

CAPÍTULO 3

Introducción a la construcción del mapa base topográfico

Horacio Echeveste y Luciano López

Introducción

El mapa base donde volcaremos la información geológica que conducirá al mapa geológico debe ser un mapa topográfico. Contar con información del relieve resulta imprescindible, ya que la interrelación entre la topografía y los planos geológicos permitirá predecir, por ejemplo, la traza de afloramiento de contactos litológicos, la traza de fallas y en general de cualquier rasgo geológico planar en zonas pobremente expuestas. El IGN, como se vio en el capítulo anterior, publica mapas de varias escalas, la más grande es 1:25.000. Desafortunadamente son escasos los mapas topográficos a esta escala, especialmente en zonas montañosas, donde, en general, se desenvuelven los geólogos. Este escenario hace que se deba recurrir a otras fuentes para obtener información topográfica de detalle de un territorio o que el propio geólogo realice el levantamiento topográfico simultáneamente con el geológico. En este capítulo se mencionan otros recursos para obtener modelos de elevación del terreno y se hace una introducción a la construcción del mapa topográfico.

Topografía

La topografía aborda el conjunto de procedimientos para determinar las posiciones relativas de los puntos sobre la superficie de la tierra y su representación en un plano o dibujo a escala. En la mayoría de las técnicas topográficas la ubicación de puntos del terreno se realiza mediante la medición de distancias y ángulos horizontales y verticales, o mediante el sistema de posicionamiento global. El resultado del “levantamiento topográfico” es el mapa topográfico, utilizado para representar los accidentes naturales de una porción de la superficie terrestre y también los elementos artificiales, humanos o culturales, como redes de transporte, poblaciones y fronteras políticas de provincias o estados.

La topografía como ciencia que se encarga de las mediciones de la superficie terrestre, se divide en dos ramas principales: la geodesia y la topografía plana.

En el primer caso, donde se representarán grandes sectores de la superficie de la tierra (países por ejemplo), las mediciones tienen en cuenta la curvatura de ésta, asimilando su forma a la de una esfera o elipsoide, de acuerdo a la precisión del mapa resultante.

En los trabajos topográficos o geológicos, que en general abarcan porciones reducidas de la superficie terrestre, no se tiene en cuenta la curvatura de la tierra. Las verticales del lugar de puntos distribuidos sobre estas superficies reducidas son consideradas paralelas entre sí.

Sin embargo, cuando se trate de determinar alturas, aún en los casos en que no se requiera gran precisión, no puede despreciarse la curvatura terrestre.

Planimetría y altimetría

La planimetría es la proyección a escala de puntos reconocidos en el terreno sobre un plano horizontal imaginario. Los puntos medidos, generalmente a partir de coordenadas polares, se vuelcan en este plano según sus verticales del lugar, es decir mediante ángulos horizontales (acimuts) y distancias horizontales o distancias reducidas al horizonte. Dependiendo del instrumental con que se hace el levantamiento, la distancia medida entre el punto estación (A en la figura 3-1) y el punto visado, puede ser directamente la distancia horizontal (mediada con cinta) o la distancia inclinada si se mide, por ejemplo, con un distanciómetro electrónico. Con la medida obtenida con este segundo método y el ángulo vertical entre ambos puntos se puede calcular trigonómicamente la distancia horizontal con la función coseno. Debido a que en la mayoría de los casos los mapas se dibujan en computadora con *software* específicos, las coordenadas polares de los puntos levantados son luego transformadas en coordenadas cartesianas, Gauss Krüger, UTM o sistema de coordenadas locales.

Por otra parte, la altimetría es la técnica que permitirá obtener para cada punto visado el valor de su cota a partir de un plano horizontal de referencia, normalmente el nivel medio del mar. Para obtener la cota del punto visado la primera condición es conocer la cota del punto estación, entonces, de manera similar a la obtención de la distancia reducida, se puede calcular la diferencia de altura entre el punto estación y el punto visado con la función seno, conocida la distancia inclinada, o tangente conocida la distancia horizontal. Este método de resolver la altimetría se denomina nivelación trigonométrica, que junto a otros métodos de nivelación trataremos en el Capítulo 5.

En la figura 3-1 se muestran el punto estación A y los puntos 1, 2, 3, 4 y 5 levantados desde A. Los puntos A', 1', 2', 3', 4' y 5' representan las proyecciones en un plano horizontal de los primeros. Las líneas blancas son horizontales y las amarillas las distancias inclinadas entre el punto estación y los puntos visados, d' en el caso del punto 1, a es el valor del ángulo vertical entre A y 1. La distancia d o distancia reducida u horizontal entre A y 1 se obtiene según la ecuación:

$$d' = d \cos \alpha$$

La diferencia de altura entre ambos, Dh , se calcula mediante la ecuación:

$$Dh = d \operatorname{sen} a$$

Este valor (negativo por estar el punto 1 a menor cota que A y ser a negativo) sumado a la cota de A permite obtener la cota del punto 1.

Un mapa con un conjunto de puntos ubicados según cualquier técnica planimetría y con valores de cota obtenidas con alguna de las técnicas alimétricas es el insumo principal para poder construir un mapa topográfico.

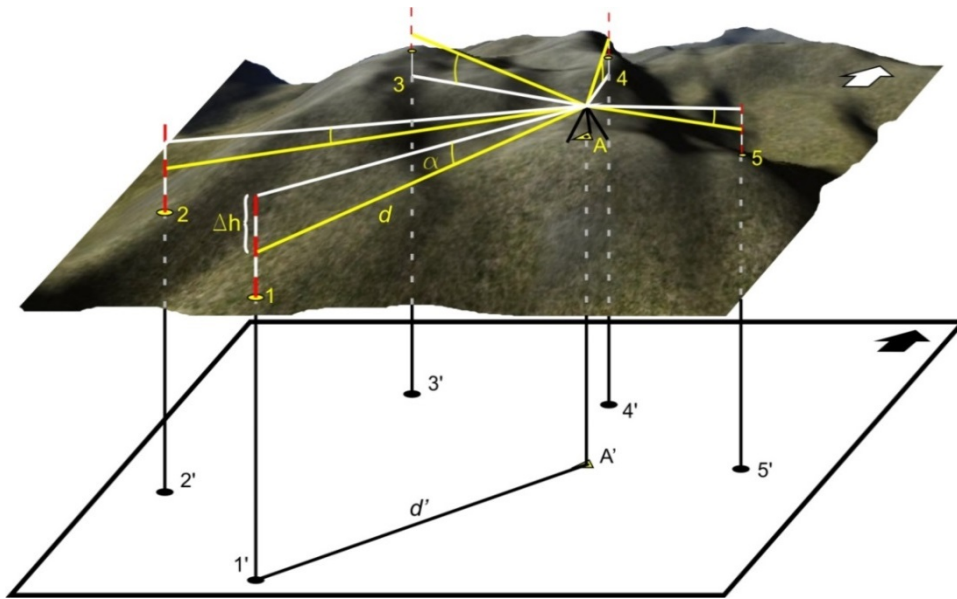


Figura 3-1. Proyección de la estación A y de los puntos 1, 2, 3, 4 y 5 en un plano horizontal (explicación en el texto).

Representación del relieve

La representación de las formas de la superficie terrestre en una superficie de dos dimensiones (un papel, monitor de computadora, etc.), ha constituido un desafío desde la confección de los primeros mapas. La dificultad surge como consecuencia de la necesidad de representar en un plano un cuerpo de tres dimensiones. Los primeros intentos tendientes a evidenciar el relieve en los mapas topográficos de las zonas montañosas consistió en sombrear, de manera más o menos artísticas, aquellas laderas donde el sol ilumina menos, las ubicadas al NE de las zonas altas en el hemisferio norte y las ubicadas al SO en el hemisferio sur. Es una manera bastante efectiva de producir sensación de relieve. En la figura 3-2, imagen de un sector del Cañón del Colorado se ilustra cómo la sombra asociada al relieve en una imagen de satélite produce sensación de relieve y como puede confundir la posición relativa del sol.

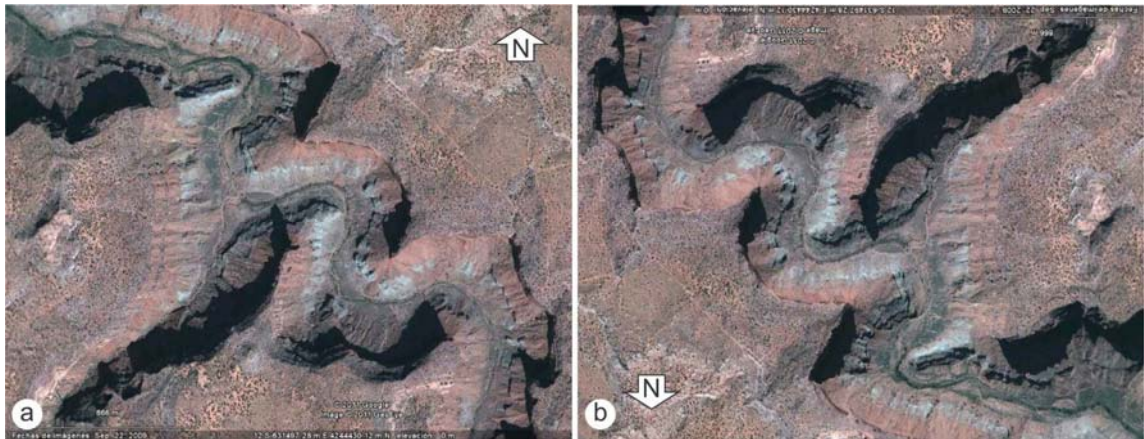


Figura 3-2. Imagen de satélite de un sector del Cañon del Colorado. a) Con el norte hacia arriba apreciamos el relieve al revés. b) Con el norte hacia abajo interpretamos el relieve correctamente.

La figura 3-2a, que el lector seguramente asociará a una especie de cresta sobre una superficie más o menos plana, corresponde en realidad a un valle (Fig. 3-2b). Al ser una imagen del hemisferio norte se debe girar (norte apuntando hacia abajo) para poder apreciar correctamente el relieve ya que nuestros sentidos están “automáticamente” adaptados para el hemisferio sur.

En la figura 3-3a, se muestra un sector del viejo mapa topográfico Bariloche a escala 1:500.000 con el relieve representado mediante sombreado.

Otra forma de representar el relieve, que se usó en casi todos los mapas del siglo XIX, fue mediante trazos de pendiente o achurado (Fig. 3-3b). Las líneas estaban uniformemente separadas, pero se empleaba un grosor o longitud de línea variable de acuerdo a lo pronunciado de la pendiente. Las líneas más gruesas en pendientes mayores producen una sensación de mayor relieve.

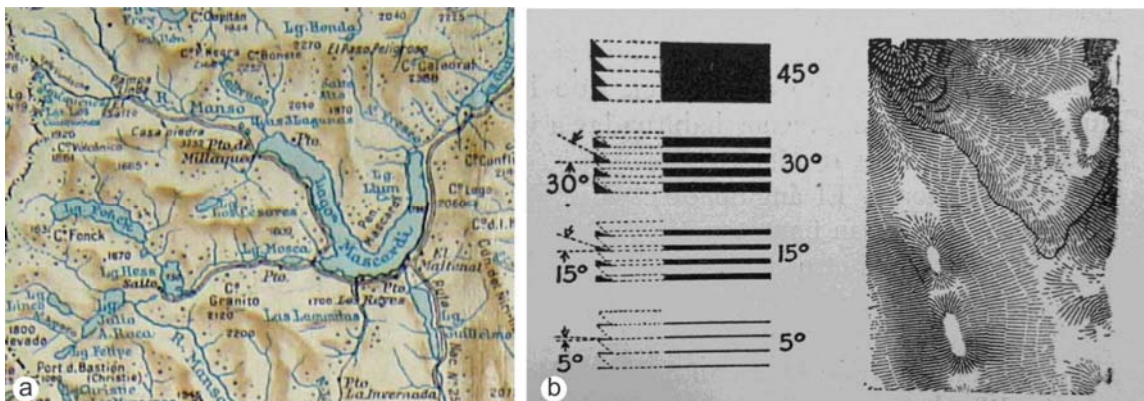


Figura 3-3. a) Un sector de la hoja topográfica Bariloche con el relieve representado por sombreado. b) Relieve representado por trazos de pendiente en un viejo mapa francés.

Curvas de nivel

Sin embargo, la dificultad de representar el relieve se superó ampliamente con la utilización de las curvas de nivel o isohipsas (isobatas por debajo del nivel del mar) que proporcionan información cuantitativa sobre el relieve, en ocasiones combinadas con sombreados o el empleo de tintas hipsométricas (Fig. 3-4).

Las curvas de nivel son líneas que unen puntos que tienen igual altura. Son el resultado de proyectar las curvas imaginarias que se generan por la intersección de planos horizontales, equidistantes entre sí, con la superficie del terreno. La equidistancia entre planos es variable y estará en función del relieve que se quiere representar. Al estar generadas por planos paralelos, las curvas de nivel no se cortan entre sí, son líneas continuas que se cierran en sí mismas, bien sea dentro o fuera del plano, nunca se bifurcan o se ramifican. La dirección de máxima pendiente del terreno sobre una curva de nivel es normal a la misma. Una mayor proximidad entre curvas de nivel indica mayores pendientes es decir, cuanto más empinada sea la pendiente, más próximas entre sí aparecerán las curvas de nivel en cualquier intervalo de curvas o escala del mapa.

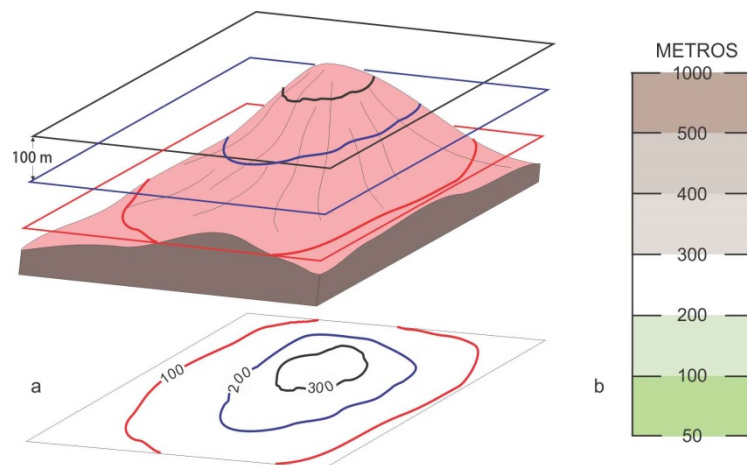


Figura 3-4. a) Curvas de nivel o isohipsas. b) Colores hipsométricos de la carta topográfica del IGN.

De este modo, los mapas con curvas de nivel proporcionan una impresión gráfica de la forma, inclinación y altitud del terreno. Generalmente se trazan a mano alzada sobre el plano, interpolando entre los puntos acotados durante el levantamiento topográfico. Cuanto mayor sea la densidad de puntos acotados, más fiel será la reproducción de las formas del terreno. Normalmente se hace interpolación lineal, asumiendo que la pendiente entre dos puntos de cota conocida es constante y responde a la ecuación de una recta.

En ocasiones, cuando la pendiente es muy pronunciada, cercana a la vertical, para que las curvas no se superpongan unas sobre otras, el IGN las combina con trazos de pendiente (Fig. 3-5).

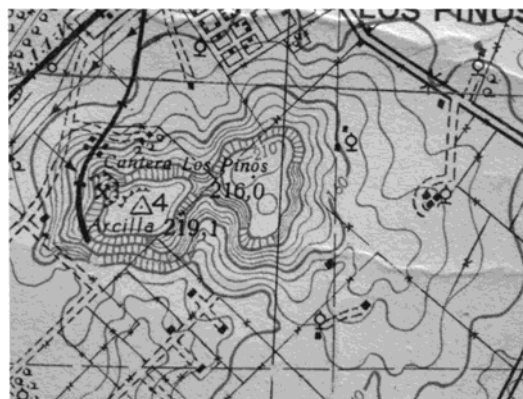


Figura 3-5. Relieve representado por curvas de nivel y trazos de pendiente en zona de relieve cercano a la vertical.

Si las curvas de nivel son trazadas mediante un *software* de dibujo en una PC, se puede elegir entre distintos métodos de interpolación (*kriging*, inversa de la distancia, regresión polinomial, etc.). Generalmente las curvas de nivel trazadas por la computadora deben retocarse siguiendo algunas pautas que el responsable del dibujo conoce y la computadora no, como por ejemplo la forma que deben tener las curvas al cruzar la red de drenaje respetando la regla de las V topográficas. Asimismo los métodos de interpolación digital suelen tener problemas con algunas situaciones comunes en topografía como quiebres de pendientes. Si bien hay mecanismos para resolver estos problemas, el dibujo de las curvas de nivel debe estar controlado y validado por el usuario.

En el caso de trazar manualmente curvas de nivel en un mapa con puntos acotados, debemos primero calcular las distancias entre los puntos por donde pasarían las curvas, se supone que la pendiente entre puntos contiguos es constante.

En la figura 3-6 se ilustra un ejemplo de interpolación analítica. Supongamos que se deben trazar curvas de nivel con equidistancia de un metro entre dos puntos acotados A y B:

Cota de A= 23,45 m

Cota de B= 28,36 m

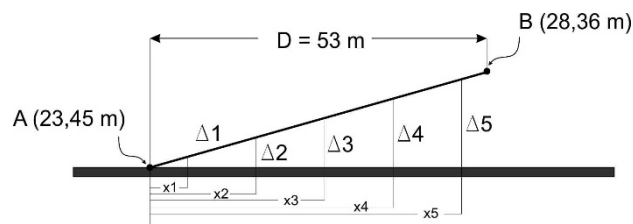


Figura 3-6. Interpolación analítica entre dos puntos acotados.

Distancia AB= 53 m

Entre ambos puntos pasarán las curvas de 24, 25, 26, 27 y 28 m. De la figura 3-6 se desprende que deben calcularse las distancias X1, X2, etc. En primer lugar se calculan las diferencias de cota entre A y B:

$$D_{AB} = 28,36 - 23,45 = 4,92 \text{ m}$$

Luego determinamos las diferencias entre la cota menor (A) y cada una de las cotas de números enteros entre A y B

$$D_1 = 24 - 23,45 = 0,55 \text{ m}$$

$$D_2 = 25 - 23,45 = 1,55 \text{ m}$$

$$D_3 = 26 - 23,45 = 2,55 \text{ m}$$

$$D_4 = 27 - 23,45 = 3,55 \text{ m}$$

$$D_5 = 28 - 23,45 = 4,55 \text{ m}$$

Y por último calculamos las distancias Xi según la ecuación derivada de triángulos semejantes:

$$D/D_{AB} = X_i / D_i \quad \text{donde} \quad X_i = D_i * D/D_{AB} \quad \text{por lo tanto:}$$

$$X_1 = 0,55 * 53 / 4,92 = 5,92 \text{ m}$$

$$X2 = 1,55 * 53 / 4,92 = 16,70 \text{ m}$$

$$X3 = 2,55 * 53 / 4,92 = 27,46 \text{ m}$$

$$X4 = 3,55 * 53 / 4,92 = 38,24 \text{ m}$$

$$X5 = 4,55 * 53 / 4,92 = 49,01 \text{ m}$$

En el caso de la interpolación gráfica en un mapa con puntos acotados, se procede como se ilustra en la figura 3-7, el objetivo es trazar curvas de nivel con una equidistancia de 5 metros. Se unen con rectas los puntos acotados contiguos (Fig. 3-7b y c) y se las divide cada una por la cantidad de metros entre los dos puntos extremos, en el caso de este ejemplo el proceso es sencillo pues los puntos tienen cotas enteras en metros.

Una vez divididos todos los segmentos como se indicó, resulta sencillo encontrar por donde pasan las curvas múltiplo de 5 m: 95, 100, 105, etc., como se ilustra en la figura 3-7d.

Existen distintos tipos de curvas de nivel, las principales son:

Curva maestra: Una de cada cuatro o cinco curvas que se dibuja con un mayor grosor y sobre la que se indica su altitud correspondiente.

Curvas intermedias: las que se encuentran entre curvas maestras.

Curva de configuración o figurativa: Cada una de las líneas utilizadas para dar una idea aproximada de las formas del relieve sin indicación numérica de altitud ya que no tienen el soporte de las medidas precisas.

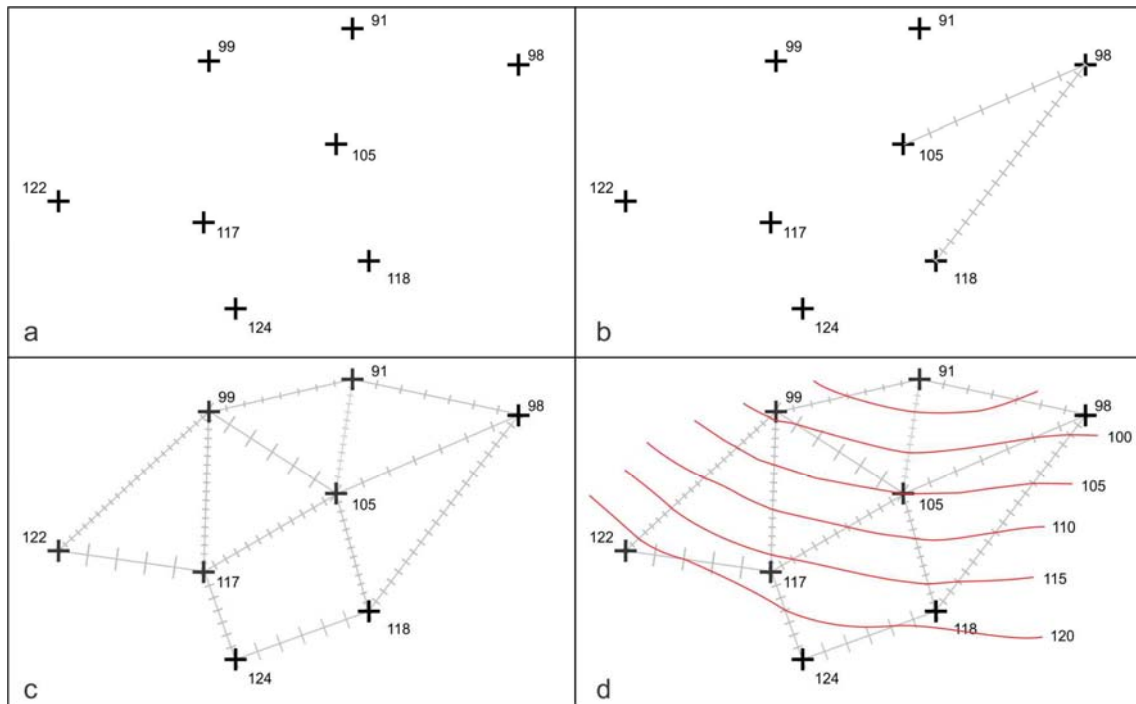


Figura 3-7. a) Mapa con puntos acotados. b y c) Se unen con rectas los puntos contiguos y se las divide en tantos segmento como sea la diferencia de cota entre los puntos extremos. d) Se trazan las curvas de nivel, en este caso con una equidistancia de 5 m.

Curva intercalada: Curva de nivel que se añade entre dos curvas de niveles normales cuando la separación entre éstas es muy grande para una representación cartográfica clara. Se suele representar con una línea más fina o discontinua.

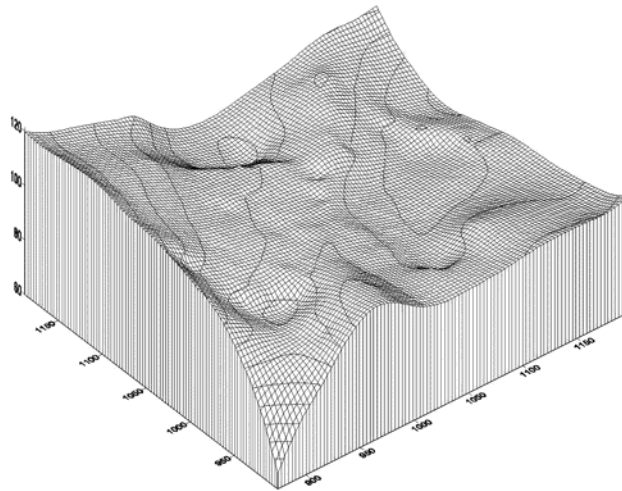


Figura 3-8. Bloc-diagrama construido con el software Surfer 7.0.

Por otra parte, algunos *software* de dibujo permiten obtener esquemas del tipo bloc-diagramas donde la forma de la superficie representada resulta de una combinación de curvas de nivel y la deformación de una grilla X Y en función de la altura (Fig. 3-8).

Modelos de elevación digital

Los modelos de elevación digital (DEM en inglés) son una forma almacenar y representar información altimétrica georreferenciada, que al estar en formato digital, permite generar vistas tridimensionales del terreno y producir una gran variedad de información (mapas, rutas, etc.), donde se utiliza como sustrato la información altimétrica. Existe una amplia variedad de fuentes desde las cuales puede construirse un DEM. Estas fuentes pueden ser divididas como directas o indirectas. En las directas se obtienen los datos de posición XYZ con algún instrumental que permita la determinación de estos datos en el campo, (ej. teodolito, estación total, GPS diferencial). Las fuentes indirectas utilizan datos tomados previamente y pueden generarse por restitución o digitalización.



La restitución por estereoscopía se basa en el fundamento que permite ver en 3D cuando se utiliza un estereoscopio. Se obtiene esta visión tridimensional al contar con dos imágenes o fotos de una misma zona adquiridas en distintas posiciones. Actualmente los software son capaces de extraer la información de altura a partir de dos imágenes satelitales (estereoscopía digital) o de pares de fotografías aéreas (estereoscopía analógica).

Los DEM generados a partir de imágenes Aster son uno de los modelos de elevación digital más extendidos que utiliza la espectroscopía digital. Estos DEM presentan una resolución espacial de 30 m en la horizontal y cubren prácticamente la totalidad de la superficie terrestre.

La interferometría de imágenes Radar resulta una de las técnicas con mayor perspectiva a futuro en lo que se refiere a la construcción de los DEM. Si bien a grandes rasgos el concepto que utiliza es el mismo que el empleado en la estereoscopía, posee la ventaja de no estar afectada por nubes o áreas de alta densidad de vegetación. Una de las mayores diferencias con las imágenes satelitales o las fotos aéreas es que las imágenes Radar registran las ondas de radio que se reflejan sobre la superficie de la Tierra, pero estas ondas son generadas por el propio satélite.

Uno de los DEM más utilizados en geología proviene de la Misión topográfica "Radar Shuttle" que fue elaborado a partir de la interferometría de imágenes radar adquiridas por un transbordador espacial. El vehículo obtiene dos imágenes de radar de un mismo sector de la superficie de la tierra simultáneamente desde dos posiciones distintas, una desde la misma nave y la otra desde un brazo de 60 m adosado (Fig. 3-9).

Las diferencias entre las imágenes obtenidas por ambas antenas permiten calcular la elevación de la superficie observada mediante técnica interferométrica. Los datos de altura se presentan como una matriz de píxeles donde cada uno tiene coordenadas de posición N-S y un valor de altura. La resolución (tamaño del píxel) varía entre 30 m (equivalente a un segundo de arco) para los Estados Unidos y 90 m para el resto del mundo (3 segundos de arco).

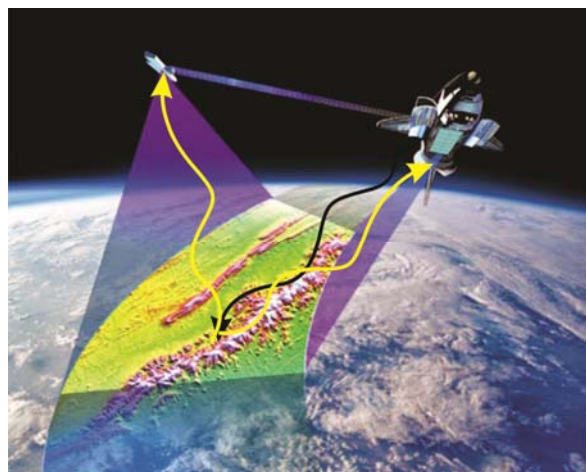


Figura 3-9. Obtención de datos altimétricos a partir de señales de radar por la misión Shuttle.

Tanto los modelos de elevación digital de Aster como de SRTM se encuentran disponibles para ser descargados de forma gratuita desde el siguiente enlace: <https://earthexplorer.usgs.gov/>

En la figura 3-10a se ilustra una imagen generada por computadora de un modelo de elevación digital. La matriz de alturas también puede representarse como curvas de nivel. La adquisición y procesamiento informático de imágenes remotas, desde satélites, trasbordadores o fotos aéreas se ha constituido como una herramienta fundamental para la generación de modelos de elevación digital (DEM) de grandes áreas. Estos modelos se constituyen como una base sobre la cual puede generarse las curvas de nivel, generar vistas tridimensionales de la superficie terrestre y realizar una serie de mapas derivados (Fig. 3-10b), que pueden ser relativamente sencillos utilizando únicamente el DEM, como los mapas de sombreado, pendientes, orientación, insolación, etc., o también pueden incorporar nueva información y servir como sustrato para simulaciones numéricas de procesos físicos como por ejemplo para modelar inundaciones o por donde se transportarán los flujos piroclásticos.

Al incrementarse la resolución espacial de los MED fue posible la determinación de vegetación, edificios y otras obras de arte, a estos modelos se los conoce como modelos de elevación de la superficie (MES), mientras que los que representan la topografía del sustrato se los conoce como modelos de elevación del terreno (MET) (Fig. 3-11).

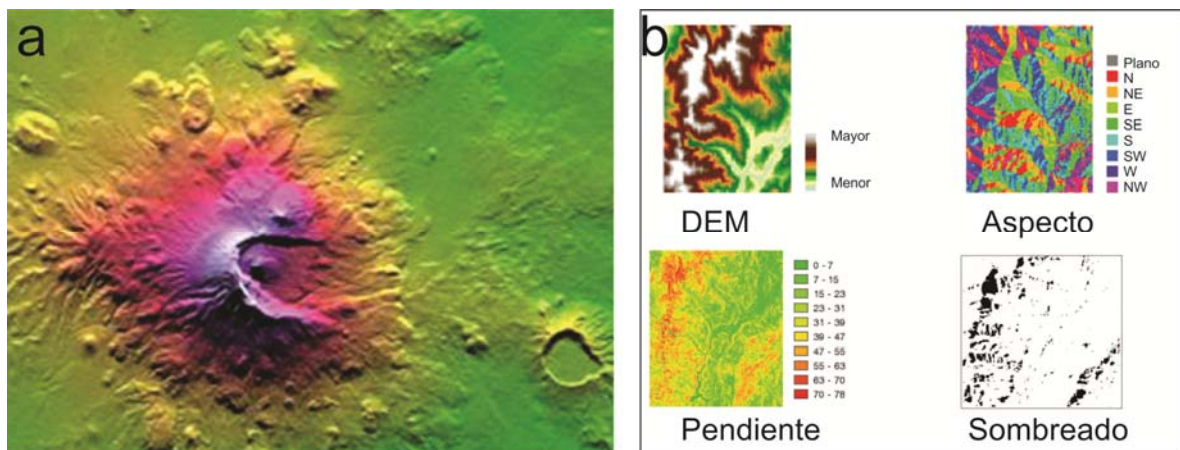


Figura 3-10. a) Modelo de elevación digital. b) Mapas derivados a partir de un modelo de elevación digital.

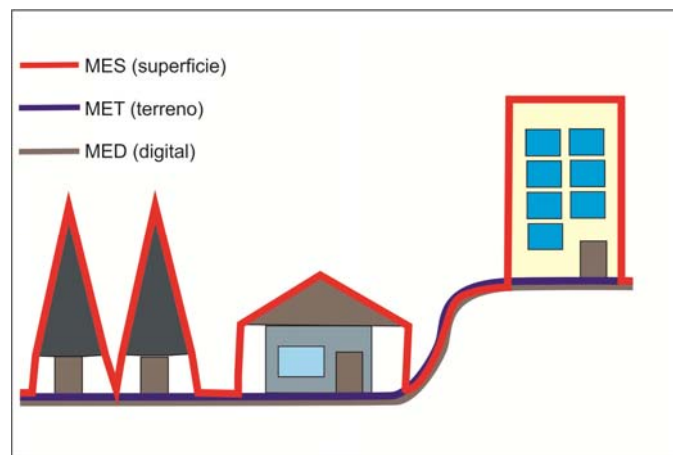


Figura 3-11 Diferencias entre los modelos de elevación de la superficie, del terreno y digital.

Con los modelos de elevación digital es posible determinar la red de drenaje y la determinación de cuencas hídricas otra utilidad es establecer la intervisibilidad o no que existe entre dos puntos o la generación de un mapa de cuenca visual que establece que sectores de un mapa pueden ser visibles desde un punto determinado. Estas funciones son muy relevantes en ciertos estudios arqueológicos y también son útiles para la determinación del impacto visual que podrá tener alguna obra. Asimismo a partir del DEM puede determinarse cuál es la ruta que implica el menor esfuerzo o tiempo entre dos puntos (que no necesariamente es la ruta más corta).

Fotogrametría digital

En la actualidad se utilizan técnicas de fotogrametría digital y *surface from motion* para generar modelos tridimensionales. Estos modelos pueden ser generados a partir de fotografías tomadas a partir de vuelos con vehículos no tripulados (UAVs) o drones. Gracias a esta técnica se consiguen modelos de elevación digital con resoluciones espaciales submétricas. Los fundamentos y técnicas de la fotogrametría serán abordados en el Capítulo 7.

¿Qué se puede representar en función de la escala del mapa?

En el caso del mapa clásico, en papel, el concepto de escala está íntimamente relacionado con el grado de detalle de lo que podemos representar. Se asume que en un mapa de este tipo el menor punto o línea que se puede dibujar es de 0,1 mm, por lo tanto en un mapa por ejemplo de escala 1:100.000 la menor medida que podremos representar será de 10 m, cualquier medida inferior no podría representarse gráficamente a escala. A este valor se lo denomina inseguridad gráfica γ (gamma). Generalmente los errores del dibujo superan este valor, aceptándose el triple de la inseguridad gráfica, 3γ , denominada tolerancia (Tabla 3-1).

De esta manera surge la importancia de la elección de la escala en función del detalle que el autor desee para su mapa y también de la elección del instrumental que debería utilizarse para hacer el “levantamiento” de acuerdo a ese detalle.

Tabla 3-1

Escala	Inseguridad gráfica	Tolerancia
1:500	0,05 m	0,15 m
1:5.000	0,5 m	1,5 m
1:10.000	1 m	3 m
1:25.000	2,5 m	7,5 m
1:50.000	5 m	15 m
1:100.000	10 m	30 m
1:200.000	20 m	60 m
1:250.000	25 m	75 m

Por ejemplo, la utilización del GPS tipo “navegador” en el georeferenciamiento de datos planimétricos, ha sido ampliamente adoptada para la confección de mapas geológicos. Los navegadores modernos alcanzan una precisión del orden de los 4 m (incertidumbre de ubicación de un punto en un círculo de 8 m de diámetro), es decir constituye un instrumento adecuado para “mapear” a escala 1:25.000 o más pequeña ya que a esta escala, el error de posición planimétrico (8 m) es similar al valor de tolerancia del mapa (7,5m).

Al pasar la información a formato digital se pierde el concepto de escala y se pierde por lo tanto el control sobre el error asociado al elemento espacial. Se dice entonces que *"la información digital no tiene escala"* y esto es tan válido que en un Sistema de Información Geográfica (SIG) se puede mezclar información de terreno con datos a escala 1:1.000 con datos a escala 1:250.000. Sin embargo debemos tener en cuenta que la escala del mapa estará en función del objetivo del mapeo, por lo tanto la elección de la escala debe hacerse antes de realizar el mapeo. Esto es de suma importancia porque limitará el tiempo invertido en el mapeo de detalles y objetos que no solo que no se observarán sino que además pueden perjudicar la lectura en la salida gráfica final. En los SIG es posible configurar la escala de referencia, la cual nos permitirá “fijar” la escala cuando estemos en el proceso de edición. Además podemos configurar que cierta información como mapas o imágenes satelitales aparezca o no en la pantalla en función de la escala.

Medición de ángulos y distancias

Como se dijimos anteriormente, el levantamiento geológico o topográfico consiste en la elección de puntos en el terreno, su ubicación relativa y/o absoluta y su representación en un mapa. Una vez elegido el punto que se quiere levantar, sobre la base de su importancia por la observación de un rasgo geológico, topográfico, fisiográfico u otro, la determinación de su ubicación dependerá del instrumento con que se cuente para hacer ese levantamiento.

Cuando usamos un GPS en un levantamiento geológico la posición relativa entre los puntos de observación es irrelevante ya que no necesitamos conocer la posición de un punto determinado para averiguar la posición de un nuevo punto.

Sin embargo, cuando usamos otros instrumentos en levantamientos topográficos o geológicos, la posición de un nuevo punto estará necesariamente referida a otro punto, generalmente al punto medido anteriormente. La manera de vincular un nuevo punto con puntos anteriores es a través de la medición de ángulos (horizontal o acimutal y vertical o cenital) y distancia, esto es mediante coordenadas polares.

Medición de ángulos horizontales y verticales

Los ángulos horizontales se pueden determinar mediante tres procedimientos según el tipo de instrumento utilizado: a) goniómetros, donde el ángulo se mide en un limbo graduado en

grados sexagesimales (círculo de 360°) como en el caso de brújulas (de geólogo, de agrimensor, taquimétricas, etc.), teodolitos, taquímetros, niveles ópticos, telémetros montados en trípodes y estaciones totales, b) goniógrafos, donde el ángulo horizontal se dibuja directamente sobre el mapa en una especie de mesa como es el caso del conjunto alidada-plancheta y c) escuadra de prisma o pentaprisma que permite determinar ángulos fijos de 90 o 180° .

En los goniómetros como el teodolito, brújula taquimétrica, nivel óptico y estación total (Fig. 3-12) un anteojo o telescopio gira según un eje vertical ubicado en el centro de un limbo horizontal. Un ángulo horizontal α entre los puntos A y B medido desde P (Fig. 3-13) es el que forman entre sí los dos planos verticales que contienen a esos puntos y al eje vertical del instrumento. En los instrumentos mencionados menos el nivel óptico, el anteojo se mueve también según un eje horizontal que permite visar puntos por arriba y por debajo del horizonte y medir ángulos verticales.

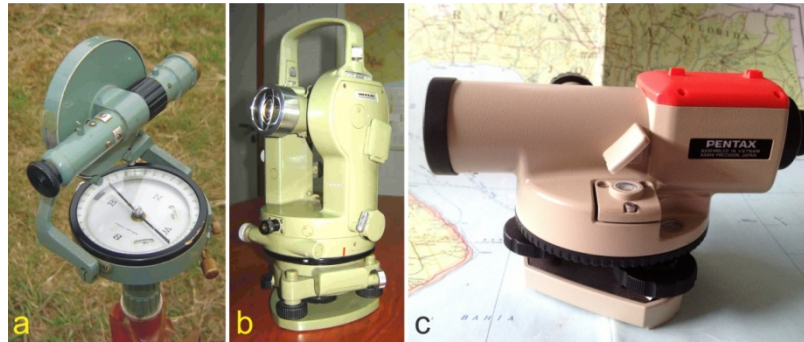


Figura 3-12. Instrumentos topográficos que permiten medir ángulos horizontales. a) Brújula taquimétrica. b) Teodolito. c) Nivel óptico.

La medida de los ángulos verticales β y γ permite calcular los desniveles respecto de P de los punto A y B, Δh_{PA} y Δh_{PB} respectivamente.

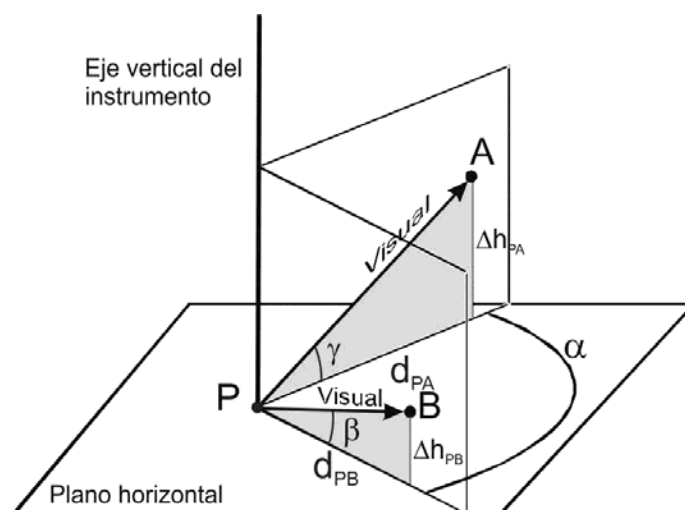


Figura 3-13. Ángulo horizontal α entre los puntos A y B. β y γ ángulos verticales desde P a los punto A y B.

Cuando el levantamiento se hace con alidada y plancheta, los ángulos horizontales se dibujan con ayuda de una reglilla solidaria a un sistema de puntería que puede ser un sencillo par de pínulas (Fig. 3-14) o un anteojo.

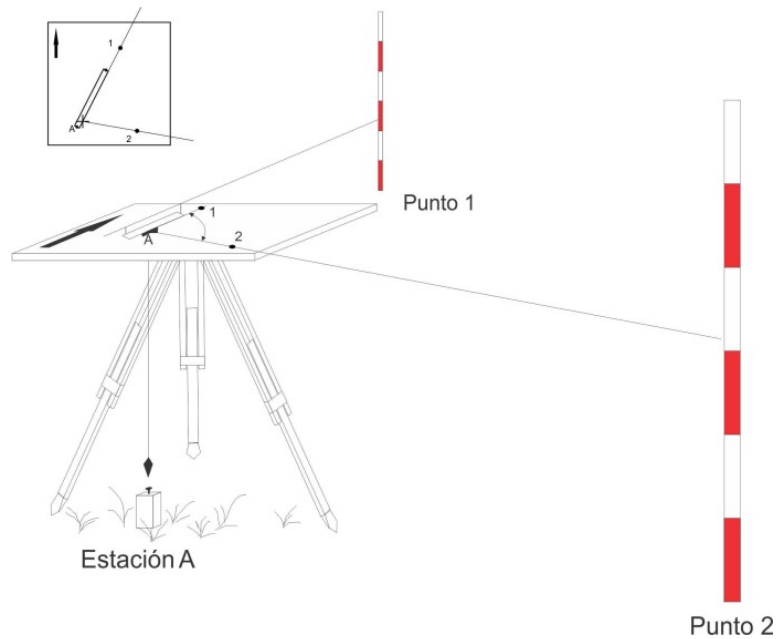


Figura 3-14. Dibujo sobre la plancheta del ángulo formado entre las visuales desde P a los puntos 1 y 2. La ubicación de los puntos 1 y 2 sobre la plancheta quedan definidos sobre las líneas trazadas luego de determinar las distancias horizontales hacia ambos puntos desde P volcadas a escala sobre el papel de la plancheta.

Por último la escuadra de prismas o prisma pentagonal de Goulier o pentaprisma (Fig. 3-15a) es un pequeño instrumento con el que se pueden medir ángulos fijos. Pueden ser simples, para medir ángulos de 90° , o dobles, uno colocado sobre el otro que permite medir ángulos de 90° y 180° .

El pentaprisma tiene dos caras a 90° entre sí y otras dos, espejadas, que forman un ángulo de 45° (Fig. 3-15b y c). Esta forma de construcción hace que un rayo que incida sobre una de sus caras no espejadas se refracte y refleje dentro del cristal y salga por la otra cara no azogada a 90° del primero aunque el rayo incidente no sea perpendicular a la primera.

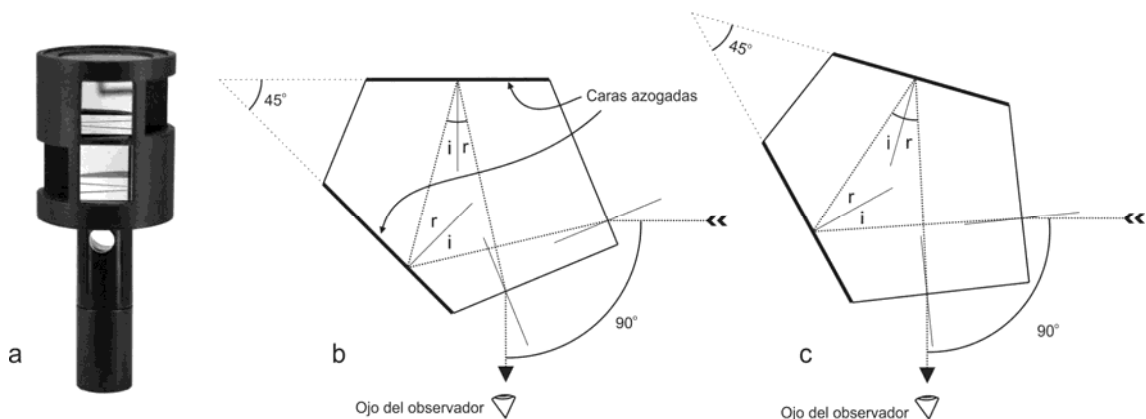


Figura 3-15 a) Escuadra de prismas doble. b y c) Recorrido de la luz dentro del pentaprisma. El ángulo entre el rayo incidente en una de las caras y el rayo que sale de la otra es de 90° , aunque el rayo incidente no sea perpendicular a la cara del cristal.

Medición de distancias

Las mediciones de distancia pueden realizarse de manera directa o indirecta y la metodología utilizada estará en función del equipamiento disponible y el grado de precisión requerido.

Mediciones directas de distancia

Pasos. En levantamientos donde no se requiere mayor precisión, usando la brújula como instrumento de control de ángulos, la forma más expeditiva y simple en la medición de distancias es a pasos. El levantamiento geológico a pasos y brújula es una metodología bastante utilizada en geología por la sencillez y rapidez en la ejecución. Cada geólogo debe saber la longitud de su paso. Con la práctica debe ser capaz de medir a pasos con un error de menos de 3 m en 100 m, incluso sobre terreno moderadamente rugoso.

La manera de obtener la longitud del paso es la siguiente: se mide con cinta métrica una distancia de 100 m en línea recta sobre terreno natural (no sobre el asfalto o piso artificial). Se camina la distancia dos veces en cada dirección contando los pasos (cuatro veces en total), tratando de utilizar un paso natural constante. Cada medición debería variar en menos de dos pasos de la media de los cuatro recorridos. Resulta muy práctico y conveniente preparar una tabla de pasos-distancias en metros, fotocopiarla (Tabla 3-2) y pegar una copia a la parte posterior de la libreta de campo.

Debemos recordar, cuando recorremos superficies inclinadas, que normalmente se acorta el paso tanto cuando se sube como cuando se baja, condición que tendremos en cuenta para no sobrestimar las distancias.

Tabla 3-2. Ejemplo de tabla de conversión de pasos a metros (1 paso=0,8 m)

Pasos	Metros	Pasos	Metros	Pasos	Metros
1	0,8	10	8	100	80
2	1,6	20	16	200	160
3	2,4	30	24	300	240
4	3,2	40	32	400	320
5	4,0	50	40	500	400
6	4,8	60	48	600	480
7	5,6	70	56	700	560
8	6,4	80	64	800	640
9	7,2	90	72	900	720
10	8,0	100	80	1000	800

Cinta métrica. La medición con cinta, de acero o teflón, de 20, 25, 50 o 100 m de largo, no requiere mayores comentarios, solo tener el recaudo de mantener la cinta horizontal al momento de la medición (Fig. 3-16a). Si la distancia a medir entre dos puntos es mayor que la longitud de la cinta, la primera tarea es colocar un conjunto de jalones alineados entre esos dos puntos, esa operación se denomina alineación. Si el terreno es más o menos plano y no hay obstáculos entre los puntos extremos, es sencillo colocar jalones intermedios. Suponiendo que hay en el terreno dos jalones alejados entre sí una centena de metros y que se debe colocar un jalón intermedio (un trabajo para dos personas), uno de estas debe colocarse fuera de la línea en uno de los extremos de manera que su ojo esté en el plano vertical que contiene a ambos jalones. En esta posición resultará sencillo indicar a la segunda persona dónde debe colocar el jalón intermedios, en la línea de los otros dos.

Esta operación resulta algo más complicada si entre los jalones que indican los puntos extremos de la línea a medir hay una barrera topográfica que impide que sean intervisibles. La figura 3-16 ayudará a explicar el procedimiento. Este trabajo es también para dos operadores.

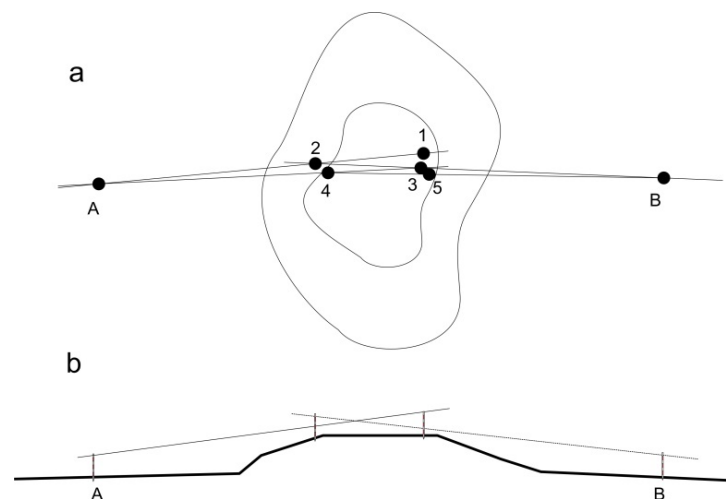


Figura 3-16. Alineación a través de una loma. a) Vista en planta. b) Perfil. Explicación en el texto

Inicialmente se coloca el jalón 1 sobre la loma tratando de ubicarlo lo mejor posible en la línea AB. Colocado el primer operador a la derecha de 1 mirando a A, le indica al segundo donde ubicar el jalón 2 alineado con A. Luego cambia de posición y se coloca a la izquierda de 2 mirando a B, verá que el jalón 1 no está alineado con B, por lo que le indicará al otro operador que lo quite y lo ubique en la posición 3. Desde la derecha de 3 mirando hacia A, verá ahora que 2 no está alineado con A, lo hace quitar y lo reubicarlo en 4 y así sucesivamente hasta que los dos jalones ubicados en la loma están alineados con AB.

Las mediciones a cinta son realizadas también por dos operadores (Fig. 3-17a). En mediciones largas, se suele utilizar un juego de estacas de metal denominadas fichas (de hierro galvanizado de 5 mm de diámetro, figura 3-17b), que el operador que va a la vanguardia tirando de la cinta, clava en el terreno cada vez que avanza el largo de ésta y que el zaguero va recogiendo a medida que se avanza en la medición. Este método impide posible errores por

descuido en la anotación de las medidas parciales ya que el zaguero solo debe contar cuantas fichas ha recogido para saber cuánto ha avanzado.

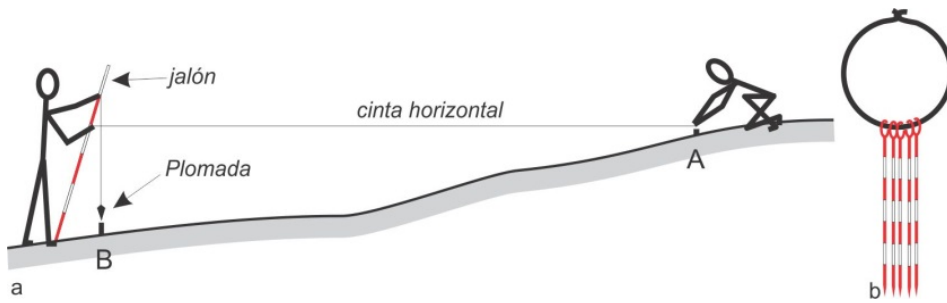


Figura 3-17. a) Medición con cinta entre los puntos A y B. El 0 de la cinta es definido por el hilo de la plomada sobre el punto B. La cinta se mantiene horizontal. b) Juego de fichas.

Respecto a su graduación existen tres tipos de cintas: continuas, por defecto y por exceso.

Cintas continuas: están divididas en metros, decímetros, centímetros y milímetros en toda su longitud (Fig. 3-18a).

Cintas por defecto (sustracción): están divididas en mm solo en el primer y último decímetro. El resto de la cinta está dividida en metros y decímetros (Fig. 3-18b). Para medir se hace coincidir en B el decímetro entero más próximo a la longitud a medir (13,10 en la figura 3-18b). La lectura de A se hace en el primer decímetro (0,066 en la figura 3-18b).

$$\text{La distancia AB} = 12,100 - 0,066 = 12,034 \text{ m}$$

Cintas por exceso: como la anterior está dividida en metros y decímetros, además posee un decímetro adicional graduado en centímetros y milímetros colocado anterior al 0 con graduación creciente en sentido contrario (Fig. 3-18c). Para medir se hace coincidir en B el decímetro entero más próximo a la longitud a medir (12,10 en la figura 3-18c) y se toma la lectura de A con el decímetro adicional.

$$\text{La distancia AB} = 12,100 + 0,042 = 12,142 \text{ m}$$

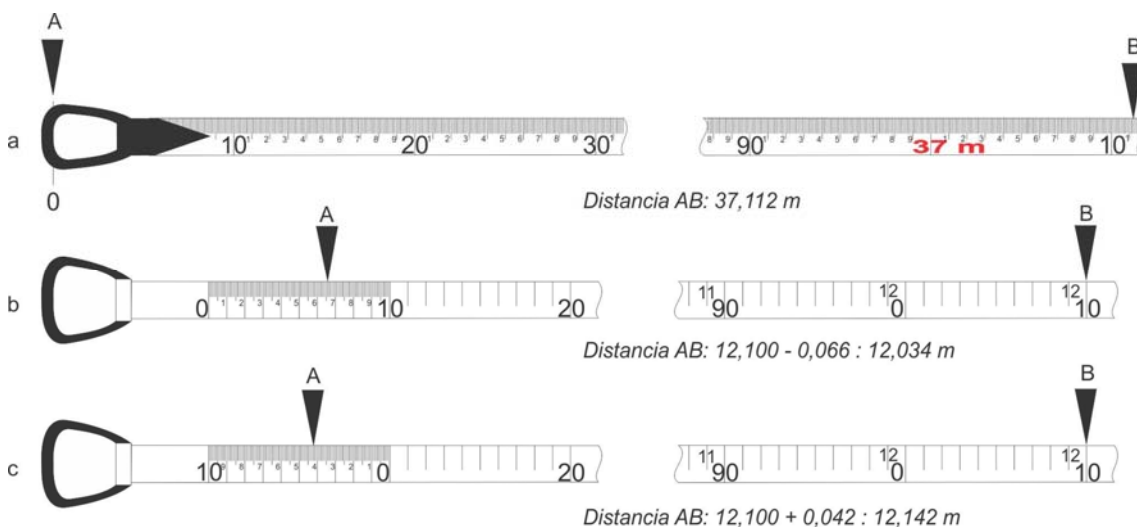


Figura 3-18. a) Cinta continua con el 0 en la cara interior de la anilla. b) Cinta por defecto. c) Cinta por exceso.

Medición indirecta de distancia

Telémetro. Este es un instrumento óptico que utiliza el mismo principio que inconscientemente usamos los humanos en la estimación de las distancias, que es el ángulo de convergencia entre las visuales de cada uno de nuestros ojos hacia los objetos. Se basa en el principio de la paralaje que es el ángulo que forman entre sí las direcciones de las visuales dirigidas a un objeto A desde dos puntos de vista distintos. En la figura 3-19 se observa un telémetro marca Wild apto para medir distancias entre 30 y 1000 m acoplado a un soporte que permite fijarlo a un trípode y medir además de las distancias, ángulos horizontales y verticales. La apreciación de la distancia se consigue llevando a coincidencia una imagen partida en el centro del ocular (Fig. 3-19a). A medida que las distancias aumentan la precisión disminuye.



Figura 3-19. Telémetro marca Wild para medir distancia entre 30 y 1000 m. a) Imagen que se ve a través del ocular, la ventana rectangular interior entrega una imagen invertida del mismo objeto vertical (un jalón en el ejemplo) que debe llevarse a coincidencia con la imagen mayor.

Medición óptica de distancias o estadimetría. La estadimetría es la medición indirecta de distancias mediante la utilización de miras (Fig. 3-20) y anteojos provistos de hilos estadimétricos. Existen miras de distintos tipos en cuanto a los materiales de construcción, largo y graduación. Las hay de madera y de aluminio, directas e invertidas. Las más modernas son de aluminio, telescópicas, en general de 4 m de longitud y directas. Suelen tener una cara graduado en cm para la determinación indirecta de distancias y una en mm para nivelación. Como la mira debe coincidir con la vertical del lugar al momento de ser visada, algunas poseen un nivel circular para asegurar esta condición. Los instrumentos que permiten determinar las distancias por este método son el nivel óptico, la brújula taquimétrica el taquímetro o teodolito y la alidada óptica de plancheta en todos sus modelos.



Figura 3- 20. Mira estadimétrica telescópica de madera invertida.
La menor graduación de la mira es un centímetro.

El principio de la estadimetría es sencillo, el anteojo del instrumento además de la cruz del retículo usado para hacer puntería al punto visado, está provisto de un par de hilos paralelos, horizontales llamado hilos estadimétricos o distanciométricos. Estos tienen una separación tal que, cuando mediante una visual horizontal se visa la mira ubicada verticalmente en el punto al cual se quiere saber la distancia, el intervalo de mira limitados por ambos hilos, multiplicado por una constante (usualmente 100) da la distancia entre el instrumento y la mira.

En la figura 3-21a se ilustra una mira observada a través de una visual horizontal del anteojo de un nivel (Fig. 3-21b). El hilo inferior corta a la mira (graduada en cm) en 0,82 m y el hilo superior en 1,08 m.

Por relación de triángulos

$$D / H = f / h \quad \text{por lo tanto} \quad D = (f / h) H \quad \text{siendo:}$$

D = distancia horizontal entre el punto estación A y el punto visado B.

f = distancia focal del anteojo (constante).

h = distancia entre los hilos superior e inferior del retículo (constante).

H = intervalo de mira interceptada por los hilos del retículo = $L_s - L_i$

La relación f / h es la constante distanciométrica K, que generalmente tiene un valor de 100 para simplificar los cálculos de las distancias.

$$\boxed{D = K H = 100 H} \quad (1)$$

Cuando la visual es horizontal, es decir normal a la mira, la distancia D resulta de multiplicar el intervalo de mira entre los dos hilos estadimétricos por la constante K.

La distancia horizontal D en el ejemplo es:

$$D = K (Hil\ sup - Hil\ inf) = 100 * (1,08 - 0,82) = 26\ m$$

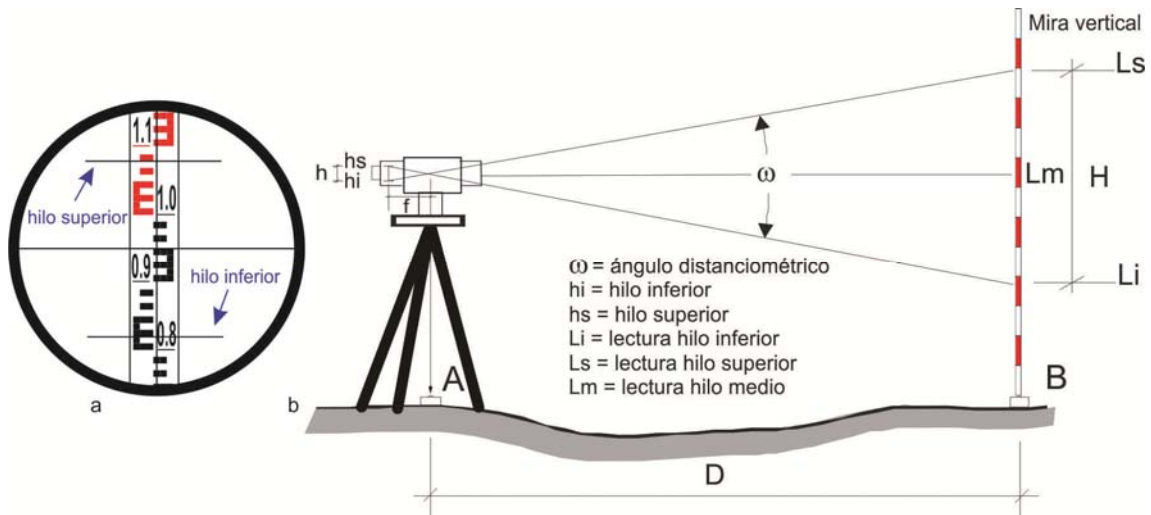


Figura 3-21. a) Esquema de la vista desde el ocular de un nivel donde se observa el intervalo de mira entre los hilos estadimétricos superior e inferior, 26 cm, que multiplicado por la constante (100) indica una distancia de 26 m. b) Representan esquemática del anteojo de un nivel con sistema de enfoque interno (modificado de Casanova 2002).

Cuando la distancia se mide con teodolito, brújula taquimétrica o alidada de plancheta, todos instrumentos que permiten medir ángulos verticales, se dice que se hace **taquimetría**, o se emplea el **método taquimétrico**, procedimiento topográfico en el que los puntos del terreno se determinan simultáneamente por coordenadas polares y alturas con un mismo instrumento, se miden ángulos y distancias en una sola operación. En este caso, la ecuación anterior solo es válida si la visual es horizontal, perpendicular a la mira. Si la visual es inclinada (Fig. 3-22) la distancia D no se puede calcular aplicando la fórmula (1) ya que la visual no es normal a la mira, por lo tanto el intervalo entre los hilos estadimétricos es mayor al que se obtendría en una visual horizontal.

Para calcular la distancia horizontal D , primeramente debemos calcular la distancia d o distancia inclinada. Para eso debemos deducir la relación que hay entre el intervalo entre los hilos estadimétricos H (con la mira vertical) y H' , que representa el intervalo de mira si esta estuviera colocada normal a la visual, inclinada un ángulo α respecto a la vertical.

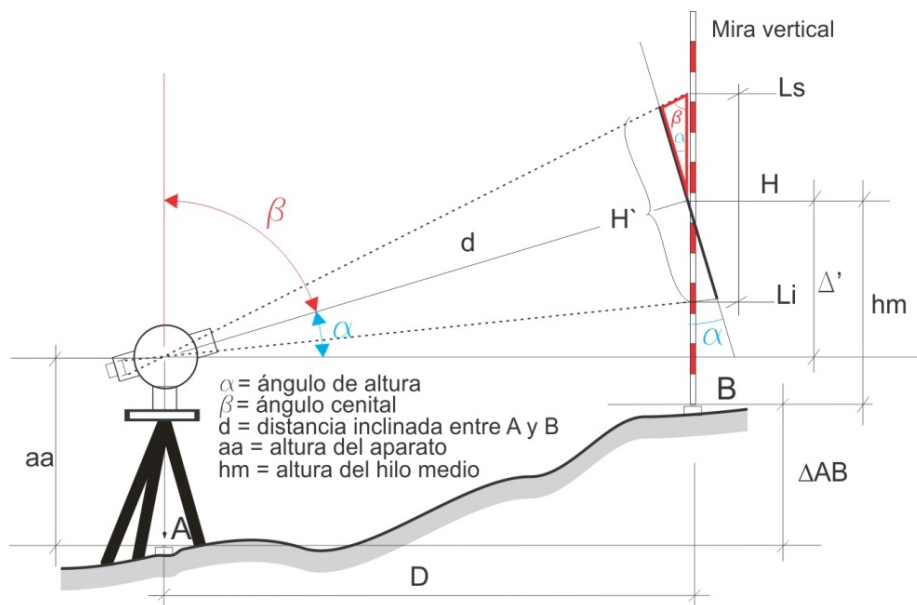


Figura 3-22. Esquema de una visual inclinada entre los puntos A y B.

El triángulo rojo de la figura 3-22 es próximo a un triángulo rectángulo, por lo tanto:

$$\cos \alpha \approx (H'/2) / (H/2) \approx H' / H$$

$$H' = H \cos \alpha \quad \text{entonces}$$

$$d = K H \cos \alpha \quad (2)$$

Entonces, para calcular la distancia inclinada multiplicamos la constante K (100) por el producto resultante del valor del intervalo de mira entre los hilos estadimétricos y el coseno del ángulo de elevación (o de depresión). Una vez obtenido el valor de d, la distancia reducida o distancia horizontal D resulta:

$$D = d \cos \alpha \quad \text{reemplazando d por (2)}$$

$$\boxed{D = K H \cos^2 \alpha}$$

Retomaremos estas ecuaciones en el Capítulo 5 cuando veamos la nivelación taquimétrica.

Distanciómetro electrónico. El distanciómetro electrónico es un telémetro que va montado sobre un teodolito (Fig. 3-23a), determina la distancia en términos del número de ondas moduladas con frecuencia y longitud de onda conocida, que caben entre el emisor y el receptor en ambos sentidos.

Permite medir distancias con una gran precisión, aun en visuales muy largas de hasta 2 km. Un rayo de luz infrarroja o laser proyectado por el emisor rebota en un espejo (mira, Fig. 3-23b) y es recibido por el receptor. La distancia medida es mostrada en un *display* con precisión milimétrica.



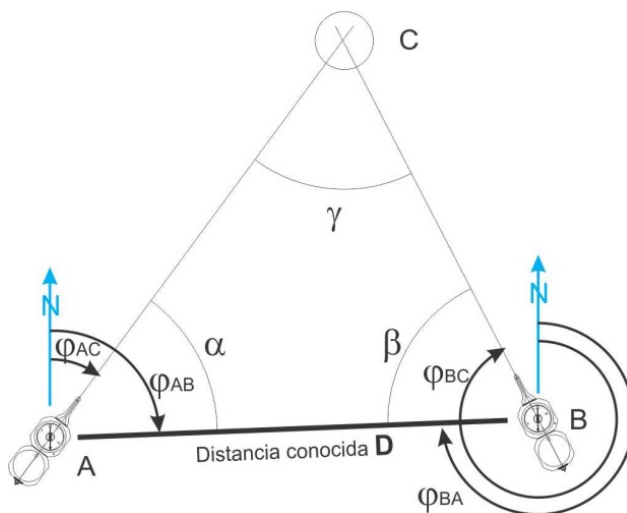
Figura 3-23. a) Distanciómetro Distomat de Wild, montado sobre un teodolito Wild T1.
b) Mira de espejo.

Estación total. La estación total es un teodolito electrónico con distanciómetro incorporado que funciona según el principio del instrumento indicado anteriormente (Fig. 3-24) también con una mira que es un espejo. Tiene la capacidad de medir distancias de manera indirecta con una precisión de 1 mm por km.



Figura 3-24. Estación total Marca TOPCON.

Intersección. El método de intersección permite también determinar distancias de manera indirecta. Consiste en visar un punto desde otros dos puntos de posición conocida. En el caso de la figura 3-25, intersección con brújula, la medida de los ángulos α y β y la distancia D (distancia conocida) desde los puntos A y B , permiten resolver trigonométricamente el triángulo ABC y determinar las distancias AC y BC según las siguientes ecuaciones:



$$a = f_{AB} - f_{AC}$$

$$b = f_{BC} - f_{BA}$$

$$g = 180^\circ - (a + b)$$

Figura 3-25. Determinación de las distancias AB y BC y ubicación del punto C haciendo intersección con brújula desde los puntos A y B .

Las distancias AC y CB se determinan aplicando el teorema del seno:

$$AC / \text{sen } b = CB / \text{sen } a = AC / \text{sen } g$$

Este método indirecto se usa habitualmente en el levantamiento con alidada y plancheta que veremos más adelante.

Resección. Similar al método anterior, en este caso desde la estación A se visa la estación C, luego se estaciona en C (sin medir la distancia AC) y desde allí se visa la estación B (Fig. 3-26). La determinación de las distancias AC y BC y la ubicación del punto C se resuelven trigonométricamente también aplicando el teorema del seno.

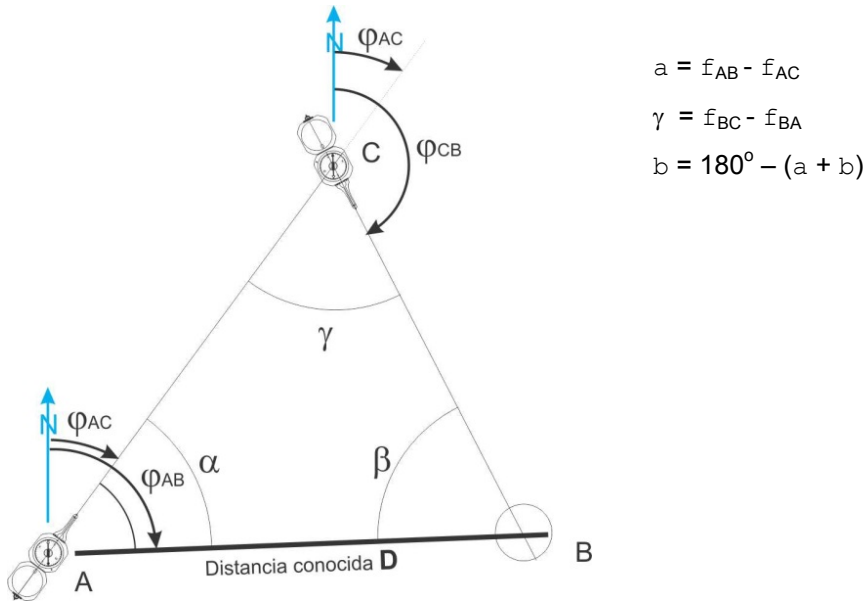


Figura 3-26. Determinación de las distancias AB y BC y ubicación del punto C por reseción.

Referencias

- Casanova Matera, L. (2002). *Topografía plana*. Universidad de los Andes, Facultad de Ingeniería, Departamento de Vías. Mérida, Venezuela.
- Davis, R., Foote, F. y Kelly, J. (1971). *Tratado de topografía*. 3era ed. castellano traducida de la 5ta ed. norteamericana. Madrid: Aguilar.