

TEMA 3

La Geología Estructural es una rama de la geología que estudia las deformaciones de la corteza terrestre, especialmente en lo referente al modo de presentación y a las causas que las originaron. Un término sinónimo de Geología Estructural es “Tectónica” (del griego tektón, constructor). El interior de La Tierra está en constante actividad, como lo demuestran principalmente los terremotos y las erupciones volcánicas. Las fuerzas internas que causan estos fenómenos son las que ocasionan las deformaciones de las rocas.

Los sedimentos se depositan en los fondos de mares y ríos en una posición más o menos horizontal y, bajo condiciones normales, el peso de los sedimentos suprayacentes más la temperatura asociada al soterramiento, conducen a la formación de rocas sedimentarias. Sin embargo, en afloramientos y cortes de carretera se pueden observar comúnmente rocas sedimentarias en posiciones inclinadas y hasta verticales, en las cuales no han podido ser sedimentadas. Esto indica que tales rocas han debido estar sometidas a esfuerzos deformantes para ser llevadas a esa posición.

Para determinar o indicar la posición de un estrato, es necesario conocer dos parámetros muy importantes:

- Rumbo: Es el ángulo que forma una línea horizontal cualquiera de una superficie geológica, como por ejemplo el tope de un estrato, con la dirección NS (norte-sur). Se expresa siempre referido a uno de los cuadrantes que forman los puntos cardinales, mediante el ángulo a partir del norte o el sur.
- Buzamiento: Es el ángulo que forma la línea de máxima pendiente de una superficie geológica. Es siempre perpendicular al rumbo. Se expresa en grados y dirección de inclinación (Figuras 1 a 3).



Figura 1: Representación del rumbo y el buzamiento.



Figura 2: Rumbo y buzamiento en dos posiciones de un afloramiento.

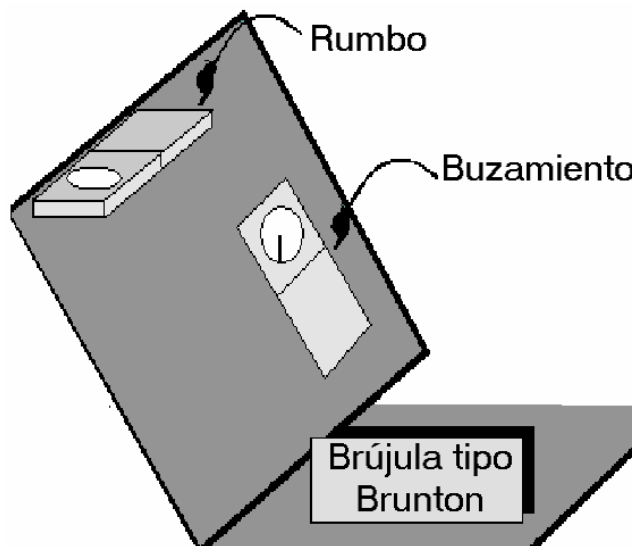


Figura 3: Mediciones de rumbo y buzamiento con brújula tipo Brunton.

En la Figura 2 se muestra una representación sencilla de lo que se conoce en geología como curvas o contornos estructurales. Son intersecciones de planos horizontales equidistantes con la superficie geológica que se desea representar; es decir, que son líneas horizontales que unen puntos de igual profundidad, los cuales representan una superficie geológica (Figura 4).

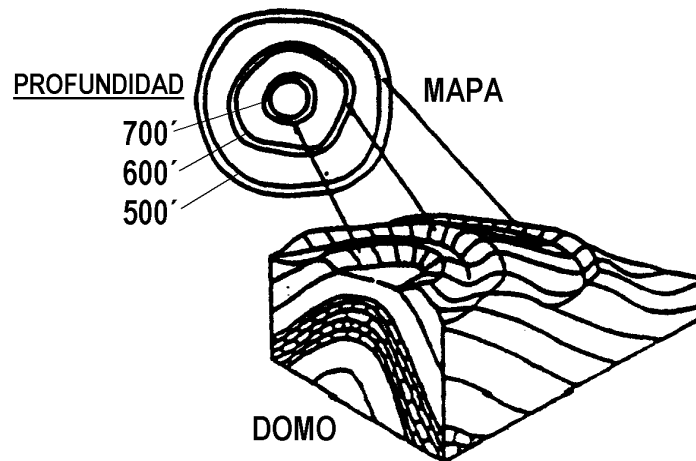


Figura 4: Curvas o contornos estructurales que representan un domo o pliegue anticlinal.

Las curvas o líneas estructurales permiten conocer la posición (Rumbo y Buzamiento) de los estratos en el subsuelo y por consiguiente, las estructuras que ellos forman. Las líneas estructurales son horizontales; por consiguiente, el ángulo que ellas forman con la dirección NS (norte-sur) es el Rumbo del estrato o superficie geológica (ver Figura 2).

Para el Geólogo Petrolero o del Subsuelo, es de gran importancia el estudio e interpretación de la estructura presente en un área, puesto que generalmente será ella la causante principal de las acumulaciones de hidrocarburos en el subsuelo. Para tal estudio, se usan los siguientes métodos:

- Información Geofísica:
 - a.- Sismográfica.
 - b.- Gravimétrica.
 - c.- Magnetométrica.
- Información durante la perforación:
 - a.- Muestras de canal.
 - b.- Tiempo de perforación.
 - c.- Muestras de núcleos.
- Registros o perfiles de pozos.
- Correlación con pozos vecinos.

Los métodos Geofísicos son los más empleados en la prospección petrolífera. Los métodos Gravimétricos y Magnéticos permiten obtener una idea general de la forma del subsuelo en la cuenca y de las zonas donde existen anomalías, que puedan ser de interés exploratorio posterior. El método Sismográfico o Sísmico es ya un método de detalle y solo se emplea para reconocer exhaustivamente las anomalías detectadas por los otros dos métodos.

En el método Gravimétrico, se mide la densidad de los sedimentos existentes en una cuenca sedimentaria. Teniendo en cuenta el patrón de curvas a nivel regional, se pueden establecer aquellas anomalías que se aparten de dicho patrón. Por ejemplo, los domos y diapiros salinos darán una anomalía negativa por la menor densidad de la sal comparada

con la roca silicatada, mientras que las intrusiones volcánicas, generalmente contentivas de minerales ferromagnesianos, darán anomalías positivas.

En el método Magnético se mide la intensidad magnética de las rocas sedimentarias, pudiéndose determinar la situación del basamento magnético de la cuenca y, por ende, las posibles anomalías; por ejemplo, espesores anormales de sedimentos darán origen a las negativas, mientras que intrusiones de rocas magnéticas darán valores positivos.

El método Sísmico de prospección es el más comúnmente empleado para las determinaciones detalladas en una zona de anomalías. Permite obtener una imagen de la posible configuración real de los yacimientos de interés en el subsuelo terrestre. Es en principio parecido a la radiografía, o tomografía tridimensional, pero del subsuelo terrestre. Estas imágenes del subsuelo pueden ser representadas a través de un perfil o sección (sísmica 2D) o un cubo (sísmica 3D).

El fundamento teórico del método sísmico se basa en la reflexión de ondas en las interfaces (generalmente límites de sucesivas capas de rocas) del subsuelo. Dichas reflexiones se originan como respuesta del subsuelo (terrestre y marino) a la energía suministrada por una fuente (explosivo, camión vibrador o cañón de aire) durante un breve período de tiempo y que es grabada en la superficie a través de unos receptores especiales (geófonos). En función de la velocidad de penetración de las ondas sísmicas (que depende de la litología) y del tiempo empleado para volver a la superficie, se puede interpretar la profundidad a la cual se encuentran las distintas formaciones y su expresión en el subsuelo formando alguna estructura. El procesamiento, análogo al revelado de una fotografía o a la mejor visión física de una tomografía, permite obtener de los datos iniciales una imagen de la estructura real del subsuelo. Luego, con los datos procesados, es posible obtener gráficos tridimensionales de la tierra y ver su estructura, sus materiales, contenido y demás finalidades, con las cuales, sin perforación física del área, pueda indicarse la guía principal para detección, ubicación, estructura, y contenido para la producción de Hidrocarburos, principalmente (petróleo y gas).

Los demás métodos al alcance del Geólogo de Subsuelo para el reconocimiento de estructuras de interés exploratorio, dependen de un sondeo o perforación exploratoria. Las muestras de canal y los núcleos, sirven para corroborar o afinar la información previamente alcanzada por métodos Geofísicos. La introducción de aparatos especiales que se introducen en el agujero del sondeo, y que miden diversas características físicas de las rocas atravesadas (resistividad eléctrica, saturación de agua, densidad, radioactividad, porosidad, etc.), proporcionan criterios muy importantes para determinar con precisión la litología, facilitan las correlaciones con otros pozos y posibilitan la postulación de estructuras favorables para almacenar comercialmente petróleo.

A continuación, se hará una descripción de las principales estructuras de interés en los estudios de Geología Petrolera.

Los procesos mecánicos que tienen lugar en las rocas, como resultado de fuerzas tectónicas, se manifiestan, en primer lugar, en deformaciones (cambios en la forma o

volumen del cuerpo geológico) y, en segundo término, en la ruptura de las rocas con o sin desplazamiento (denominadas, respectivamente, fallas y diaclasas).

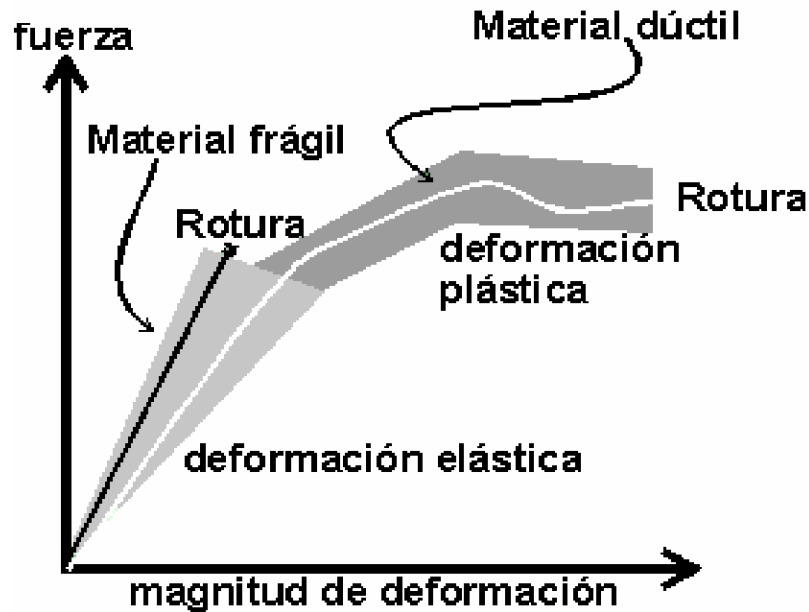


Figura 5: Magnitud de Deformación de los materiales (Tensión) respecto a la Fuerza aplicada sobre ellos (Esfuerzo).

En las deformaciones elásticas, el material deformado regresa a su forma original luego que cesan los esfuerzos sobre este. Cuando una roca es sometida a la acción de esfuerzos y estos sobrepasan el límite de resistencia de la roca, puede suceder dos cosas: que se doble o pliegue (deformación plástica), o que se rompa. Cuando ocurre la deformación plástica irreversible, es decir, cuando el material dúctil no recobra su forma original al cesar los esfuerzos a los cuales ha sido sometido, queda permanentemente doblado, constituyendo, en el caso de las rocas, los denominados pliegues.

Pliegues

Son ondulaciones de los estratos o capas de rocas, reflejadas en deformaciones más o menos intensas de la corteza terrestre, producidas generalmente por la acción de esfuerzos activos dentro de La Tierra.

Los eventos tectónicos pueden producir en las rocas, deformaciones de carácter elástico o plástico. Solamente las deformaciones plásticas irreversibles, quedan impresas permanentemente en la estructura de la corteza terrestre. El plegamiento es la manifestación más importante de deformación plástica que existe en la naturaleza.

La carencia de uniformidad de los cuerpos deformados, es de gran importancia en la deformación tectónica. La falta de uniformidad de las rocas sedimentarias, tal como se refleja en su estratificación, es la razón fundamental por la cual la deformación plástica de tales cuerpos, adquiere la forma de plegamiento.

Los principales elementos de un pliegue son los siguientes (Figura 6):

- Plano Axial: Es el plano o superficie que divide al pliegue en dos partes aproximadamente iguales y simétricas y contiene todo los puntos de la máxima curvatura de este. También puede definirse como el plano que bisecta el ángulo diedro formado por los flancos que dividen al pliegue, pasando por su centro.
- Flancos: Son los lados de un pliegue. Se extienden desde el eje de un pliegue hasta el eje del pliegue próximo. Son los elementos básicos de un pliegue, constituidos por el conjunto de estratos que fueron doblados y que se ubican a ambos lados del eje. Si los ángulos buzan con un mismo ángulo, se dice que el pliegue es simétrico, si lo hace en diferentes ángulos, es asimétrico.
- Eje: Es la línea que une todos los puntos de máxima curvatura de una capa plegada. Resulta de la interacción del plano axial con cada capa plegada. Un pliegue tendrá tantos ejes como capas afecte.
- Cresta: Es la parte del pliegue por donde sale el plano axial. Es la línea que une los puntos más altos de una capa plegada. Un pliegue tiene tantas crestas como capas afecte. El punto de máxima curvatura se conoce como Charnela, y aquel donde la curva pasa de cóncava a convexa, se conoce como Punto de Inflexión.

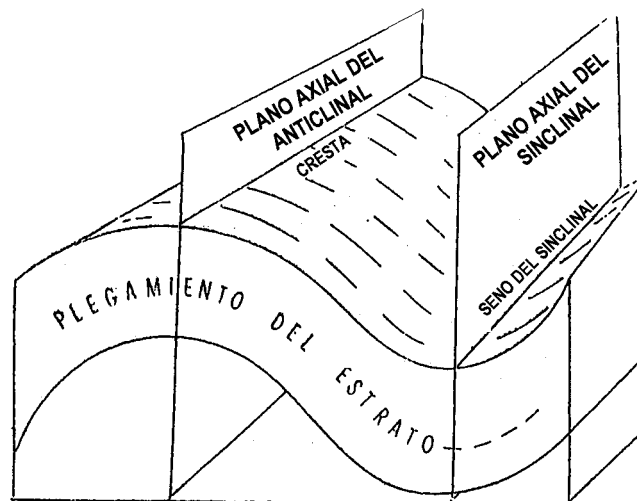
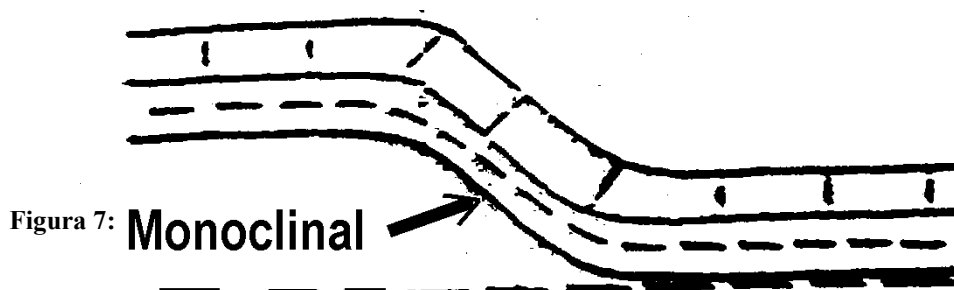


Figura 6: Elementos de un pliegue.

Existen varias clasificaciones de los pliegues de acuerdo a su geometría y a su origen. Se definirán a continuación aquellos más importantes en Geología del Subsuelo:



Monoclinal.- Es una franja de buzamiento pronunciado dentro de un área de buzamiento suave. Consiste en la flexión que conecta estratos horizontales o poco inclinados a ambos lados de la flexión (Figura 7). Puede servir como trampa para hidrocarburos.

Homoclinal.- Es un área en la cual las capas buzando en el mismo sentido, con la misma inclinación.

Anticlinal.- Es un pliegue convexo hacia arriba o en forma de A (Figura 8). También se puede definir como un pliegue en el cual las rocas más antiguas se encuentran hacia el centro de la curvatura. Este es el tipo de pliegue más importante en Geología Petrolera, ya que los hidrocarburos migran hacia las zonas de menor presión hacia arriba, hacia la superficie y pueden quedar encerradas en estructuras anticlinales en las cuales existe una capa superior impermeable al paso de los fluidos orgánicos.

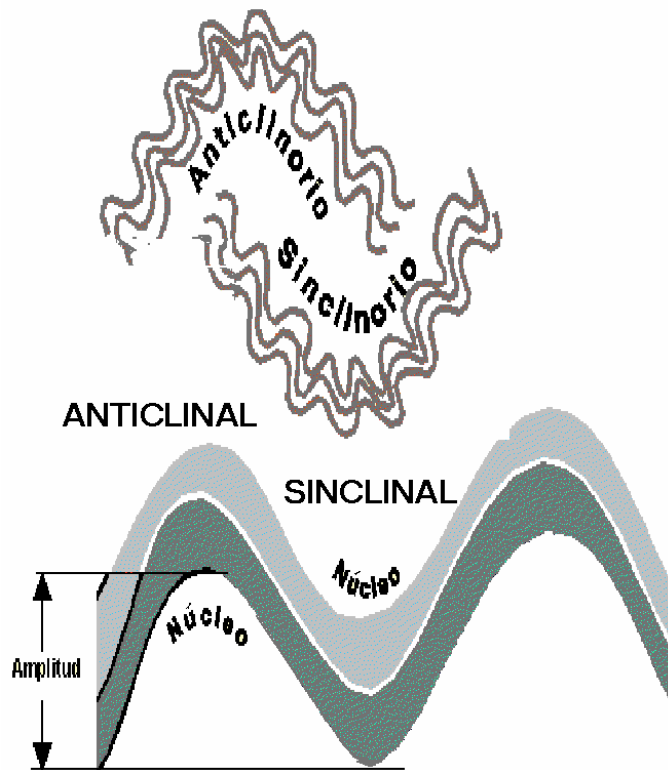


Figura 8: Pliegues tipo anticlinal, anticlinoide; sinclinal, y sinclinoide.

La edad relativa del núcleo (más viejo), respecto a la periferia (más joven), es el criterio que define un anticlinal (Figura 9). Una relación de edades contraria (núcleo más joven, tope de mayor edad), para un pliegue en forma de A, tipifica a un sinclinal volcado. Cuando no se puede establecer la edad relativa entre el núcleo y la capa periférica, se habla de un pliegue anticlinoide.

Sinclinal.- Es un pliegue cóncavo hacia arriba, o en forma de U. También se puede definir como un pliegue en el cual las rocas más jóvenes se encuentran hacia el centro de la curvatura (Figura 8-9). Un pliegue en forma de U, en el cual no se puede establecer las

relaciones de edades entre los estratos interiores y exteriores, recibe el nombre de sinclinorio (Figura 8).

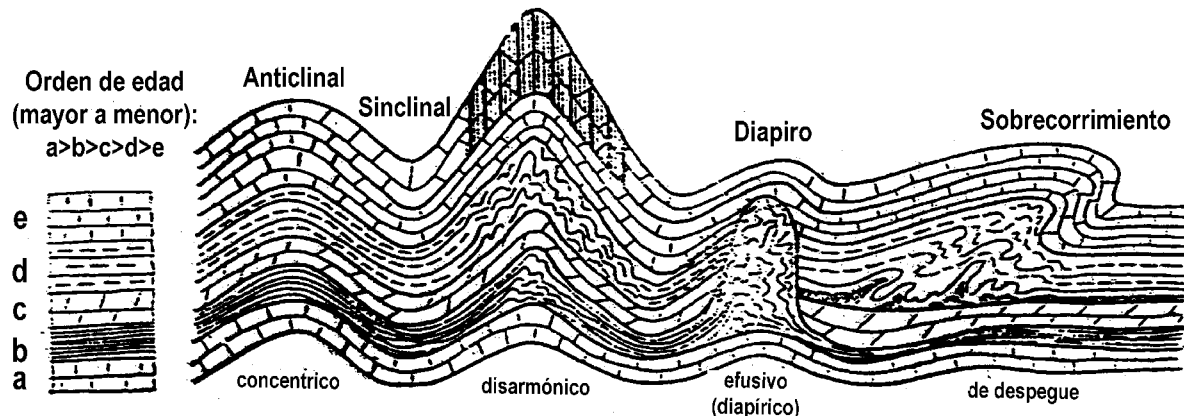


Figura 9: Algunos tipos de pliegues.

Domo o Periclinal.- Es un anticlinal en el cual las capas buzan radialmente desde un punto central (Figura 10). Un tipo especial son los **Diapiros**, constituidos por núcleos de sal común (halita), yeso o lutita.

Cubeta o Cuenca estructural.- Es un sinclinal en el cual las capas buzan radialmente hacia un punto central (Figura 11).

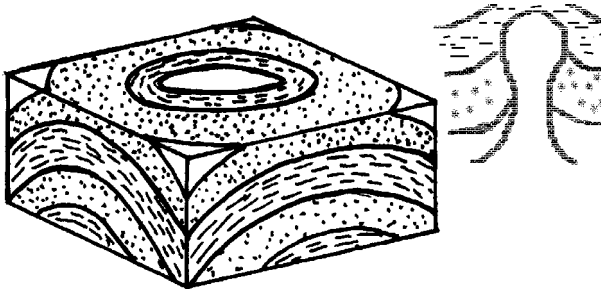


Figura 10: Domo

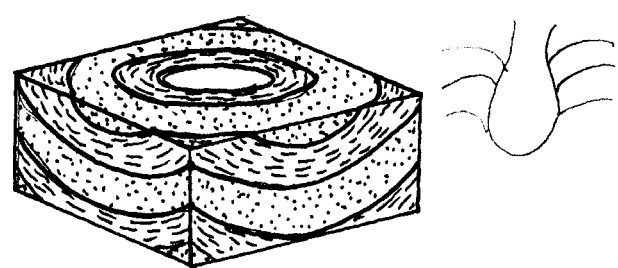


Figura 11: Cubeta

Pliegue Vertical.- Pliegue en el cual su plano axial es vertical (Figura 12).



Figura 12: Pliegue Vertical

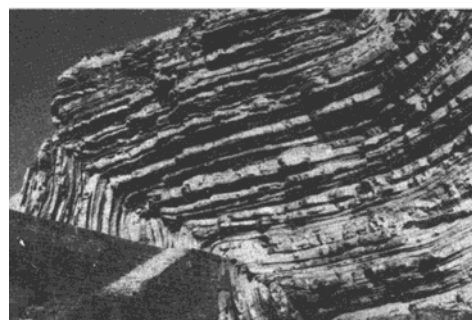


Figura 13: Pliegue en Rodilla

Pliegue en Rodilla.- Aquel en el cual el plano axial está inclinado y uno de los flancos es vertical (Figura 13).

Pliegue Volcado.- Es aquel en el que en algunos sitios, un flanco se dobla hacia abajo tan lejos de la vertical, que queda abajo del otro flanco (Figura 14). Un caso extremo es el llamado pliegue recumbente, también conocido como **Sobrecojamiento** (Figura 9).

Pliegue Isoclinal.- Pliegue en el cual los dos flancos son paralelos (Figura 15).

Pliegue Acostado.- Se produce cuando los flancos son esencialmente horizontales, es decir, cuando buzan en una misma dirección.

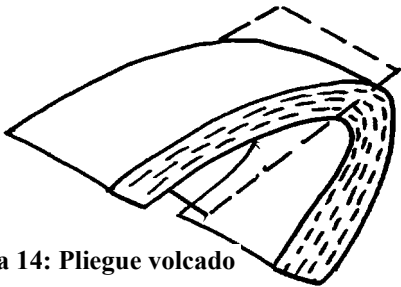


Figura 14: Pliegue volcado

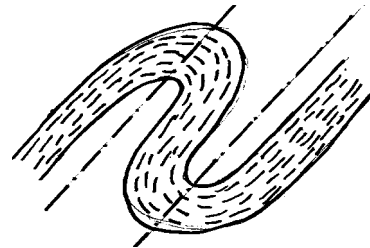


Figura 15: Pliegue Isoclinal

Terraza Estructural.- Es una franja de buzamiento suave, casi horizontal, dentro de un área de buzamiento más pronunciado.

Geoanticlinal.- Es una zona positiva (alta) de la corteza terrestre, la cual está sujeta a erosión. Los continentes son un ejemplo.

Geosinclinal.- Es una zona negativa (deprimida) de la corteza terrestre, la cual recibe sedimentos. Las cuencas sedimentarias son geosinclinales.

Pliegue en Chevrón, Zig-zag o Concertina.- Pliegues en los cuales los flancos son rectos y las charnelas son curvas afiladas, su forma general es como una Z (Figura 16).

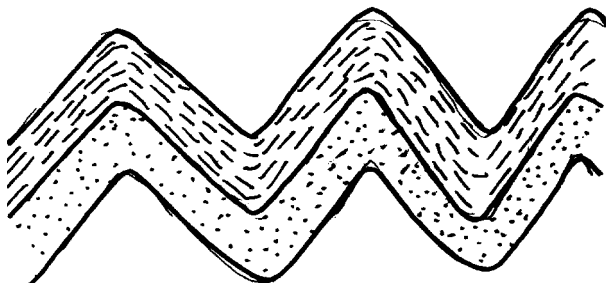


Figura 16: Pliegue en Chevrón



Fallas

Son fracturas de las capas de rocas, a lo largo de las cuales ha habido un desplazamiento de los bloques fracturados. Desde el punto de vista de la Geología, el estudio de las fallas es importante porque permite reconstruir la historia de los movimientos tectónicos que afectaron a una región cualquiera bajo estudio y a La Tierra como planeta. Sus principales elementos, son presentados a continuación (Figura 17):

- Plano de Falla: Es el plano o superficie o de fractura a lo largo del cual se ha producido el desplazamiento.
- Labio de Falla: Son las dos masas que se desplazaron sobre el plano de falla; por lo tanto, se tiene el labio superior o bloque levantado, que esta situado por encima de la superficie de falla y el labio inferior o bloque deprimido, que se encuentra situado por debajo de la superficie de falla.
- Salto de Falla: Es el desnivel que se produce en ambos lados o bloques.
- Salto Vertical: Es la proyección vertical del desplazamiento de una falla, por lo general se mide en un plano vertical perpendicular al rumbo del plano de falla.
- Salto Horizontal: Es el componente horizontal del desplazamiento de buzamiento en un plano vertical perpendicular al rumbo del plano de falla.



Figura 17: Elementos estructurales de una falla.

El estudio y determinación de la posición de las fallas es muy importante en Geología del Petróleo, porque ellas pueden servir de trampas a la acumulación de hidrocarburos. En el subsuelo, las fallas pueden ser reconocidas a nivel de los perfiles o registros, por presentarse en ellos la omisión o falta de aparición de una sección determinada (cuando la falla es normal), o la repetición de una curva cualquiera o de una secuencia de estratos (falla inversa), en el pozo objeto de evaluación.

En los mapas estructurales, la presencia de anomalías en las curvas de nivel, pueden indicar fallas. Estas anomalías son:

- a.- Curvas anormalmente separadas, con respecto a una separación más o menos constante en el resto de las curvas (Figura 18).
- b.- Curvas anormalmente unidas (Figura 19).
- c.- Curvas anormalmente desviadas a lo largo de una línea.
- d.- Repetición de una curva o de una secuencia de curvas (Figura 20).

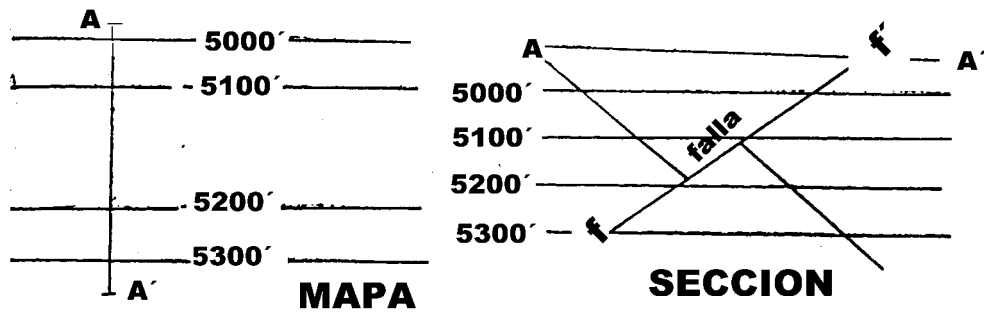


Figura 18: **Curvas anormalmente separadas**

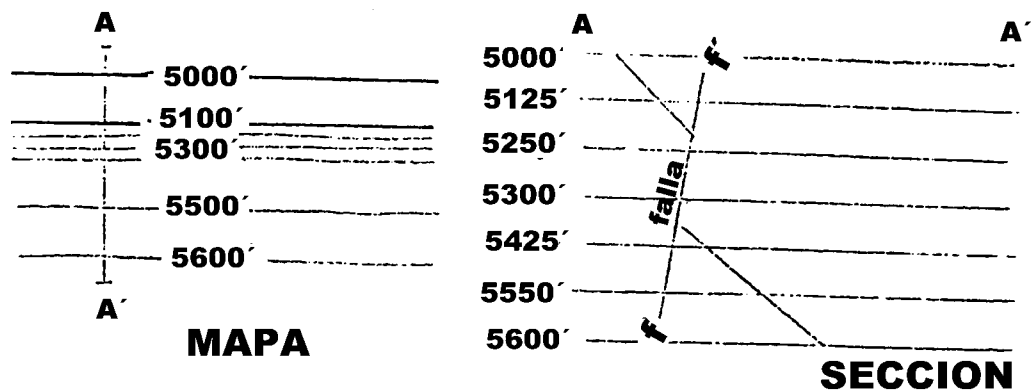


Figura 19: **Curvas estructurales anormalmente unidas**

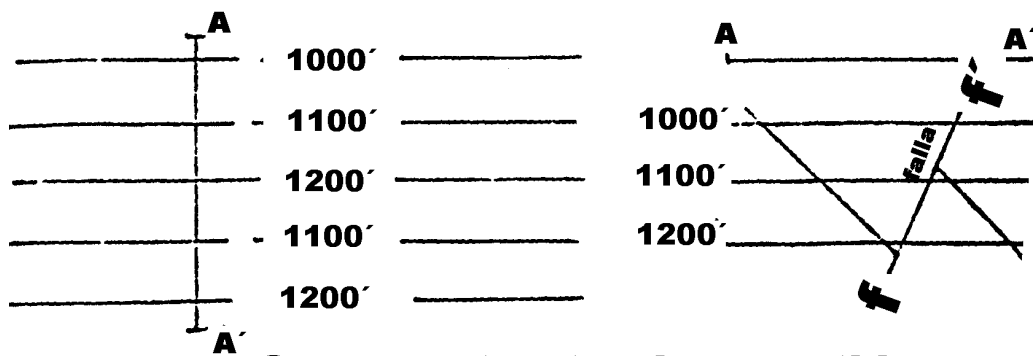


Figura 20: **Curvas estructurales repetidas**

Existen varios criterios para clasificar las fallas. La Figura 21 incluye los tipos más comunes de ellas.

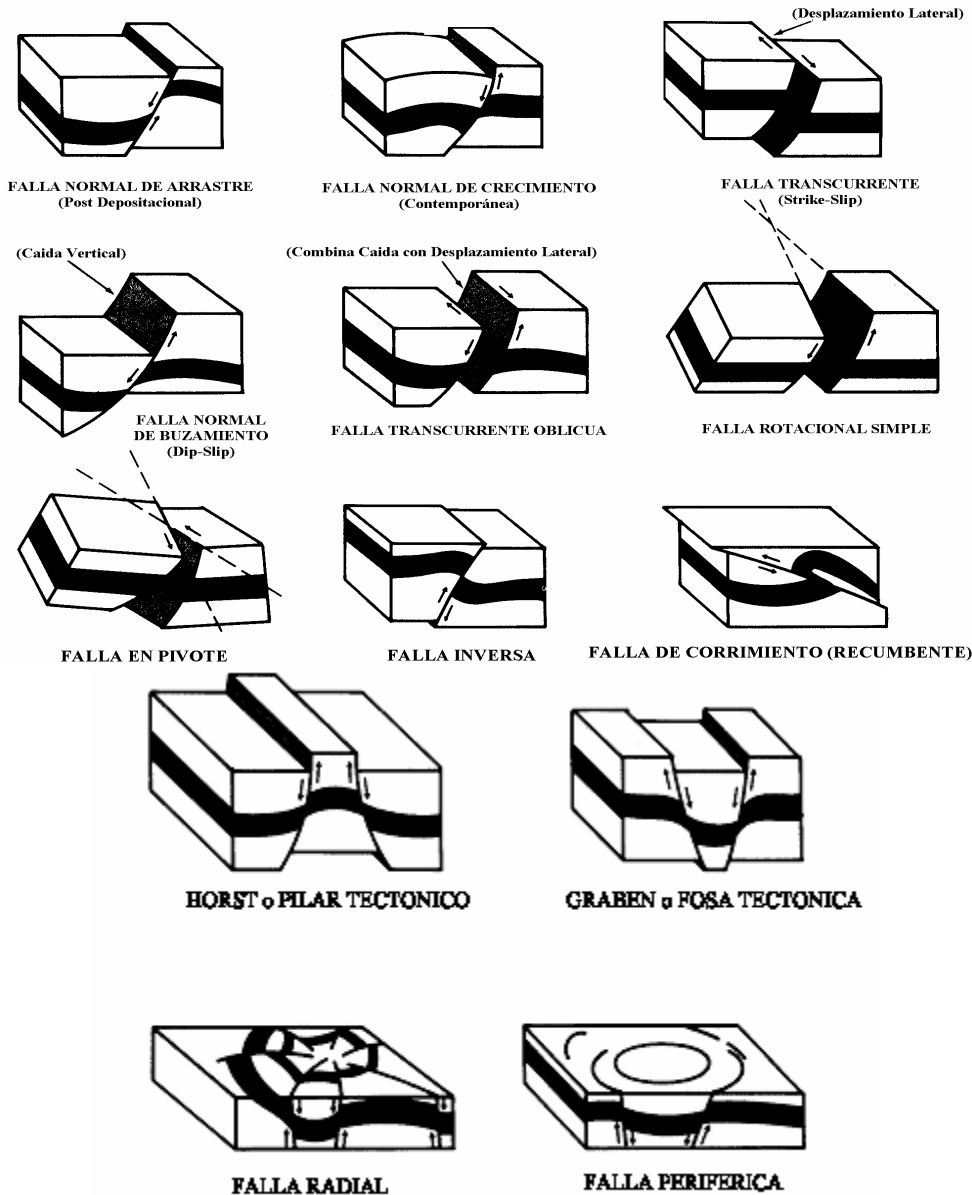


Figura 21: **CLASIFICACIÓN DE FALLAS**

Uno de los criterios de clasificación de las fallas, atiende a la dirección del movimiento a lo largo del plano de falla. Aquellas cuya dirección principal de movimiento va en el sentido del rumbo (strike-slip), se clasifican en:

Falla de rasgadura o transcurrente.- Son aquellas en las cuales el desplazamiento se ha efectuado en la dirección del rumbo del plano de falla. En estas fallas el desplazamiento total es igual al desplazamiento del rumbo.

Falla transformante.- Son grandes fallas de deslizamiento a lo largo del rumbo, que se forman entre otros tipos de estructuras tectónicas, como por ejemplo, en dorsales oceánicas, fosas o uniones triples (Figura 22).

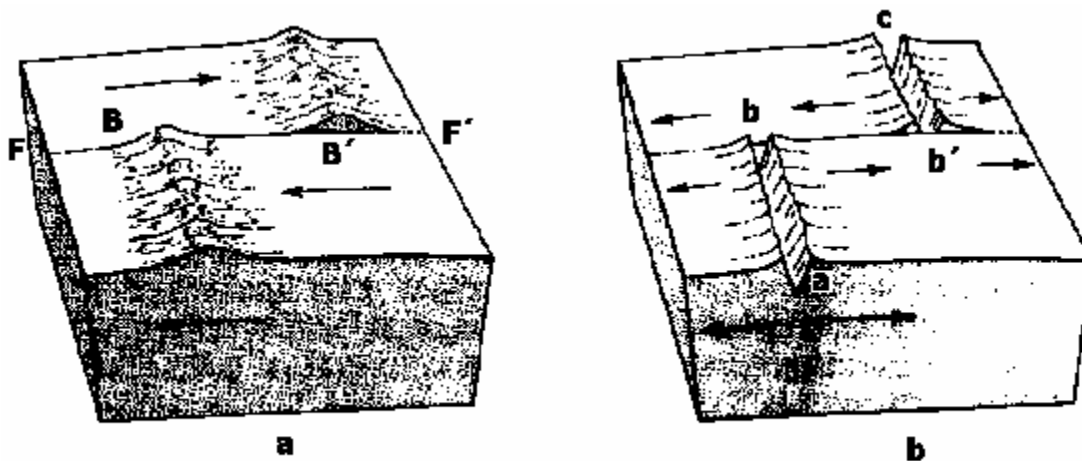


Figura 22: *Fallas de Rumbo: (a) falla transcurrente; (b) falla transformante.*

En una falla transcurrente (a), los bloques de ambos lados de la falla se mueven en los sentidos de las flechas, lo cual provoca el desplazamiento de toda la estructura en cada uno de los lados de la falla (ver cadena montañosa en figura a). En ella, el desplazamiento BB' aumentará con el tiempo conforme prosiga la actividad del fallamiento. Estas fallas se clasifican a su vez en dextrales y sinestrales, según el movimiento relativo de los bloques fallados transcurra hacia la derecha o la izquierda, respectivamente.

En la falla transformante (b), el desplazamiento bb' no cambiará en lo absoluto, siempre y cuando los segmentos de dorsal mesoocéánica ab y b'c produzcan corteza marina a la misma velocidad. Además, el desplazamiento entre los bloques situados a ambos lados de la falla se produce solo a lo largo de la porción bb', fuera de bb' no se produce desplazamiento a lo largo de la falla.

Aquellas fallas cuya dirección principal de movimiento va en el sentido del buzamiento (dip slip), se clasifican de acuerdo al movimiento relativo de los labios de falla en:

Fallas normales.- Son aquellas en las cuales el labio superior ha descendido con respecto al labio inferior, en el sentido normal que dicta la Ley de la Gravedad (Figura 21).

Fallas inversas.- Son aquellas en las cuales el labio superior ha subido con respecto al labio inferior, en el sentido contrario a la Ley de la Gravedad (Figura 21).

Estos tipos de fallas también se clasifican en **homotéticas**, cuando la falla y los estratos presentan la misma dirección de inclinación; y **antitéticas**, cuando las direcciones de la falla y la de buzamiento de los estratos afectados, es opuesta (Figura 23).

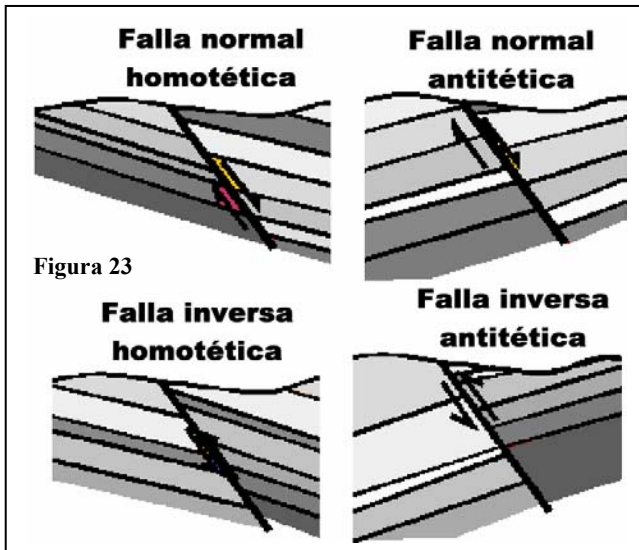


Figura 23

Otro criterio de clasificación de las fallas, se establece de acuerdo al tipo de esfuerzo que las originó:

Fallas tensionales o de gravedad.- Son aquellas producidas por un esfuerzo de tensión horizontal o por efectos de la gravedad, lo cual produce el mismo resultado. Este tipo de falla indica un alargamiento de la corteza terrestre. La deformación resultante de estos esfuerzos son fallas normales de ángulo alto, el eje mayor de esfuerzo es vertical y los ejes menor e intermedio son horizontales. Un ejemplo de estas, son las fallas tipo graben (Figura 21).

Fallas de compresión.- Son fallas producidas por un esfuerzo de compresión horizontal, lo cual indica un acortamiento de la corteza terrestre. Se generan fallas inversas de alto ángulo, las cuales forman estructuras en flor, o también fallas tipo horst (pilar, Figura 21).

Diaclasas

También llamadas Juntas, son fracturas a lo largo de las cuales no se ha producido ningún desplazamiento. Son estructuras menores originadas por los mismos esfuerzos causantes de pliegues y fallas (Figura 24). Por lo general se presentan en sistemas de innumerables diaclasas paralelas entre sí, en una misma capa de rocas ocurren varios sistemas de diaclasas formando ángulos entre sí.

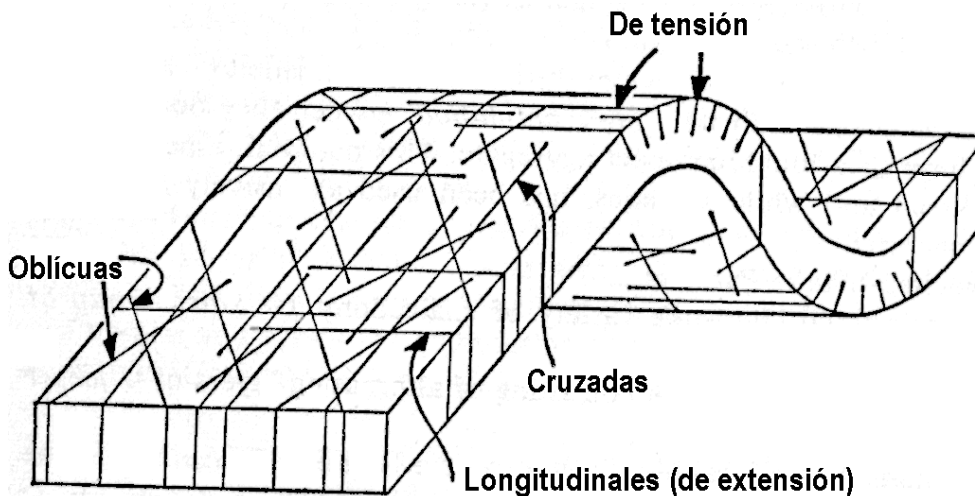


Figura 24: Tipos de Diaclasas.

En Geología Estructural, las diaclasas son de gran utilidad, porque su estudio sistemático permite construir diagramas de frecuencia que indican el tipo y dirección de los esfuerzos tectónicos que actuaron sobre un área.

De las rocas sedimentarias, las diaclasas afectan solo a las calizas y en poca frecuencia a algunas areniscas muy compactadas. En Geología del Petróleo, tienen mucha importancia porque causan porosidad secundaria en las calizas, convirtiéndolas en rocas recipientes.

Las diaclasas, o juntas, se clasifican atendiendo a su origen en:

De Cizalla o de Tensión.- Aunque la característica principal que distingue a una diaclasa consiste en que no se ha detectado en ella ningún movimiento, es corriente distinguir entre diaclasas de cizalla y de tensión considerando las primeras como fracturas de cizalla incipiente. Las juntas de tensión de las rocas isótropas se forman perpendiculares a una de las direcciones principales del esfuerzo, ya que de lo contrario en el momento anterior a la fractura existiría un esfuerzo de cizalla finito al plano de la junta potencial y se produciría el correspondiente desplazamiento de cizalla finito.

Diaclasas debido a la liberación de la carga por erosión en rocas isótropas.- Algunas juntas se forman durante la liberación erosional de la carga en respuesta a la mayor facilidad con que las rocas descomprimidas se expanden perpendicularmente, más que paralelamente, a la superficie libre. Durante la liberación erosional de la carga, el cuerpo se mantendrá en estado de esfuerzo hidrostático solo si la extensión es igual en todas direcciones. Dentro de la superficie, la extensión hacia arriba será más fácil que la extensión horizontal, porque el esfuerzo normal sobre los planos horizontales se aproxima a un valor de presión de una atmósfera, mientras que esto no puede ser así en los planos verticales, donde interviene la presión litosférica.

Diaclasas debido a cambios diferenciales de volumen en cuerpos heterogéneos.- La mayoría de los cuerpos rocosos de gran tamaño y mucho de los pequeños están formados por varios tipos de rocas yuxtapuestas en capas o en otras configuraciones. Cuando estos cuerpos se descomprimen o se enfrían a partir de condiciones de esfuerzo hidrostático, en ellos se desencadenan esfuerzos desviatorios locales, debido a las diferencias de compresibilidad o de coeficiente de contracción térmica entre unidades adyacentes de litología diferente. También se desarrollan esfuerzos tensionales locales a escala granular, con lo cual los granos minerales adyacentes de diferente orientación o composición tenderán a sufrir deformaciones ligeramente diferentes durante la descomposición o el enfriamiento.

Diaclasas debido a deformación regional.- Muchas juntas y en especial las que atraviesan rocas de litologías diferentes, parecen estar relacionadas directamente con los pliegues producidos por deformación regional. Los pliegues pueden derivarse por accidentes pronunciados u ondulaciones regionales apenas perceptibles. Una explicación posible de la formación de diaclasas a escala regional, propone el ligero flexionamiento de placas litosféricas que se supone se ha de producir cuando una placa cambia de latitud y por lo tanto, cambia su radio de curvatura.

Discordancias

Son superficies que representan un periodo de EROSION o NO DEPOSITACIÓN en una secuencia de estratos. Las discordancias separan estratos más jóvenes de capas viejas; representan un periodo entre la depositación o formación de rocas más jóvenes, durante el cual no hubo sedimentación o formación de rocas.

Las discordancias se originan cuando una región negativa, o cuenca de sedimentación, deja de recibir sedimentos, o es levantada por fuerzas tectónicas, quedando sometida a procesos de erosión. Se habla en este caso de la formación de una **Superficie de Erosión**.

Las discordancias pueden clasificarse en tres tipos fundamentales; discordancias paralelas (disconformidades), discordancias angulares (Figuras 25 y 27) y discordancias litológicas (inconformidades, Figuras 26 y 28).

Las discordancias paralelas, también llamadas estratigráficas, o disconformidades, son aquellas en las cuales los estratos que se encuentran por debajo y por encima de la superficie discordante o superficie de erosión son esencialmente paralelos.

Un tipo muy particular de discordancia paralela es el Hiatus, Diastema o Laguna Estratigráfica, en la cual no ha habido erosión sino un periodo de no depositación. Son poco frecuentes en la naturaleza, porque los periodos de no depositación generalmente van acompañados de erosión.

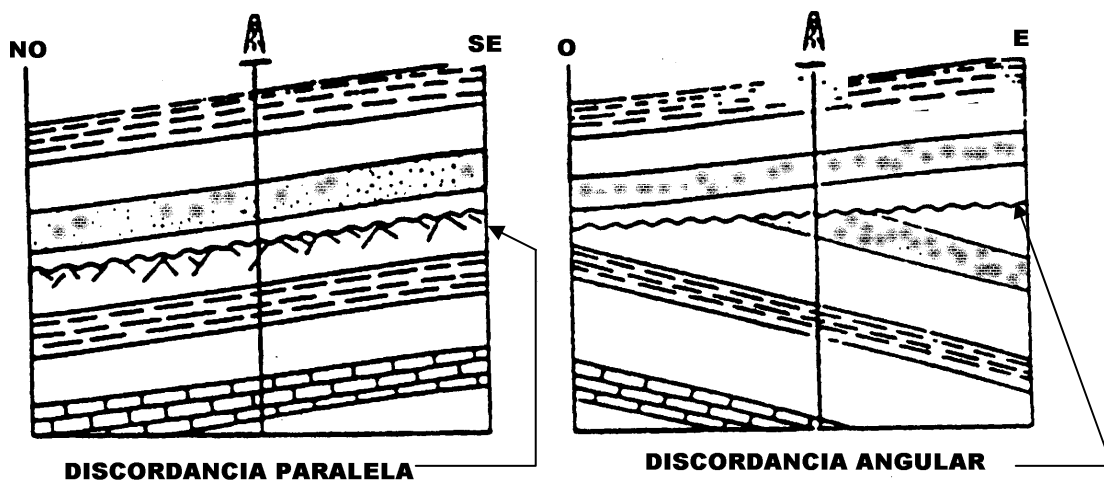


Figura 25: Tipos Básicos de Discordancias.

Las discordancias angulares, que son las más frecuentes, son aquellas en las cuales los estratos infrayacentes (que están por debajo) de la superficie discordante, forman un ángulo con las capas suprayacentes (que están por encima). Ejemplos de estas, son las discordancias erosionales (Figura 26).

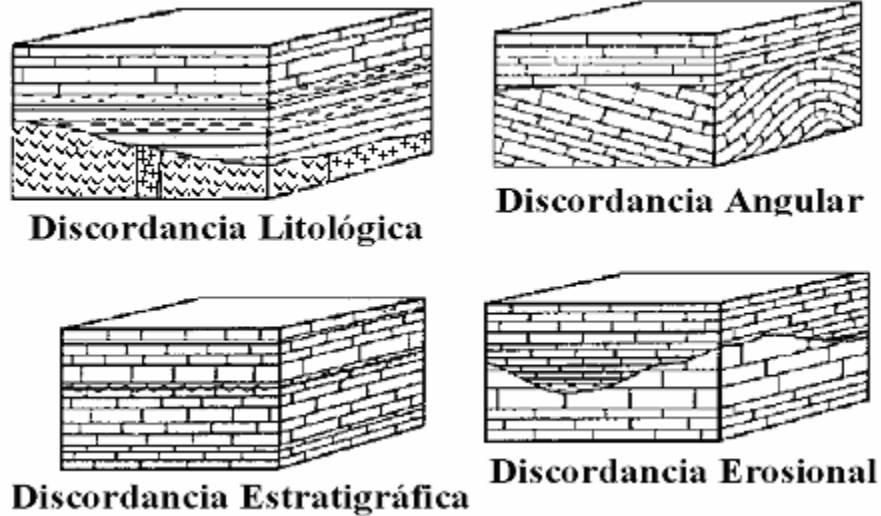


Figura 26: Ejemplos de Discordancias.

La discordancia entre las rocas ígneas o metamórficas que están expuestas a la erosión y que después quedan cubiertas por sedimentos, se llama inconformidad, o discordancia litológica.



Figura 27: Discordancia Angular.



Figura 28: Inconformidad entre granito y arenisca.

Hay varios criterios para el reconocimiento de discordancias; entre ellos, cabe mencionar los siguientes:

- Angularidad entre los estratos; es un indicio directo de discordancia angular, el cual puede ser observado a nivel de afloramiento o en los perfiles de buzamiento del subsuelo.
- Contraste pronunciado en el grado de metamorfismo; en este caso, es probable que las rocas menos metamorfizadas se hayan depositado en discordancia sobre secuencias que habían sufrido un proceso previo de metamorfismo.
- Contraste en la intensidad del plegamiento; Si en una región se encuentran secuencias fuertemente plegadas en contacto o cercanas a unidades poco plegadas u horizontales,

hay evidencias de una discordancia producto de algún proceso de naturaleza similar al explicado en el punto anterior.

- d.- Diferencias en edad geológica; el estudio de los fósiles puede indicar la ausencia de rocas de un periodo determinado, señalando así la presencia de una discordancia.
- e.- Contraste de colores entre dos capas contiguas; puede implicar condiciones ambientales muy diferentes de sedimentación y, por ende, una discordancia.
- f.- Conglomerado basal; frecuentemente, encima de una discordancia o superficie de erosión se encuentra una capa de conglomerado, debida a transgresiones marinas, la cual es denominada conglomerado basal.
- g.- Terminación abrupta de estructuras (fallas o pliegues).
- h.- Diferencias importantes en el grado de compactación de formaciones contiguas.

Las discordancias son de interés en la Geología del Petróleo por que pueden constituir bien sea trampas para la acumulación de hidrocarburos, o bien sea rutas de disipación de petróleo que de otro modo se hubiera entrampado.

- a.- Sello por truncamiento: Las discordancias pueden servir como trampas cuando queda una roca impermeable (lutita) por encima de una arenisca o caliza permeable, truncadas por la discordancia (Figura 29).

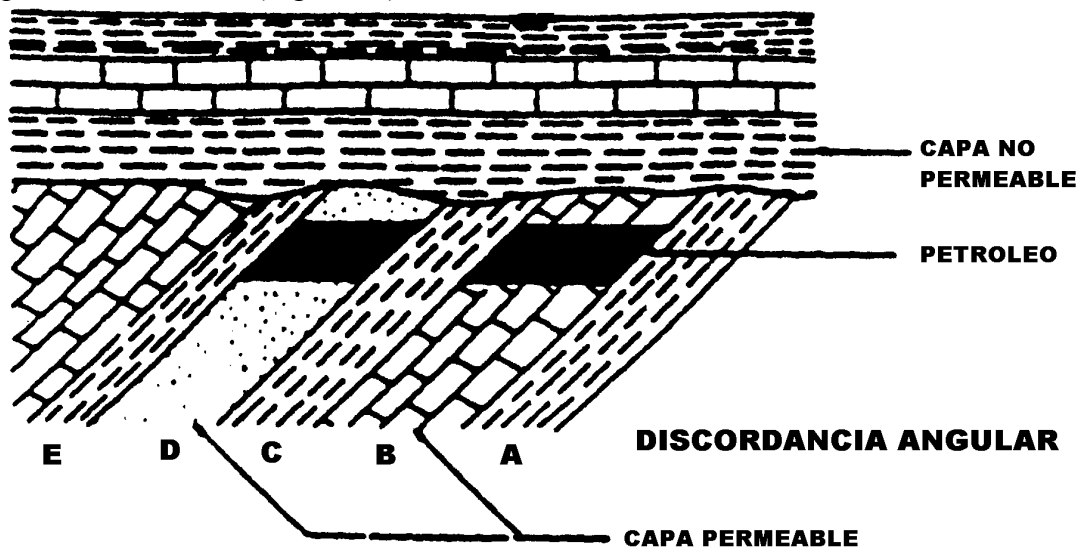


Figura 29: Importancia de las Discordancias en Geología del Petróleo.

- b.- Trampa por acuñamiento: Las areniscas que se acumulan por encima de una discordancia pueden constituir buenos yacimientos de hidrocarburos.
- c.- Comunicación de yacimientos: En el caso que una discordancia ponga en contacto dos estratos de roca almacén y la roca de abajo contenga petróleo, este puede migrar a la roca de arriba y constituir así dos yacimientos, siempre y cuando la capa superior sea impermeable y la estructura del área permita la constitución de una trampa. Existe un ejemplo importante de esto en el Lago de Maracaibo, en la discordancia Eoceno-Mioceno, la cual pone en contacto depósitos acumulados en las areniscas C de la Formación Misosa con areniscas de la sección basal de la Formación La Rosa.

d.- Trampas por taponamiento asfáltico: Los hidrocarburos que migren durante el período de erosión que representa la discordancia, pueden perder sus componentes volátiles por evaporación o sufrir la eliminación de componentes livianos por acción de las bacterias (biodegradación). En estos casos, se forman tapones asfálticos que pasan a ser una trampa de tipo estratigráfico para crudo que migre posteriormente. Este efecto ha sido reportado comúnmente en los campos costaneros del antiguo Distrito Bolívar, en la Costa Oriental del Lago de Maracaibo.

Esquistocidad y Foliación

Ambos términos están relacionados con el proceso de Metamorfismo, y poseen el mismo origen. La esquistocidad es una hojiosidad (presentación de las rocas en forma de hojas de un libro) en la cual todas las hojas tienen la misma composición, sin que tengan alguna relación definida con la estratificación original de las rocas (Figura 30).

Por su parte, la foliación es una hojiosidad tal que las hojas son de composición distinta (alterna) y sin que tengan ninguna relación definida con la estratificación. Por ejemplo, una roca metamórfica con alternancia entre láminas de minerales micáceos y finas capas de cuarzo (esquistos micáceos), o bandas de cuarzo y feldespato (gneises).

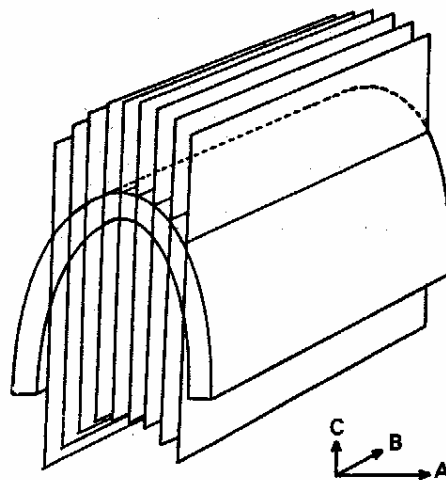


Figura 30: Disposición de la esquistocidad en un pliegue. A: Esfuerzo máximo; B: medio; C: mínimo.

La esquistocidad acompaña generalmente al plegamiento. Los planos de esquistocidad son paralelos al plano axial de los pliegues, lo cual significa que la componente máxima del vector de los esfuerzos generadores del pliegue, es perpendicular al plano de esquistocidad. La Figura 28 corresponde a un caso en el cual el esfuerzo máximo A coincidió inicialmente con el plano del estrato; después de la deformación, A es perpendicular al plano axial y, en consecuencia, a la nueva lineación, esquistocidad o foliación.

Cuanto más competente sea una roca, más paralela es la esquistocidad (Figura 30); y cuanto más incompetente, más tienden a converger los planos de esquistocidad hacia el núcleo del pliegue, tanto si se trata de un anticlinal como de un sinclinal (Figura 31).

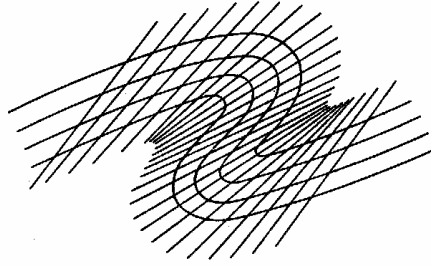


Figura 31: Orientación de las capas según la relación esquistocidad/estratificación.

No todas las rocas son igualmente sensibles al desarrollo de la esquistocidad; las rocas plásticas (lutitas, margas) se transforman con más facilidad en esquistos que las rocas rígidas (calizas, Figura 32).

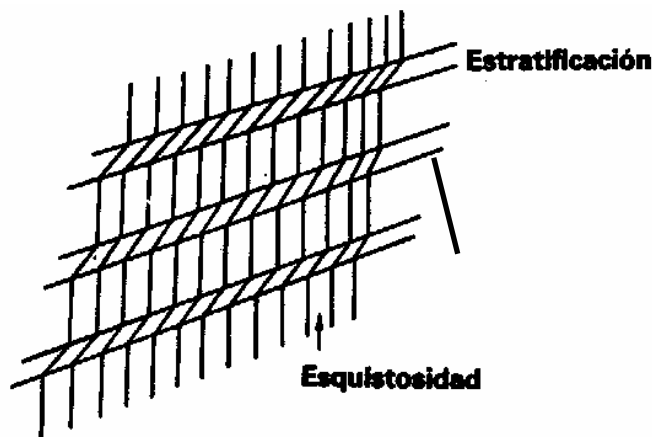


Figura 32: Refracción de la esquistocidad (se endereza en los estratos competentes).

En la alternancia de esquistos margosos y esquistos calcáreos mostrados en la figura anterior, la esquistocidad está desviada hacia la perpendicular a la estratificación en las capas duras. Tal fenómeno se conoce como “refracción de la esquistocidad”.

Alineaciones y Budines

Las alineaciones (Figura 33) corresponden al crecimiento de minerales producidos por el proceso de metamorfismo, presentándose en forma de vetas o bandas en las rocas. Las venillas de cuarzo son un ejemplo clásico de lo aquí mencionado.

Las alineaciones, bien sea de minerales de neoformación por el proceso de metamorfismo (anfíboles), o de minerales preexistentes (cuarzo, calcita), son consecuencia del hecho que un cristal, sometido a un esfuerzo y rodeado de un fluido con el cual está en equilibrio químico, tiende a disolverse en las caras que soportan la presión más fuerte, y a desarrollarse en la dirección de las caras que soportan la presión más débil. En este sentido, la dirección del esfuerzo mínimo al cual ha sido sometida la roca, es paralela a la dirección de la alineación.



Figura 33:
Alineaciones

Los budines representan una estructura poco común en la naturaleza, originada por esfuerzos tensionales. El estiramiento de un estrato competente a lo largo de la dirección de los planos de estratificación da lugar a grietas de tensión o a cuellos, los cuales pueden posteriormente rellenarse de material lateral incompetente. La apariencia usual es la de una cuerda de chorizos (Figura 34).

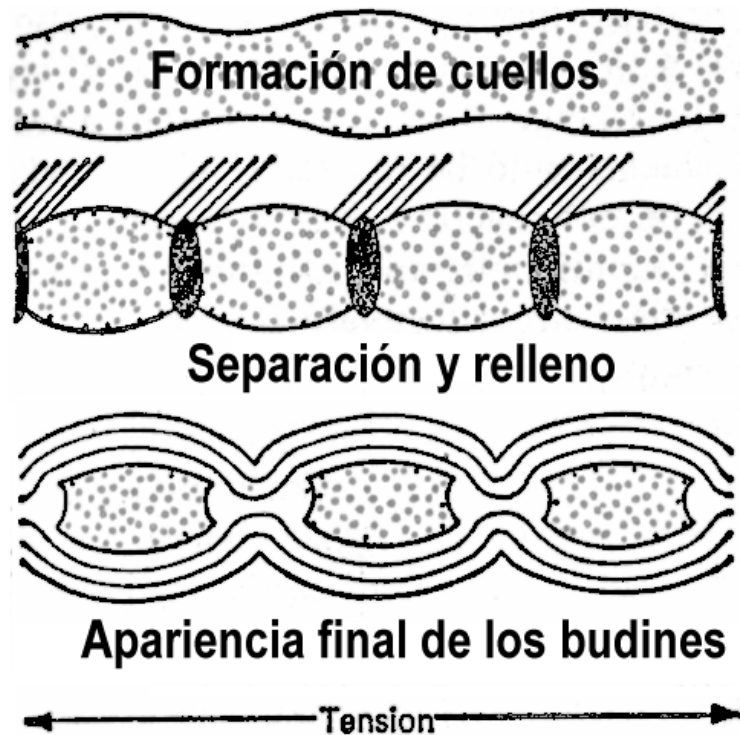


Figura 34: Origen de los budines.

Estas estructuras se observan preferentemente en rocas metamórficas, en las cuales generalmente los budines están constituidos por cuarzo o calcita.

Las Representaciones Gráficas de las Estructuras Lineales

Las estructuras geológicas, particularmente aquellos elementos constituyentes de las mismas que son de carácter lineal, pueden ser representadas de varias maneras. La más simple es a través del uso de un mapa geológico, sobre el cual se transporta la dirección del rumbo, y se indica el buzamiento con una línea perpendicular a la línea de rumbo (sentido, norte o sur) y un número (valor del ángulo). Otras dos formas, corresponden a un histograma, transportando sobre las accisas las direcciones de alineación (rumbo) y sobre las ordenadas el número de medidas; o un rosetón, transportando el número de medidas según una escala constante sobre unas líneas rectas radiales que tienen direcciones preestablecidas, de 10° en 10° , por ejemplo (Figura 35).

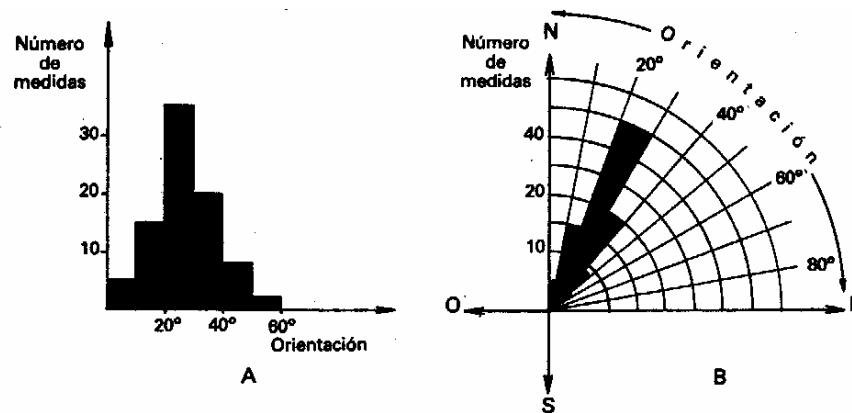


Figura 35: Métodos de representación de alineaciones: A. Histograma; B. Rosetón.

Un problema que presentan estos dos métodos, es el que ninguno permite la inclusión del valor y sentido del buzamiento o inclinación de la alineación; es decir, que ambos suponen que los vectores son horizontales o subhorizontales. Un tipo de representación que permite situar la alineación en tres dimensiones está dado por las redes o falsillas, tanto de Wulff (más utilizada) como de Schmidt (Figura 36)

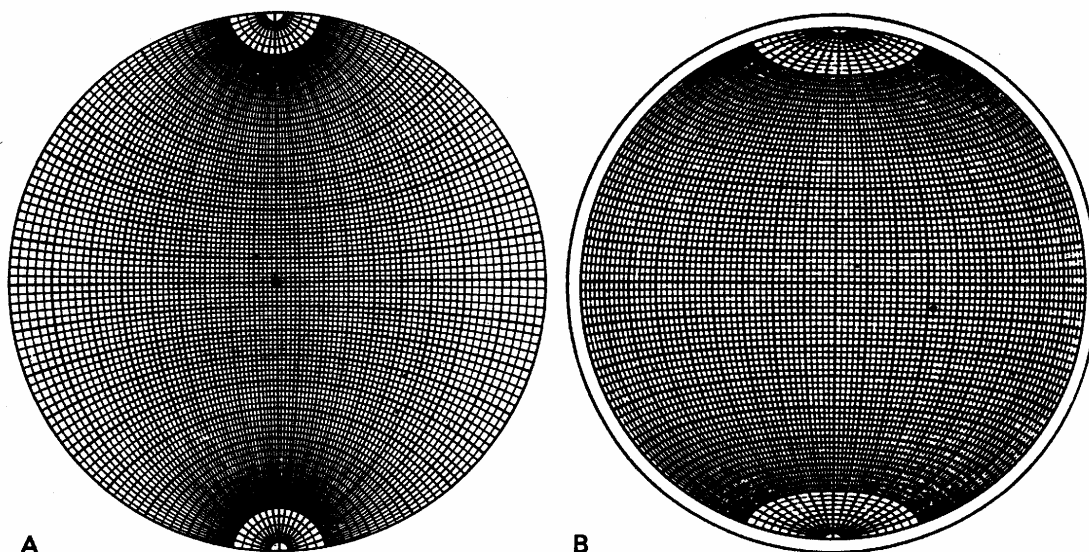


Figura 36: Redes para proyecciones estereográficas: A. Red de Wulff; B. Red de Schmidt.

Para la representación de valores de rumbo y buzamiento sobre la red de Wulff, se hace girar un papel transparente encima de la falsilla, la cual se deja inmóvil. Se usa como eje el centro de la red. Para representar una alineación de rumbo α y buzamiento β , se rota el papel transparente en un ángulo igual a $-\alpha$ y sobre el eje NS (norte-sur) se marca el valor β ; se sitúa entonces el transparente en su posición original, haciéndolo girar un ángulo $+\alpha$; el punto se encontrará en su posición (Figura 36).

Se debe recordar que los rumbos están referidos de 0° a 360° en el sentido de las agujas del reloj (de izquierda a derecha). Para situar un punto, se hará girar el transparente en sentido inverso a las agujas del reloj. Esta claro que las direcciones del rumbo se cuentan en grados, en el círculo exterior de la red. En el caso del buzamiento, se conoce que para cada dirección determinada del rumbo, hay dos familias de buzamientos, uno hacia el norte y otro hacia el sur. Los buzamientos hacia el norte estarán representados por un punto en la mitad superior de la falsilla, y hacia el sur en la parte inferior. Para saber el valor del ángulo de buzamiento, se rota el transparente al eje NS, línea sobre la cual se cuenta desde 0° en el polo, hasta 90° en el ecuador de la esfera correspondiente a la red.

La lectura de valores representados sobre la plantilla, requiere rotar el transparente en el sentido de las agujas del reloj, hasta el eje NS. El valor α de esta rotación representa el rumbo de la estructura, y el ángulo leído sobre el eje NS dará el valor del buzamiento.

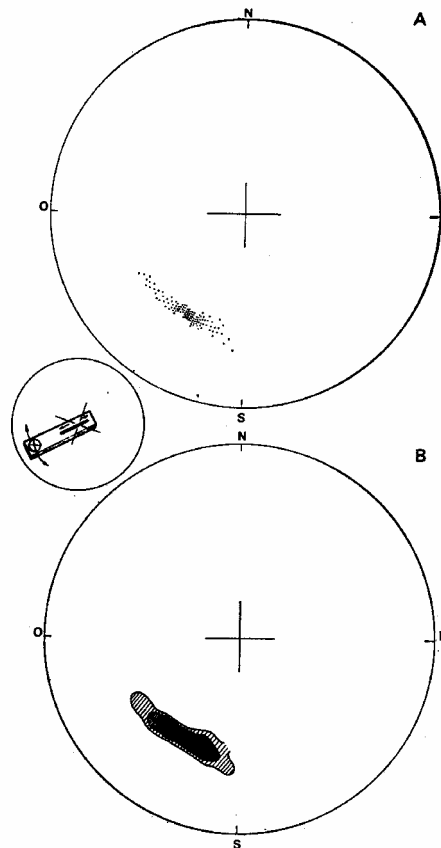


Figura 36: Diagrama de las alineaciones correspondientes a la Figura 34: A. Red de Wulff; B. Red de Schmidt

En la Figura 36, parte A, se muestra la representación de los valores indicados en el histograma y el rosetón de la Figura 32. Se reconoce que la dirección principal del rumbo está entre 20 y 30° (NNE-SSO), tal y como se vio sobre todo en el rosetón; adicionalmente, se incluye el valor de buzamiento de 30° al sur, imposible de representar en los diagramas anteriormente referidos.

La red de Schmidt posibilita representaciones de áreas con la misma densidad de puntos, los cuales se separan luego por curvas cerradas. El conjunto representa la repartición estadística de las alineaciones. Su construcción y uso, no será explicado aquí.

Trampas Petrolíferas

Una trampa petrolífera, en la cual se acumulan hidrocarburos líquidos o gaseosos, está constituida por una estructura geológica durable, de cualquier naturaleza, la cual se opone al movimiento del petróleo. Según Levorsen (1967), en su libro clásico de Geología del Petróleo, trampa es: “el lugar donde el crudo y el gas están limitados de todo movimiento”.

La Figura 37 muestra los principales elementos de una trampa. Se utilizó como ejemplo una trampa constituida por una arenisca porosa y permeable, suprayacida por una capa impermeable, formando en su conjunto un anticlinal. Se observa en la figura que el punto estratigráficamente más alto de la trampa es la cresta de culminación. El punto más bajo es el punto de derrame o punto inferior del cierre de la trampa. El plano horizontal a través del punto de derrame es llamado plano de derrame. La distancia vertical del punto más alto (cresta) al más bajo (punto de derrame) es el cierre de la trampa. La parte productiva del depósito es denominada arena neta petrolífera (“pay”). Su espesor vertical es conocido como el espesor neto de arena petrolífera (“gross pay”).

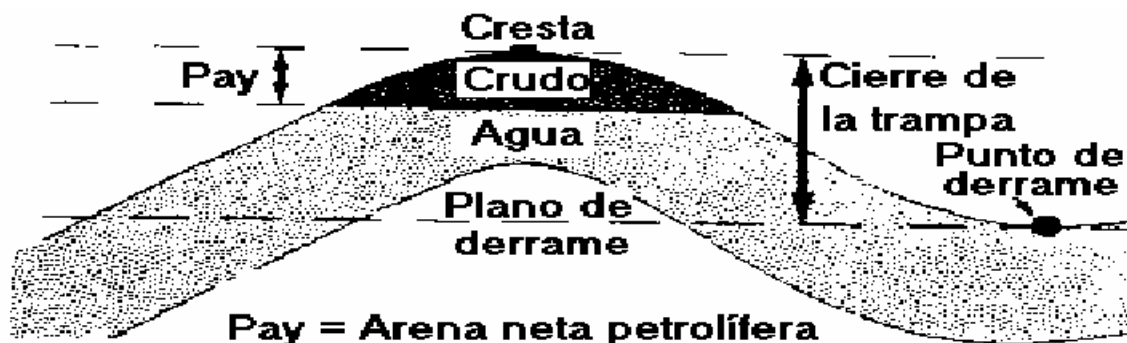


Figura 37: Elementos de una trampa (anticlinal).

No todo el espesor de arena neta petrolífera (“gross pay”) puede ser productivo. Por ejemplo, las lutitas interdigitadas dentro de un yacimiento contribuyen al “gross pay” pero no con el espesor de arena neta petrolífera explotable (“net pay”).

Una trampa puede contener petróleo, gas o una combinación de los dos. El contacto agua-petróleo (OWC o CAP) es el nivel más profundo de petróleo producible dentro de un

reservorio en particular. Este marca la interfase entre rocas predominantemente saturadas en petróleo y rocas saturadas en agua. Algo similar puede decirse respecto al contacto gas-agua. (GWC o CGA) o el contacto gas-petróleo (GOC o CGP). El petróleo y el gas pueden presentarse juntos en la misma trampa como dos fases separadas (líquida y gaseosa). En este caso el gas se ubica en la posición estratigráficamente más alta al petróleo debido a su densidad más baja.

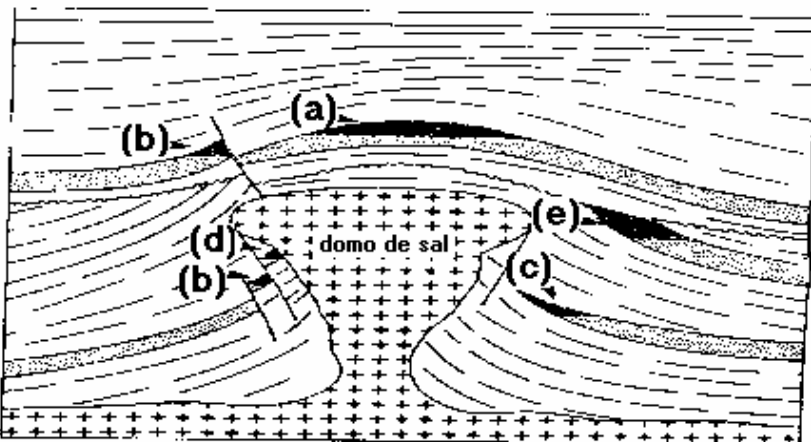
El establecimiento de estos contactos es indispensable para el cálculo de las reservas de una acumulación y es uno de los principales objetivos del perfilaje del pozo y de su muestreo.

Los contactos entre fluidos en una trampa son casi siempre planos pero no siempre horizontales. Esto es importante para la evaluación de las reservas y el establecimiento de un esquema de producción eficiente. Una de las razones más comunes por las que un contacto entre fluidos inclinado puede ocurrir es debido al flujo hidrodinámico del agua de fondo.

Puede haber uno o más recipientes de hidrocarburos, cada uno con sus contactos entre fluidos, dentro de los límites geográficos del campo de petróleo o gas. Cada recipiente individual puede contener una o más zonas de arena neta petrolífera (Figura 38).

Figura 38: Ejemplos de Trampas

- (a): Trampa tipo anticlinal o domo.**
- (b): Trampa en falla.**
- (c): Trampa en lente de arenisca.**
- (d): Trampa por truncamiento estratigráfico.**
- (e): Trampa en discordancia.**



Hay muchos tipos diferentes de trampas de hidrocarburos. Básicamente, las trampas pueden clasificarse en 3 tipos mayores: estructurales, estratigráficas y combinación de las anteriores:

Clasificación de las Trampas

- **Estructurales** **Fallas, pliegues, domos de sal**
- **Estratigráficas** **Cambios de facies por procesos depositacionales (canales, barras, arrecifes) o postdepositacionales (diagénesis)**
- **Combinadas** **Trampas en discordancias**

Las trampas estructurales provienen principalmente de procesos tectónicos post-depositacionales que modifican la configuración espacial de la roca almacén, principalmente por plegamiento y fallamiento. Los principales representantes de este grupo de trampas, son los anticlinales, las fallas y los domos o diapiros de sal o de lodo.

Las trampas estratigráficas son aquellas cuya geometría es el resultado de cambios en la litología. Levorsen (1967), define la trampa estratigráfica como “aquella en la que el principal elemento de entrapamiento es alguna variación en la estratigrafía, litología, o ambas, de la roca almacén, tales como un cambio de facies, una variación local de la porosidad y permeabilidad, o una terminación estructura arriba de la roca reservorio, independientemente de la causa”. Los cambios litológicos pueden ser depositacionales, como en canales, arrecifes y barras, o post-depositacionales, donde los estratos son truncados o donde las litologías de la roca han sido alteradas por diagénesis.

Las trampas combinadas, mezclan dos o más tipos de los grupos genéricos previamente definidos. Un ejemplo común ocurre generalmente en las discordancias angulares. Un tipo muy raro de trampa está representado por las trampas puramente hidrodinámicas. Resultan de la combinación de fuerzas hidrodinámicas y estructura y/o estratigrafía. En las trampas hidrodinámicas, el movimiento hacia debajo de las aguas de formación evita el movimiento hacia arriba del petróleo. Hay un número importante de campos con contactos agua-petróleo inclinados donde el entrapamiento es una combinación de estructura y fuerza hidrodinámica. Los principales tipos de trampas, se presentan a continuación (Figura 39):

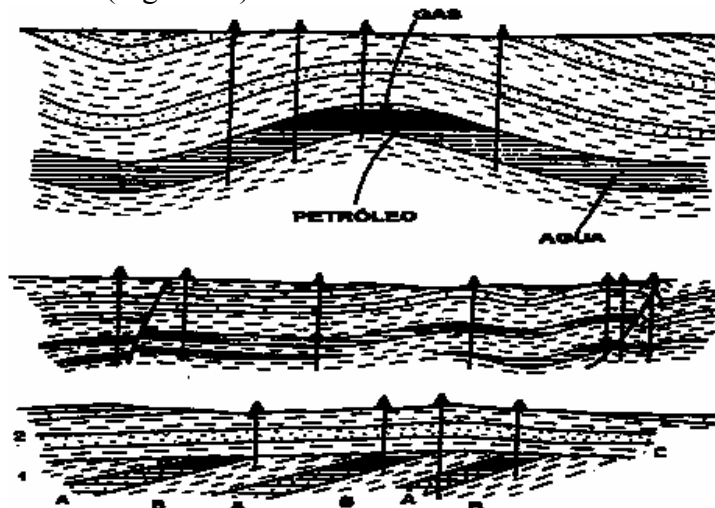
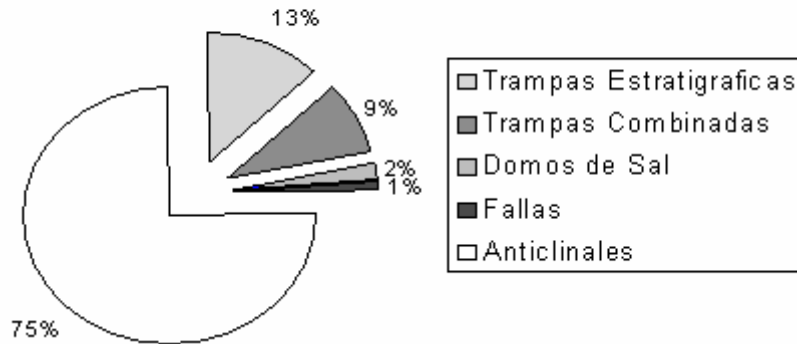


Figura 39: Principales tipos de trampas; anticlinal, fallas, trampas estratigráficas, discordancias.

Los porcentajes de yacimientos de crudo que se almacenan en diferentes tipos de trampas se muestran en la Figura 40:

Figura 40: OCURRENCIA DE YACIMIENTOS EN DIFERENTES TIPOS DE TRAMPAS (%)



Los campos gigantes de petróleo se definen como aquellos con más de 500 MMBls de reservas recuperables. De estos, las trampas anticlinales contienen el 75% de las reservas mundiales de petróleo conocidas; las fallas cerca del 1% y las trampas asociadas con domos de sal el 2%. Solamente el 13% de las reservas mundiales conocidas ocurren en campos gigantes de naturaleza estratigráfica y un 9% en trampas combinadas.

ANEXO 1

DICCIONARIO GEOLOGIA ESTRUCTURAL

Compression = Compresión
Deformation = Deformación
Dip = Buzamiento
Drag = Arrastre, Rastro
Elongation = Alargamiento
Fault = Falla
Flexion, Flexure = Flexión
Fold = Pliegue
Joint = Diaclasa
Pitch (ing) = Cabeceo
Plate = Placa
Plunge = Inmersión
Restrained = Compresión
Ridge = Cordillera
Rod = Vara, Barra
Shear = Cizallamiento
Slickenside = Espejo de Falla
Slip, Slide, Skid = Deslizamiento
Strike = Rumbo
Strain = Tensión
Strength = Fuerza, Potencia
Stress = Esfuerzo
Stretch = Esfuerzo, Tensión, Dilatamiento
Torsion, Twist = Torsión
Thrust = Empuje, Presión, Derrumbe
Trench = Fosa