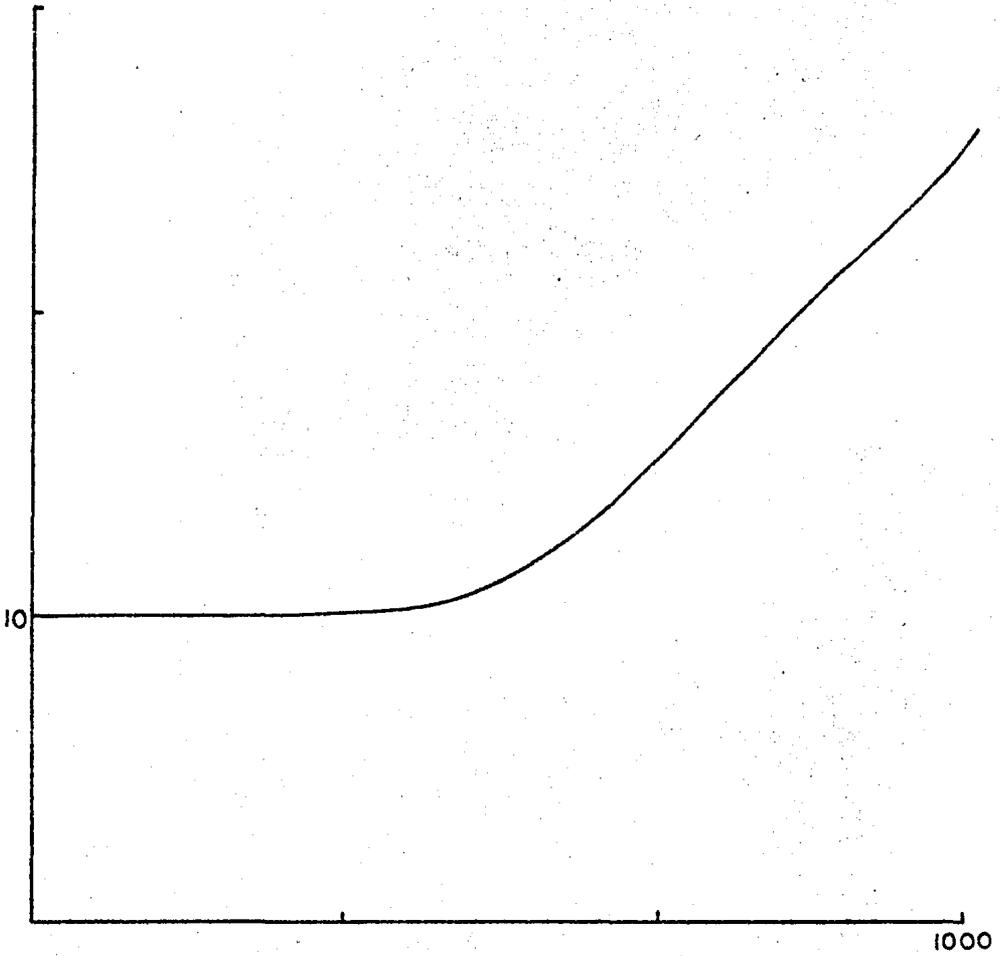
DBN: Sondeo realizado perpendicular al perfil, sobre la región de resistividad ρ_1 . El sustrato es de resistividad infinita.

ZDP: Sondeo realizado paralelo al perfil sobre la región de resistividad ρ_2 . El sustrato es de resistividad cero.

NOTA: El número que acompaña a la nomenclatura es la distancia que hay del centro del sondeo al contacto en m.

B-1

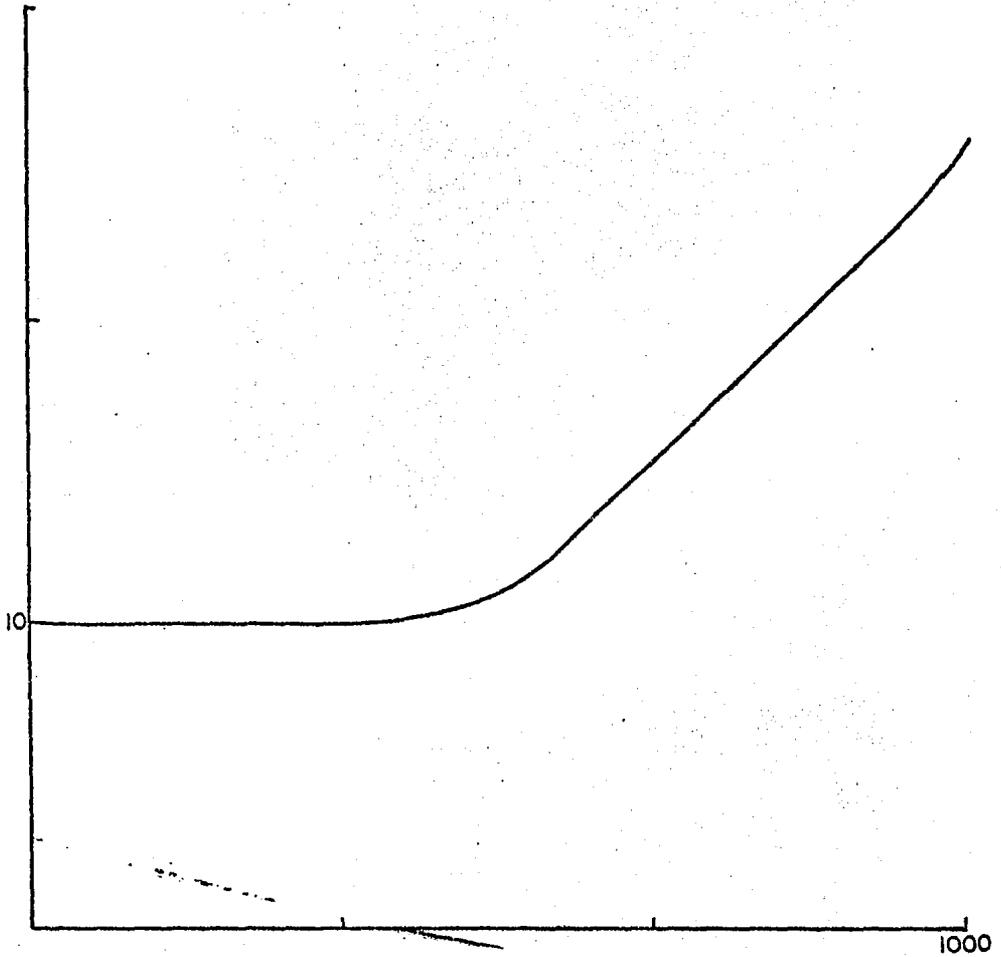
DN 2020



B-2

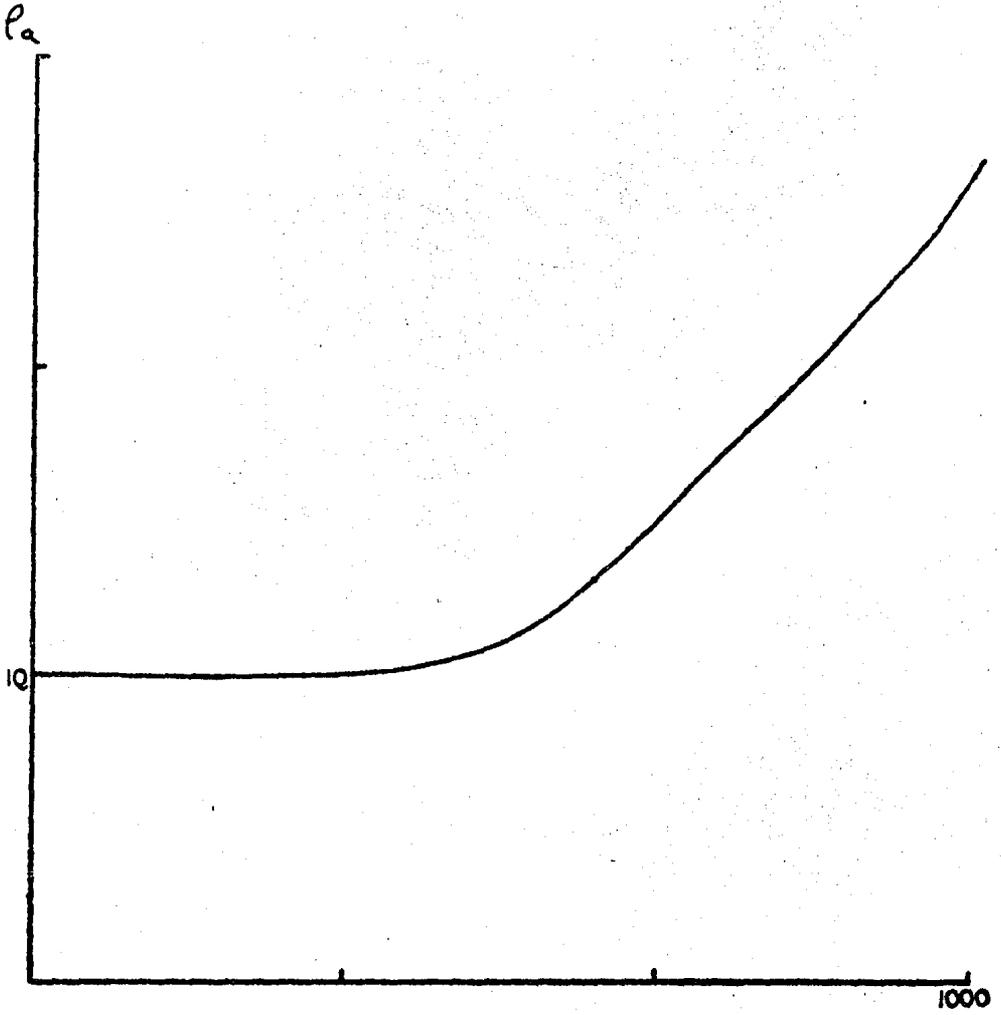
DN 1520

P_a



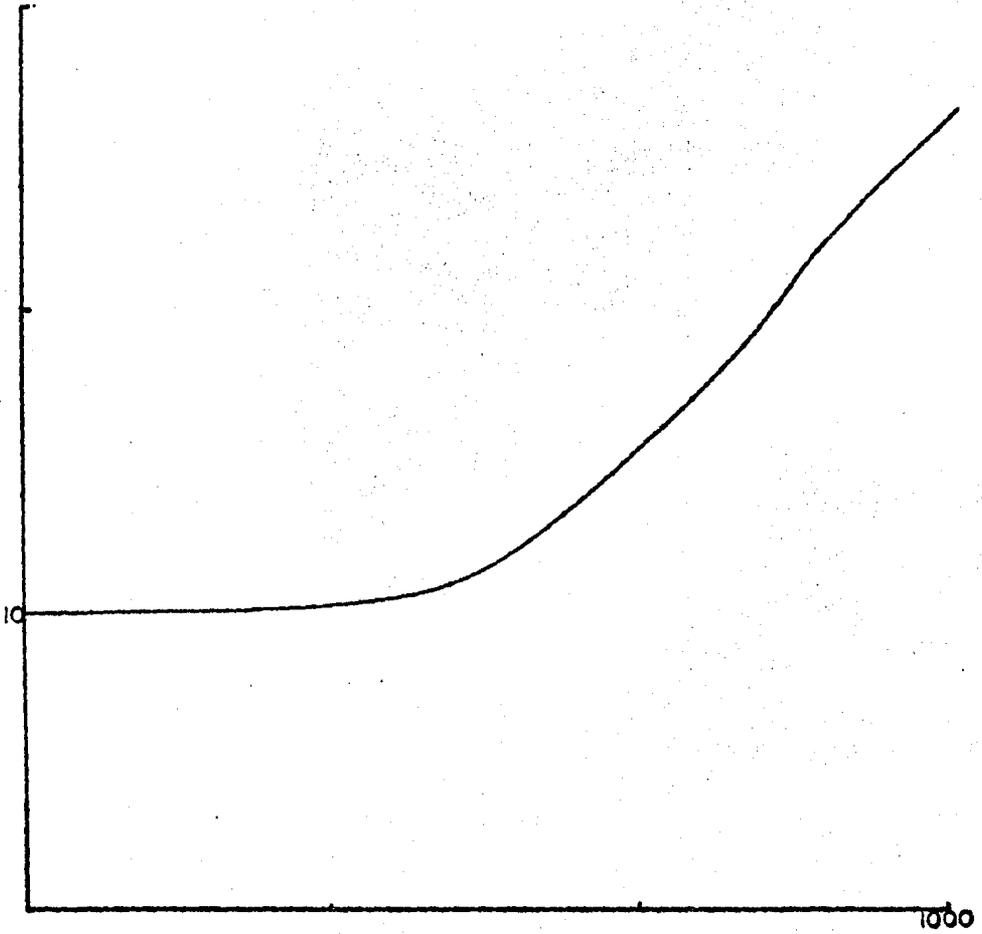
B-3

DN 1020



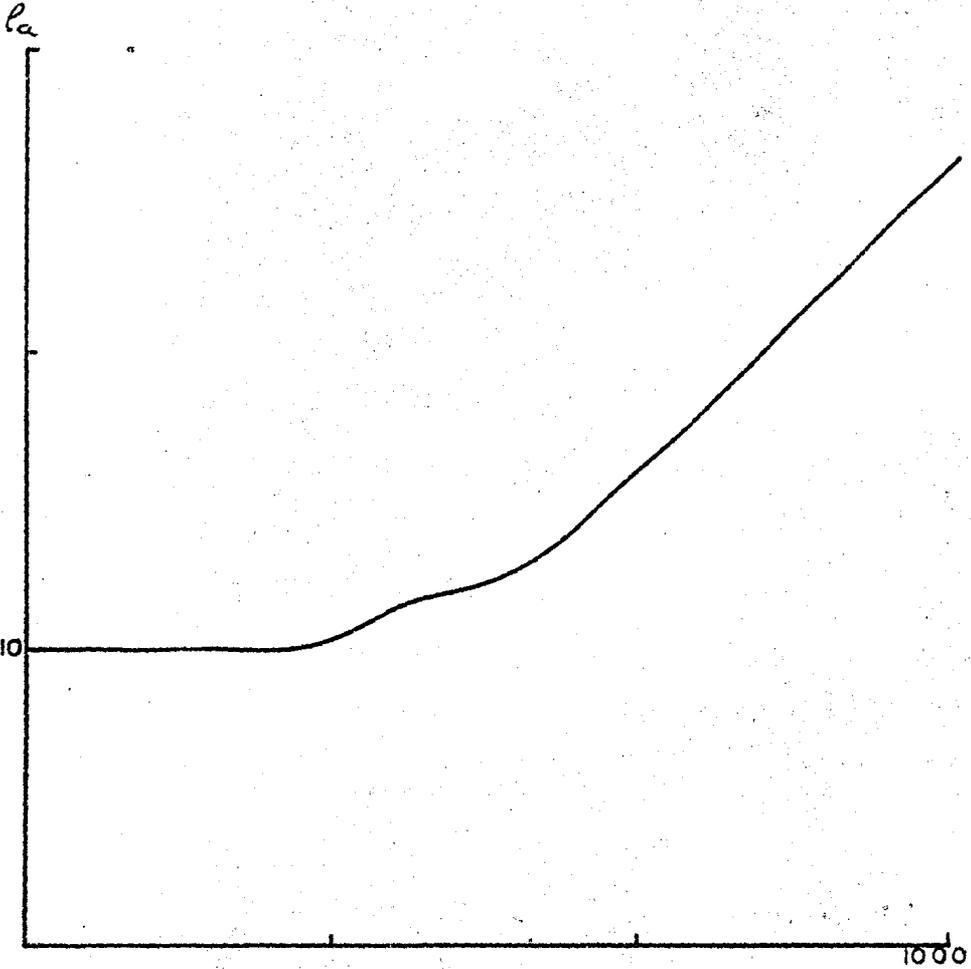
B-4

DN 520



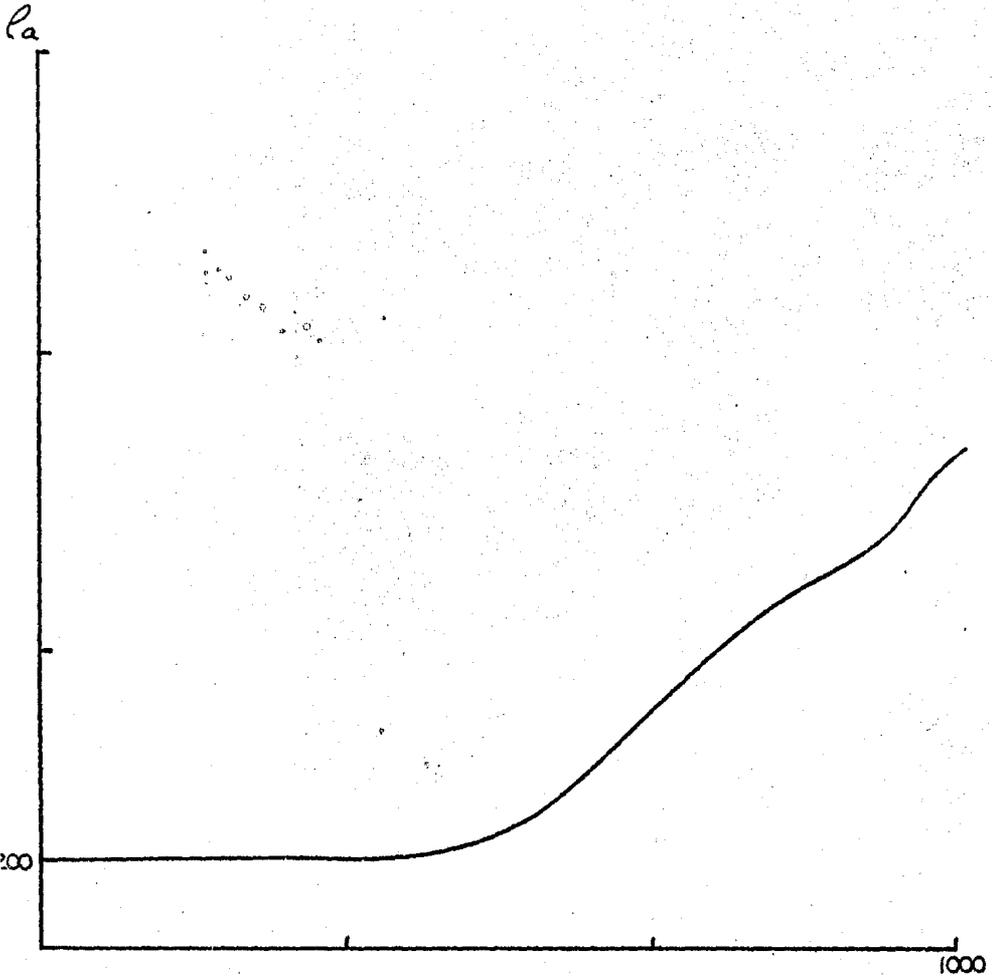
8-5

DN 20



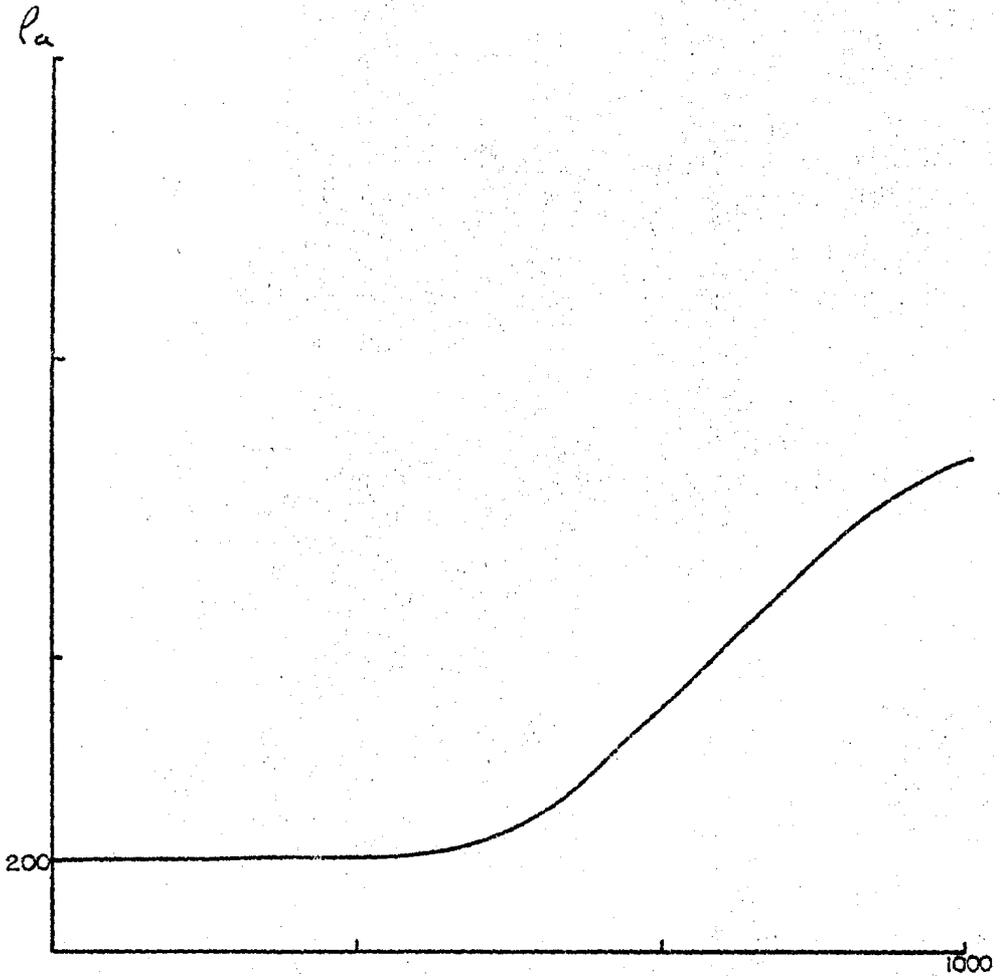
B-6

DP 480



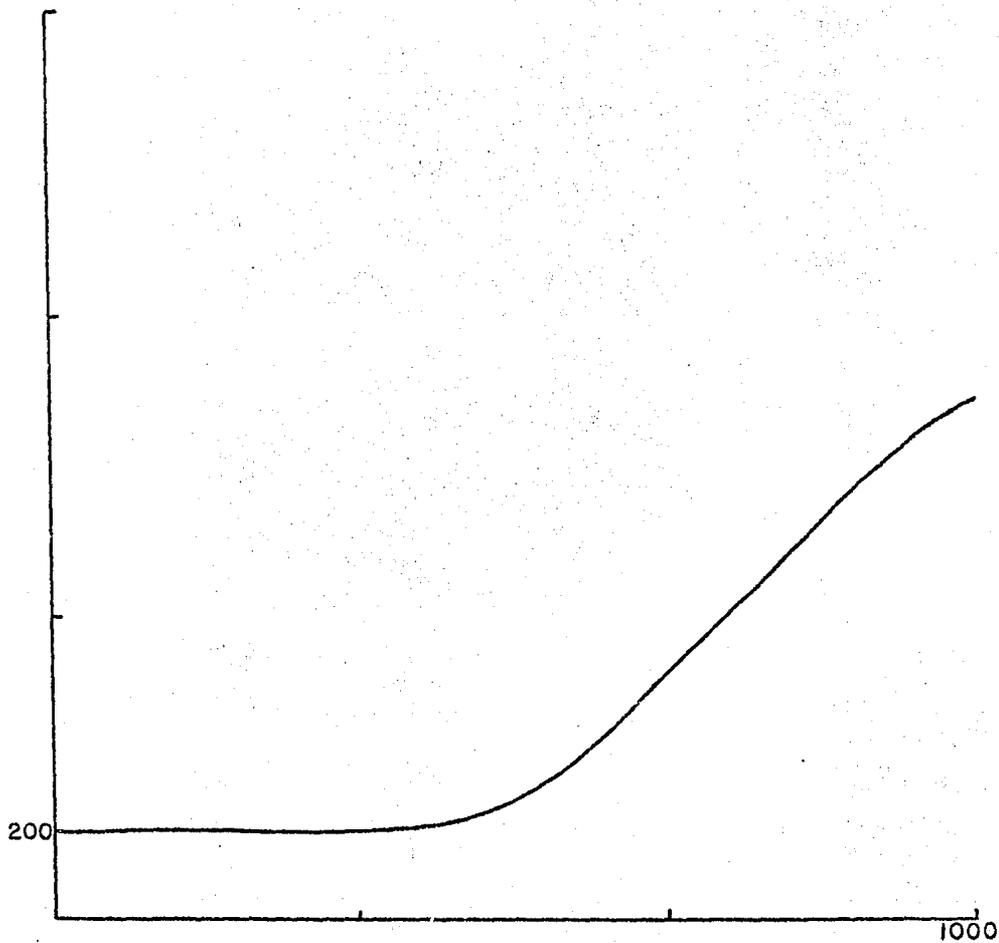
B-7

DP 980



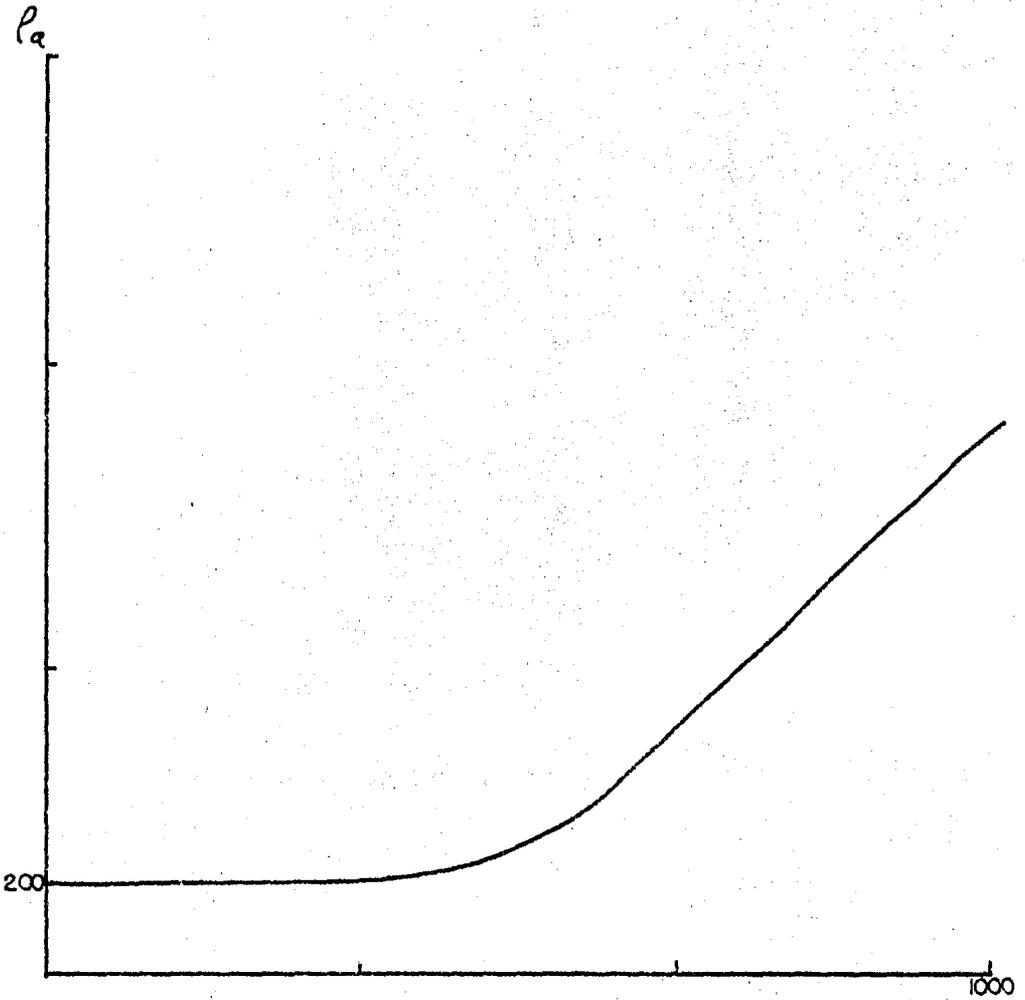
B-8

DP 1480



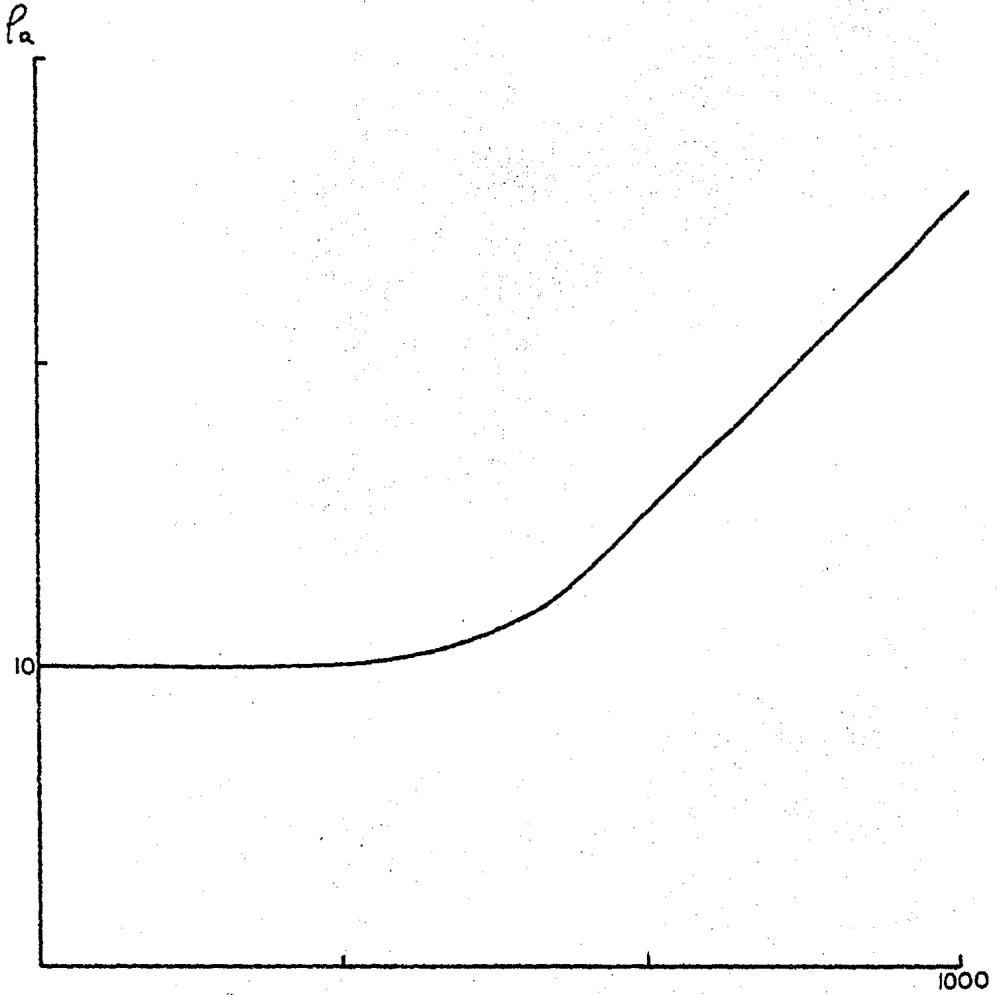
B-9

DP 1980



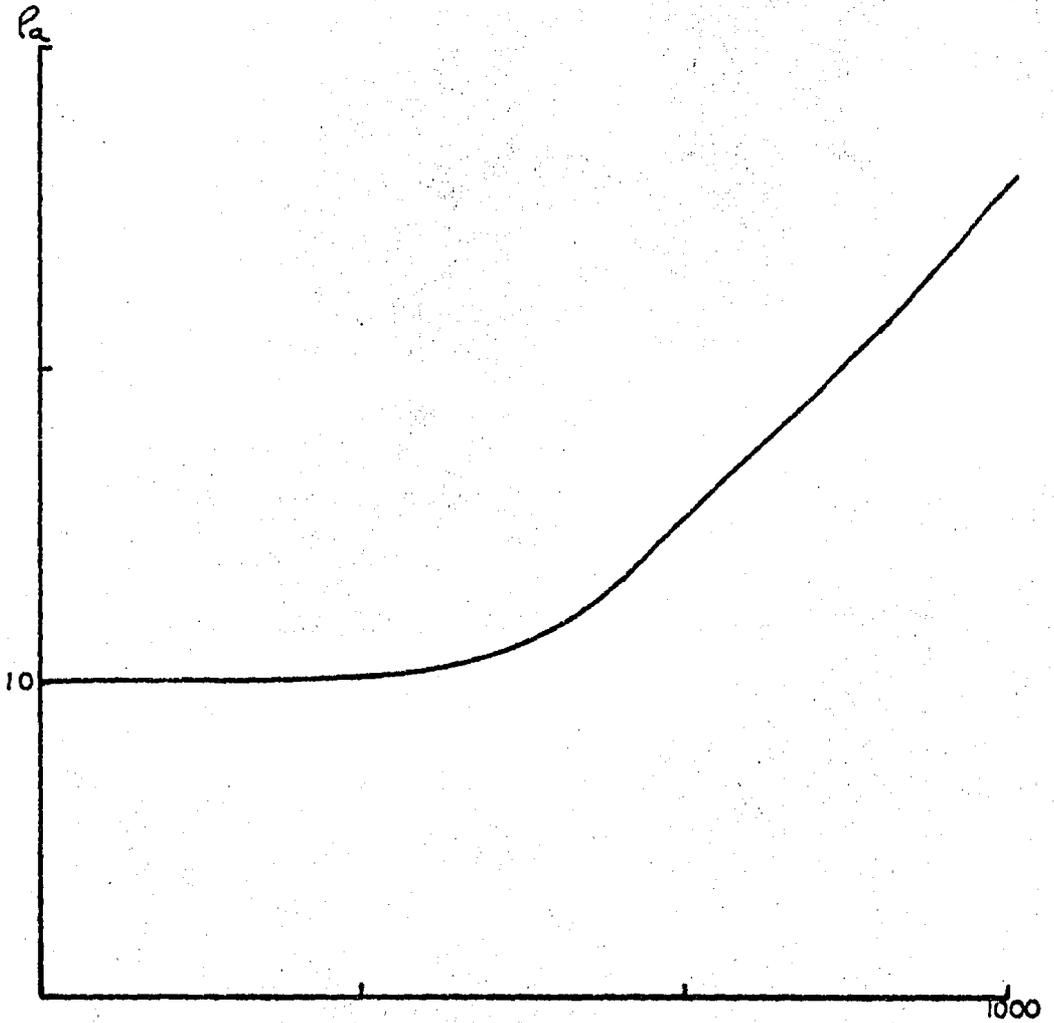
B-10

DBN 2020



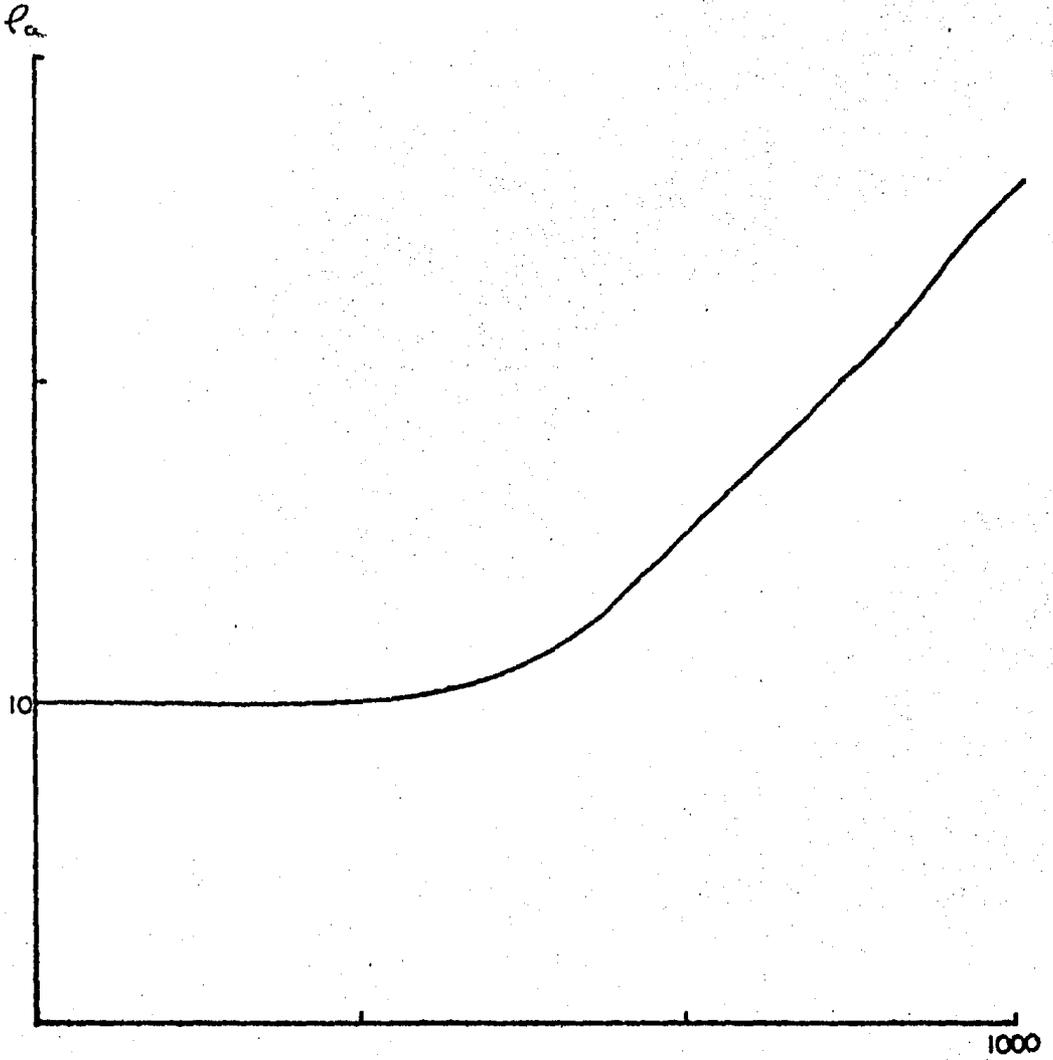
B-11

DBN 1520



B-12

DBN 1020



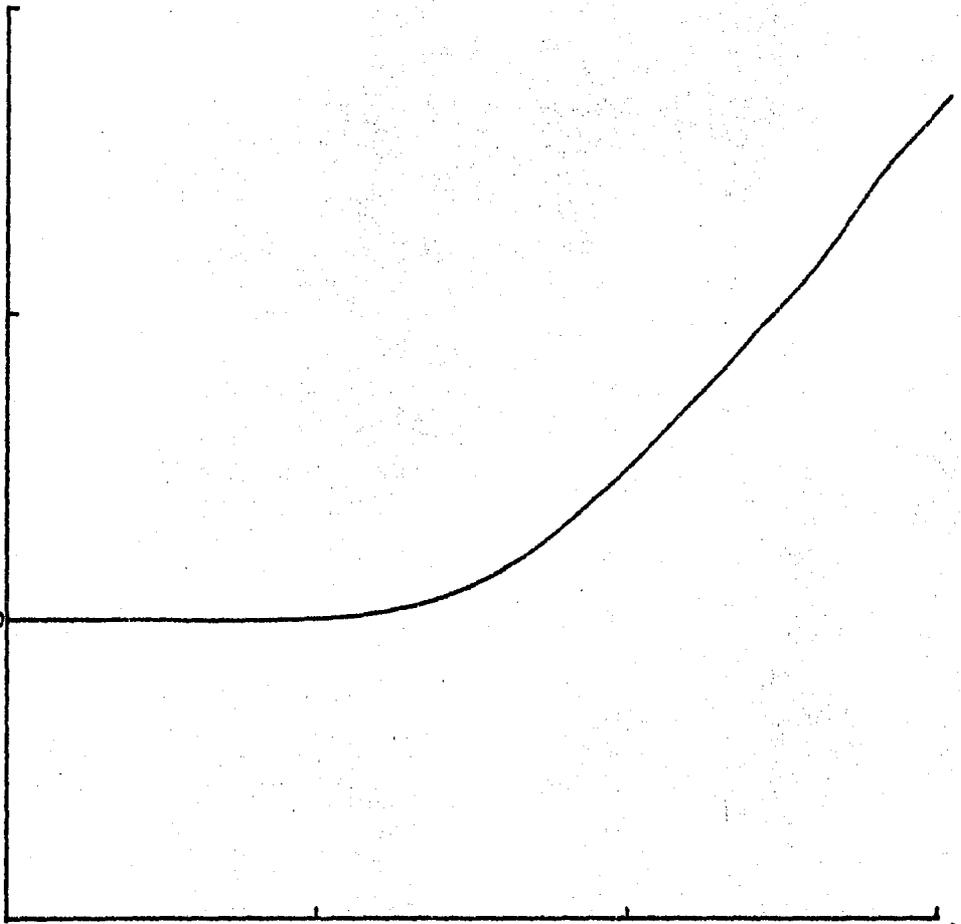
B-13

D8N 520

ρ_a

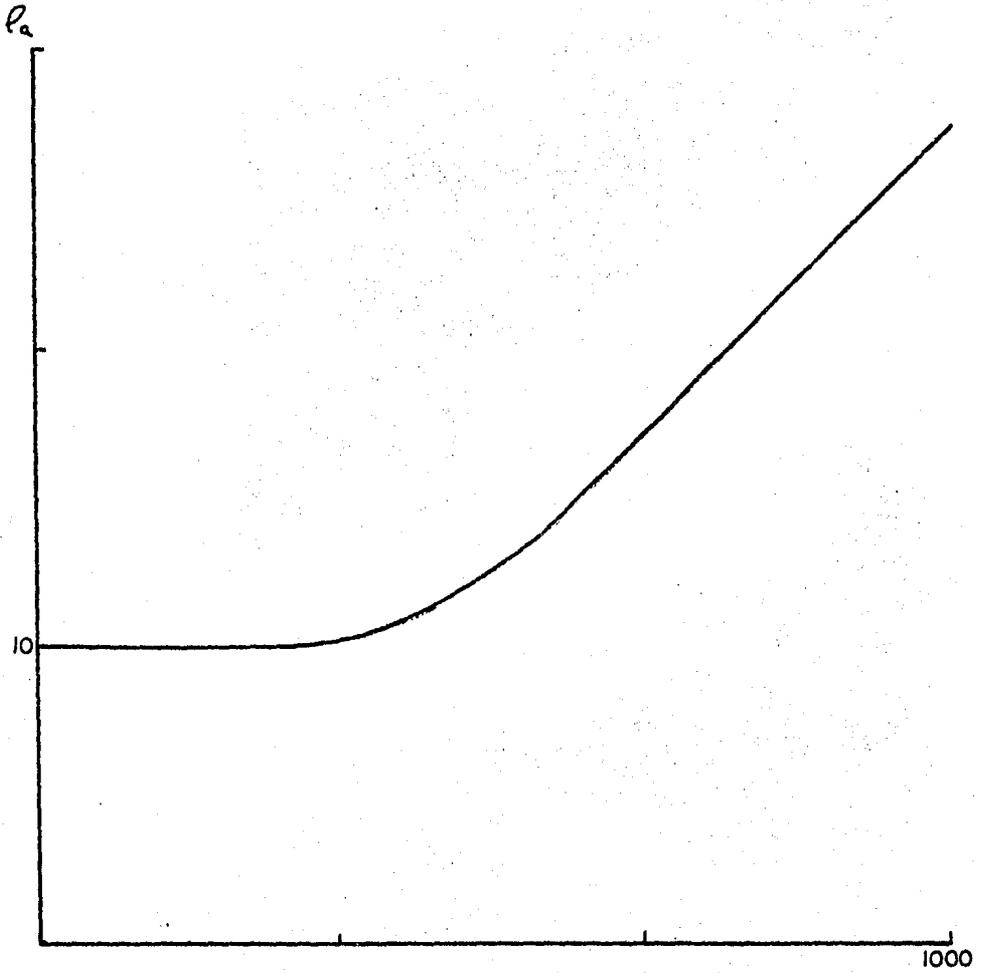
10

1000



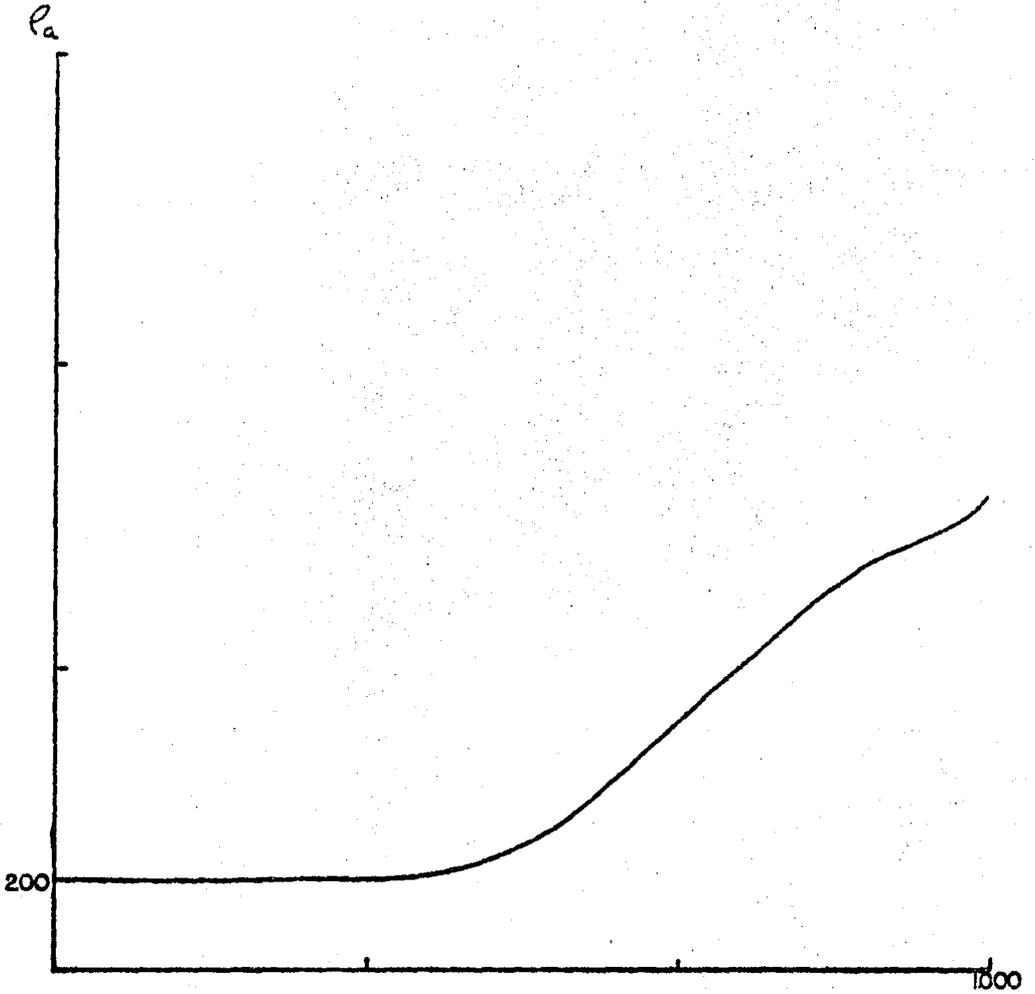
B-14

DBN 20



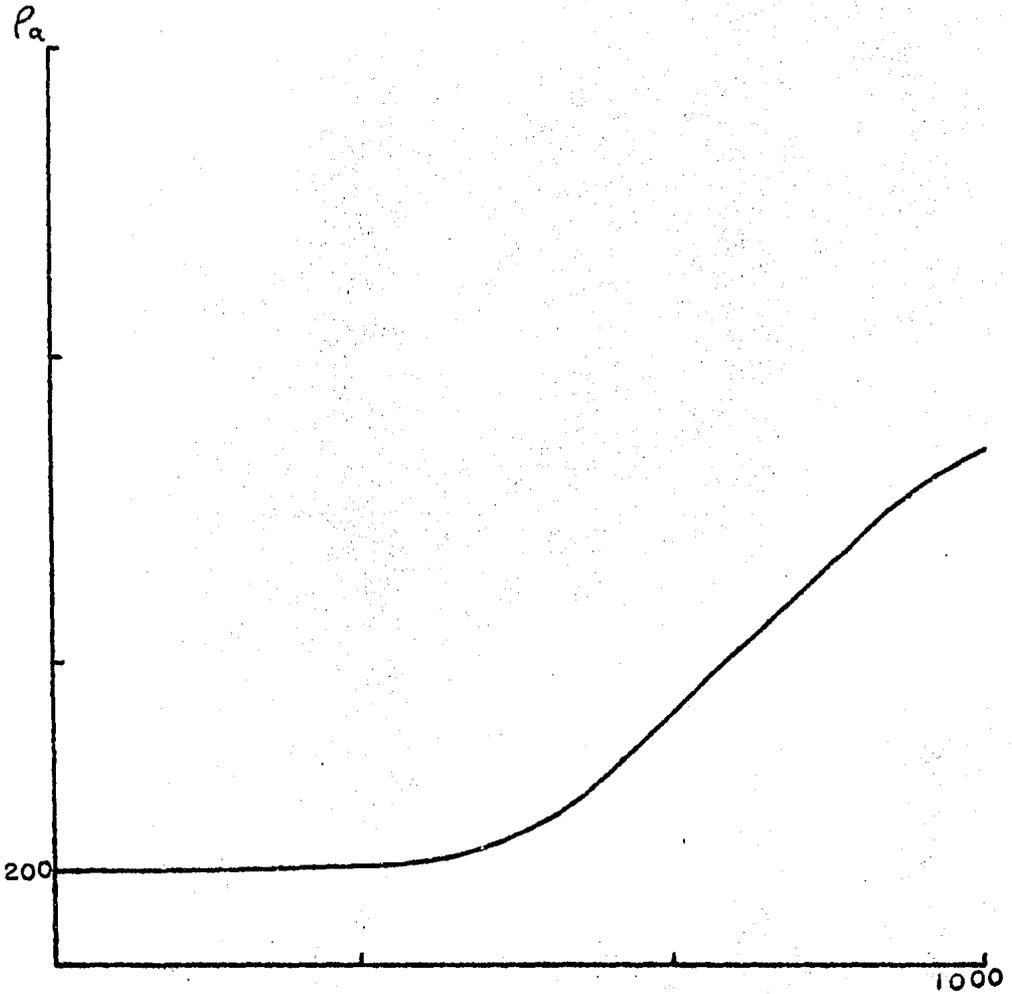
B-15

DBP 480



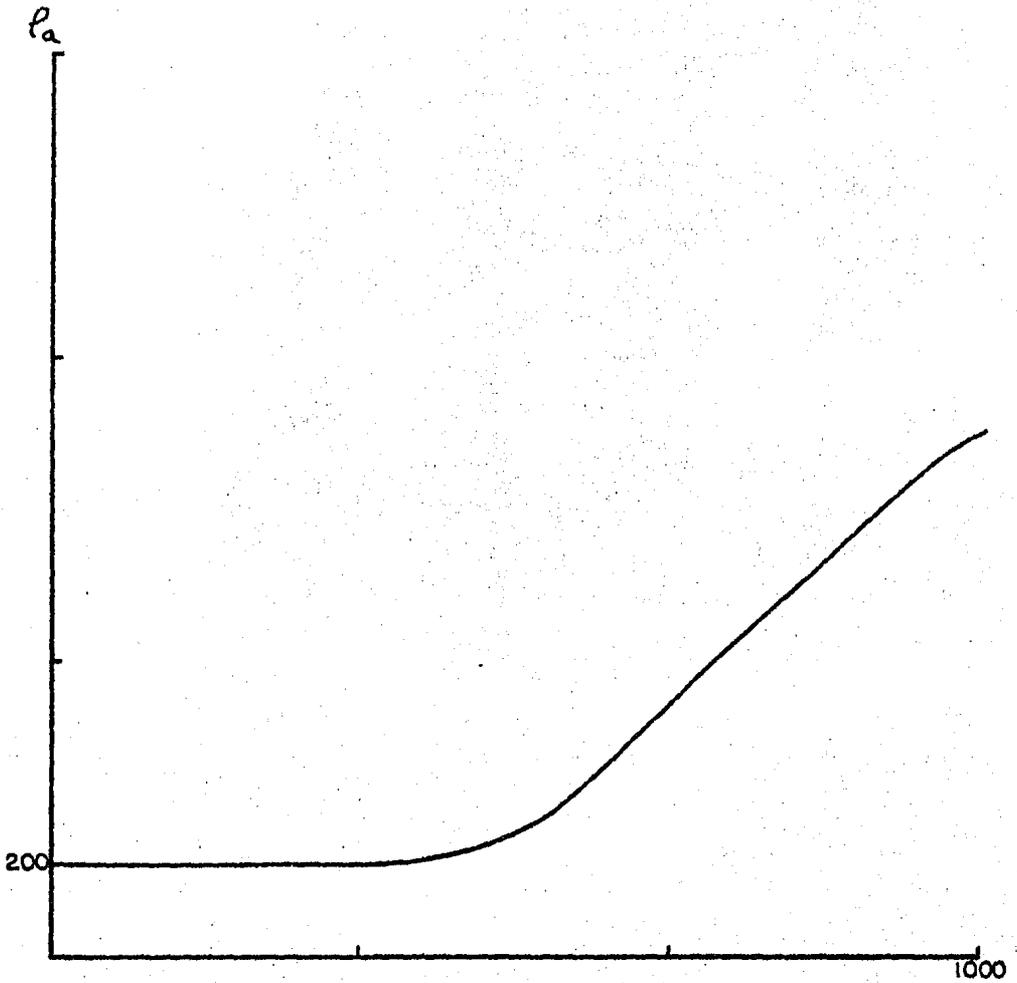
B-16

DBP 980



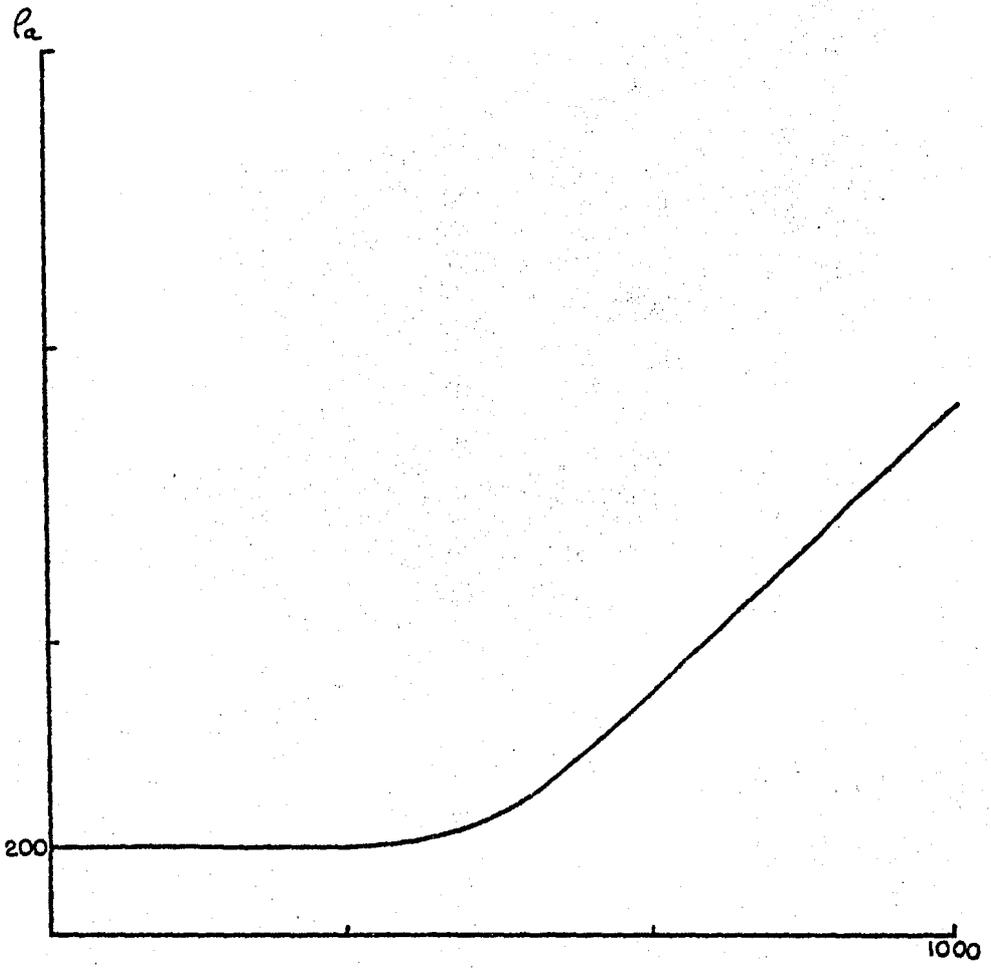
B-17

DBP 1480



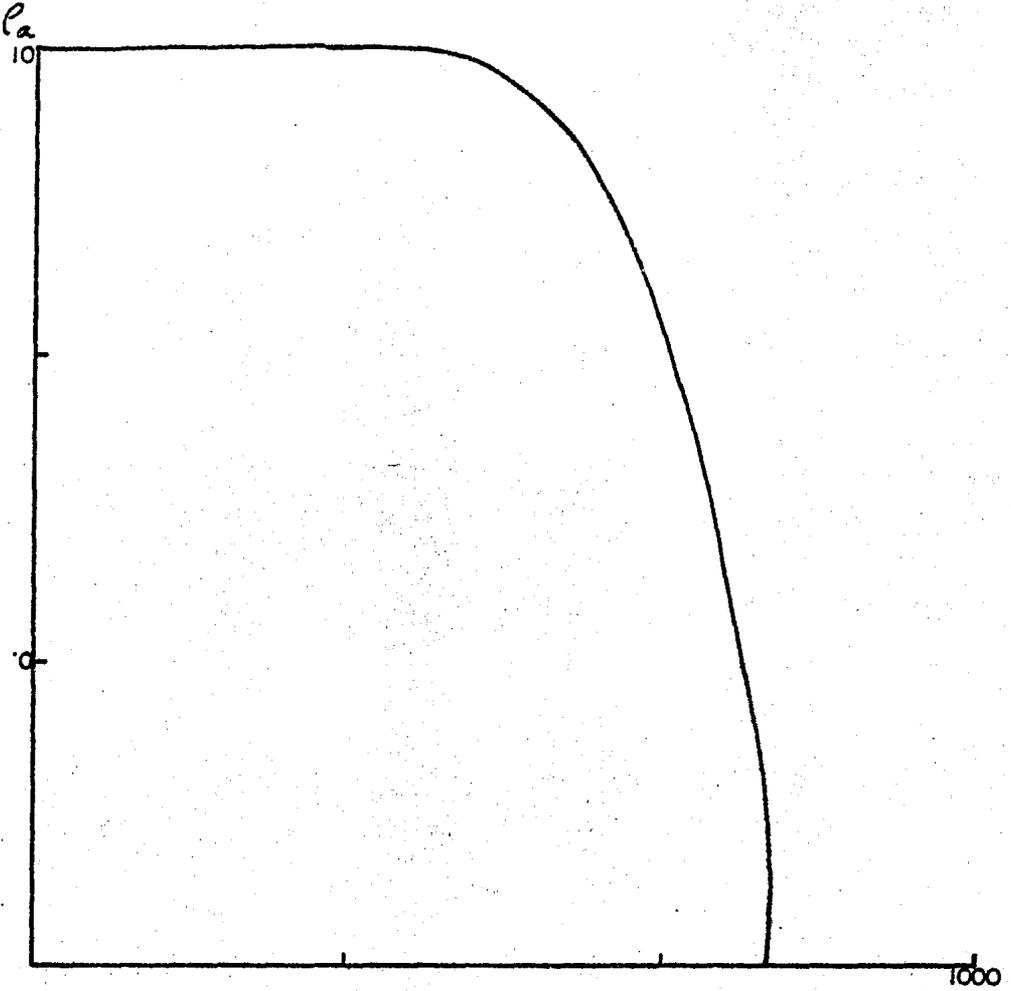
B-18

DBP 1980



B-19

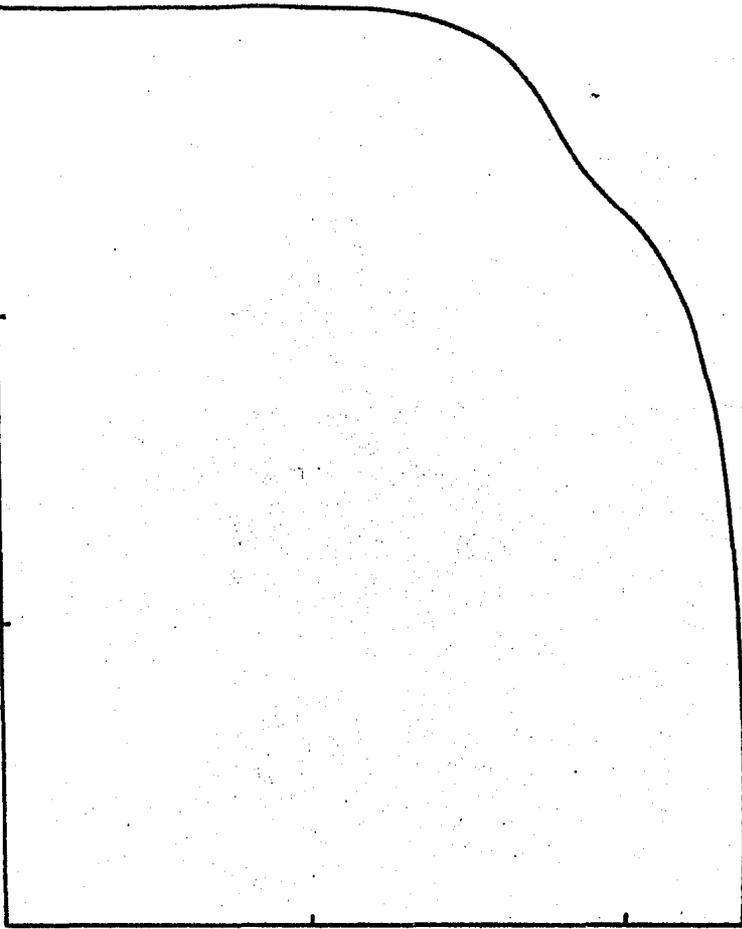
ZDN 125



B-20

ZDN 95

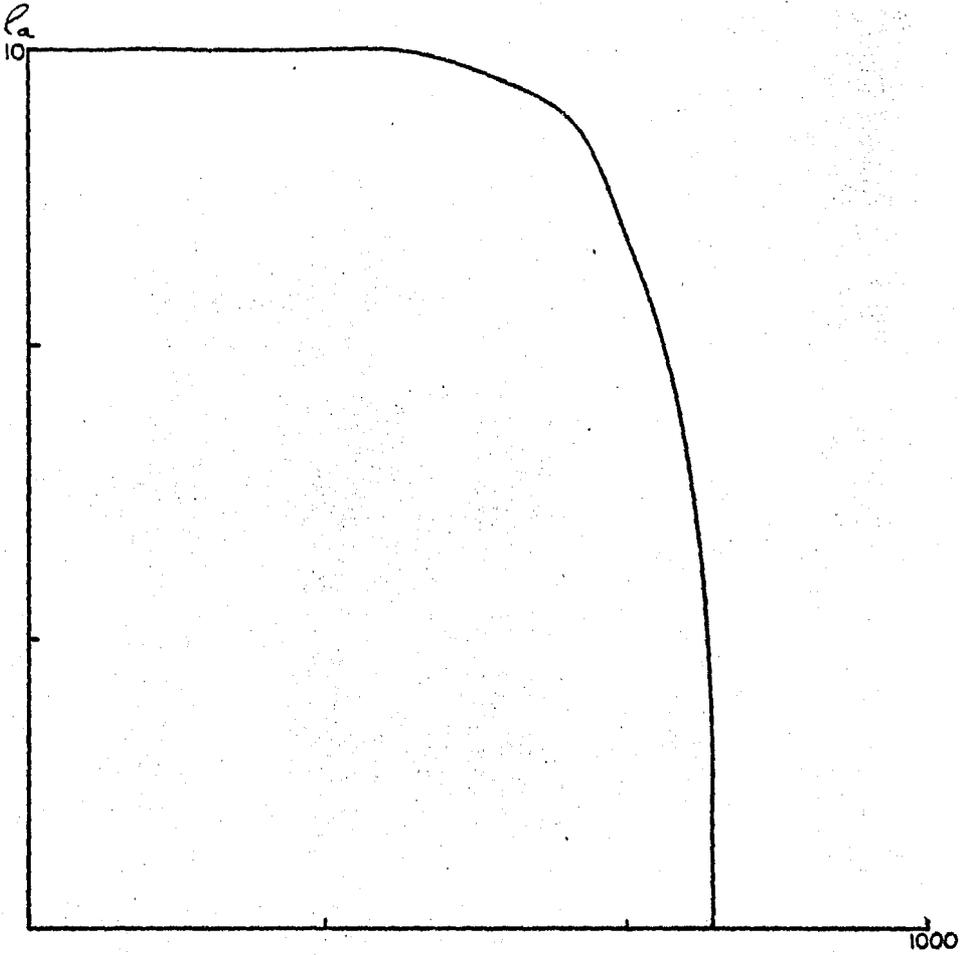
ρ_a
10



1000

B-21

ZDN 65

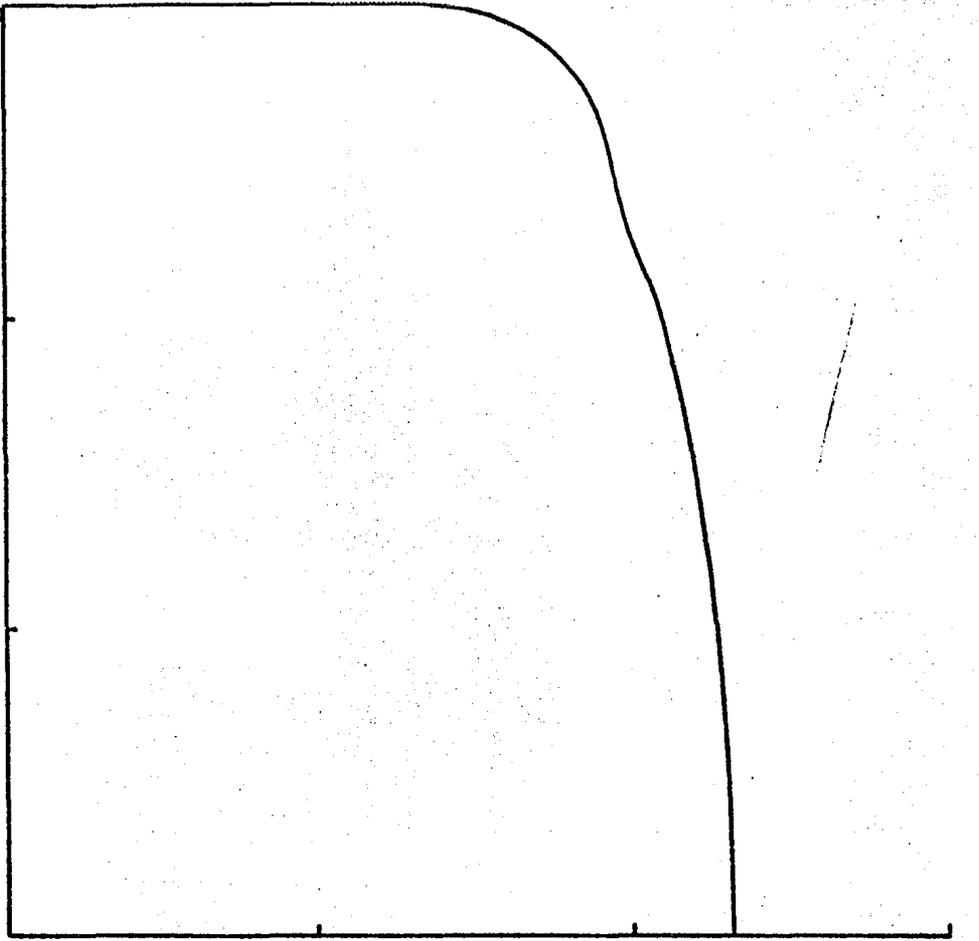


B-22

ZDN 35

ρ_a

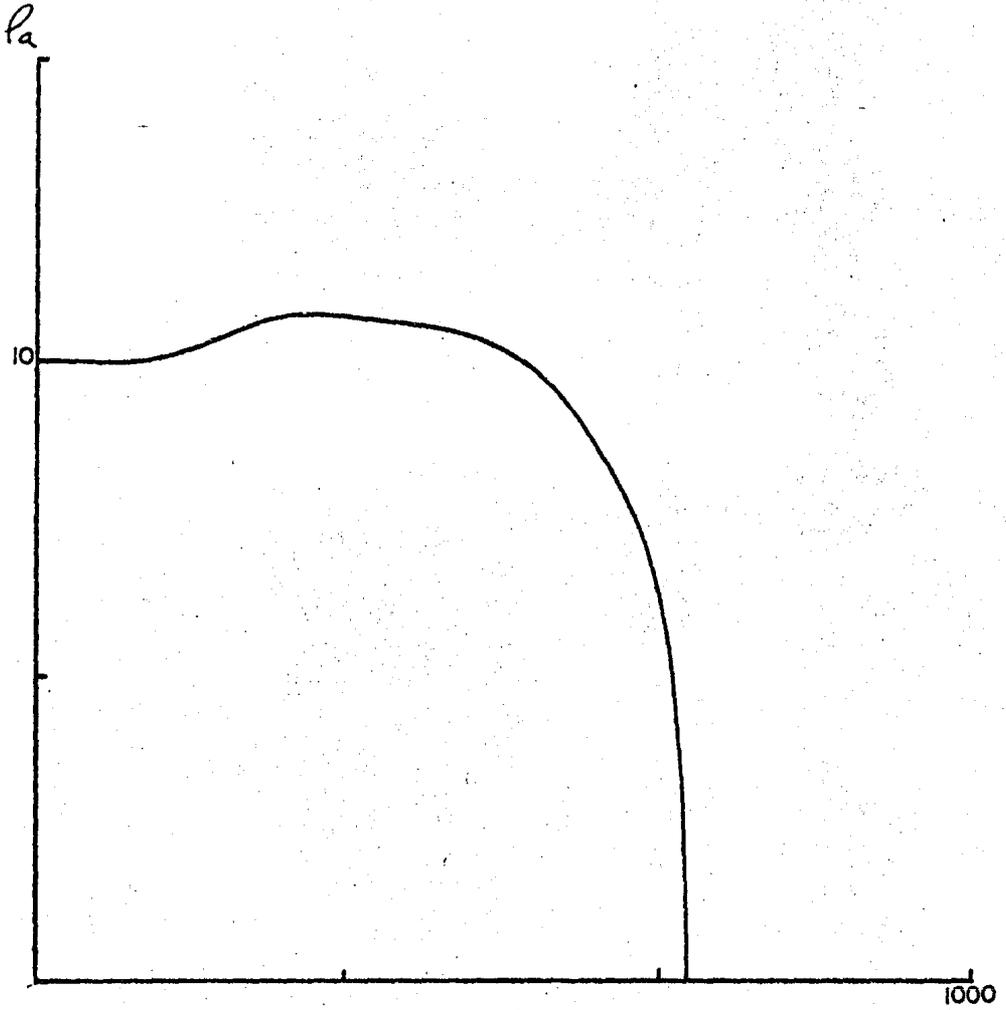
10



1000

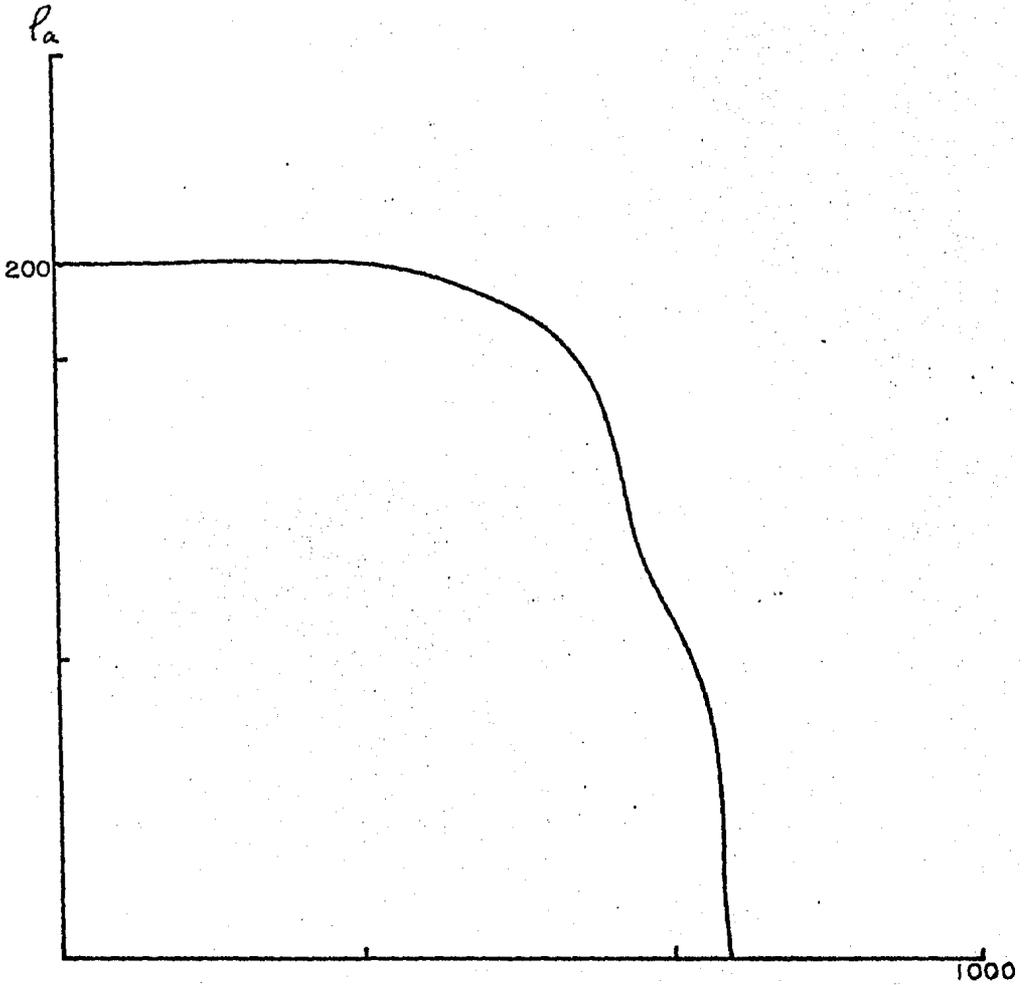
B-23

ZDN 5



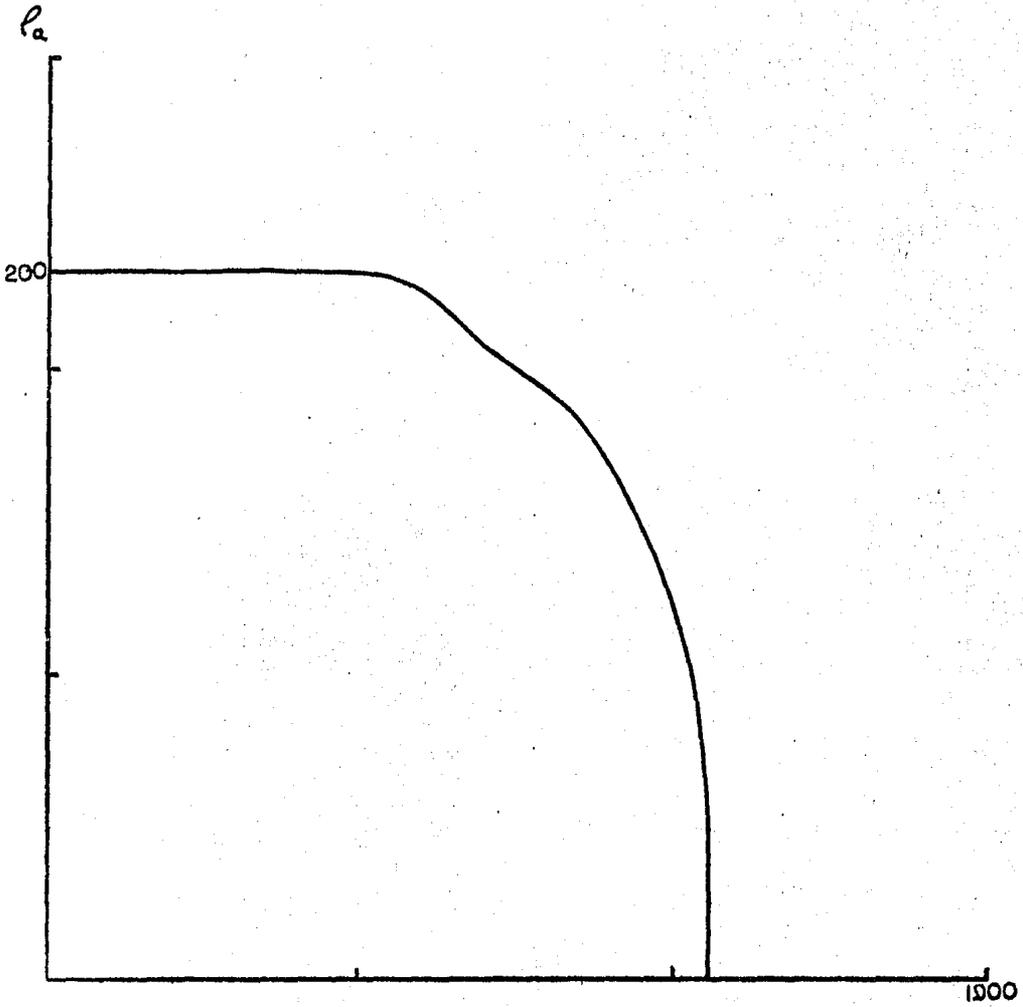
B-24

ZDP 25



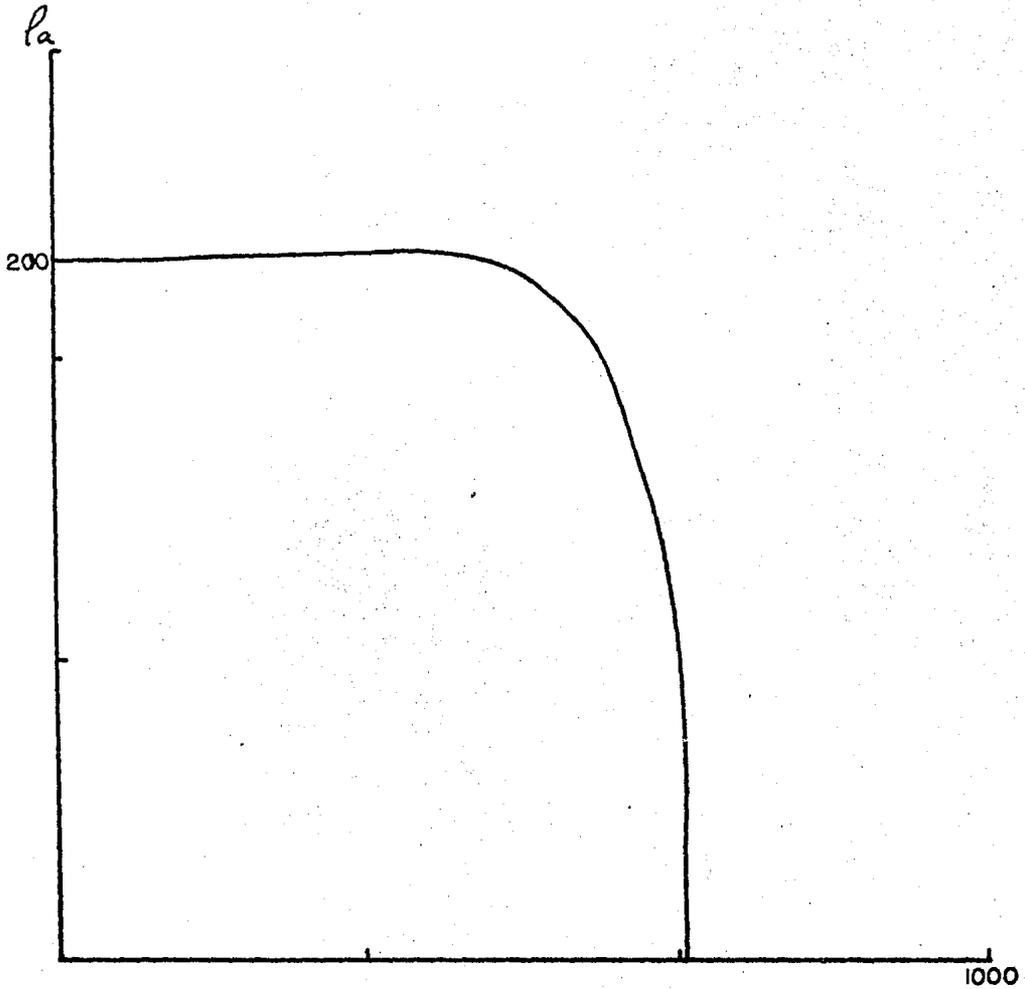
B-25

ZDP 55



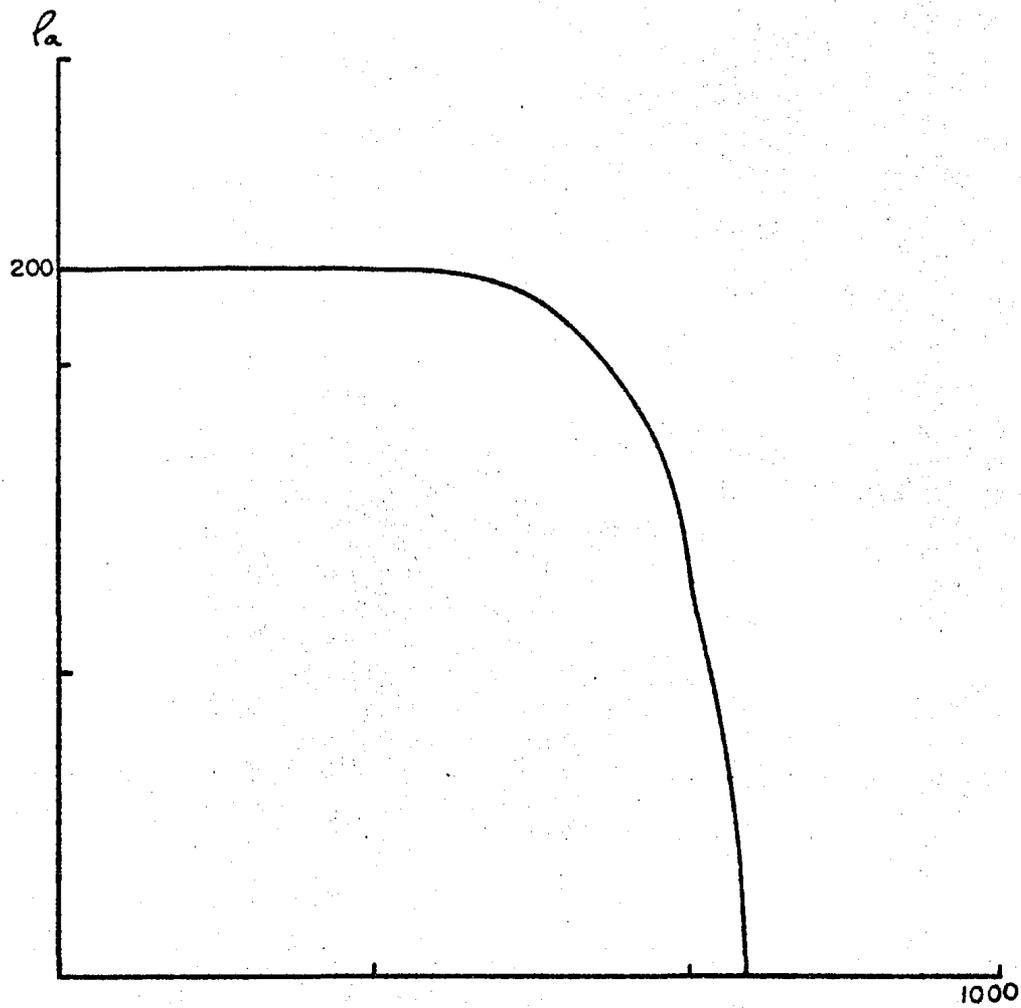
B-26

ZDP 85



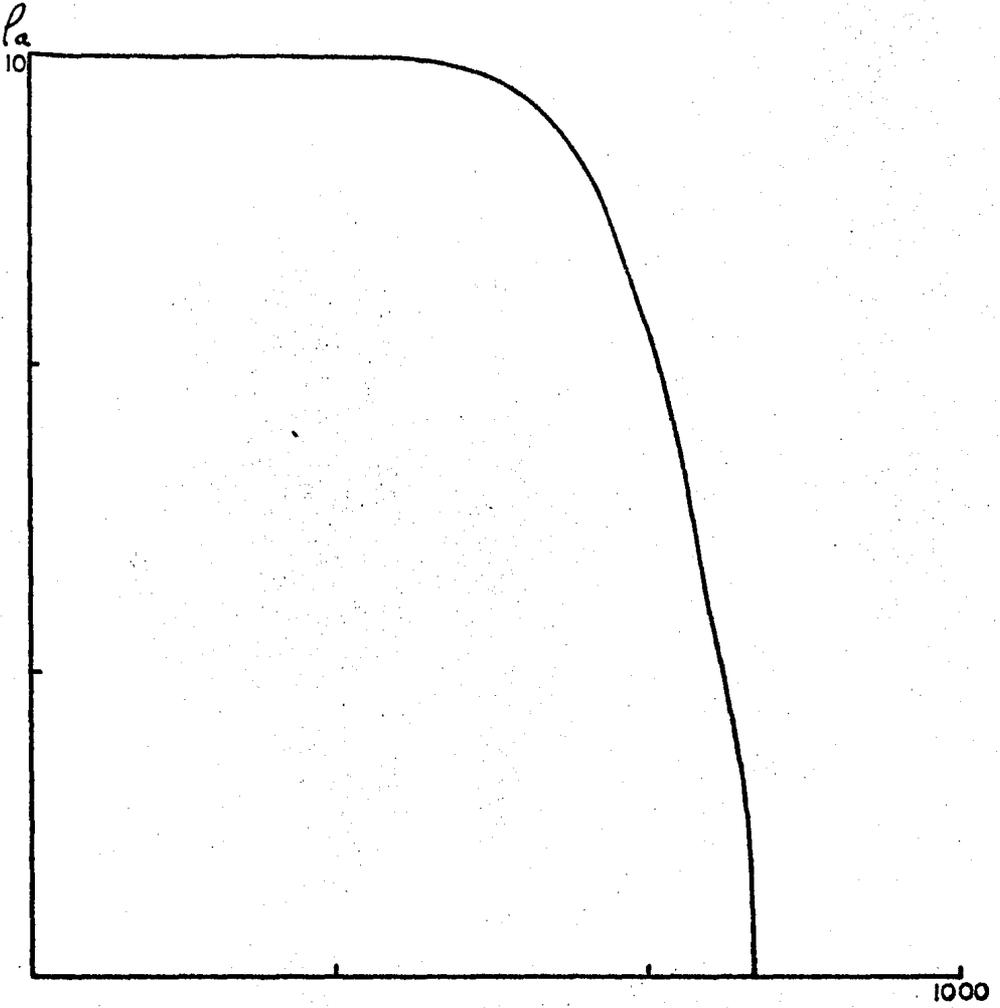
B-27

ZDP. 115



B-28

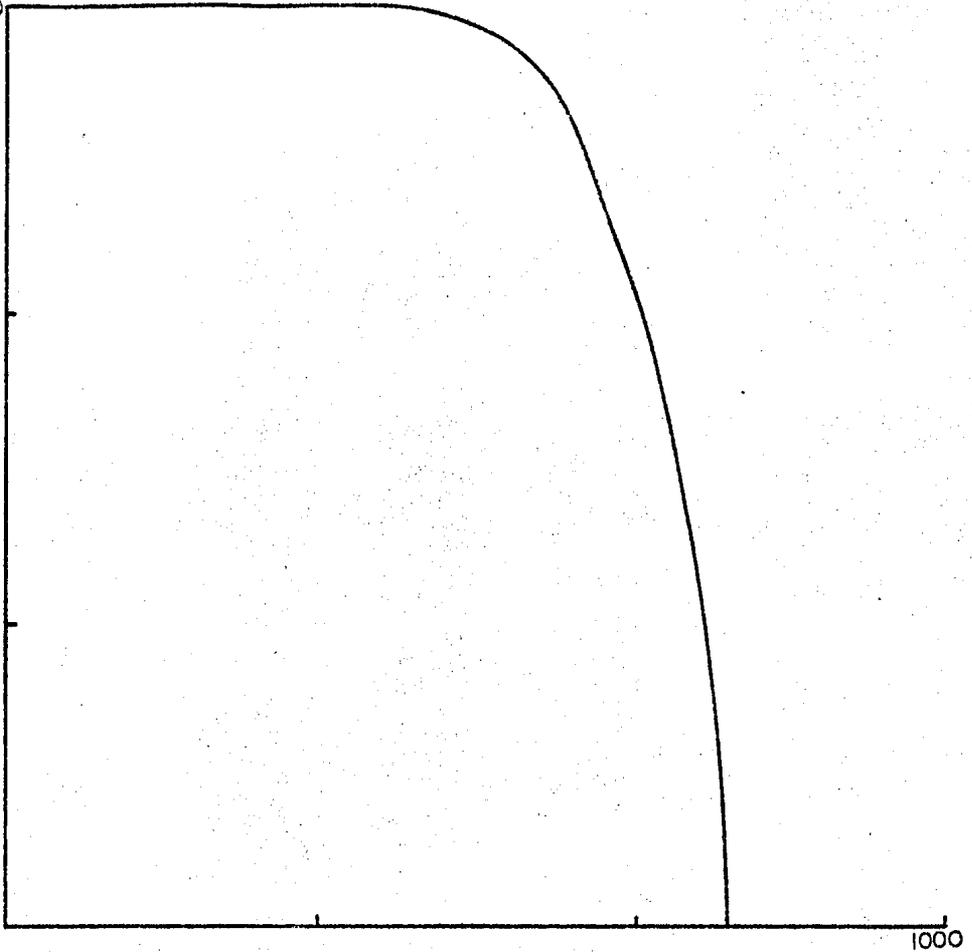
ZDBN 125



B-29

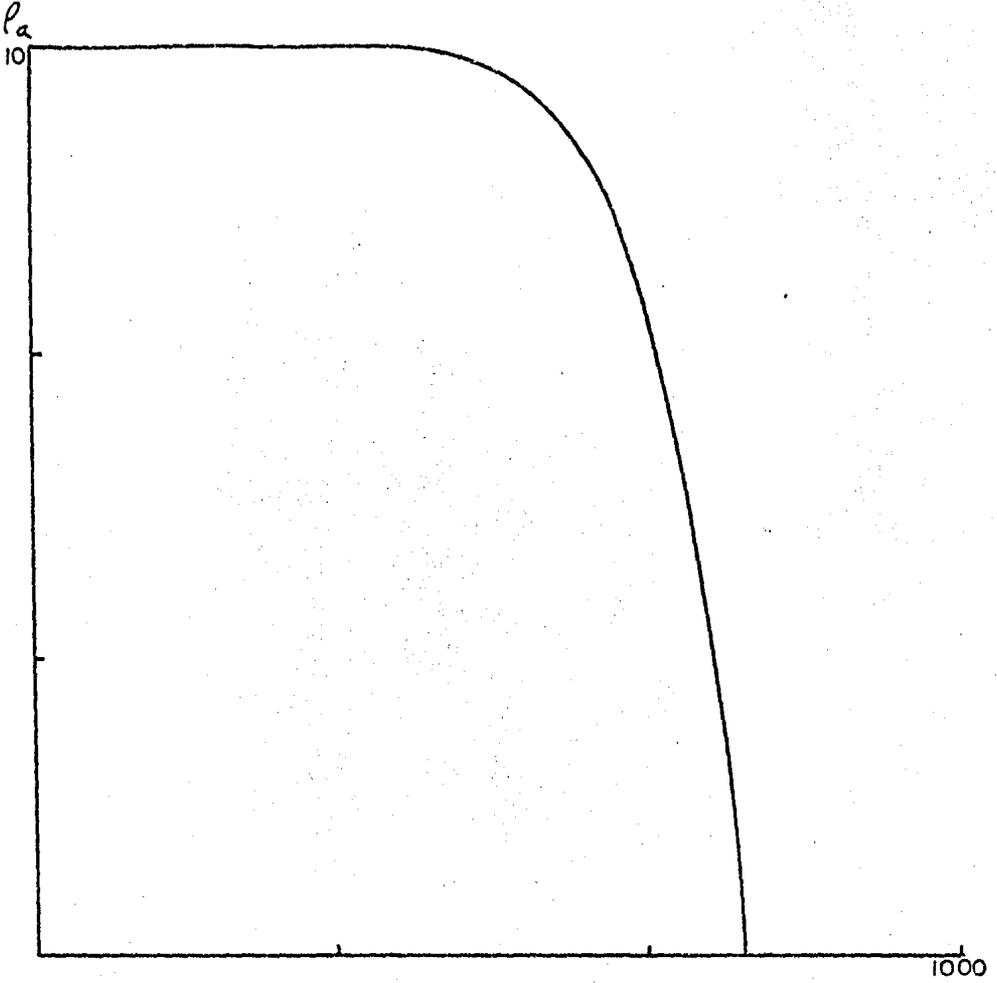
ZDBN 95

ρ_a
10



B-30

ZDBN 65



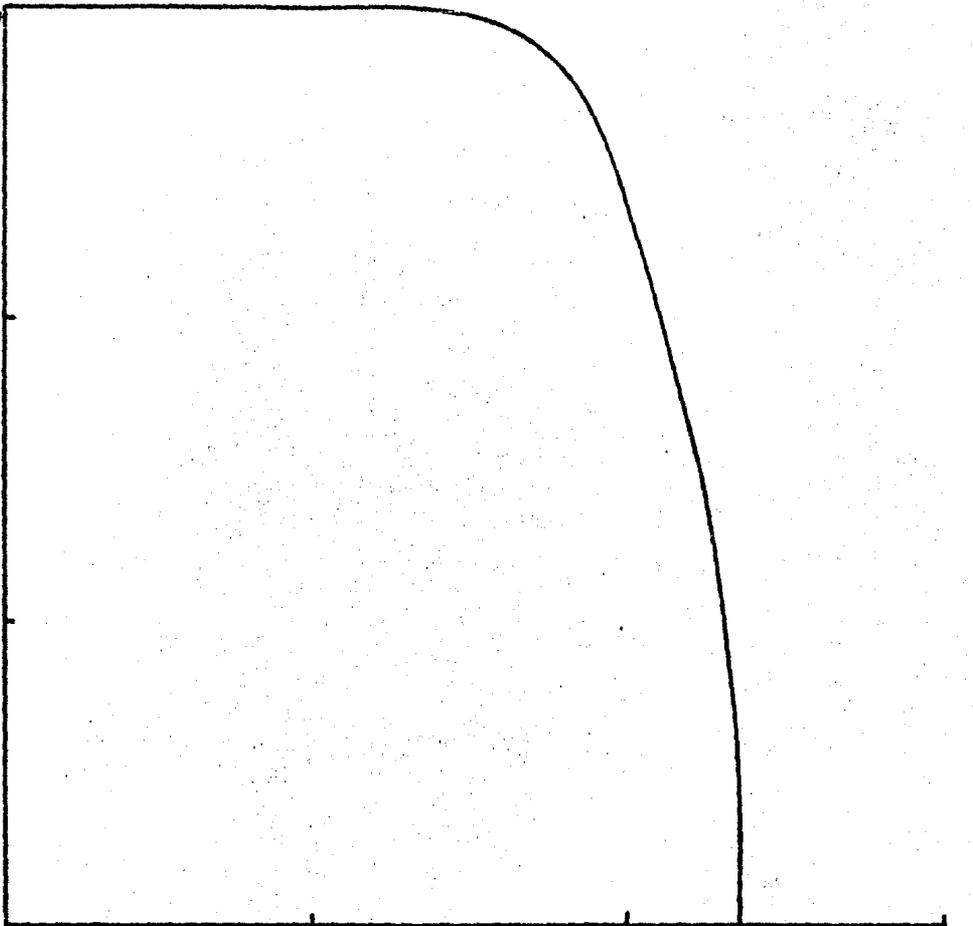
B-31

ZDBN 35

ρ_a

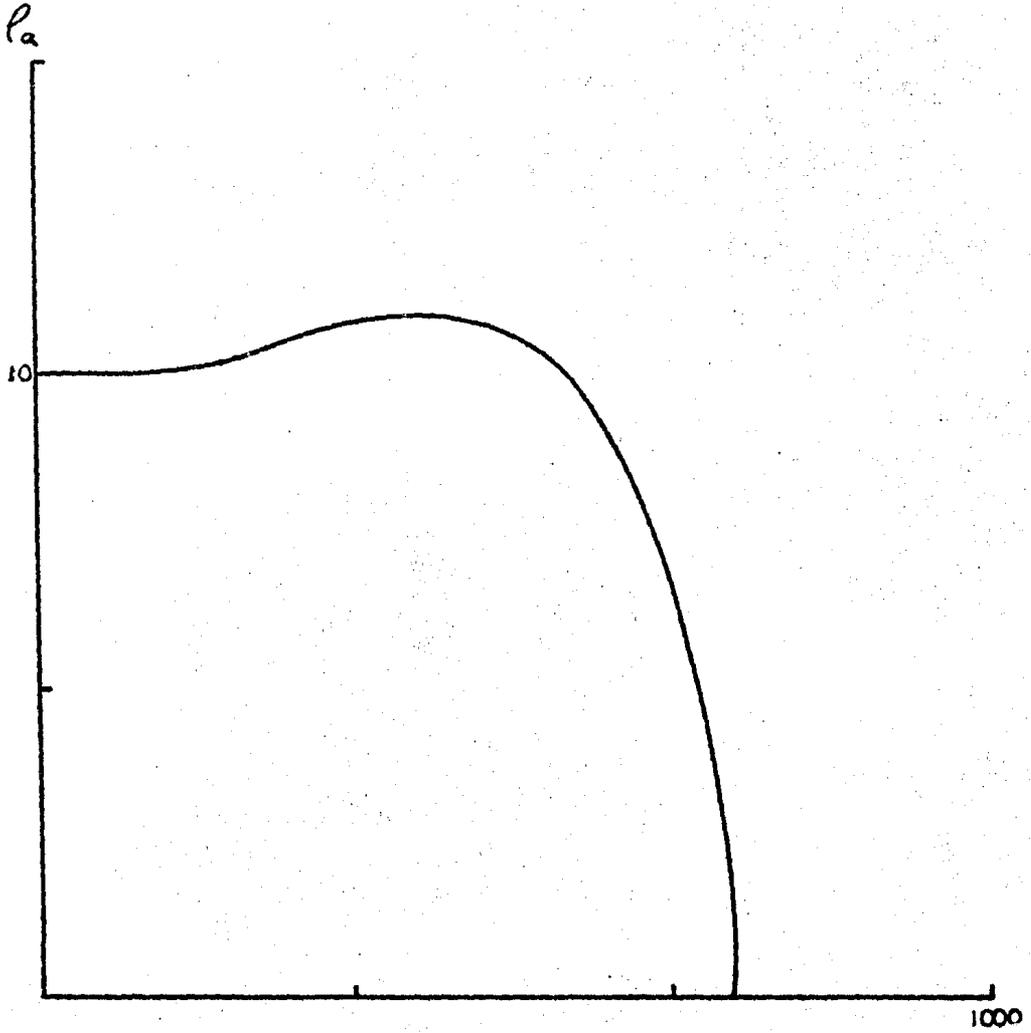
10

1000



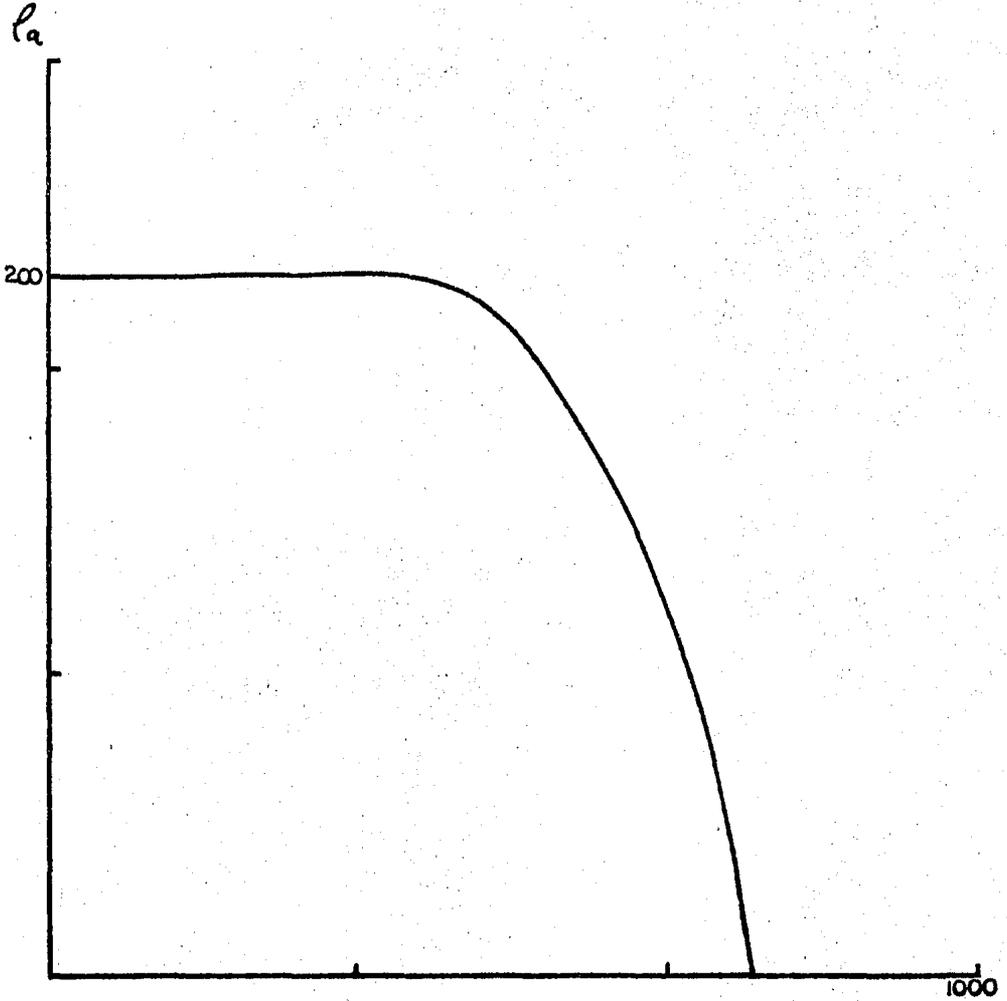
B-32

ZDBN 5



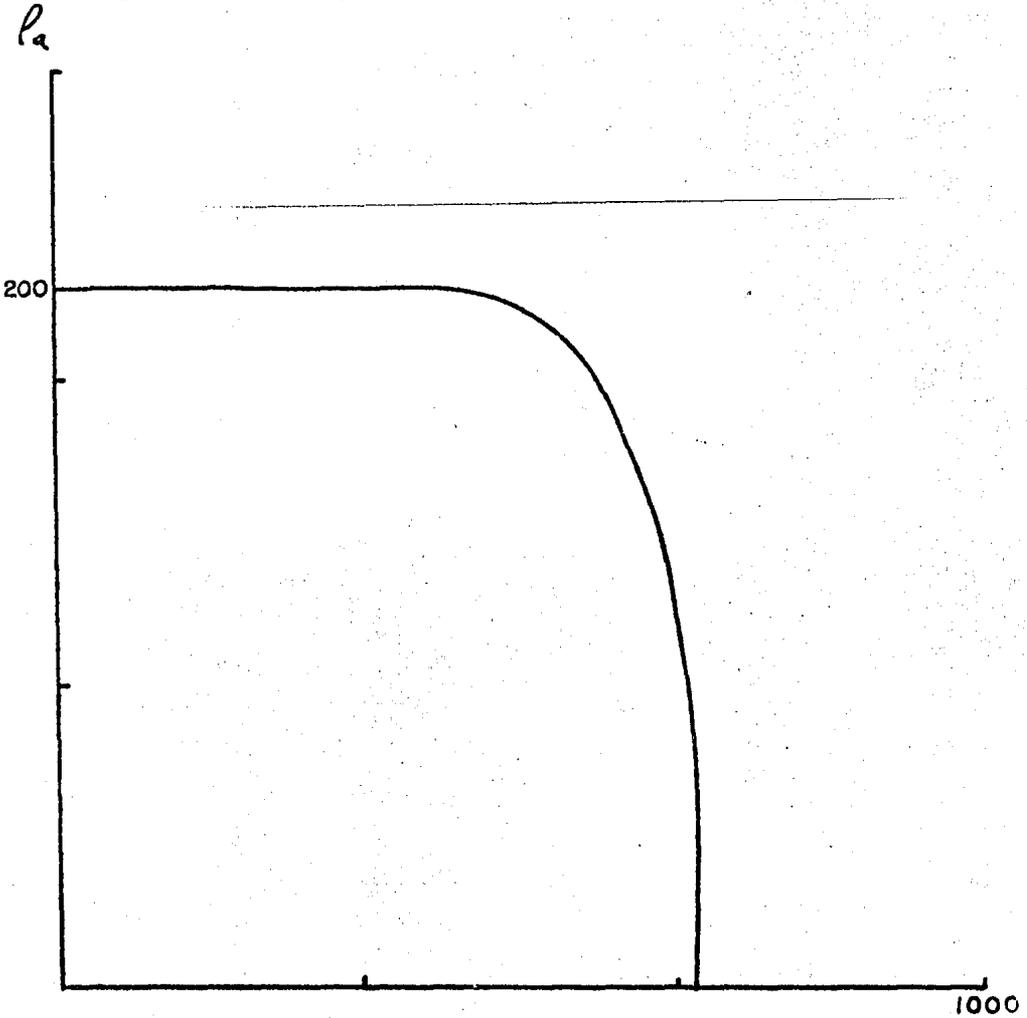
B-33

ZDBP 25



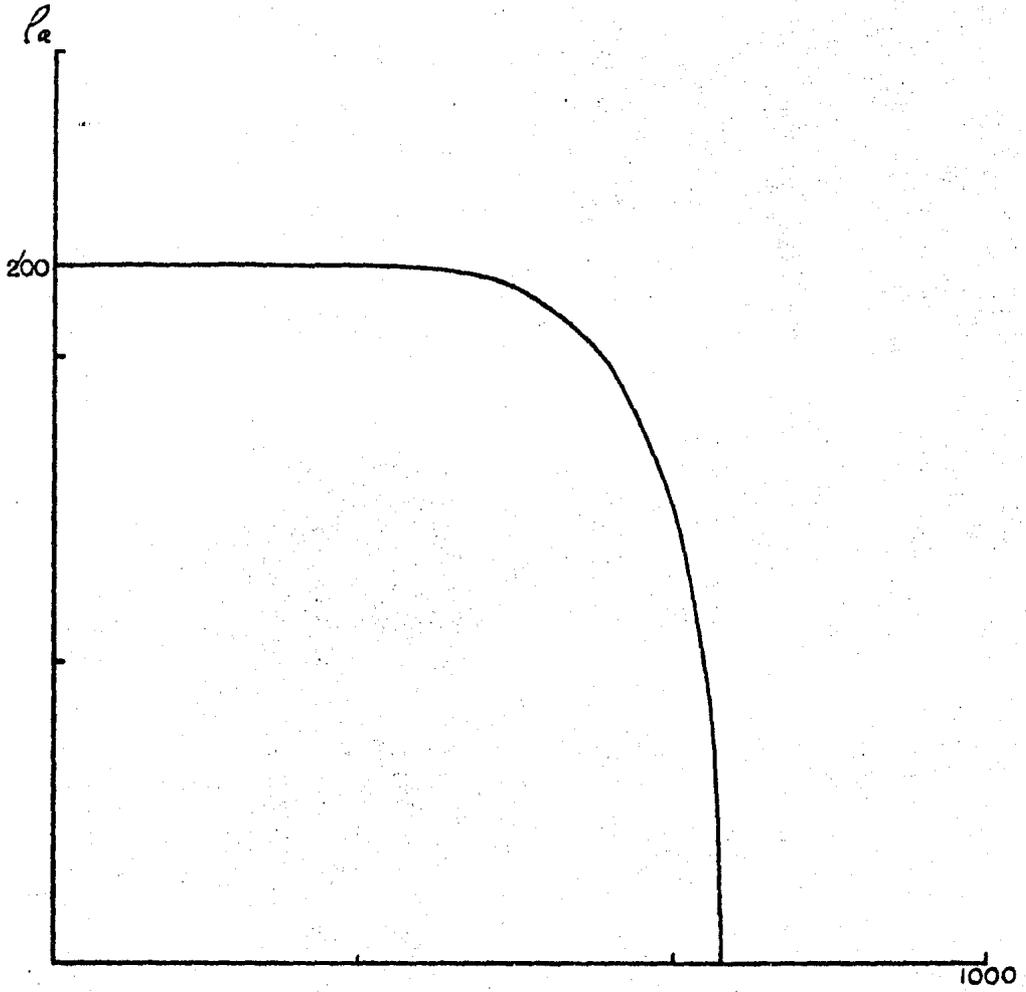
B-34

ZDBP 55



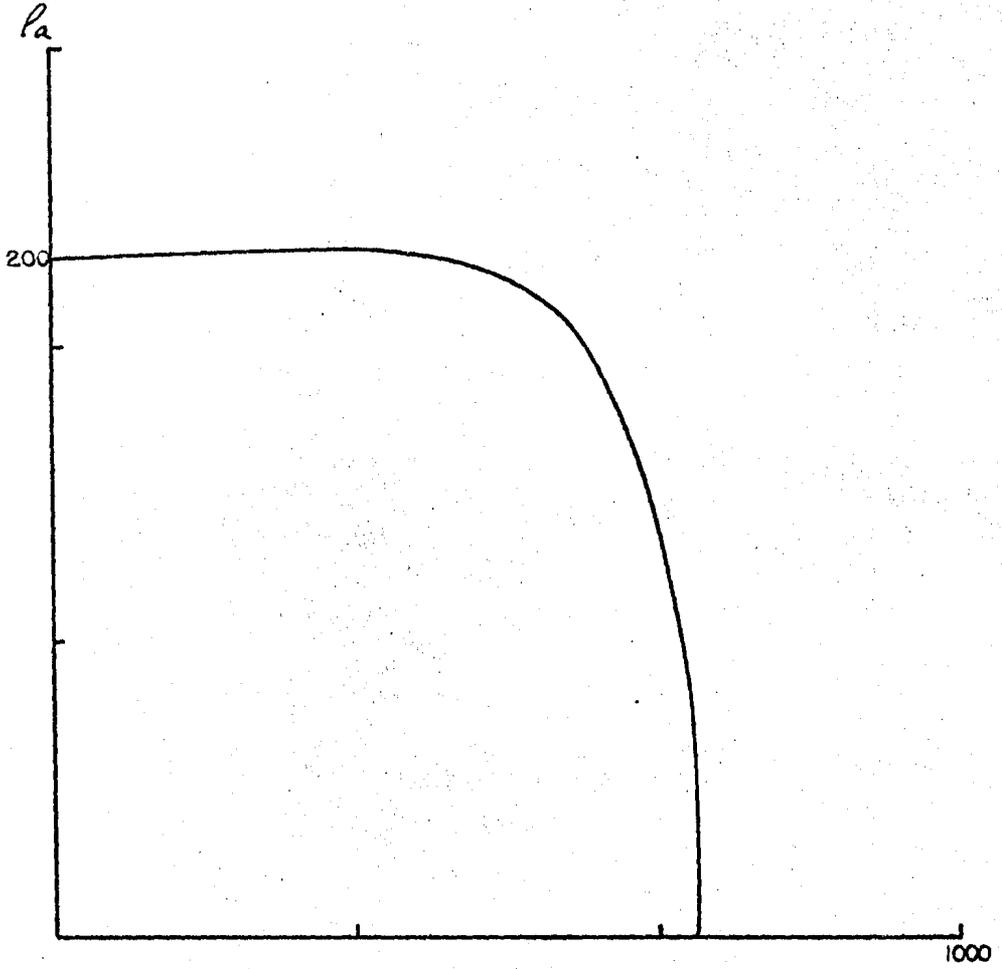
B-35

ZDBP 85



B-36

ZDBP 115



BIBLIOGRAFIA

ALPIN L.M. et all (1966) Dipole methods for measuring -- earth conductivity. Traducción de G. V. Keller. Consultante Bureau. New York.

ANDERSON W.L. (1979) Computer Program Numerical Integration of related Hankel Transforms of orders 0 and 1 by adaptive digital filtering. Geophysics. p. 1287-1305.

GHOSH D.P. (1971) The application of linear filter theory to the direct interpretation of geoelectrical resistivity sounding measurements. Geophysical prosp. v. 19 p. 192-217.

GONZALEZ V.P. (1984) Análisis comparativo de la eficiencia de filtros lineales inversos para el cálculo numérico de curvas de resistividad aparente para medios horizontalmente estratificados. Segundo Seminario de Aplicación de las Computadoras a la Industria Minera.

HABBERJAM G.M. and JACKSON A.A. (1974) Aproximate rules for the composition of aparent resistivity sections. Geophysical prosp. v. 22 p. 393-420.

HABBERJAM G.M. and MOHAMMED S.A.G. (1977) An example of the applications of the rules of composition in resistivity interpretation. Geophysical prosp. v.25 p. 52-60.

KOEFOED O. (1979) Geosounding Principles 1. Elsevier Scientific Publishing Company. New York.

MOONEY H.M. et all (1966) A resistivity computation method for layered earth models. Geophysics v. 31 p. 192-203.

MUNDRY E. (1980) Shore Note. The effect of a finite distance between potential electrodes on Schlumberger resistivity measurements. A simple correction graph. Geophysics v. 45 p. 1872-1875.

MUNDRY E. (1984) Geoelectrical model calculation for two-dimensional resistivity distributions. Geophysical prosp. v. 32 p. 124-131.

ORELLANA E. (1981) Prospección Geoeléctrica en corriente continua. Paraninfo, Madrid.

RIJO et all (1977) Interpretation of apparent resistivity data from Apodi Valley, Rio Grande Do Norte, Brazil Geophysics. v. 42 p. 811-821.

RIJO et all (1980) Topographic effects in resistivity and induced-polarization surveys. Geophysics. v. 45 p. 75-93.

TEJERO A. et all (1984) Interpretación iterativa de sondeos eléctricos. Segunda Reunión Geohidrológica. Academia Mexicana de Ingeniería. Instituto de Geología y Minería de S.L.P.

WATSON (1962) A treatise on the theory of Bessel Function. 2nd. ed. Cambridge. Cambridge United Press.