

Libros de **Cátedra**

Manual de levantamiento geológico

Una introducción a la geología de campo

Horacio Echeveste (coordinador)

n
naturales

FACULTAD DE
CIENCIAS NATURALES Y MUSEO


Editorial
de la Universidad
de La Plata



UNIVERSIDAD
NACIONAL
DE LA PLATA

MANUAL DE LEVANTAMIENTO GEOLÓGICO

UNA INTRODUCCIÓN A LA GEOLOGÍA DE CAMPO

Horacio Echeveste

(coordinador)

Facultad de Ciencias Naturales y Museo



UNIVERSIDAD
NACIONAL
DE LA PLATA

CAPÍTULO 11

Mapeo de estructuras

Horacio Echeveste y Pablo Diego González

Introducción

El reconocimiento y mapeo detallado de estructuras geológicas (posición de pliegues, dirección de movimiento de fallas, disposición de diaclasas) proporciona información sobre cómo y por qué se deforma la corteza. Estos datos son fundamentales en la exploración de recursos minerales (petróleo, gas y carbón), en el estudio de aguas subterráneas, en la construcción de grandes obras de ingeniería (presas de embalse, autopistas, túneles) y en la evaluación de estabilidad tectónica de una región (prevención de riesgo geológico asociado a terremotos).

Actualmente se hace un uso excesivo de la palabra estructura, especialmente por parte de los geólogos de yacimientos, quienes la utilizan con tres acepciones: veta, falla, disposición mineral dentro de la veta. Cuando hablamos de estructura en este Capítulo, nos referimos a aquellas características de las rocas producto de los esfuerzos compresivos o extensionales, pliegues, fallas y diaclasas.

La brújula geológica para la medición de elementos estructurales

En el Capítulo 6 vimos el uso de la brújula geológica tipo Brunton como instrumento topográfico, en éste se abordará su uso más frecuente, en la medición de acimut e inclinación de planos y líneas (fallas, diaclasas, estratificación, foliación, ejes de pliegues, estrías, etc.).

La posición espacial de un plano geológico quedará definida por su rumbo o acimut y su inclinación y la de una línea por su dirección y buzamiento.

Definiciones

- Línea de rumbo de un plano: es la línea formada por la intersección del plano con un plano horizontal (equivalente a la marca que deja el agua en la rampa de bajada de botes, figura 11-1).
- Rumbo de un plano: es el ángulo horizontal formado entre el norte o sur magnético y la línea de rumbo. Varía entre 0° y 90° desde el norte o sur hacia el este u oeste.

- Acimut de un plano: es el ángulo horizontal formado entre el norte magnético y la línea de rumbo medido en sentido de las agujas del reloj o dextrógiro (puede variar entre 0° y 360°)
- Inclinación de un plano: es el ángulo vertical formado entre la dirección de máxima inclinación y el plano horizontal, se mide en un plano perpendicular al rumbo.
- Buzamiento de una línea: es el ángulo vertical formado entre la línea y el plano horizontal medido en un plano vertical que contenga a la línea.

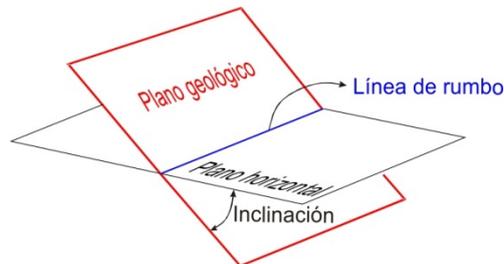


Figura 11-1. Línea de rumbo formada por la intersección del plano geológico con un plano horizontal e inclinación.

Como se comentó en el capítulo 6, la brújula Brunton, la más popular de las usadas por los geólogos en Argentina, se fabrica con dos tipos de graduación en su limbo horizontal, cuadrante, de 0°- 90° (Fig. 11-2a) y la mucho más difundida acimutal, de 0° a 360° (Fig. 11-2b) que miden rumbos y acimuts respectivamente.

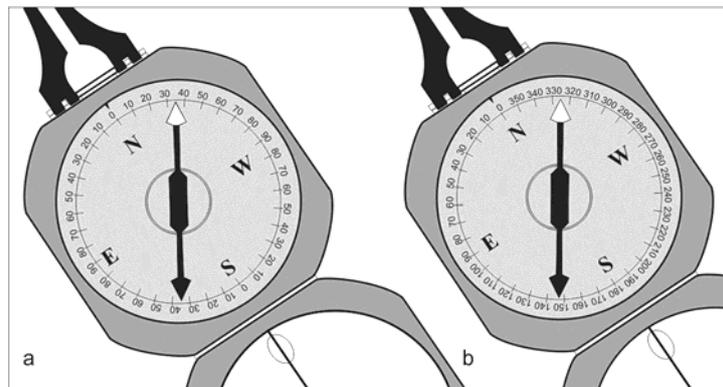


Figura 11-2. a) Brújula Brunton con limbo horizontal graduado en cuadrantes para medir rumbos, en este caso N35°O. b) Limbo horizontal graduado en acimut, en este caso la aguja marca acimut 325°.

Tipos de notación

La recopilación de datos de orientación de planos y lineaciones constituye una parte crítica del trabajo estructural, por lo que un tema importante es la nomenclatura que usaremos en la notación de acimut e inclinación de estos elementos (estratificación, planos de fallas, diaclasas, planos axiales, dirección y buzamiento o plunge de ejes de pliegues, estrías en planos de falla, lineaciones minerales, etc.). En la figura 11-3, la posición del plano es medida con una brújula con graduación acimutal (limbo de 0° a 360°) por lo tanto la notación será: acimut 315° (Fig. 11-3a) o, si se la gira 180° o se lee con el otro extremo de la aguja, acimut

135° (Fig. 11-3b). La notación final de la posición del plano será: acimut 315°/40° NE o acimut 135°/40° NE ya que la inclinación del plano respecto a la horizontal, medido con el clinómetro, es de 40° al noreste (Fig. 11-3c).

Si la brújula fuera de cuadrantes la notación sería, rumbo N 45° W/40° NE o, girada 180°, S 45° E/40° NE.

Una variante de esta última notación es la **tipo Americano** que solo usa el I y IV cuadrante, es decir los rumbos siempre llevarán la N como primera letra y variarán de 0° a 90 al E y al W. En todos estos casos, tanto en la graduación acimutal como en la de cuadrantes, la notación es una combinación de números y letras.

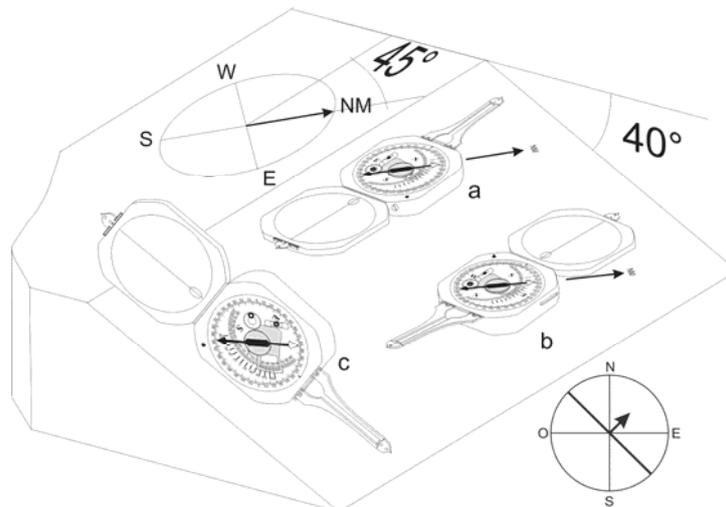


Figura 11-3. a) Acimut 315°/40° NE. b) Girando la brújula 180° se leerá acimut 135°/40° NE. c) Medición de la inclinación, 40° al NE.

En algunas ocasiones este tipo de notación no resulta apropiada, requiriéndose una forma más simple. Algunos *software* que procesan datos estructurales solo permiten cargarlos en formato numérico. Para cubrir este requerimiento se puede recurrir a dos tipos de notaciones. Uno es el método de la mano derecha que consiste en colocar la brújula de tal forma que la pínula larga apunte en la dirección del dedo índice de la mano derecha cuando el pulgar apunta en la dirección de la inclinación (“mano derecha” de los ingleses, figura 11-4a). En el ejemplo de la figura la notación sería 135°/40° ya que es en esta orientación, 135°, que el plano inclina en la dirección donde apunta el pulgar de la mano derecha. Lamentablemente hay otra regla de la mano derecha (de los americanos) que dice: se debe poner la pínula larga de la brújula en dirección hacia donde se encuentra nuestra mano derecha cuando el plano que se está midiendo inclina hacia nosotros (Fig. 11-4b). Es evidente que en el caso de elegir la regla de la mano derecha para expresar la posición de planos, se debe aclarar si el usado es el método de los ingleses o de los americanos.

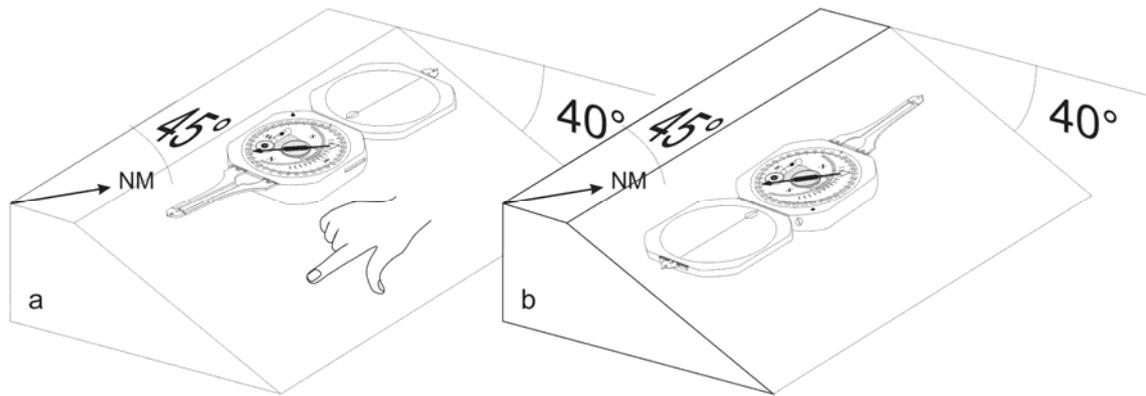


Figura 11-4. a) Acimut $135^\circ/40^\circ$, según la regla de la mano derecha de los ingleses. b) Acimut $315^\circ/40^\circ$, según la regla de la mano derecha de los americanos.

La otra notación que no necesita el uso de letras, muy utilizada en nuestro país, es la del **RBZ (rumbo del buzamiento)**. En este caso se apoya la tapa de la brújula sobre el plano a medir, con su línea central o sagital coincidiendo con la dirección de máxima inclinación, se horizontaliza con el nivel circular y se lee el extremo norte de la aguja imantada (Fig. 11-5).

Una forma práctica de encontrar en el plano la dirección de máxima inclinación y medir el RBZ es la siguiente: colocar el clinómetro en la posición 90° de tal manera que el nivel tubular quede del lado de la bisagra de la tapa, apoyar la base de la brújula sobre el plano con la pínula en la dirección de la inclinación, moverla hasta que el nivel tubular esté centrado, en esta posición la línea sagital de la brújula se encuentra en la línea de máxima inclinación (Fig. 11-6), luego se horizontaliza y se mide el RBZ

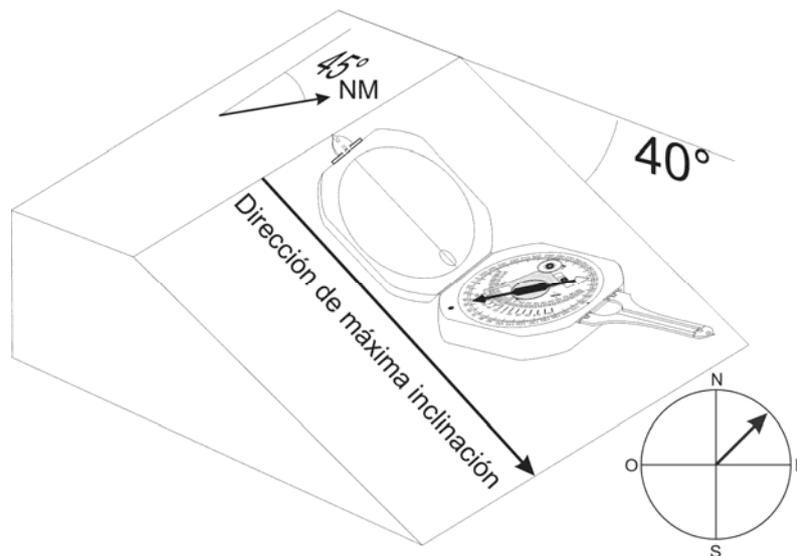


Figura 11-5. Posición de la brújula Brunton para medir el RBZ.

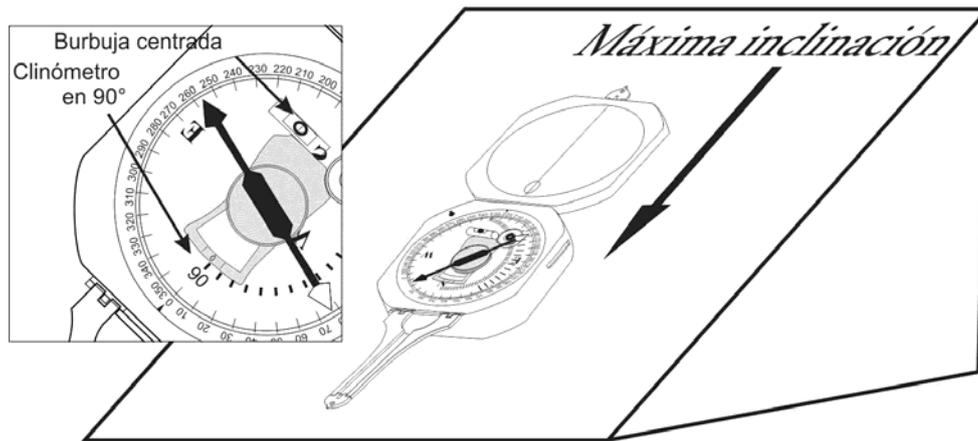


Figura 11-6. Determinación de la dirección de máxima inclinación.

La notación en el ejemplo de la figura 11-5 es $45^\circ/40^\circ$. Se desprende de la definición de inclinación que la medida del RBZ difiere en 90° de la del acimut. Esta notación también se conoce como de **Círculo Completo**.

Estas últimas notaciones resultan sumamente eficientes, solo dos números permiten la descripción de cualquier plano disminuyendo considerablemente los errores de anotación y/o de transcripción.

Existen entonces varias posibilidades de notación para planos: acimut/inclinación, rumbo/inclinación, rumbo del buzamiento (RBZ)/inclinación, acimut/inclinación según la reglas de mano derecha. En la figura 11-7 se ilustran las diferentes notaciones.

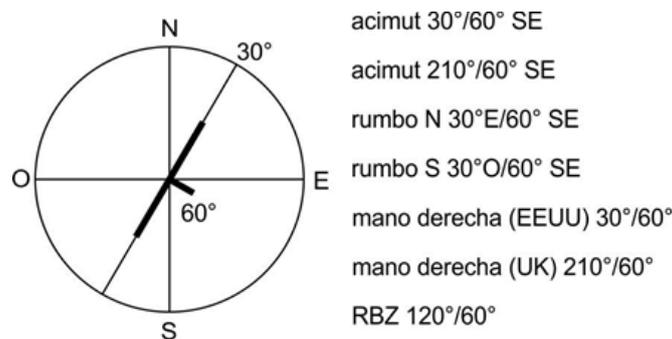


Figura 11-7. Diferentes maneras de notación para indicar la posición de un plano.

Medida de planos y líneas con la Brunton

Planos

La medida de rumbos e inclinaciones con brújula Brunton de planos geológicos (estratificación, foliación, diaclasas, fallas, etc.) puede hacerse de varias maneras, una es por contacto, como se ilustra en la figura 11-8. La medición por contacto puede hacerse tanto en el te-

cho de una capa (Fig. 11-8a, b) como en el piso (Fig. 11-8c, d). Al medir el rumbo se debe colocar la brújula en posición horizontal con ayuda del nivel horizontal, cuando la superficie es rugosa se puede colocar sobre la capa o plano a medir la libreta u otra superficie plana para asegurar que la caja de la brújula haga buen contacto con el plano (Fig. 11-8a). Cuando la brújula se encuentra en posición horizontal, el contacto de la arista de la caja con el plano que se está midiendo será una línea de rumbo o acimut. En el caso de la determinación del rumbo o acimut de planos de baja inclinación, la determinación con exactitud de la línea de rumbo usando el nivel horizontal puede presentar dificultad, para solucionar este problema se mide el RBZ como se indicó anteriormente.

Al medir la inclinación por contacto debemos tener el recaudo que la brújula, abierta y parada verticalmente, este colocada en la dirección de máxima inclinación, es decir perpendicular al rumbo (Fig. 11-8b).



Figura 11-8. a-d) Distintas formas de medir rumbo e inclinación con la brújula Brunton. Explicación en el texto.

Otra forma de medir el rumbo o acimut de una capa o plano es como la ilustrada en la figura 11-9. Las dos personas deben estar paradas sobre la superficie a medir en una línea de rumbo, en el caso de la figura 11-9, el techo de la capa. Para asegurarse que ambos estén en el rumbo, el operador de la brújula, parado sobre el techo de la capa y con el nivel del clinómetro en 0° , debe apuntar a los ojos de su ayudante (que tiene su misma altura y que también debe pararse sobre el techo de la capa) indicándole cuanto debe moverse hasta que la burbuja del nivel del clinómetro esté centrada (Fig. 11-9a). En ese momento la visual es una línea de rumbo. Luego se mide el rumbo o acimut como se indica en la figura 11-9b. La brújula debe estar en posición horizontal, controlada por el centrado de la burbuja del nivel circular, debemos visar al compañero a través del espejo de tal modo que nuestro ojo, la línea sagital de la brújula marcada en el espejo, la pínula larga y el compañero visado se encuentren en el mismo plano vertical, en este momento leemos en el limbo la posición de la aguja.

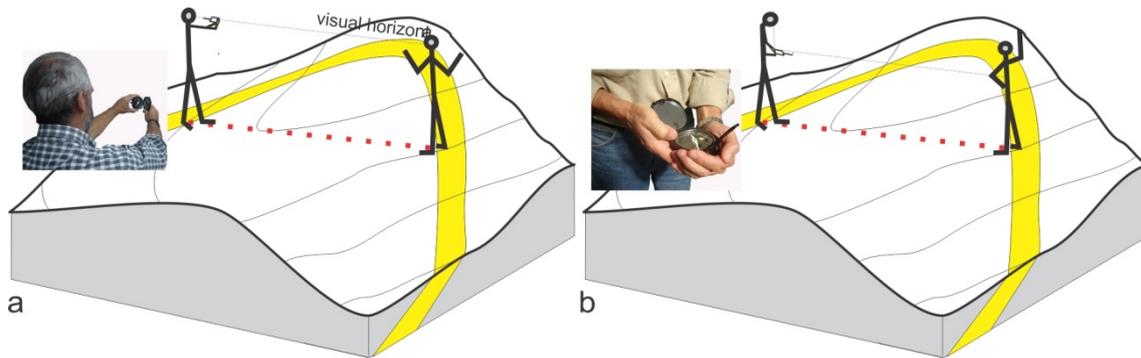


Figura 11-9. a) Determinación de una línea de rumbo, línea punteada roja, a partir de una visual horizontal paralela. b) Medición del rumbo.

La inclinación también puede medirse de forma remota, sin que la brújula esté en contacto con el plano a medir, como se ilustra en la figura 11-10. El único recaudo que debemos tener es asegurarnos que nos encontramos en una línea de rumbo y por lo tanto la inclinación que estamos midiendo es la verdadera.

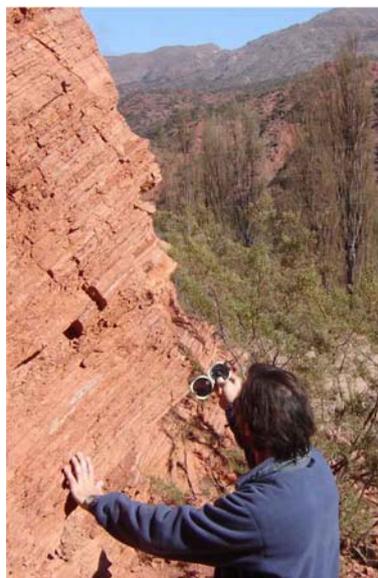


Figura 11-10. Medición remota de la inclinación de rocas sedimentarias.

Líneas

Un lineamiento (por ejemplo el eje de un pliegue, estrías en un plano de falla, etc.) se define en el espacio por su dirección (el acimut de un plano vertical imaginario que pasa por él) y por su inclinación o buzamiento en ese plano (Fig. 11-11a).

A menudo los lineamientos presentes sobre una superficie inclinada, como las estrías en una falla, se miden más fácilmente por su hundimiento (pich o rake en inglés), es decir, el ángulo que la lineación forma con el rumbo del plano, medido sobre el plano en sentido de la agujas del reloj (Fig. 11-11b).

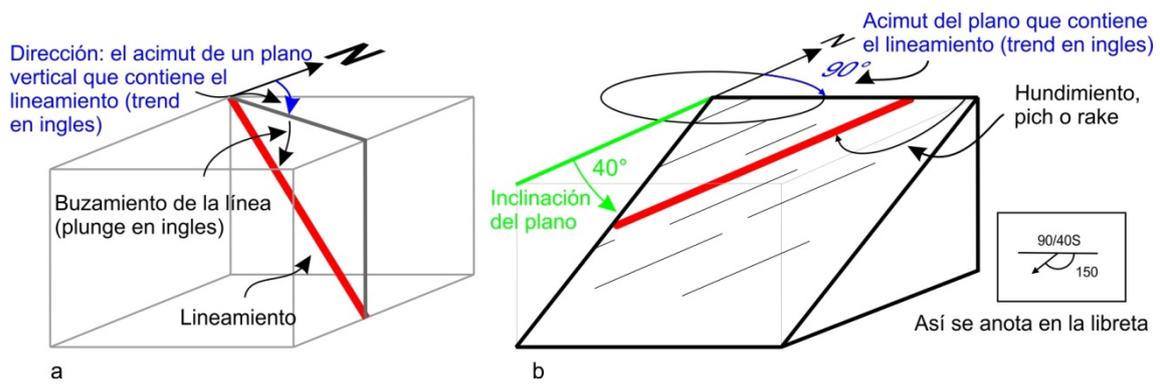
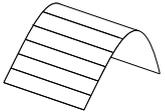
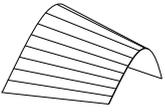
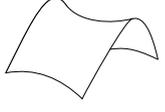


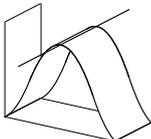
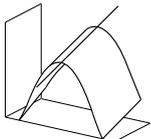
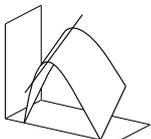
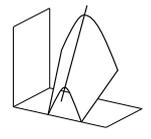
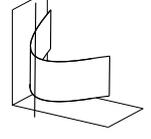
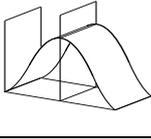
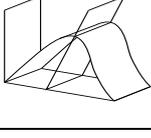
Figura 11-11. a) La posición de un lineamiento queda definida por el acimut del plano vertical que lo contiene y por el buzamiento medido en ese mismo plano. b) Hundimiento o rake de un lineamiento.

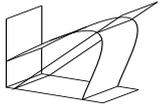
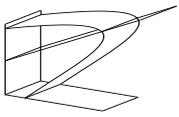
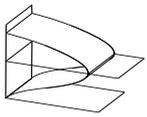
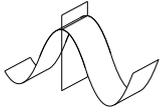
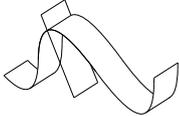
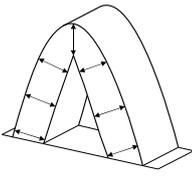
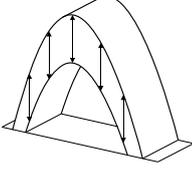
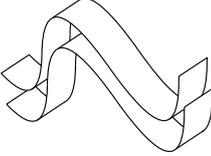
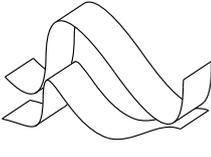
Para los datos anotados en la libreta, es aconsejable omitir el uso del símbolo de grado para no confundirlo con un cero. Algunos softwares usados para graficar datos estructurales requieren que los valores de acimut se expresen mediante tres dígitos por lo que a los acimuts menores a 100° se le debe anteponer un cero. Es una buena costumbre consignar los valores de acimut en la libreta con tres dígitos para diferenciarlos claramente de valores de inclinación.

Pliegues

El reconocimiento y correcta descripción y mapeo del plegamiento de una secuencia sedimentaria permitirá sacar conclusiones acerca del tipo de deformación y mecánica de plegamiento. A manera de recordatorio al momento de describir un plegamiento en el campo, en la Tabla 11-1 se indican los principales tipos de pliegues según la geometría del plano de estratificación, su posición espacial y la relación entre capas plegadas adyacentes.

| Tabla 11-1 Principales tipos de pliegues | | |
|--|--------------------------------------|---|
| Según la línea generatriz, recta paralela o no paralela y no recta | cilíndricos |  |
| | cónico |  |
| | no cilíndricos |  |
| Según el ángulo interlimbo | suave(180° - 120°) |  |
| | abierto (120° - 70°) |  |

| | | |
|--------------------------------------|---------------------|---|
| | cerrado (70°-30°) |  |
| | apretado (30°-0°) |  |
| | isoclinal (0°) |  |
| Según la curvatura | redondeado |  |
| | tipo chevron |  |
| Según el buzamiento del eje | horizontal (0°-10°) |  |
| | suave (10°-30°) |  |
| | moderado (30°-60°) |  |
| | fuerte (60°-80°) |  |
| | vertical (80°-90°) |  |
| Según la inclinación del plano axial | vertical (80°-90°) |  |
| | fuerte (60°-80°) |  |

| | | |
|----------------------------------|---------------------|---|
| | moderado (30°-60°) |  |
| | suave (10°-30°) |  |
| | recumbente (0°-10°) |  |
| Según la simetría de los flancos | simétrico |  |
| | asimétrico |  |
| Según el espesor de las capas | paralelo |  |
| | similar |  |
| Según el paralelismo entre capas | armónico |  |
| | disarmónico |  |

Que medir en un pliegue

Según se desprende de los tipos de pliegues de la Tabla 11-1, la clasificación de un pliegue determinado dependerá en parte de la medida de limbo, plano axial y eje del pliegue. Las medidas a recoger son las siguientes (ver Fig. 11-12):

- Acimut e inclinación de los limbos
- Acimut e inclinación del plano axial

- Acimut y buzamiento del eje
- Dirección de vergencia

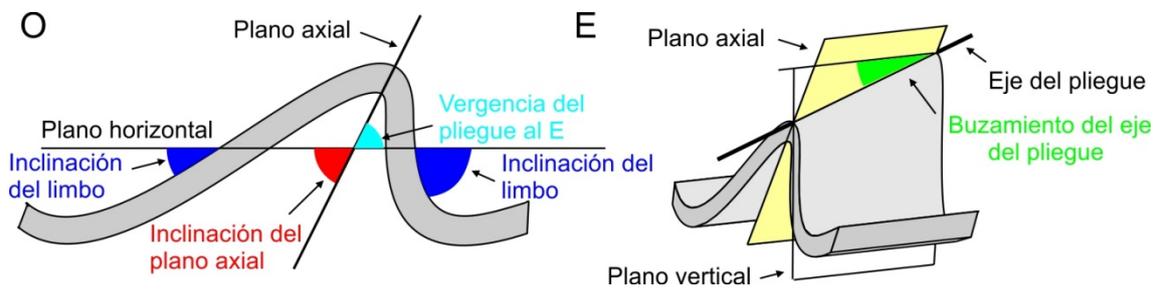


Figura11-12. Partes de un pliegue y elementos a medir.

La medición de la posición del plano axial y del eje del pliegue deberá realizarse en afloramientos que muestren una sección normal a la estructura. Esta situación se presenta raramente, por lo que la medida de ambos elementos deberá obtenerse, en la mayoría de los casos, a partir de los datos de acimut e inclinación de los flacos mediante proyección estereográfica.

Para que los pliegues puedan ser volcados en el mapa deben tomarse un suficiente número de datos de acimut e inclinación de la estratificación, al menos un dato por cada 4 cm² del mapa (independientemente de la escala). Asimismo, para que queden claramente representados, además de la posición de las capas, deben volcarse la traza del plano axial, esto es, la intersección del plano axial con la superficie topográfica y la dirección de buzamiento del eje. Recordar que al igual que la traza de los contactos litológicos, la traza del plano axial estará controlada por la topografía según la regla de las V geológicas.

En la figura 11-13a se muestra un ejemplo de la relación entre la traza de afloramiento de un pliegue y la topografía. La línea azul es la superficie de estratificación plegada que pone en contacto la unidad gris con la amarilla. Si se analiza la inflexión de la traza en el sector **a** se puede concluir, según la regla de las V, que responde a la interacción del plano geológico con la topografía. El segmento entre los puntos **d** y **b** que pasa por **a** corresponde entonces a un plano de estratificación que inclina al SE ya que el punto **a** se encuentra en cota 550 y los puntos **b** y **d** en cota próxima a 450.

Uniando los puntos de intersección de este plano de estratificación, por ejemplo con la curva de nivel de cota 500, se obtendrá fácilmente el acimut del plano, mientras que la resolución del problema de los tres puntos permitirá calcular su inclinación, en este caso menor que la pendiente topográfica (al SE) y de bajo ángulo según su relación con las curvas de nivel.

Siguiendo el mismo razonamiento, la inflexión en el punto **c** también corresponde a una V geológica de un plano de estratificación que inclina hacia el NO, ya que el punto **c** está más bajo que **b** y **d**. La inclinación de este plano es más fuerte, ya que su traza corta la topografía según una línea casi recta.

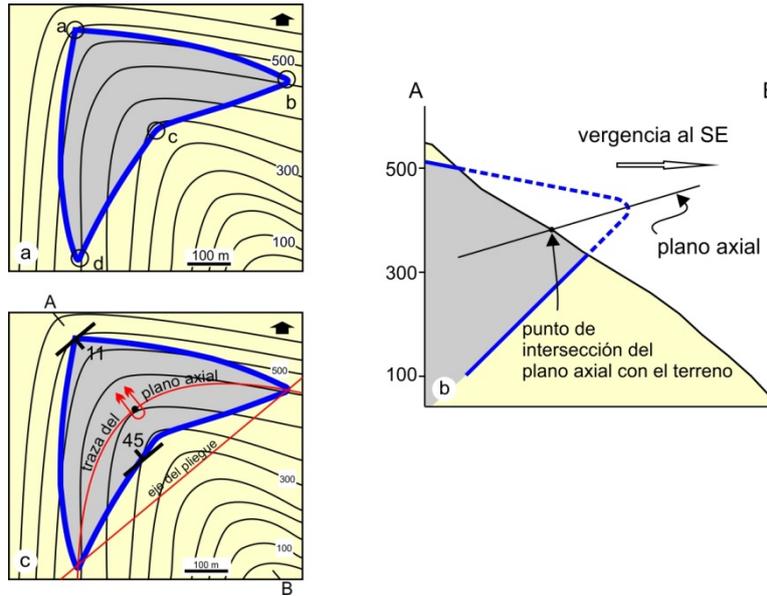


Figura 11-13. a) Afloramiento de un pliegue. Se definen cuatro vértices en la traza, dos debido a la regla de las V (a y c) y dos a la nariz del pliegue (b y d). b) Perfil transversal al pliegue donde se aprecia la inclinación de los flancos y posición del plano axial. c) Trazas del eje del pliegue y del plano axial.

De lo expuesto, se desprende que las inflexiones en los puntos **b** y **d** corresponden a la zona de charnela del pliegue, y por ellos pasa el eje que es horizontal, por encontrarse ambos puntos a la misma cota (Fig. 11-13c). Según el razonamiento seguido, la porción de la traza **d a b** corresponde a un flanco del pliegue y la **d c b** al otro. Si bien ambos planos inclinan hacia el interior de la estructura (vista en planta), se trata de una antiforma y si definimos a la unidad gris como la más vieja, corresponde a un anticlinal; el perfil de la figura 11-13b, normal al rumbo de la estructura, ayuda a visualizar esta situación.

La traza del plano axial pasa por los puntos **b** y **d** (ya que contiene al eje del pliegue) y como las inclinaciones de ambos flancos son distintas, el plano axial no es vertical y su traza por lo tanto no será una línea recta. Del perfil de la figura 11-13b se puede obtener también el punto donde el plano axial corta la topografía en la línea de éste; uniéndolo con los puntos **b** y **d** se puede marcar la traza del plano axial.

Otro dato importante a relevar es el acimut de la vergencia del pliegue y consignar en la libreta si la antiforma o sinforma que se describe es un anticlinal o sinclinal. En la figura 11-14 se muestra un sinclinal como una antiforma (a) y una sinforma (b).

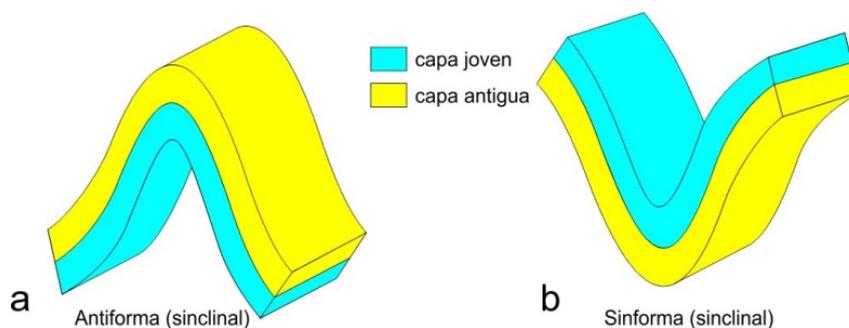


Figura 11-14. a) Relación entre un sinclinal dispuesto como una sinforma (a) y una antiforma (b).

En ocasiones la pequeña dimensión de algunos pliegues impide representarlos a escala en el mapa, por lo tanto su dibujo en la libreta o una fotografía resultará imprescindible para luego ilustrar el informe de campo. En el Anexo IV se muestran las rastras de los principales tipos de pliegues.

Fallas

En las zonas superiores de la corteza, en condiciones de baja presión de confinamiento, las rocas se comportan de manera frágil frente a los esfuerzos y se deforman rompiéndose.

Una falla es una discontinuidad en la corteza, plana a curvilinear, que ha tenido desplazamiento medible de las rocas a ambos lados de la superficie de falla, desde escala microscópicas hasta centenares o miles de km como en límites de placa. Puede ocurrir como una superficie de fractura discreta, o más comúnmente como una **zona** de falla tabular limitada por superficies discretas o difusas que contienen abundante superficies de fracturas secundarias. La alta densidad de fracturas dentro de esas zonas favorece la alteración y meteorización posterior. Las fallas y zonas de fallas, en consecuencia, son más “alterables” que las rocas no deformadas adyacentes, esto a veces dificulta su reconocimiento debido a que constituyen zonas pobremente expuestas.

Si bien generalmente las zonas de falla suelen estar cubiertas por depósitos superficiales, la cuidadosa observación del entorno de una posible falla puede dar indicios de su existencia. La presencia de una escarpa, un río siguiendo un trayecto más o menos recto, el contacto entre unidades litológicas que normalmente no son adyacentes, el desplazamiento de alguna característica lineal como un dique y, en fallas activas, el desplazamiento de vías férreas, arroyos o carreteras, puede indicar la presencia de una falla (Fig. 11-15). De esta manera, muchas fallas terminan siendo mapeadas a partir de inferencias de su presencia.

A manera de recordatorio al momento de describir una falla en el campo, en la Tabla 11-2 se indican los principales tipos de fallas de acuerdo a la posición del plano de falla, movimiento relativo de los bloques y relación entre el plano de falla y la estratificación.

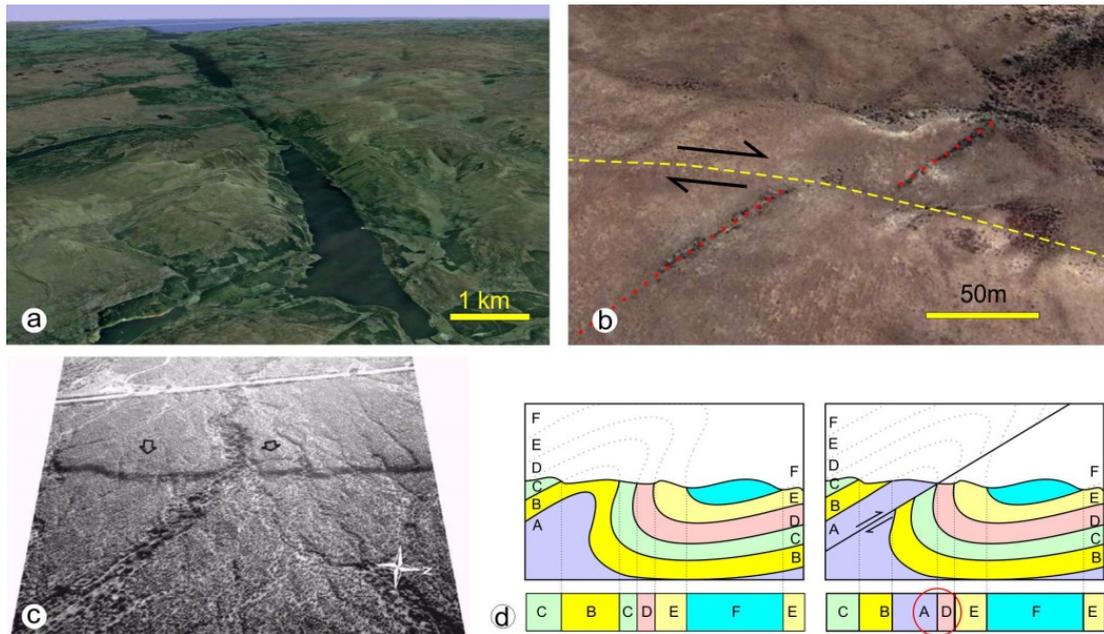
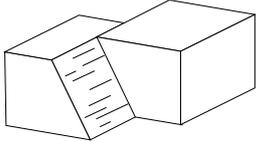
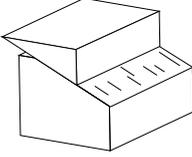
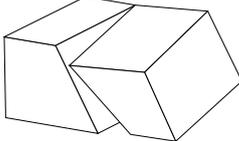
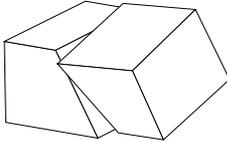
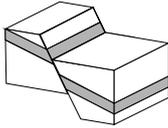
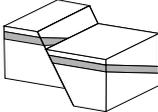
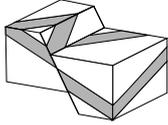
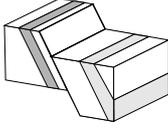


Figura 11-15. Evidencias de falla. a) Valles y lagos alineados asociados a la falla Gran Glen que divide en dos a las Tierras Altas de Escocia. b) Una falla con componente de rumbo corta a una veta de jaseroide en el distrito argentífero Manantial Espejo, Santa Cruz. c) Escarpa de la falla activa Villavicencio Sur, norte de Mendoza (tomado de Mingorance, 2006). d) El contacto entre dos unidades sedimentarias normalmente no adyacentes (A y D) pone en evidencia la presencia de una falla.

| Tabla 11-2 Principales tipos de fallas | | |
|--|--|--|
| Según la inclinación del plano de falla | de alto ángulo (>45°) | |
| | de bajo ángulo (<45°) | |
| Movimiento relativo de los bloques (no rotacionales) | directa (normal o extensional) | |
| | inversa | |
| | de rumbo o transcurrente (dextral, derecha o sentido horario) | |

| | | |
|---|---|---|
| | de rumbo (sinestral, izquierda o sentido antihorario) |  |
| | inversa de bajo ángulo (corrimiento) |  |
| Fallas rotacionales | de desplazamiento oblicuo (en bisagra) |  |
| | de desplazamiento oblicuo (en tijera) |  |
| Relación entre el plano de falla y la estratificación | paralela al rumbo de las capas |  |
| | paralela a la inclinación de las capas |  |
| | oblicua a las capas |  |
| | paralela a la estratificación |  |

Que medir en una falla

En la figura 11-16 se ilustran las partes de una falla y los datos estructurales a relevar para su descripción y posterior mapeo.

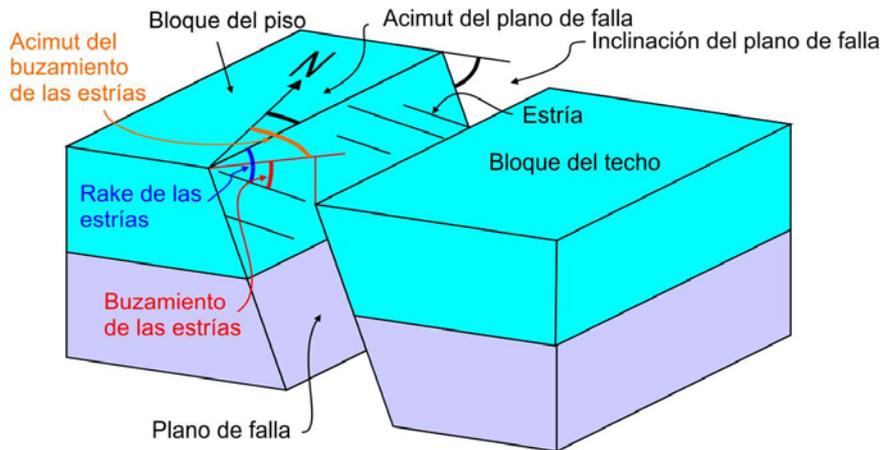


Figura 11-16. Falla directa con componente de rumbo donde se indican sus partes y los datos estructurales a relevar.

Desplazamiento de la falla

Otro dato importante que deberíamos obtener cuando analizamos una falla es el desplazamiento de los bloques a lo largo del plano de falla. Este movimiento puede describirse a partir del desplazamiento de dos puntos que originalmente eran adyacentes a cada lado del plano de falla, vector AB de la figura 11-17.

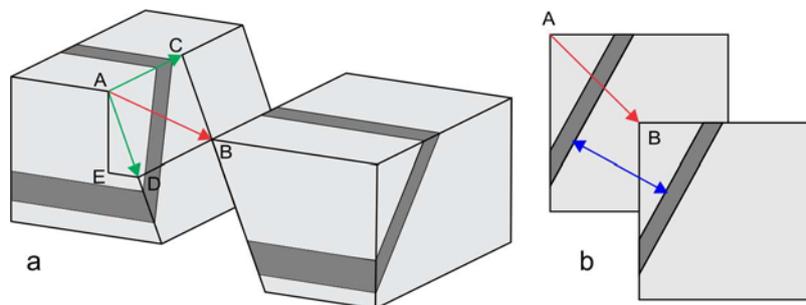


Figura 11-17. a) AB: desplazamiento neto. AC: componente de rumbo. AD: componente de inclinación. ED: rechazo horizontal. AE: rechazo vertical. b) La flecha azul indica el desplazamiento estratigráfico, medido en una dirección normal a la capa

El vector AB, desplazamiento neto, puede dividirse en una componente en el sentido del rumbo de la falla, vector AC denominado componente de rumbo u horizontal y en una componente en el sentido de la inclinación, vector AD o componente de inclinación. En general, en la observación de campo, al no conocerse la dirección y sentido de movimiento de la falla, la descripción de la misma estará limitada por la determinación de alguno de estos dos movimientos relativos, al desplazamiento según la componente de rumbo en afloramientos horizontales o al desplazamiento según la componente de inclinación en secciones transversales. Por otra parte este último puede descomponerse en los vectores ED, llamado rechazo horizontal y AE denominado rechazo vertical.

En la mayoría de los casos, los datos de desplazamiento solo pueden estimarse a partir del movimiento de elementos geológicos de geometría plana como diques, vetas o planos de estratificación. Sin embargo, aun reconociendo un desplazamiento relativo de algún rasgo plano a ambos lados de un plano de falla, sin otros datos que aporten al conocimiento del movimiento relativo de los bloques, no se podrá tener verdadera certeza respecto al desplazamiento neto de la falla. En la figura 11-18 se ilustra con un ejemplo; la observación de campo en el plano horizontal de un cuerpo tabular desplazado por una falla resulta un dato insuficiente para conocer el verdadero movimiento de los bloques ya que, si el cuerpo tabular tiene una inclinación distinta a la vertical, la relación del cuerpo desplazado puede explicarse por una falla de rumbo (a), una falla inversa (b), o una falla directa (c).

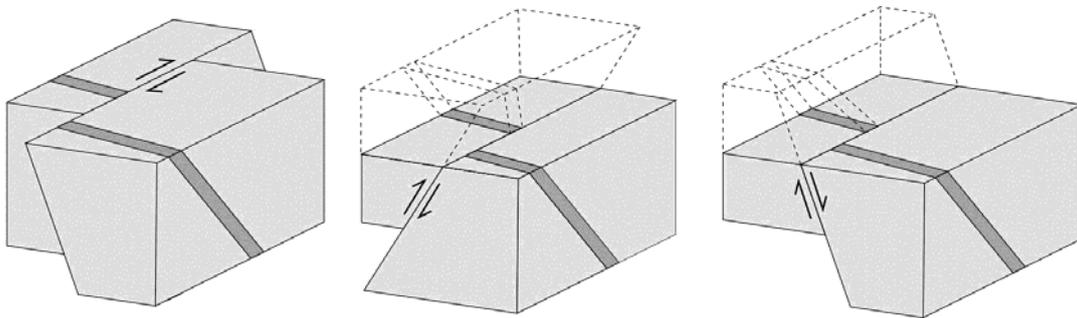


Figura 11-18. Tres tipos distintos de falla producen el mismo tipo de afloramiento

En una situación como la ilustrada en la figura 11-18, resulta evidente que el desplazamiento neto de la falla no podrá obtenerse, sin embargo, al momento de la descripción, al contar con una capa marcadora, se podrán medir fácilmente la separación en el rumbo (desplazamiento aparente horizontal) y calcular la separación en la inclinación, la separación estratigráfica, vertical y horizontal. La figura 11-19 representa la vista en planta de uno de los casos de la figura anterior asumiendo una topografía plana (cota 0 m).

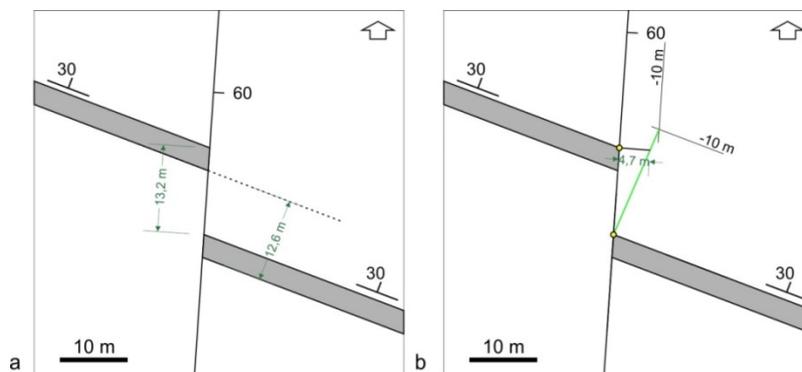


Figura 11-19. Explicación en el texto.

La separación según la línea de rumbo se mide directamente en el mapa sobre el rumbo de la falla, 13,2 m en el ejemplo (Fig. 11-19a). La separación estratigráfica se puede calcular mi-

diendo el desplazamiento de la capa en planta (12,6 m en el ejemplo) y usando el seno del ángulo de inclinación de la capa (30°), según la siguiente expresión:

$$\text{separación estratigráfica} = 12,6 \text{ sen } 30 = 6,3 \text{ m}$$

(un perfil normal a la capa ayudará a ver esta relación)

La separación en la inclinación se puede calcular trazando curvas de nivel estructurales sobre el plano de falla y sobre la capa en el bloque del techo, por ejemplo a -10 m (Fig. 11-19b), uniendo su intersección con su homólogo en superficie se obtendrá la intersección entre el plano de falla y el techo de la capa (cuya proyección horizontal está representada por la línea verde en la figura). Trazando una normal a la falla desde el mismo punto en el bloque del piso de la falla hasta la línea de intersección, se obtendrá la separación horizontal de la falla (4,7 m en el ejemplo). La separación vertical se calcula fácilmente sabiendo la inclinación de la falla:

$$\text{separación vertical} = \text{rechazo horizontal } \tan \text{ del ángulo de inclinación de la falla}$$

(8,1 m en el ejemplo).

La separación en la inclinación se puede calcular usando el teorema de Pitágoras (9,4 m).

Sin olvidar que las fallas suelen reactivarse a lo largo de su historia y que durante las reactivaciones pueden moverse en sentido y dirección distinta a las anteriores, la presencia de estrías en el plano de falla puede indicar la dirección del movimiento y en algunos casos también el sentido, al menos relacionado al último movimiento. En la figura 11-20 se ilustra un espejo de falla con estrías que definen la dirección del movimiento y “escalones” (dentro del círculo) que indica el sentido, en este caso el bloque se ha movido en el sentido de la flecha.

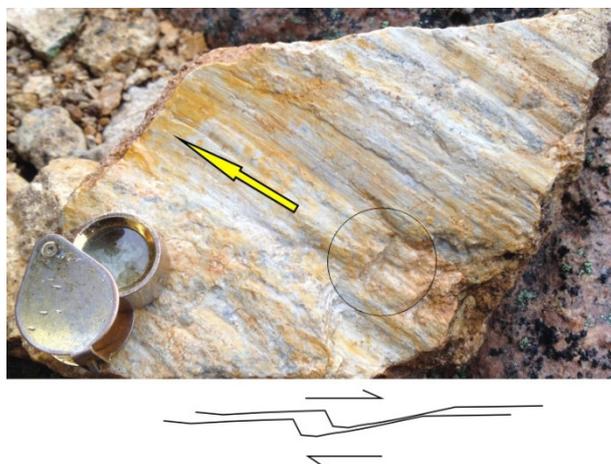


Figura 11-20. Espejo de falla con estrías y escalones que indican el sentido y dirección del desplazamiento de la falla.

Otros indicadores del movimiento relativo de la falla son la flexión de estratos como respuesta temprana al esfuerzo previo al fallamiento (Fig. 11-21) o la presencia de ondulaciones en el plano de falla con crestas y senos paralelos a la dirección de movimiento. Las fallas normales tienen en general inclinaciones fuertes, subverticales, mientras las inversas suelen tener inclinaciones suaves ya que, según la ley de Anderson la fractura se genera a unos 30° del mayor esfuerzo (σ_1 , vertical en las directas y horizontal en las inversas). En el caso de fallas

reconocidas en el campo en fotos aéreas o imágenes satelitales, su inclinación se puede estimar por la forma en que la traza de la falla corta la topografía, si la traza de la falla atraviesa bruscamente la topografía su inclinación será fuerte, si sigue los contornos del terreno su inclinación será suave.

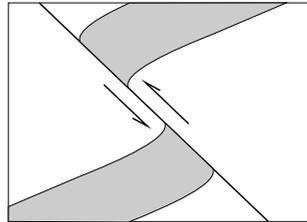


Figura 11-21. Flexión de los estratos próximo a la zona de falla indica el movimiento relativo en el sentido de la inclinación.

Si bien como se ha expresado anteriormente, en la mayoría de los casos la determinación del desplazamiento neto de una falla suele ser muy difícil de obtener, en ocasiones, donde la falla corta un conjunto de rasgos tabulares como vetas o diques, la obtención del verdadero movimiento de la falla puede lograrse realizando un análisis geométrico de los planos involucrados.

En la figura 11-22 se ilustra un caso. El objetivo del análisis para la determinación del desplazamiento neto consistirá en obtener la posición de dos puntos sobre el plano de falla que hayan estado adyacentes antes del movimiento. Esos puntos, denominados por algunos autores de lengua inglesa como *piercing point*, corresponden, en el caso del ejemplo, a la intersección de las dos vetas sobre el plano de falla.

Un primer análisis del mapa de la figura (de topografía horizontal) indica que la falla, cuyo plano inclina 70° al NNO debe ser directa, ya que el bloque norte tiene que haber bajado para que la distancia horizontal entre ambas vetas aumente (las vetas inclinan, una al NE (A) y la otra al O (B)). Otro resultado de la observación es que la falla es del tipo no rotacional, ya que las inclinaciones de las vetas han permanecido constantes a ambos lados del plano de falla.

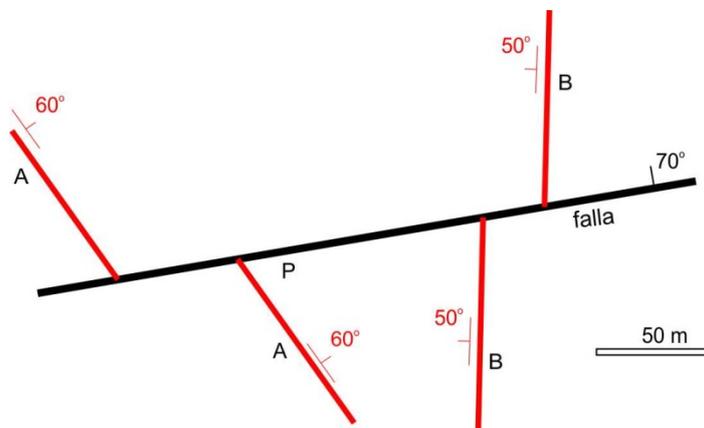


Figura 11-22. Dibujo en planta, dos vetas inclinadas, A y B son cortadas por una falla.

Para obtener el punto de intersección de las dos vetas sobre el plano de falla en el bloque del techo, que evidentemente estará a una cota menor que la superficie topográfica (horizontal de cota 0 m), se dibujan primero curvas de nivel estructurales sobre los tres planos a una cota menor, por ejemplo a cota -50 m, igual que el caso del ejemplo de la figura 11-19 (líneas de puntos en la figura 11-23a). Las líneas Af y Bf (verdes, Fig. 11-23a), obtenidas al unir las intersecciones de las vetas con la falla a cota 0 y a cota -50, son las proyecciones sobre el plano horizontal de las intersección de las vetas con la falla. Ambas líneas se cortan en el punto H1 que es la proyección sobre el plano horizontal del punto buscado (intersección de los tres planos en el bloque del techo de la falla o *piercing point*). Como el punto H1 se encuentra en el plano de falla, su cota se puede obtener a partir de la distancia horizontal entre la proyección del punto H1 en el plano horizontal y el punto P, la cota de H1 resulta entonces igual a la distancia P-H1 por la tangente del ángulo de inclinación de la falla (70°).

La obtención del otro *piercing point* en el bloque del piso es sencilla, basta con trazar dos paralelas a las líneas A-f y B-f desde las intersecciones de las trazas de las vetas del bloque del piso y el plano de falla para obtener la intersección de los tres planos en el bloque del piso, punto H2, proyectado sobre el plano horizontal. La cota del punto H2 se obtiene del mismo modo que la del punto H1. Conociendo las cotas de ambos puntos y la distancia horizontal que las separa (H1-H2), se puede conocer la distancia inclinada o desplazamiento neto, su acimut y buzamiento.

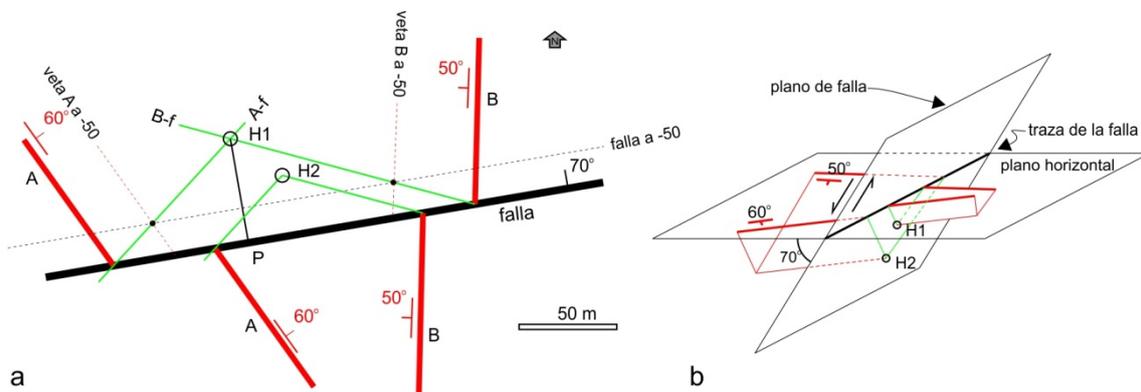


Figura 11-23. a) Dibujo en planta, las intersecciones de las trazas de las vetas y plano de falla 50 m por debajo de la superficie permite trazar su intersección, punto H1 en el bloque del techo y H2 en el del piso. b) Esquema de una vista en 3D.

Otro elemento que puede constituir un *piercing point* que permita determinar el desplazamiento neto de una falla es la charnela de un pliegue en su intersección con el plano de falla (Fig. 11-24).

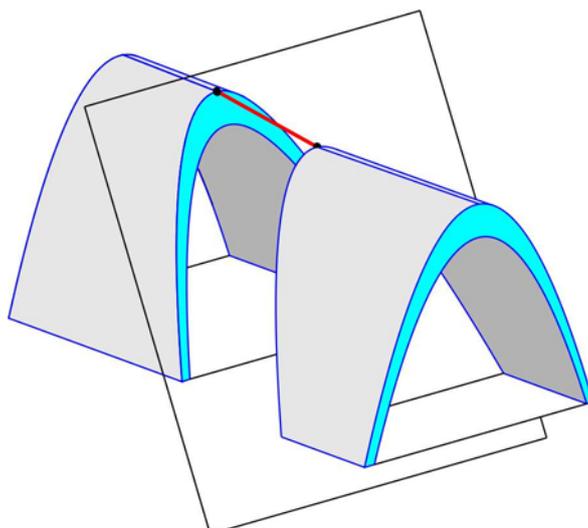


Figura 11-24. La intersección de la zona de charnela con el plano de falla permitiría determinar el desplazamiento neto de la falla.

Al igual que los planos axiales de los pliegues, las fallas se mapean según la intersección del plano de falla con la superficie topográfica. Nuevamente recordemos que las trazas de planos de falla con inclinaciones distintas de la vertical estarán controladas por la regla de las V geológicas. En el Anexo IV se indica cómo se registran las fallas en el mapa.

Rocas de falla

Si bien en algunas ocasiones las fallas se resuelven a través de una superficie única de discontinuidad sin modificación de las rocas inmediatas al plano de falla, es más frecuente que la fractura involucre una zona, paralela a la falla, donde la roca es triturada, constituyendo una roca de falla. Si la falla se produce a poca profundidad, en la zona de deformación frágil propia de la corteza superior, las rocas de fallas formadas serán cataclasitas (brechas de falla, microbrechas harina de falla, entre otras). Si por el contrario la deformación se produce en la zona de deformación dúctil, las rocas de falla formadas serán protomilonitas, milonitas y ultramilonitas, propias de las zonas de cizalla profundas. Estas zonas suelen conformar fajas de deformación heterogénea de varios metros a cientos de metros de ancho y de centenas de kilómetros de largo. La característica estructural de las zonas de cizalla es el desarrollo de una marcada foliación y lineación miloníticas. Estructuras de estratos originales raramente se conservan en las milonitas.

Cataclasitas. Por lo general son rocas cohesivas y no foliadas, que exhiben evidencias de fracturación frágil y también de procesos de disolución por presión. Las cataclasitas se clasifican según el tamaño de grano y de la relación % entre los clastos y la matriz. Las brechas de falla pueden involucrar espesores muy variables, desde pocos centímetros hasta decenas de metros. El reconocimiento en el campo de una brecha originada por una falla constituye una prueba muy importante de la existencia de ésta. Se las reconoce por formar cuerpos tabulares (zona de falla), en general monomíticos, de roca fracturada con fragmentos angulosos de

tamaño variable, normalmente inmersos en una matriz más fina. Una protocataclasita tiene hasta un 50% de matriz y una cataclasita foliada, además de la estructura planar, está compuesta esencialmente por argilominerales, que si superan el 70% en volumen, la roca se denomina harina de falla.

Milonitas. Las milonitas son rocas foliadas y cohesivas, con desarrollo de una marcada fábrica planar y lineal, formadas bajo condiciones de deformación dúctil a dúctil-frágil. Están compuestas por porfiroclastos y matriz, cuya relación de abundancia permite clasificarlas en protomilonitas (10-50% de matriz), milonitas (50-90% de matriz) y ultramilonitas (90-100% de matriz) (Fig. 11-25). La matriz es de grano fino y está compuesta por cuarzo, clorita, biotita y muscovita. Los porfiroclastos son de feldespatos, granate, hornblenda y piroxeno, y tienen evidencias de deformación cristaloplástica (extinción ondulosa) y/o recristalización parcial.

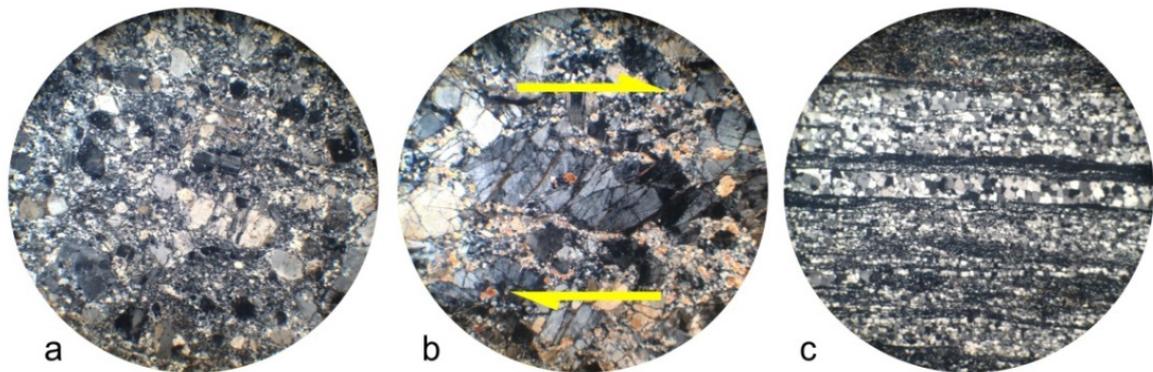


Figura 11-25. Microfotografías de secciones delgadas de granitoides deformados por cizalla dúctil en el flanco norte del Cerro Albión en las Sierras de Tandil. a) Protomilonita con una incipiente foliación dada por estiramiento de los minerales del protolito. b) Milonita con marcada foliación producto del acomodamiento en bandas de minerales de hábito planar (filosilicatos) y un indicador cinemático conformado por un porfiroclasto de feldespato fracturado y desplazado en forma de "estante de libros". c) Ultramilonita con foliación muy marcada dada por la alternancia de bandas cuarzo-feldespáticas de diferente granulometría y bandas de filosilicatos.

La presencia de cierta asimetría permite utilizar los porfiroclastos como indicadores cinemáticos del sentido de movimiento de las zonas de cizalla (Fig. 11-26a y b) junto con otras estructuras como pliegues en vaina, foliación oblicua, foliación S/C, etc. (Passchier y Trouw, 2005, Trouw et al., 2012).



Figura 11-26. Milonita granítica de alto grado, Ortogneis Juchi (Mesoproterozoico), Sierras Pampeanas occidentales de La Rioja. La milonita está compuesta por porfiroclastos asimétricos tipo sigma (a. cinemática sinistral) de feldespato alcalino (fk) y tipo delta de granate coronítico (b. cinemática dextral), y por una matriz foliada (S milonítica) de grano fino con biotita. Se exhiben otros elementos de fábrica de una milonita. Diámetro de la moneda: 24 mm.

Es común encontrar en ellas evidencia de recristalización metamórfica y según su grado se clasifican como de alto, medio y bajo grado, en tanto que según el tipo de roca del protolito pueden denominarse como milonita granítica, milonita gneísica, filonita, etc. (Trouw et al., 2012).

Algunas fábricas miloníticas pueden ser confundidas con clivaje pizarreño (o incluso, a pequeña escala, con bandas de flujo ígneas). Para confirmar una fábrica milonítica, la roca debe tener sus dos componentes, los porfiroclastos y la matriz, y además se deben buscar otras microestructuras características de estas rocas, tales como extinción ondulosa, maclas combadas o acuñadas, estructuras manto-núcleo, entre otras. Los indicadores cinemáticos suelen ser meso a microscópicos (Fig. 11-27).



Figura 11-27. Porfiroclastos de feldespato K en una milonita granítica, Macizo Norpatagónico, Río Negro. La asimetría indica un cizalla sinistral.

Pseudotaquilita. Es una roca de falla formada casi enteramente por vidrio. Por lo general se intercala como bandas finas entre milonitas o cataclasitas (Fig. 11-28). Se forman por la fusión del protolito causada por el calor de fricción en la zona de cizalla.



Figura 11-28. Zona de cizalla frágil-dúctil con brecha y pseudotaquilita (flechas blancas) en el plutón granodiorítico Arroyo Salado, Macizo Norpatagónico (Río Negro). Diámetro de la moneda: 22 mm.

Diaclasas

Las diaclasas son las estructuras más comunes y frecuentes que se reconocen en las rocas. Pueden responder a distintos orígenes, se puede producir por enfriamiento, ser el resultado de procesos tectónicos o por liberación de presión confinante durante la exhumación de macizos rocosos. Aquellas producidas por deformación cortical suelen conformar sistemas o juegos cuyo análisis estructural puede brindar importante información respecto a la deformación general de un área.

Para poder hacer inferencias estructurales a partir de diaclasas se deberían medir una cantidad suficiente como para que tengan valor estadístico. En una zona con 3 o 4 juegos de diaclasas habría que medir en el orden de un centenar de estas estructuras. No es necesario volcar las diaclasas en el mapa geológico (100 datos de diaclasas abarrotaría el mapa), a excepción de aquellas denominadas maestras o principales (solo algunas). Si se considera importante consignar en el mapa las diaclasas de una zona, se puede insertar en el mismo un diagrama de rosas.

Referencias

- Allmandinger, R. (1988). *Técnicas modernas de análisis estructural*. Buenos Aires: Asociación Geológica Argentina, Serie B 16.
- Bennison, G.M. (1990). *An Introduction to Geological Structures and Maps*. Fifth Edition. Londres: Hodder & Stoughton. 69 pp.

- Davis, G. y Reynolds, S. (1996). *Structural geology of rocks and regions*. 2da. Edición, 776 pp. New York: J. Wiley and Sons.
- Lisle, R.F. (2004). *Geological Structures and Maps A practical guide*. 105 pp. Linacre House, Jordan Hill Oxford: Elsevier Butterworth-Heinemann.
- McClay, K. (1988). *The mapping of geological structures*. Chichester, West Sussex: John Wiley and Sons.
- Mingorance, F. (2006). *Morfometría de la escarpa de falla histórica identificada al norte del cerro La Cal, zona de falla La Cal, Mendoza*. Revista de la Asociación Geológica Argentina, 61(4), 620-638.
- Passchier, C., Trow, R. (2005). *Micro-tectonics*. 289 p. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag.
- Trouw, R.J.A., Passchier, C.W., Wiersma, D.J. (2012). *Atlas of Mylonites - and related micro-structures*. 322 p. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag.
- Wilson, G. (1978). *Significado tectónico de las estructuras menores y su importancia para el geólogo de campo*. Traducción de la edición inglesa de 1972, 128 pp. Barcelona: Omega.

Manual de levantamiento geológico : una introducción a la geología de campo / Horacio Echeveste ... [et al.] ; coordinación general de Horacio Echeveste. - 1a ed . - La Plata : Universidad Nacional de La Plata ; La Plata : EDULP, 2018.

Libro digital, PDF - (Libros de cátedra)

Archivo Digital: descarga y online
ISBN 978-950-34-1623-5

1. Mapa. 2. Geología. I. Echeveste, Horacio II. Echeveste, Horacio, coord.
CDD 551

Diseño de tapa: Dirección de Comunicación Visual de la UNLP

Universidad Nacional de La Plata – Editorial de la Universidad de La Plata
47 N.º 380 / La Plata B1900AJP / Buenos Aires, Argentina
+54 221 427 3992 / 427 4898
edulp.editorial@gmail.com
www.editorial.unlp.edu.ar

Edulp integra la Red de Editoriales Universitarias Nacionales (REUN)

Primera edición, 2018
ISBN 978-950-34-1623-5
© 2018 - Edulp

n
naturales



UNIVERSIDAD
NACIONAL
DE LA PLATA