

## **TEMA 8.- APLICACIONES GEOLÓGICO-MINERAS.**

### **8.1.- Introducción.**

En este tema se describen las técnicas topográficas aplicables para la determinación de la dirección, el buzamiento y la potencia, parámetros que definen un estrato o una formación estratiforme. El conocimiento de la geometría del cuerpo mineralizado es fundamental para su correcta ubicación en el espacio y para su cubicación, tanto en los trabajos de investigación minera como en los de diseño y realización de labores a cielo abierto o por interior.

Se define un *estrato* como un nivel simple de litología homogénea y gradacional, depositado de forma paralela a la inclinación original de la formación. Está separado de los estratos adyacentes por superficies de erosión o por cambios abruptos en el carácter y presenta una configuración tabular.

Denominamos *formación estratiforme* a una estructura geológica que sin ser un estrato, puesto que no comparte su misma génesis, sí que presenta una configuración tabular similar a la de éste.

Las superficies que los limitan se denominan *techo* y *muro*. En el caso de un estrato definiremos como *techo* a la superficie que separa la formación objeto de estudio de materiales más modernos. De igual forma, definiremos como *muro* a la superficie que separa el estrato de materiales más antiguos.

En el caso de formaciones estratiformes, la superficie de la formación cortada en primer lugar por un hipotético sondeo vertical será el *techo*. La formación inferior será el *muro*.

A partir de este momento, hablaremos indistintamente de estrato o de formación estratiforme, ya que los parámetros que vamos a determinar son puramente geométricos y no dependen de la génesis de la formación.

#### **8.1.1.- Conceptos básicos.**

En extensiones cortas podemos asimilar tanto el *techo* como el *muro* de un estrato a un plano. La *dirección* de dicha formación será la recta intersección del plano de *techo* o de *muro* con un plano horizontal (figura 8.1). Representaremos este parámetro mediante el acimut correspondiente a dicha recta. Será igualmente válido el acimut dado en cualquiera de los dos sentidos de la recta.

Se define como *buzamiento* (buzamiento real) de un estrato el ángulo formado por la línea de máxima pendiente contenida en el plano del estrato y su proyección sobre un plano horizontal (figura 8.1). Deberá darse también la orientación de la línea de máxima pendiente en su sentido descendente, materializada por el acimut de su proyección horizontal.

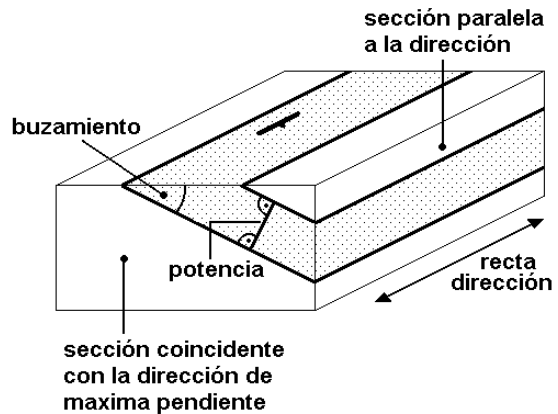


Fig. 8.1. Dirección, buzamiento y potencia

Puesto que la línea de máxima pendiente es perpendicular a la dirección del estrato, la diferencia entre ambos acimutes será de  $\pm \pi/2$ .

Definiremos como *buzamiento aparente* el ángulo formado por una línea contenida en el plano del estrato, y distinta de la de máxima pendiente, y su proyección sobre un plano horizontal. El buzamiento aparente será siempre menor que el buzamiento real.

La *potencia* (potencia real) de un estrato será la distancia que separa los planos de techo y de muro, medida perpendicularmente a éstos. Cualquier otra medición de esta distancia, distinta de la perpendicular entre techo y muro, se denominará *potencia aparente* y será siempre mayor que la potencia real.

Denominamos *longitud* de un estrato a la distancia, medida según la recta dirección, entre los límites del mismo.

## 8.2.- Dirección y buzamiento.

Estos dos parámetros suelen medirse al mismo tiempo y con operaciones consecutivas, debido a la relación geométrica que existe entre ellos. Antes de pasar a su determinación vamos a ver cómo se deducen los buzamientos reales a partir de los aparentes y viceversa. Este proceso es importante, tanto para el cálculo directo como por formar parte de procesos generales de cálculo de buzamientos a partir de las coordenadas conocidas de varios puntos del estrato.

Sea  $\beta$  el ángulo de buzamiento real,  $\alpha$  el aparente e  $\hat{I}$  el ángulo comprendido entre las direcciones de ambos buzamientos. En el caso de la figura será:

$$\hat{I} = \theta_{\text{BUZAMIENTO APARENTE}} - \theta_{\text{BUZAMIENTO REAL}}$$

Con el fin de facilitar el proceso de cálculo, vamos a considerar que los puntos  $D$  y  $C$  de la figura 8.2 tienen la misma altitud.  $D'$  y  $C'$  son sus proyecciones sobre un plano horizontal. Para obtener la expresión que relaciona los tres valores angulares anteriores hacemos:

$$\text{tg } \beta = \frac{DD'}{OD'}$$

$$\text{tg } \alpha = \frac{CC'}{OC'}$$

$$\cos \hat{I} = \frac{OD'}{OC'}$$

y como  $DD' = CC'$

$$\text{tg } \beta = \frac{DD'}{OD'} = \frac{OC' \text{ tg } \alpha}{OC' \cos \hat{I}} = \frac{\text{tg } \alpha}{\cos \hat{I}}$$

Podemos proceder de forma semejante con una disposición diferente de los puntos, como la de la figura 8.3, para llegar a la misma expresión que relaciona los buzamientos real y aparente y el ángulo comprendido entre las direcciones de ambos buzamientos.

A continuación vamos a estudiar los distintos casos que se pueden presentar en el cálculo de dirección y buzamiento, atendiendo tanto a los instrumentos que permiten medirlos directamente como al procedimiento de obtención a partir de coordenadas de puntos, tomados todos en el techo o en el muro del estrato.

### 8.2.1.- Con brújula de geólogo.

Las brújulas empleadas para aplicaciones geológicas tienen las siguientes características:

- Pueden ser de limbo fijo o de limbo móvil.
- Están dotadas de un nivel de burbuja, normalmente esférico.
- Incorporan distintos sistemas para lanzar visuales.
- Incorporan un clinómetro para medir inclinaciones.

Son procedimientos que aportan precisiones inferiores a las de las técnicas topográficas, pero que en muchos casos son suficientes.

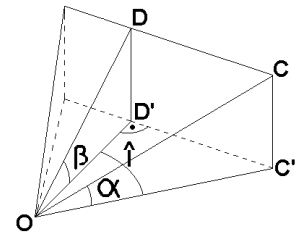


Fig. 8.2. Buzamientos real y aparente (1)

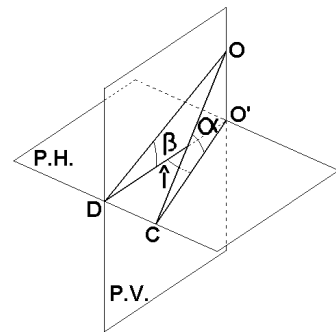


Fig. 8.3. Buzamientos real y aparente (2)

Para emplear una brújula de geólogo debemos determinar sobre el estrato la línea de máxima pendiente o una línea horizontal contenida en él. Ambas líneas son perpendiculares entre sí, por lo que determinada una se conoce también la otra. Una línea horizontal se puede determinar con un nivel de burbuja. La línea de máxima pendiente se puede materializar dejando caer una pequeña cantidad de agua y si ésta describe una línea sinuosa, se fijará como línea de máxima pendiente la línea eje simétrico del camino marcado por el agua.

Una vez determinadas estas direcciones se coloca el único lateral recto de la brújula paralelo a la línea horizontal y se mide la dirección. A continuación se coloca este lateral paralelo a la línea de máxima pendiente y, con ayuda del clinómetro, se determina el buzamiento.

Debido a las irregularidades naturales que presenta la superficie del estrato, para obtener un valor medio de estos parámetros se suele colocar un elemento plano y rígido, por ejemplo una carpeta, y sobre él se coloca la brújula. También es conveniente realizar varias mediciones de dirección y buzamiento, que nos permitan calcular el valor más probable de cada parámetro.

### 8.2.2.- Mediante procedimientos topográficos.

Pueden emplearse taquímetros o estaciones totales. Por su rapidez y comodidad son muy apropiados los equipos láser, capaces de realizar mediciones sin prisma en distancias cortas.

Para medir la dirección del estrato se estaciona el instrumento topográfico frente a él y se realizan las operaciones necesarias para orientarlo. Esto puede hacerse en campo, para obtener sobre el terreno el valor de la dirección, o posteriormente en gabinete.

A continuación se visan dos puntos  $P_1$  y  $P_2$  del estrato, que tengan la misma altitud, y se miden las distancias reducidas y las lecturas horizontales (figura 8.4). Los puntos deben estar lo bastante alejados entre sí como para que el valor de la dirección sea preciso.

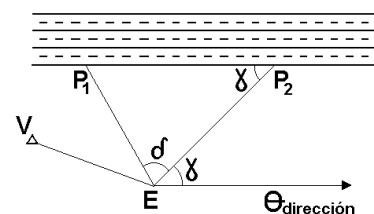


Fig. 8.4. Dirección: procedimientos topográficos

Calculamos  $\delta$ , ángulo horizontal que forman las visuales, por diferencia de lecturas horizontales:

$$\delta = L_E^{P_2} - L_E^{P_1}$$

Aplicando el teorema del coseno calculamos la distancia reducida entre los dos puntos visados:

$$P_1P_2 = \sqrt{(EP_1)^2 + (EP_2)^2 - 2 EP_1 EP_2 \cos \delta}$$

y aplicando el teorema del seno calculamos el ángulo  $\gamma$ :

$$\frac{P_1P_2}{\sin \delta} = \frac{EP_1}{\sin \gamma} \quad \sin \gamma = \frac{EP_1 \sin \delta}{P_1P_2}$$

En el caso de la figura, sumando al acimut de la alineación  $E-P_2$  el ángulo  $\gamma$ , obtenemos el acimut de la recta dirección.

Una vez conocido su acimut, se pueden lanzar visuales perpendiculares a la recta dirección para determinar el buzamiento. Se coliman dos puntos  $P_3$  y  $P_4$  situados sobre la línea intersección del plano vertical que pasa por  $E$  y es perpendicular a dicha recta y el plano del estrato (figura 8.5). Los puntos se coliman visando con un acimut:

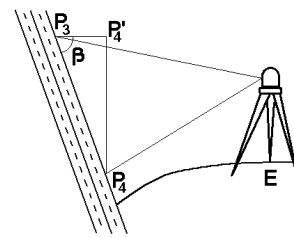


Fig. 8.5. Buzamiento: procedimientos topográficos

$$\theta_{visual} = \theta_{dirección} \pm \frac{\pi}{2}$$

La línea intersección será la línea de máxima pendiente. Medimos las distancias reducidas  $EP_3$  y  $EP_4$ , lo que nos permite calcular:

$$P_3P'_4 = EP_3 - EP_4$$

El desnivel entre ambos puntos será la diferencia de las tangentes topográficas, empleadas con su signo:

$$Z_{P'_4}^{P_3} = t_E^{P_3} - t_E^{P_4}$$

Una vez obtenidos estos valores, el cálculo del buzamiento  $\beta$  es inmediato:

$$\text{tg } \beta = \frac{Z_{P'_4}^{P_3}}{P_3P'_4}$$

Se debe indicar también el acimut del buzamiento, que será el de la recta dirección sumándole o restándole  $\pi/2$ .

### 8.2.3.- A partir de las coordenadas de tres puntos del estrato.

Los puntos pueden estar situados en la superficie y/o en el subsuelo. El procedimiento de cálculo es aplicable en todos los casos. Los puntos medidos deben corresponder al mismo plano (techo o muro) del estrato.

Las coordenadas de los puntos se medirán por aplicación de las técnicas que ya conocemos. En el caso de un sondeo se conocen (figura 8.6):

- Las coordenadas de su punto inicial  $B$ .
- El acimut del sondeo  $\theta_s$ , medido respecto a su sentido de avance.
- La inclinación del sondeo  $i$ , ángulo medido respecto a la vertical
- La longitud del sondeo  $l$  desde la boca hasta el contacto con la formación estratiforme que pretendemos estudiar.

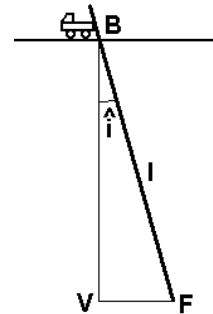


Fig. 8.6. Sondeo inclinado

Con estos datos podemos calcular las coordenadas del punto de contacto  $F$  del sondeo con el estrato:

$$\text{sen } \hat{i} = \frac{VF}{BF} = \frac{VF}{l} \quad VF = l \text{ sen } \hat{i}$$

que será la distancia reducida entre la boca del sondeo y el punto de interés.

$$\text{cos } \hat{i} = \frac{BV}{BF} = \frac{\Delta Z}{l} \quad \Delta Z = l \text{ cos } \hat{i}$$

que será el desnivel entre la boca del sondeo y el punto de interés.

Por tanto, las coordenadas del punto  $F$  serán:

$$X_F = X_B + VF \text{ sen } \theta_s = X_B + l \text{ sen } \hat{i} \text{ sen } \theta_s$$

$$Y_F = Y_B + VF \text{ cos } \theta_s = Y_B + l \text{ sen } \hat{i} \text{ cos } \theta_s$$

$$Z_F = Z_B - \Delta Z = Z_B - l \text{ cos } \hat{i}$$

Una vez conocidas las coordenadas de tres puntos del estrato,  $A$ ,  $B$  y  $C$ , operamos de la siguiente forma: En primer lugar establecemos un plano horizontal de comparación  $AB'C'$ , que pasa por el punto menos elevado de los tres,  $A$  (figura 8.7).

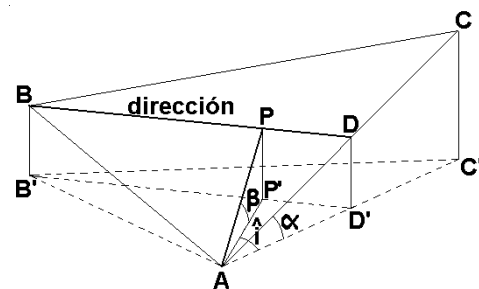


Fig. 8.7. Dirección y buzamiento a partir de 3 sondeos

La dirección del estrato la marcan las líneas horizontales contenidas en él. Para mayor comodidad de cálculo utilizaremos la línea horizontal que pasa por el punto de altitud intermedia,  $B$ . Para calcular el acimut de esta línea se necesitan las coordenadas de otro punto sobre ella,  $D$ , que se calculará sobre la alineación  $A$ - $C$  de la forma siguiente:

Necesitamos la distancia vertical  $DD'$ , que será igual a  $BB'$  y se calcula:

$$DD' = BB' = Z_B - Z_A$$

Como los triángulos  $ACC'$  y  $ADD'$  son semejantes:

$$\frac{AD'}{AC'} = \frac{DD'}{CC'} \quad AD' = \frac{AC' DD'}{CC'}$$

donde  $CC'$  es la diferencia entre las coordenadas  $Z$  de  $C$  y  $A$  y  $AC'$  se calcula a partir de las coordenadas planas de ambos puntos.

También podemos calcularlo a partir de la pendiente:

$$tg \alpha = \frac{CC'}{AC'} = \frac{DD'}{AD'} \quad AD' = \frac{DD'}{tg \alpha} = \frac{DD'}{CC'/AC'} = \frac{AC' DD'}{CC'}$$

En cuanto al acimut, tenemos que  $\theta_A^D = \theta_A^C$ , que se calcula fácilmente a partir de las coordenadas de  $A$  y  $C$ . Conocidos acimut y distancia, calculamos las coordenadas de  $D$ :

$$X_D = X_A + AD' \operatorname{sen} \theta_A^D$$

$$Y_D = Y_A + AD' \operatorname{cos} \theta_A^D$$

$$Z_D = Z_B$$

Con estos datos se puede calcular el acimut de la alineación  $B-D$ , que coincide con el de la recta dirección. Como hemos indicado, son válidos los dos valores  $\theta_B^D$  y  $\theta_D^B$ .

Para calcular el buzamiento es preciso calcular tanto el valor de  $\beta$  como el acimut que define el sentido descendente del estrato. Será:

$$\theta_P^A = \theta_B^D \pm \pi / 2$$

Para obtener el valor de  $\beta$  aplicaremos la expresión conocida:

$$tg \beta = \frac{tg \alpha}{\cos \hat{i}}$$

Calculamos el buzamiento aparente  $\alpha$  en la alineación  $A-C$ :

$$tg \alpha = \frac{CC'}{AC'}$$

y el ángulo:

$$\hat{i} = \theta_A^C - \theta_A^P$$

Con estos datos ya se puede calcular el buzamiento del estrato.

### 8.3.- Potencia.

Para determinar la potencia real  $P$  del estrato supondremos que se han determinado previamente la dirección y el buzamiento.

### 8.3.1.- Cálculo por observaciones en superficie.

Estacionamos en un punto  $E$ , frente al afloramiento, y lanzamos visuales perpendiculares a la recta dirección. Colimamos dos puntos  $A$  y  $B$ , pertenecientes respectivamente al techo y al muro del estrato, situados en el plano vertical generado por el movimiento de cabeceo del anteojo. Podemos encontrarnos dos casos:

$\theta$  del buzamiento =  $\theta$  de las visuales:

Medidas las distancias reducidas y las tangentes topográficas correspondientes a las dos visuales, calculamos  $AB'$  (diferencia entre las distancias reducidas) y  $BB'$  (diferencia entre los desniveles). En la figura 8.8:

$$AB = \sqrt{(AB')^2 + (BB')^2}$$

$AB$  es la potencia aparente.

$$\operatorname{tg} \delta = \frac{BB'}{AB'}$$

Una vez calculado  $\delta$  y conocido el buzamiento  $\beta$ , será:

$$\gamma = \pi - \beta - \delta$$

La potencia real  $P$  se calcula:

$$P = AB \operatorname{sen} \gamma$$

$\theta$  del buzamiento =  $\theta$  de las visuales  $\pm \pi$ :

Procedemos como en el caso anterior, calculando la distancia  $AB$  y el ángulo  $\delta$ . En la figura 8.9:

$$\gamma = \pi + \beta - \frac{\pi}{2} \quad \delta = \frac{\pi}{2} + \beta - \delta$$

La potencia real  $P$  se calcula:

$$P = AB \operatorname{cos} \gamma$$

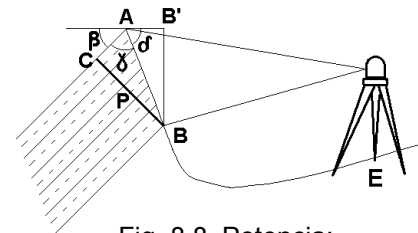


Fig. 8.8. Potencia: observaciones en superficie (1)

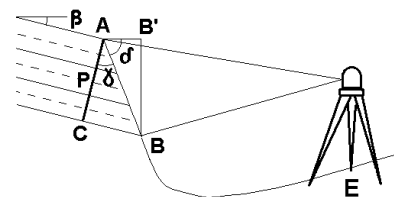


Fig. 8.9. Potencia: observaciones en superficie (2)

### 8.3.2.- Cálculo a partir de datos de sondeos.

Sean  $A$  y  $C$  los puntos de intersección del sondeo con el techo y el muro del estrato. Como antes, suponemos conocidos la dirección y el buzamiento de éste. Vamos a considerar un sistema cartesiano de coordenadas cuyo origen



coincida con C y cuyo eje Y siga la dirección del acimut del buzamiento (figura 8.10). El eje X sigue, por tanto, la dirección del muro del estrato. Proyectaremos la potencia aparente AC sobre el plano vertical ZY, obteniendo una nueva potencia aparente BC.

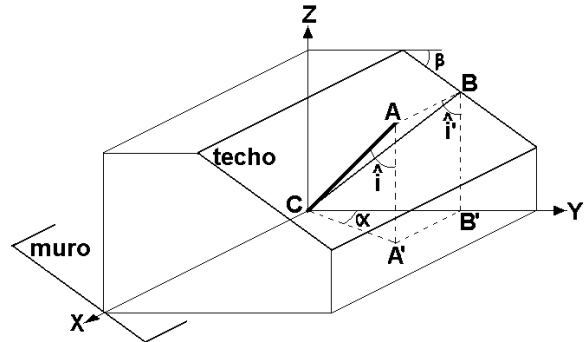


Fig. 8.10. Potencia: mediante datos de sondeos (1)

Para ello, a partir de las coordenadas de A y C calculamos AA' (diferencia de coordenadas Z) y CA' (distancia reducida entre ambos puntos). El ángulo  $\alpha$  será la diferencia en valor absoluto entre los acimutes del sondeo y del buzamiento a la que sumamos o restamos  $200^g$ , en caso necesario, de manera que esté entre  $0^g$  y  $100^g$ . Tenemos:

$$CB' = CA' \cos \alpha$$

$$BB' = AA'$$

y la potencia aparente, proyectada sobre el plano ZY, será:

$$CB = \sqrt{(CB')^2 + (BB')^2}$$

Calculamos también el ángulo  $i'$ :

$$\operatorname{tg} i' = \frac{CB'}{BB'}$$

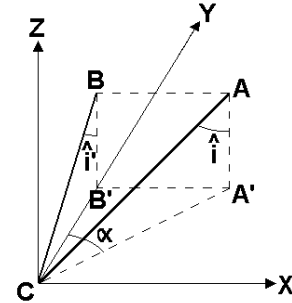


Fig. 8.11. Potencia: mediante datos de sondeos (2)

Para calcular la potencia real P del estrato, proyectamos la potencia aparente BC sobre la recta perpendicular a la de máxima pendiente. Nos podemos encontrar con dos casos:

$$\theta_{B^C} = \theta_{\text{buzamiento}} \pm \pi$$

En las figuras:

$$P = CB \cos(\hat{i}' - \beta)$$

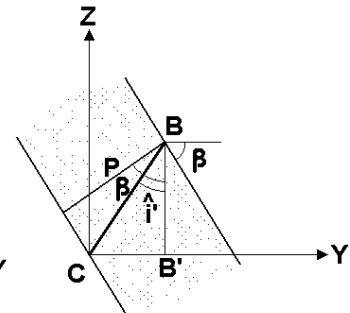
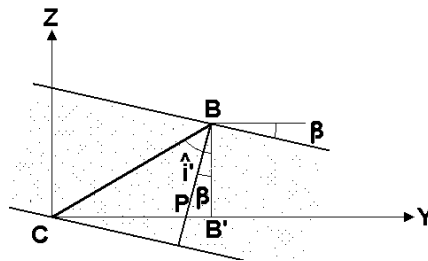


Fig. 8.12. Potencia: mediante datos de sondeos (3)

$$\theta_{B^C} = \theta_{\text{buzamiento}}$$

En la figura:

$$P = CB \cos(\beta + \hat{i}')$$

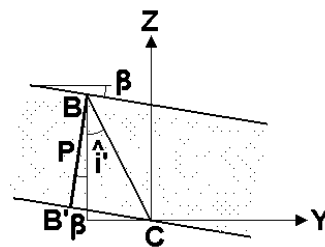


Fig. 8.13. Potencia: mediante datos de sondeos (4)