

TRAZADO DE ISOPLETAS CON COMPUTADORA Y GRAFICADOR. APLICACION A PERFILES DE POLARIZACION INDUCIDA

ALBERTO H. J. CHRISTENSEN
Departamento de Geología y Minas,
Dirección General de Fabricaciones Militares

Se tratan problemas que admiten la representación por isopletas y las técnicas de computación corrientemente usadas en el trazado automático de las curvas. Se discute una aplicación de estas técnicas al cálculo y graficación de perfiles de IP.

Problems that admit isopleth representation and the computer techniques used to draw the charts are discussed. Automatic techniques applied to IP profiles are also discussed.

El trazado de isopletas ha sido objeto de numerosos trabajos de computación durante los últimos años. Mediante computadora, programas preparados a tal fin y aparatos llamados graficadores (**plotters**), es posible obtener las isopletas en forma totalmente automática.

Muchos fenómenos o hechos físicos, de muy diversa naturaleza, pueden ser expresados como funciones uniformes de dos variables, analíticas o no, y, por tanto, ser representados por superficies. La posibilidad de observar directamente, en forma total o parcial, la superficie por representar, constituye un criterio de clasificación de estos fenómenos. Cuando la superficie puede ser vista, como sucede con la topografía de una zona, las isopletas por trazar, en este caso curvas de nivel, deberán respetar los rasgos morfológicos visibles. Esta exigencia se manifiesta mediante la existencia de dos categorías de datos: las ternas de valores que indicarán la pendiente y la tendencia del terreno en cada punto dato, y las series de valores que definirán los rasgos morfológicos.

Si la superficie por representar no puede ser vista directamente —tal es el caso de una discontinuidad geológica sólo conocida por perforaciones o, en forma más abstracta, la superficie que representa la anomalía de un campo— sólo existe una categoría de datos. En consecuencia, la programación para computadora que resuelva el problema será más sencilla con el segundo tipo de fenómeno.

La diferencia se acentúa con la contribución de otras exigencias: mayor precisión y acuerdo del mapa de curvas de nivel con la planimetría. La complejidad resultante incide para que la programación de curvas de nivel requiera equipos más poderosos, tanto en computadora como en graficadores y para que el esfuerzo en programación sea mucho más considerable que el necesario para el segundo tipo de fenómeno. Ejemplo sobresaliente de una programación para superficies topográficas es la elaborada en la Universidad de Stuttgart, llamada DACS (**Digital Automatic Contouring System**), la cual, en el tratamiento preliminar de los datos, utiliza una técnica de precalibración (**least-squares collocation**), que fue originalmente derivada para observaciones gravimétricas (Kraus, 1973).

El tipo más simple de programación ha sido desarrollado con preferencia por organizaciones o empresas vinculadas a exploraciones geológicas. Los procedimientos van desde el más simple, que establece una superficie poliédrica, hasta el más elaborado, como el SIGMA, del Bureau de Recherches Géologiques et Minières, que utiliza análisis armónico en el filtrado de los datos (Bureau de Recherches Géologiques et Minières, 1971).

Un aporte sumamente interesante, siempre relacionado con problemas geológicos, es el publicado por R. Olea, que aplica el **Kriging Universal** para obtener los valores que luego se usan en el trazado de las isopletas (Olea, 1972).

Casi todos los procedimientos de trazado parten del conocimiento de un conjunto de valores distribuidos de manera uniforme. La distribución puede afectar la forma de una grilla de celdas cuadradas, rectangulares o triangulares, siendo la primera la más común, por ser la más sencilla de establecer. Estas grillas o redes se superponen al campo de variación de la función y luego, con interpolaciones por mínimos cuadrados, se calculan los valores de la función que corresponden a los cruces de la grilla. Los recursos para trazar las isopletas a partir de la grilla se tratarán más adelante.

Las ventajas de obtener en forma automática las isopletas en Geología o en

Geofísica pueden ser seriamente discutidas, en el caso de ser dicha obtención el único fin del proceso automatizado, ya que:

- a) El trazado manual de las curvas no insume un gran esfuerzo.
- b) Preparar los datos para la computadora puede ser tarea tediosa, larga o, en ocasiones, complicada.

Tratando de justificar el método automático, algunos autores argumentan que el trazado por computadora es más sistemático y objetivo que el manual. No parece, sin embargo, que este argumento tenga real peso, ya que los métodos de interpolación usados con computadora carecen de justificación alguna, excepto la comparación ulterior de las curvas con las trazadas a mano. Un poco en broma, se podría decir que los métodos automáticos son mejores porque son sistemáticamente infundados. La real justificación es económica, sin embargo, ya que las ventajas se manifiestan cuando el trazado está precedido de otro cálculo, lo que ofrece la oportunidad de amortizar la inversión en preparar los datos a lo largo de un proceso más completo. Este es el caso frecuente en Geofísica, donde el cálculo de correcciones, calibraciones u operaciones más o menos complejas hace imperativo el uso de computadora.

Quizás puede aventurarse otra justificación, esta vez con alguna pretensión técnica. El tratamiento de los datos, para obtener la grilla básica, permite ciertas variaciones: por ejemplo, se puede variar el tamaño o la forma de las celdas o la expresión del peso que refleja la influencia de un punto sobre otro durante la interpolación. De esta manera es posible obtener, para un mismo conjunto de datos, dos o más juegos de curvas. Esta flexibilidad permite juzgar el carácter representativo de las curvas: si una variación razonable, por ejemplo, en los pesos aplicados, produce una alteración de las curvas muy importante, hasta modificar las formas por ellas delineadas, se deberá asignar a cualquier juego de curvas obtenido con esos datos y ese procedimiento, una representatividad pobre del campo objeto del trabajo. En otras palabras, y más sencillamente, permite acotar la importancia que se ha de dar a las curvas.

En algunos casos, la grilla básica debe usarse como dato para otro proceso distinto del tratado. En Geología o en Geofísica se presenta esta circunstancia cuando se desea calcular, con polinomios ortogonales, una función de los datos. Si la distribución de éstos es muy irregular se corre el riesgo de que los polinomios "fantaseen" en los vacíos dejados por los datos. El recurso para salvar el inconveniente consiste en aplicar los polinomios, no a los datos de campo, sino a los de una grilla uniforme establecida a partir de aquéllos.

Los programas de trazado aquí descriptos fueron realizados para la Dirección General de Fabricaciones Militares (FM), con vistas a prestar asistencia en los planes de prospección geológica a cargo de dicha empresa. Pertenecen al tipo más simple, o sea que no deben considerarse muy apropiados para tratar superficies topográficas. En líneas generales, el procedimiento utilizado en ellos figura en varias publicaciones (Cañ et al., 1963; Colc et al., 1967), y consiste, brevemente, en hacer pasar planos por los puntos datos, planos cuyos cosenos directores son determinados por los puntos vecinos, mediante un ajuste por mínimos cuadrados. La grilla a la que antes se hizo referencia se superpone sobre los puntos datos y los planos determinados fijan, para las cuatro esquinas de las celdas que resultan ocupadas por un punto dato, los primeros valores interpolados de la función por representar. El resto de los esquineros, es decir, los

pertenecientes a celdas no ocupadas, son evaluados por medio de un procedimiento algo más complicado, ya que cada cruce lleno en vecindad de uno vacío manifiesta su influencia sobre éste en distinta forma, dependiendo la diferencia de tratamiento de la distancia entre punto lleno y punto vacío. Terminada la evaluación de todos los esquineros, se obtiene la grilla completa. Con pequeñas modificaciones y usando más memoria de computadora, es posible tratar también funciones uniformes de tres variables, con lo que podrían resolverse simultáneamente problemas tales como la cubicación de un depósito de mineral o la obtención de un modelo termodinámico.

Con la grilla completa se puede ya proceder a trazar las isopleas. Pero antes la computadora debe recibir indicación de los valores de las isopleas por trazar. Estas indicaciones pueden darse en forma de un valor base y un incremento, o de una función y un incremento. El último caso puede originar, por ejemplo, una distribución logarítmica de las isopleas.

Con los valores de cada isoplea que se desea representar el programa interpola entre los cuatro esquineros de cada celda, para hallar las coordenadas de la sucesión de puntos que constituirá la isoplea. Debido a los ajustes e interpolaciones sufridos, los cuatro esquineros de una celda no resultan, en general, situados sobre un mismo plano, por lo cual las isopleas se calculan como desarrolladas sobre superficies piramidales, cuyos vértices son los centros de cada celda, con valor igual al promedio de las cuatro esquinas (Ver Figura 1). Tras haber ensayado todos los valores posibles dentro de cada celda y todas las celdas dentro de cada columna, los resultados quedan agrupados como una sucesión de quebradas.

El graficador es un aparato que puede desplazar un lápiz u otro elemento trazador sobre un papel, obedeciendo las órdenes que una computadora le transmite directamente o a través de un equipo intermediario. Con un graficador, las columnas de quebradas se dibujan una tras otra y, dentro de la precisión del equipo, coinciden en los límites con las quebradas de las columnas vecinas. El aspecto final de las isopleas no es tan elegante como el obtenido por un dibujante, pero se aproxima bastante cuando el tamaño de las celdas se disminuye lo suficiente. La disminución, sin embargo, se traduce en un aumento muy considerable del tiempo de computadora: doblar la cantidad de celdas por lado, es decir, reducir en un medio el tamaño de las mismas, significa cuadruplicar el tiempo necesario para establecer la grilla.

La mencionada disposición de datos para ser graficados es poco eficiente. Sucede que el graficador debe levantar la pluma y volverla a bajar cuando termina con uno de los pequeños tramos de isoplea y se dispone a iniciar otro. Esta alteración del estado de la pluma es costoso en tiempo. Por ello, el programa cuenta con una opción para construir una isoplea completa a partir de los pequeños tramos contenidos en una celda. Este recurso permite asimismo ejercer otras dos opciones que, sin embargo, aún no están funcionando en la programación: la interpolación de cúbicas sobre cada quebrada, llamadas **splines** (Adams, 1974) y un rotulado inteligente de cada isoplea.

Estas dos opciones, empero, también consumen tiempo de computadora, a cambio del cual sólo se obtendrá el dudoso beneficio de un aspecto más agradable y terminado de las curvas, en un producto que tiene escasa divulgación. Por esta razón, la mayoría de los programas de trazado para Geofísica no

recurren a las cúbicas y se conforman con las quebradas. Resta esperar que los geofísicos también se conformen con ellas.

Los programas trazadores de isopletas fueron incorporados a otro grupo de programas, que calcula y grafica perfiles de polarización inducida (IP).

El método practicado en Fabricaciones Militares es una variante del de frecuencia variable (**frequency domain**), en el cual las observaciones se basan sobre una geometría llamada dipolo-dipolo. El proceso se inicia cuando se reciben en gabinete los formularios completados por el geofísico en campaña. Estos formularios han sido diseñados **ad-hoc** y tienen columnas numeradas para facilitar la tarea de perforar las tarjetas Hollerith (Fig. 3), que son el medio elegido para introducir los datos en la computadora. El procesamiento con ésta no exige, pues, trabajo adicional alguno del geofísico. Cada perfil es numerado y se anota también, en las primeras columnas, la fecha y la hora de la observación, para poder aplicar las calibraciones correspondientes a cada período de trabajo ininterrumpido.

El trabajo de gabinete comprende cálculo y dibujo. El cálculo es muy simple y la ventaja de usar computación no es neta si no se consideran los beneficios marginales, tales como la obtención de listados claros y libres de errores groseros, impresión de resúmenes, realización de ajustes, el cálculo del acoplamiento teórico y, sobre todo, la posibilidad de almacenar los datos y resultados en una cinta magnética, junto con todos los otros medidos en una misma área. Esta última facilidad permite dibujar los perfiles repetidas veces, variando detalles tales como la escala, o formar un archivo integrado con el resto de la Geofísica del lugar.

Los programas de cálculo fueron preparados siguiendo las indicaciones del Ing. Gerd Hoermannsdoerfer, geofísico alemán que colaboró durante varios meses con los geofísicos de FM. La ubicación de los puntos de referencia del perfil (Fig. 4) se fija de acuerdo con los estudios de la institución germana a la que pertenece dicho geofísico.

Respecto de estos puntos de referencia corresponde destacar que el perfil, tal como se lo grafica, no debe entenderse como una verdadera sección recta de las propiedades eléctricas del terreno subyacente, pues cada valor obtenido es una medida de todo el conjunto terreno-electrodos y no tiene por qué ser igual a la medida de la impedancia del material en el punto donde precisamente se lo anota. Todos los autores insisten en que la graficación del perfil IP adoptada es sólo una convención cómoda para sistematizar, interpretar y comparar resultados. No obstante, el tipo de graficación adoptado participa, en cierta medida, de las cualidades de una verdadera sección recta, ya que los valores obtenidos para separaciones de dipolo grandes, y que corresponden a penetraciones más profundas, se ubican más abajo que los que se obtienen con separaciones más pequeñas. Cabe aquí citar a Forwood y Roberts (1963): "... el graficado de los resultados puede, sin embargo, ser frecuentemente contemplado como una carta o sección recta de resistividades y factor metálico, y pueden hacerse evaluaciones razonables en profundidad, posición y tamaño de la zona mineralizada. En la práctica, mineralizaciones causantes de anomalías de IP han sido usualmente localizadas en la primera perforación".

El procedimiento en campaña se inicia con el estaqueo del perfil. Las estacas se colocan a intervalos constantes, siendo este intervalo la "longitud de

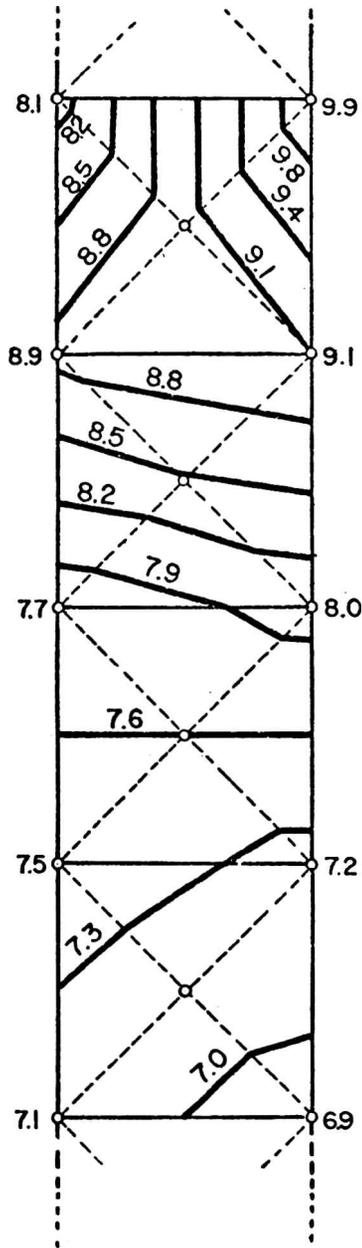


Figura 1: Isopletas resultantes de la interpolación en un sector de una columna de celdas cuadradas.

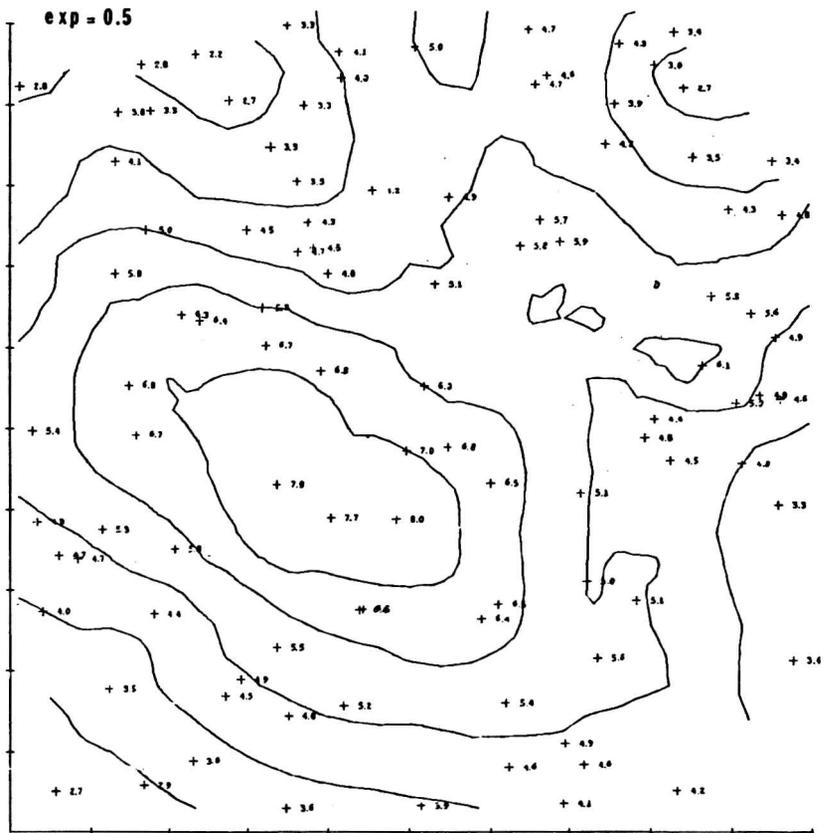


Figura 2: Isopletas derivadas del conjunto de 100 puntos elegidos al azar y publicados por la Universidad de Kansas. Obtenidas con un **plotter** IBM 1627 en línea con una computadora IBM/360 - mod. 40. Tiempo total de proceso: 20 minutos. Tamaño original: 30 x 30 cm. La grilla resultó de 26 celdas por lado.

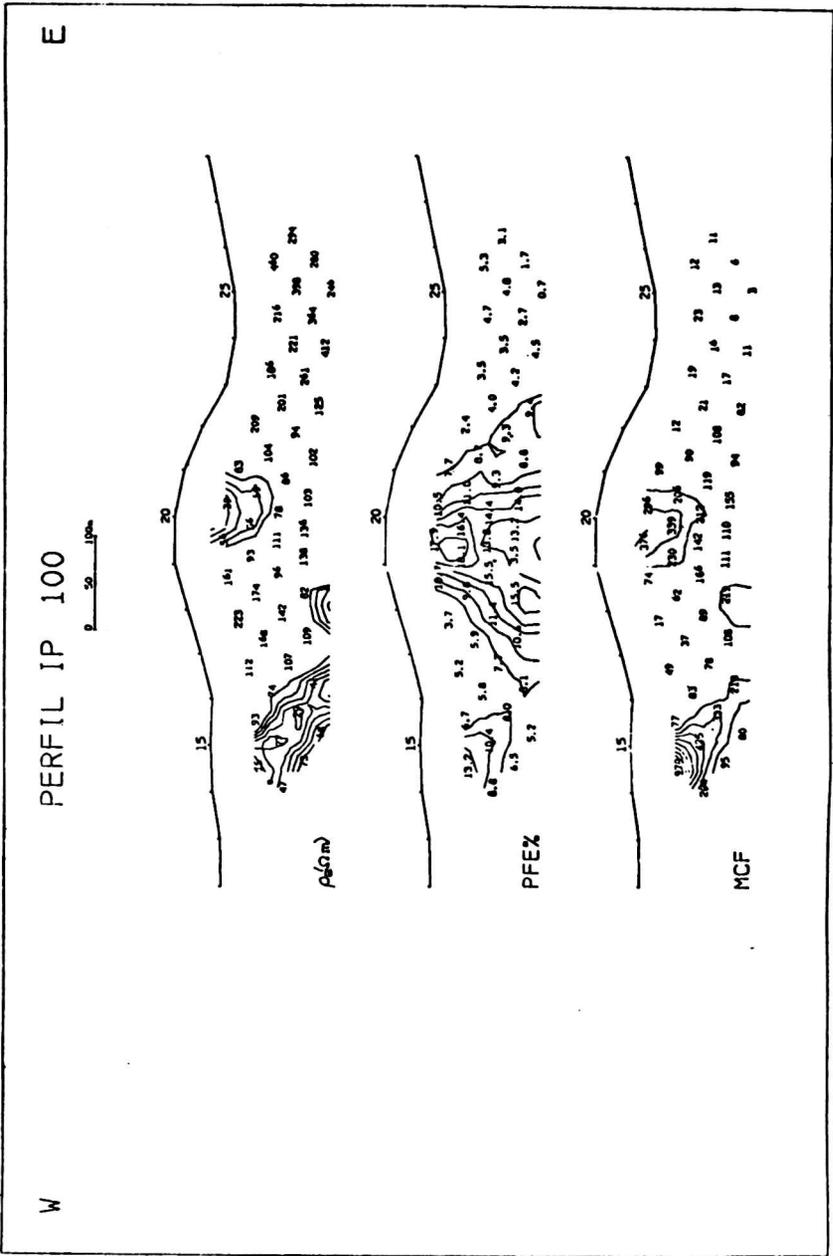


Figura 5: Perfil trazado con un plotter 1627. Tamaño original: 60 x 36 cm.

dipolo" adoptada para el perfil. La medición de resistividad se efectúa inyectando corriente por un dipolo y midiendo la diferencia de potencial en otro. Mediciones a dos distintas frecuencias, una muy baja, casi CC, cuya diferencia de impedancia acusará la polarización del medio, se realizan al mismo tiempo.

Las fórmulas usadas en el programa de cálculo son las siguientes:

$$\rho_{a(H)} = K \frac{U}{I} \quad K = \pi \cdot L \cdot n \cdot (n^2 - 1)$$

$$\rho_{a(U)} = \rho_{a(H)} + \frac{\rho_{a(H)} \cdot \text{PFE} \%}{100}$$

$$\text{PFE} \% = RD_L - RD_H - R_{CAL}$$

$$\text{MCF} = \frac{\text{PFE} \% \cdot 10^3}{\rho_{a(H)}}$$

Además de estas expresiones, el programa utiliza otra para calcular el acoplamiento teórico, derivada por **Geoscience**, cuyo resultado se imprime y puede servir para comparar con los valores observados.

Los valores calculados y corregidos de resistividad, PFE y MCF se anotan en puntos, llamados en la literatura "puntos de referencia", determinados según el esquema ilustrado en la Figura 4. El programa calcula las coordenadas de cada punto de referencia como una función de la ubicación de los dipolos y de las áreas que quedan por abajo o por arriba de la línea que une los puntos medios de ambos.

Algunas facilidades que brindan los programas se citan a continuación:

- a) Trazado de las isonómalas de las tres variables, de acuerdo con varias posibilidades en cuanto a valores por representar (Ver Fig. 5).
- b) Trazado de todos los perfiles de un área con los puntos a distancia adecuada del margen izquierdo, en forma tal que todos queden en posición propia para ser superpuestos y estudiados.
- c) Posibilidad de almacenar en cinta magnética los resultados de todos los perfiles de un área, para poder luego graficar las anomalías en proyección horizontal.

El programa de cálculo necesita unos dos minutos de computadora IBM/360-40 para procesar e imprimir un perfil con 150 observaciones. El programa de trazado insume de tres a cuatro veces más tiempo, debido a que el graficador usado, un IBM 1627, es un periférico sumamente lento. Además, es de poca resolución, característica a la que deben su apariencia "temblorosa" los trazos obtenidos con él. todos los programas fueron escritos en el lenguaje FORTRAN IV.

BIBLIOGRAFIA

- Adams, J. A., 1974: Cubic spline curve fitting with controlled end conditions. Computer Aided Design, v. 6, n. 1.*
- Bureau de Recherches Géologiques et Minières, 1971: Systeme d'interprétation gravimétrique ou magnétique assisté par ordinateur.*
- Cain, J. C. y Neilon, J. R., 1963: Automatic mapping of the geomagnetic field Journal of Geophysical Research. v. 68, n. 16.*
- Cole, A. J., Jordan, C. y Merriam, D. F., 1967: FORTRAN II Program for progressive linear fit of surfaces on a quadratic base using an IBM 1620 computer. The University of Kansas.*
- Forwood, P. S. y Roberts, J. B., 1963: The application of induced polarization in the geophysical exploration for metals in Australia. The search for disseminated sulfides.*
- Hallof, P. G., 1957: On the interpretation of resistivity and IP results. Tesis Doctoral. M.I.T. Depto. de Geología y Geofísica.*
- Kraus, K., 1973: A general digital terrain model. Theory and applications. Extracto de Numerische Photogrammetrie. Wichmann Verlag. Karlsruhe.*
- McIntyre, D. B., Pollard, D. D. y Smith, R., 1968: Computer programs for automatic Contouring. The University of Kansas.*
- Olea, R., 1972: Application of regionalized variable theory to automatic contouring. Tesis Doctoral. The University of Kansas.*
- Simpson, S. S., 1954: Least squares polynomial fitting to gravitational data and density plotting by digital computers. Geophysics. v. 19, n. 2.*
- Sumi, F., 1959: Geophysical exploration in mining by induced polarization. Geophysical Prospecting, v. 7.*