

ROCAS ORGÁNICAS: CARBÓN Y PETRÓLEO

1. INTRODUCCIÓN

Dentro de este grupo se incluyen depósitos sedimentarios de distinta naturaleza debidos a la actividad de los seres vivos, constituidos mayoritariamente por su propia materia orgánica más o menos trasformada. De acuerdo con su naturaleza, estos materiales se han agrupado bajo la denominación de rocas orgánicas para diferenciarlas de las rocas bioquímicas, en las que también intervienen seres vivos en su formación, pero que están compuestas mayoritariamente por material inorgánico.

La materia orgánica -a diferencia de la inorgánica- es muy inestable, se descompone y evoluciona más o menos rápidamente. Dicha evolución depende de su naturaleza y de las condiciones ambientales existentes (contenido en oxígeno, temperatura, presión...). Así, en presencia de oxígeno -en ambientes subaéreos o subacuáticos oxidantes- la materia orgánica se altera, dando CO_2 y H_2O que son volátiles, y mayoritariamente se pierden como componentes de las rocas. En ausencia de oxígeno -en ambientes subacuáticos o subterráneos reductores- la descomposición es incompleta y las rocas conservan compuestos orgánicos más o menos estables.

Abundancia. La materia orgánica es ubicua en los sedimentos, pero dado que la mayor parte de los ambientes sedimentarios son oxidantes sólo una ínfima parte pasa a las rocas, donde normalmente se presenta finamente dispersa. En cuanto al contenido en materia orgánica en distintos ambientes, señalar que: a) en aguas naturales se encuentra en forma coloidal y se sitúa entre 0-10 mg/l (inferior a 0,001 % en peso); b) en sedimentos actuales se observan pequeñas diferencias: 1-0,50 % en el Mediterráneo, 0,25-0,50 % en el Atlántico y 0,25 % en el Pacífico; c) en las rocas es de 2,1 % en lutitas (1,79 % en limos; 2,08 en arcillas gruesas; 6,50 en arcillas finas < 2 micras), 0,25-0,30 % en carbonatos y 0,05 % en areniscas. En consecuencia, los depósitos orgánicos suponen concentraciones bastante excepcionales en la naturaleza. Los principales sedimentos y rocas donde se producen concentraciones de este tipo son: lodos negros sapropélicos, pizarras bituminosas de grano fino; turbas, carbones pardos, carbones negros; petróleo, gas natural, asfaltos y betunes.

Interés de su estudio. Como recursos energéticos, los combustibles fósiles ocupan un lugar de primer orden en la economía mundial (centrales térmicas, industria metalúrgica, industria siderúrgica...). En la industria química son la fuente principal de materias primas orgánicas (medicamentos, caucho, resinas, colorantes, explosivos, lubricantes...) y también interesan por su contenido en determinados elementos químicos (Cu, Zn, As, Mb, Pb, U, V...).

Nomenclatura y clasificación.

A) Entre los depósitos orgánicos actuales, en función de su naturaleza y su grado de evolución, se pueden distinguir:

- **Humus:** Materia orgánica más o menos “in situ” y alterada, localizada en la parte superior de los perfiles edáficos, que contiene principalmente ácidos húmicos (compuestos aromáticos de elevado peso molecular –policíclicos– procedentes de los fenoles contenidos en las ligninas vegetales, que atacan las arcillas y los granos detríticos). Se genera por descomposición de vegetales y animales y, normalmente, con el tiempo se oxida y no forma depósitos orgánicos.

- Turba: Material procedente de la descomposición de vegetales acumulados “in situ”, debido fundamentalmente al enterramiento de plantas leñosas resistentes al deterioro (plantas que toleran normalmente condiciones ácidas: musgos, brezos, juncos, pinos, abedules, sauces). Se forma en condiciones anaerobias, sobre todo en pantanos de climas fríos, donde la alteración de la materia orgánica es más lenta.
- Sapropel: Depósito orgánico de grano fino, rico en materia algal, con fitoplacton y fragmentos de plantas superiores en proporción variable. Se forma en condiciones subacuáticas anaerobias, junto a productos como el metano y el sulfhídrico. Puede considerarse un biopolímero y constituye el origen de los hidrocarburos naturales.
- Kerógeno: Materia orgánica compleja incluida en rocas sedimentarias de grano fino (pizarras bituminosas), generada por evolución del sapropel. Es un geopolímero con hidrocarburos de cadenas largas (como el petróleo pesado, pero con mayor proporción de componentes aromáticos) y se distingue por ser insoluble en disolventes orgánicos.

B) Los materiales orgánicos antiguos –generados por evolución de los anteriores– se clasifican atendiendo a la naturaleza de la materia orgánica inicial del depósito:

- Carbón (carbón húmico): Materia sólida generada por fosilización de sedimentos de origen vegetal (turberas), formada mayoritariamente por compuestos orgánicos (>50 % según Pettijohn ó >67 % según Tucker). De acuerdo su grado de evolución suele distinguirse entre carbones blandos y duros, y entre carbones pardos y negros.
- Petróleo (crudo petrolífero): Mezcla natural de hidrocarburos de cadenas cortas y largas en proporción variable, a menudo con azufre combinado orgánicamente y compuestos oxigenados y nitrogenados. Está formado mayoritariamente por materia orgánica (>50 %) que procede de sapropel, y se presenta normalmente líquido (aceite bruto), acompañado de gas natural (mayoritariamente metano) y de componentes sólidos (betún y asfalto).
- Carbones sapropélicos o bituminosos: Rocas orgánicas intermedias entre el carbón y el petróleo, constituyen los carbones grasos (carbones que producen un elevado porcentaje de alquitrán en la destilación) entre los que se incluyen los siguientes tipos:
 - "Cannel coal": carbón algo bituminoso, de bajo contenido en terrígenos (< 25 %),
 - "Cannel shale": carbón algo bituminoso, mayor contenido en terrígenos (25-50 %),
 - "Boghead cannel": carbón muy bituminoso, bajo contenido en terrígenos (< 25 %),
 - "Boghead cannel shale": muy bituminoso, mayor contenido en terrígenos (25-50 %)
- Rocas intermedias entre orgánicas e inorgánicas:
 - Carbón impuro o de hueso ("bone coal"), procede de lodos con alto contenido en materia orgánica (20-50 %), predominado el humus y la turba sobre el kerógeno.
 - Pizarra bituminosa ("oil shale"), procede de lodos también con alto contenido en componentes orgánicos (20-50 % según Pettijohn o 33-67 % según Tucker), con predominio ahora del kerógeno sobre humus y turbas.
 - Pizarra negra ("black shale"), lutitas ricas en materia orgánica, procede de lodos con un contenido en componentes orgánicos (5-20 % según Pettijohn o 10-33 % según Tucker).
- Otras rocas mezclas de carbón y minerales inorgánicos (más del 10 %):
 - Carbargilita, carbón con arcillas y cuarzo.
 - Carbankerita, carbón con minerales carbonatados (frecuentemente del 20 al 60 %), puede contener también arcillas y pirita.
 - Carbopirita, carbón con pirita (frecuentemente del 15 al 20 %).

2. CARBÓN

Roca sedimentaria organoclástica más o menos metamorfizada, formada por una mezcla heterogénea de distintos compuestos orgánicos junto a cierta cantidad de materia inorgánica y agua. Procede de restos vegetales con distinto grado de conservación, mayoritariamente turbas con más o menos materia orgánica tipo sapropel, que se encuentran formando parte de lodos y fangos en zonas pantanosas, lacustres o deltaicas. Normalmente se acumulan in situ o sufren ligeros desplazamientos. Se presentan en cuencas poco profundas (marismas, pantanos), estratificados y asociados a rocas detríticas de grano fino.

Son rocas esencialmente autógenas, generadas durante el enterramiento por la transformación de restos vegetales acumulados en presencia de agua, debido a modificaciones diagenéticas específicas, con reacciones anaerobias y modificaciones texturales y químicas, debidas sobre todo a la temperatura y a la acción bacteriana. Se trata de un metamorfismo orgánico, en este sentido las rocas orgánicas difieren de las detríticas y químicas, a las que la diagénesis no afecta de manera tan radical.

Forma de presentarse. Aparecen en capas estratificadas, alternado con otras rocas sedimentarias: areniscas, pizarras y en menor grado calizas; mayoritariamente con rocas de grano fino. Forman secuencias donde se suceden los depósitos de grano grueso, las arenas y limos, sobre los que se desarrolla la vegetación que genera carbones, de nuevo limos con más o menos fósiles...

La sedimentación se caracteriza por presentar secuencias periódicas, sedimentación rítmica, depósitos cíclicos "ciclotemas", en los que las capas de carbón son una parte. Los ciclos pueden ser más o menos completos y se relacionan con variaciones en las condiciones de la cuenca; en cada ciclo normalmente se deposita una capa de carbón. La potencia media de la capa de carbón puede situarse alrededor de 1,8 m, la de cada ciclo de 10 a 20 m y el número de ciclos presentes en una formación puede variar de 50 a 400.

Un ciclo típico en relación con el depósito de carbón puede ser: lutitas con fósiles marinos y más o menos carbonatos, areniscas y limolitas no marinas, depósito de carbón, horizontes edáficos con raíces, suelos arenosos, suelos arcillosos (con nódulos de siderita). Asociados al depósito –debajo de las capas de carbón, pero también en medio o encima– pueden aparecer capas: "tonstein" o capas con fósiles marinos, que permiten establecer correlaciones, ya que normalmente la correlación lateral entre las capas de carbón es mala. El "tonstein" se considera un paleosuelo caolínítico, relacionado con cenizas volcánicas desplazadas por el viento.

Composición química. Los elementos mayoritarios son carbono, hidrogeno y oxígeno, variando su proporción según el rango de los carbones: C: 65-95 %, H: 3-10 %, O: 2-25 %.

	C	H	N	O
Madera	50	6,2	0,9	43
Turba	55	6,3	1,7	37
Lignito	73	5,2	1,3	20
Carbón bituminoso	84	5,6	1,5	8,7
Antracita	94	2,8	1,0	2,7

2.1. TIPOS ROCOSOS

En función de la naturaleza de la materia orgánica que contienen se distingue en primer lugar entre carbones húmicos y sapropélicos.

Carbones húmicos: Carbones típicos, formados por de acumulación de plantas leñosas, resistentes; normalmente se presentan estratificados. Se clasifican en función del rango o poder calorífico, que depende de los procesos sufridos durante la diagénesis, consecuencia de los procesos de diagénesis, que equivalen a un metamorfismo para la materia orgánica. Estos procesos tienen lugar durante el enterramiento, en el cual el sedimento se ve sometido a distintas condiciones (temperatura, presión, fluidos) y se producen procesos físicos, químicos y biológicos (microbiológicos), que hacen evolucionar la materia orgánica: proceso de carbonificación. El resultado es un incremento en el contenido en C y disminución en volátiles se traduce en una variación del rango del carbón, es decir en su poder calorífico:

Tipos, rangos y distribución en el tiempo:

- Turbas: recientes, cuaternarias, afectadas por procesos biológicos y bacterianos. De aspecto más o menos fibroso, conservan la estructura vegetal. Su contenido en carbono se sitúa en torno al 60 %, superior al presentado por la materia vegetal (40 %).
- Carbones pardos: mesozoicos (jurásico) o terciarios (eoceno)
 - * blandos, conservan la textura vegetal (del 60-70 % de C)
 - * duros (lignitos: 70-78 % de C), se forma la vitrinita
- Carbones negros: paleozoicos (devónico, carbonífero)
 - * duros, bituminosos (hullas: 78-90 % de C), con trozos brillantes, bandeado.
 - * antracitas (más de 91 % de C), fractura concoidea, queman con llama sin humo.
- Grafito (100 % de C): formado en condiciones metamórficas.

Carbones sapropélicos: Formados a partir de algas, masas de esporas (polen) y diminutos restos de plantas no leñosas. Se presentan no estratificados, formando barros orgánicos, normalmente en las partes más profunda de la cuenca. Se distingue entre:

- "Cannel coal": carbón masivo, formado por restos de plantas esporas y hongos (durita), materia vegetal finamente dividida; textura granuda fina y fractura concoidea, de interés en joyería.
- "Boghead coal": conocido también como torbanita (pasa a pizarra bituminosa): carbón derivado de algas, de tendencia aceitosa, con fina pizarrosidad.

2.2. PETROGRAFÍA

Litotipos¹. A simple vista pueden distinguirse cuatro componentes o litotipos que se presentan en bandas milimétricas (3-5 mm) en los carbones húmicos, compuestos a su vez elementos menores microscópicos (los macerales). Dichos componentes macroscópicos son:

- Vitreño o vitrita: Negro, de aspecto brillante, vítreo, duro, frágil, quebradizo, con fractura concoidea, rompe en cubos y no mancha (parecido al azabache); se presenta en capas mayores de 3 mm. Pasta o gel coloidal formada por restos muy pequeños de células, materia orgánica amorfa, homogéneo, sin estructura vegetal. Componente relativamente abundante (10-15 %²), compuesto mayoritariamente por macerales del grupo de la vitrinita. (Dureza: 2. Densidad: 1,3).

¹ Escuela Británica

² Porcentajes en volumen en hullas y carbones bituminosos.

- Fuseno o fusita: Negro mate, de aspecto blando, brillo sedoso, fibroso, muy frágil, poroso, pulverulento, sucio y mancha (parecido al carbón vegetal); se presenta en lechos negros, en lentejones y capas mayores de 3 mm. Procede de restos de madera y esclerénquima con la textura celular bien conservada. Componente frecuente, aunque poco abundante (1-2 %), compuesto mayoritariamente de inertinita: fusinita. (Dureza: 1)
- Dureno o durita: Gris o pardo negruzco, de aspecto mate, terroso, mayor dureza, fractura fina a rugosa; se presenta en capas de mm a dm, sin estratificar normalmente. Procede de restos vegetales sin sus características originales, cápsulas de esporas. Componente frecuente y abundante (30-40 %), compuesto de una mezcla de inertinita y liptinita. (Dureza: 7. Densidad: 1,35-1,45)
- Clareno o clarita: Aspecto semibrillante, laminado, brillo sedoso, brillante en fractura reciente, fractura *plana*, irregular; se presenta alternando en bandas mates y brillantes, en capas menores de 3 mm. Constituido por esporas, cutículas y hojas, unidas por cemento amorfo de vitrinita. Componente más abundante (50 %), compuesto por una fina alternancia de vitrinita y liptinita. (Densidad: alta. Dureza: 1,3)

Macerales³. Los carbones están formados por otros constituyentes o macerales (equivalentes a los minerales en los compuestos inorgánicos), los cuales constituyen la base de su clasificación actual. Dichos constituyentes son opacos y, aunque pueden observarse en microscopía óptica con luz transmitida (MT) y en microscopía de fluorescencia (MF), sobre todo se distinguen en microscopía de reflexión (MR), sobre superficies pulidas. Los macerales forman elementos individualizables, aunque de límites borrosos, envueltos en una pasta, diferenciándose por su color y forma (rojos o amarillos en MT), y se asocian en bandas de 50 µm constituyendo microlitotipos y litotipos. Se dividen en tres grandes grupos (los dos primeros en relación con materia húmica de procedencia subaérea, y el tercero de materia amorfa de procedencia acuosa):

- Vitrinita o huminita: de color gris (MT), reflectividad media (MR), densidad media, contenido en C e H medio. Gel que procede de fragmentos de tejidos leñosos de plantas que han sufrido un rápido enterramiento. Componente más abundante. Incluye: "telinita" de las paredes celulares de vegetales, tiene estructura celular; "colinita" de rellenos orgánicos de cavidades celulares, con ácidos húmicos, carece de estructura interna.
- Inertinita: color blanco (MT), alta reflectividad (MR), alta densidad, alto contenido en C y bajo en H. Componente más escaso. Procede de tejidos de la madera, que han sufrido un cierto grado de oxidación, previamente o durante la hullaificación. Incluye: "fusinita" de tejidos leñosos, de madera, tiene estructura celular (aspecto de carbón vegetal, puede originarse en incendios forestales); "micrinita" de detritus orgánico fino y por descomposición térmica de resinas, sin estructura (forma la matriz del carbón y rellena cavidades); "esclerotinita" de hongos; "semifusinita"...
- Liptinita o exinita: de color oscuro (MT), baja reflectividad (MR), baja densidad, alto contenido en H y bajo en C. Componente poco abundante. Procede de megaesporas, microesporas, cutículas, resinas y algas, puede reconocerse su forma y estructura, con frecuencia los componentes aparecen compactados y aplastados. Incluye: "cutinita" de nervios y cutículas de hojas; "esporinita" de exinas de polen y esporas; "resinita" de resinas vegetales; "alginita" de algas, constituyente principal de los carbones bituminosos.

³ Escuela de Estados Unidos

Otros componentes. Los carbones pueden presentar minerales inorgánicos -como accesorios normalmente (< 10 %)-, en relación con sedimentos detríticos, bioquímicos o químicos asociados y constituyen los componentes inertes en los carbones. Los principales son:

- detríticos: granos de cuarzo, feldespatos, arcillas y minerales pesados,
- químicos (autígenos): concreciones de siderita, pirita, ankerita, dolomita, calcita. La pirita es abundante por la actividad de las bacterias sulfato reductoras. También hay minerales diagenéticos tardíos que se presentan en cavidades: ankerita, cuarzo, sulfuros de Fe, Pb, Zn, Cu.

En algunos depósitos tiene interés particular las bolas de carbón ("*coal palls*"), son concreciones esféricas, de calcita o dolomita con restos de plantas muy bien conservados. Son nódulos diagenéticos previos a la compactación y alteración de la materia orgánica, generados en turbas o pantanos boscosos.

2.3. GÉNESIS DE LOS DEPÓSITOS

Fuente del material. Materia orgánica procedente de distintas sustancias vegetales, sobre cuya importancia no hay acuerdo, y que además han cambiado en el tiempo. En el Carbonífero teridofitas, en el Pérmico: coníferas, en el Mesozoico: gimnospermas y en el Cenozoico: angiospermas. Hay dudas sobre si los tejidos vegetales eran los mismos que los de las plantas actuales. Compuestos orgánicos: hidratos de carbonos (celulosa, almidón, quitina), lignina, ceras y grasas, resinas, proteínas.

Ambiente de depósito. Actúan factores climáticos, morfológicos y tectónicos. Aparecen en zonas donde la producción es muy elevada se produce la acumulación, en clima húmedo con precipitaciones regulares, en aguas frías o algo templadas, en cuencas cerradas con aguas estratificadas, sin movimiento (caída de oxígeno), ambiente reductor, en sitios como turberas, pantanos (ciénagas, manglares), lagos, marismas.

Medios de depósito. Cuencas sedimentarias, subsidentes (ya que el enterramiento rápido favorece la conservación de la materia orgánica), poco profundas, donde apenas llegan sedimentos detríticos, relacionadas con movimientos epirogénicos, propias de épocas transgresivas. Los dos tipos clásicos:

- Parálcos: Cuencas de origen tectónico, no muy profundas, relacionadas con el mar, zonas de influencia marina y continental (fósiles marinos), costeras (deltas persistentes, marismas: llanuras costeras extensas), franjas pantanosas por ascenso de las aguas. Presentan mayor extensión y ritmo más regular.
- Limnicos: Cuencas de origen climático, continentales lacustre o fluviales (conos de deyección, meandros abandonados, lagos) con ritmo más irregular, más variable, más pequeños, de menor extensión lateral (lentejones), elevada subsidencia, más potentes, menor número de ciclotemas.

Atendiendo a los procesos de acumulación de la materia orgánica en las cuencas sedimentarias se distinguen tres tipos compatibles entre sí:

- autoctonas. depósitos in situ (árboles en posición vertical),
- aloctonas, materiales arrastrados, proceden de otros lugares (árboles tumbados),
- semialóctonas: con material autóctono (plantas) y aloctono (polen).

2.4. DIAGÉNESIS: CARBONIFICACIÓN.

Un rápido enterramiento tras el depósito favorece la formación de carbón, ya que tiene lugar una acusada compactación (1 capa de carbón procede de 10 a 20 veces más de turba), y se producen varias reacciones químicas. Primero la acción de las bacterias anaerobias convierte los vegetales en turbas, después -durante el proceso de carbonificación- se producen cambios geoquímicos en los que ya no intervienen las bacterias, que conllevan pérdida de agua y de volátiles y enriquecimiento en carbono.

La mayor parte de los carbones son carbones húmicos, formados in situ como turba (bosques pantanosos), pasan a lignitos por enterramiento en ausencia de aire y tiempo, y pasan a carbones bituminosos por cambios fisicoquímicos exclusivamente. Derivan de sustancias húmicas por la rotura química de lignina, celulosa y proteínas de las plantas originales. La lignina es degradada por microorganismos a ácidos húmicos (compuestos aromáticos policíclicos). Al incrementarse el rango de los carbones se incrementa la proporción de componentes aromáticos (la antracita formada por anillos de benceno condensados). Las sustancias húmicas poseen peso molecular elevado, elevado C y pérdida de H, O, N.

El carbón se forma en la diagénesis entre 100 y 200°C por el proceso de carbonificación: carboxilación, condensación, eliminación de agua y otras reacciones de unión. Cuando se calienta desprende metano, hidrógeno y se concentran brea, por destilación produce coque. Hay varias maneras de medir el proceso de formación de carbón (no validas en todo el rango de los carbones): contenido en elementos químicos (C, H, O, volátiles, humedad), capacidad calorífica y reflectancia de la vitrinita (en sustancias con fitoclastos), relacionada con su contenido en volátiles. La reflectancia de la vitrinita es un indicador del enterramiento, de la temperatura alcanzada y de la potencialidad de la cuenca para que hayan alcanzado rangos en el carbón o los hidrocarburos que presenten interés.

El rango del carbón es consecuencia del grado de carbonización alcanzado. Al aumentar la profundidad, aumenta la temperatura -de acuerdo con el gradiente geotérmico- y aumenta el rango del carbón. La profundidad de cambio de rango varía de unas cuencas a otras, ya que depende del gradiente geotérmico. También influye el tiempo que se ha mantenido a una determinada temperatura y la tectónica, en áreas plegadas las presiones tectónicas y el calor de fricción incremento de temperatura, se produce orientación y aumenta el rango del carbón.

3. PETRÓLEO

El petróleo es una mezcla natural de hidrocarburos parafínicos, nafténicos y bencénicos en proporciones variables, de color oscuro y olor característico. Se presenta mayoritariamente como un líquido aceitoso (densidad 0.8 a 0.95 g/cm³), que contiene componentes sólidos y gaseosos. Procede de la transformación de la materia orgánica -mayoritariamente plancton- depositada en sedimentos marinos de grano fino. Dichos depósitos conocidos como sapropel evolucionan a kerógeno y finalmente a petróleo. Son sinónimos: petróleo bruto, crudo de petróleo, aceite bruto, aceite mineral o aceite natural.

Comportamiento de la *materia orgánica original* durante el depósito las *proteínas* por hidrólisis liberan aminoácidos que los microorganismos del suelo destruyen, dando amoníaco y después se transforman en nitritos y nitratos; los *glúcidos* (celulosa y hemicelulosa) se destruyen fácilmente; los *lípidos* se hidrolizan fácilmente y no juegan ningún papel en los sedimentos; los *compuestos heterocíclicos* se presentan en carbones y petróleos; los *fenoles* se encuentran de la lignina vegetal y dan lugar a los ácidos húmicos, que forman parte de suelos y sedimentos de

grano fino junto con el kerógeno. De esta forma tiene lugar una evolución del kerógeno al petróleo, términos muy próximos.

Nomenclatura

- **Asfalto:** Material pardo, bituminoso de origen natural (betún) o artificial (residuo de destilación del petróleo), de consistencia sólida o semisólida (reblandece a 50 °C y funde a 100°C), densidad entre 1 y 1,6, insoluble en agua y alcohol y más o menos soluble en disolventes orgánicos (S_2C), es una mezcla de hidrocarburos ricos en cicloalcanos y sustancias minerales. Los asfaltos naturales proceden del petróleo por oxidación de los hidrocarburos superiores de la serie de las parafinas.
- **Betún:** Material de aspecto similar, totalmente soluble en disolventes orgánicos, es una mezcla de hidrocarburos aromáticos policíclicos de elevada masa molecular y de sustancias orgánicas ricas en C e H (con O, S, N, y trazas de Ni, V). Constituye el residuo alterado de petróleo, consecuencia de su ascenso a la superficie y de la pérdida de volátiles, que se está impregnando los poros de las rocas en los yacimientos de petróleo; también puede ser obtenido por tratamiento industrial del petróleo.
- **Alquitrán:** Líquido viscoso a sólido, negro a pardo oscuro, que procede de la destilación destructiva de materias orgánicas (madera, carbón, petróleo, pizarras); según su origen contiene cantidades variables de hidrocarburos aromáticos, fenoles, piridinas y otras bases nitrogenadas; arde con llama humosa, se utiliza como impermeabilizante y como fuente de compuestos orgánicos.
- **Brea:** Fracción más pesada del alquitrán, procedente de petróleos, carbones o maderas, que se obtiene como residuo sólido por destilación fraccionada a temperaturas superior a 350°C; está constituida fundamentalmente por hidrocarburos policondensados de peso molecular muy elevado; puede presentarse impregnando arenas por evaporación parcial del petróleo.

Composición. El petróleo está compuesto casi en su totalidad por hidrocarburos y, con frecuencia, también presenta algo de azufre combinado orgánicamente y restos de compuestos oxigenados y nitrogenados. Los hidrocarburos pueden ser de tres clases:

- **Alifáticos o parafínicos** (C_nH_{2n+2}): formados sobre todo por alcanos, de cadenas abiertas saturadas (ej.: petróleos americanos).
- **Ciclanos, cicloalcanos, cicloparafinas o naftenos** (C_nH_{2n}): de cadenas cíclicas saturadas, de baja masa molecular (ej.: petróleos rusos).
- **Aromáticos o bencénicos** (C_nH_{2n-6}): con grupos cíclicos no saturados tipo benceno, (ej.: petróleos indonésicos).

Atendiendo a los elementos químicos mayoritarios, se presentan en la siguiente proporción: Carbono: 85 %, Hidrógeno: 12 %, Oxígeno: 2 %, Nitrógeno: < 1.5 %, Azufre: < 8 %. Todos ellos están combinados orgánicamente, forman parte de cientos de moléculas orgánicas diferentes (grasas, ácidos, piridinas, porfirinas, tioalcanos, etc.). Por su contenido en azufre se puede distinguir entre petróleo bajo en azufre o dulce y petróleo alto en azufre o agrio.

En el petróleo se encuentran componentes orgánicos sólidos y semisólidos asociados, son mezclas de hidrocarburos de elevado peso molecular, junto a otras sustancias orgánicas ricas en C e H (asfaltenos, resinas, etc.). Cuando el petróleo está próximo a la superficie, tienen lugar procesos de transformación: pérdida de volátiles, oxidación de las parafinas superiores, y se concentran dichas sustancias bituminosas, de aspecto más o menos sólido, conocidas como asfaltos o betunes de origen natural.

El petróleo siempre lleva asociado además componentes gaseosos que pueden encontrarse disueltos en el líquido o separados formando bolsadas de gas. El componente principal es el metano, a veces en menor proporción presenta etano y propano, y CO₂, N₂, H₂S, He. Al aumentar la diagénesis aumenta la fracción gaseosa y se distinguen dos tipos de gas en función de los vapores líquidos presentes: gas húmedo propio de la primera etapa, y gas seco de etapas posteriores más avanzadas. También normalmente está acompañado de aguas saladas, salmueras que presentan mayor salinidad que el agua del mar.

Distribución. En cuanto a su desarrollo en el tiempo, el petróleo nunca presenta gran antigüedad, normalmente no se encuentra en terrenos Paleozoicos, aparece únicamente en rocas Mesozoicas y Terciarias, el 80 % en rocas postríasicas. Tampoco son importantes como fuente de petróleo los depósitos recientes, puesto que en ellos la materia orgánica no dispone de tiempo suficiente para madurar. Los yacimientos más abundantes de petróleo se encuentran en el Cretácico y los de gas natural en el Pérmico, en relación con las formaciones hulleras del Carbonífero.

En la superficie terrestre el petróleo se concentra (85 %) en unas 20 provincias, que se encuentran situadas mayoritariamente en el hemisferio norte. Dichos yacimientos se presentan fundamentalmente en dos posiciones geotectónicas, con distinta importancia. Los mayores se sitúan en el borde de los cratones, en cuencas subsidentes desarrolladas en zonas de debilidad de la corteza, en relación con procesos de convergencia de placas: Oriente Medio (54 %), Mar Caribe (12 %), Norte de África (8 %), Norte de Alaska... Dentro de dichas cuencas las mayores concentraciones se producen en las zonas ligeramente onduladas, donde el petróleo se concentra en las charnelas de los pliegues. También aparece en grandes cuencas intracráticas, más o menos plegadas: Rusia (Urales y Siberia, 9 %), América del norte (5 %), Europa (4 %), Indonesia (3 %), China (3 %)...

A pesar del elevado número de indicios de petróleo, son muy pocos los yacimientos que presentan volúmenes de interés económico. Se observa una correlación inversa entre el volumen de petróleo que suministra un yacimiento y el número de yacimientos equivalentes en cuanto a su volumen de petróleo,

Forma de presentarse. En los yacimientos el petróleo se concentra en ciertos niveles debido a la existencia de trampas de origen sedimentario o tectónico. No obstante, las series petrolíferas abarcan y afectan a toda la cuenca sedimentaria y los distintos materiales que en ella se encuentran colaboran de diferente manera a la formación del yacimiento:

- Rocas madre o fuente: son rocas de grano fino, formadas en condiciones favorables al depósito de materia orgánica y a su conservación.
- Rocas almacén o reservorio: son rocas de grano grueso, favorables a la acumulación de petróleo, susceptibles de generar concentraciones cuando presentan rocas de cobertera apropiadas.
- Rocas intermedias entre rocas madre y almacén, a través de las cuales el petróleo migra, mientras va evolucionando y madurando.

3.1. GÉNESIS DE LOS DEPÓSITOS

A veces, en épocas pasadas, se ha planteado el origen inorgánico del petróleo por combinación de C e H a partir de CO₂ y H₂O, en condiciones de elevada presión y temperatura y con ayuda de catalizadores. Mediante ensayos de laboratorio se sintetizaron algunos compuestos

orgánicos y en la naturaleza es posible que se genere en ambientes volcánicos. Este origen permite explicar su presencia en meteoritos. No obstante, en la actualidad no se discute su origen orgánico dada la cantidad de pruebas encontradas, fundamentalmente compuestos complejos que claramente proceden de organismos (como las porfirinas, derivados del colesterol...), además las bajas temperaturas y presiones observadas en los yacimientos no son compatibles con un origen inorgánico.

Fuente del material. Procede de la materia orgánica depositada en los ríos (humus, cadáveres) y sobre todo en el fondo de los mares: fitoplancton marino microscópico, principalmente foraminíferos, radiolarios, flagelados y algas unicelulares.

En ocasiones se producen fenómenos de mortandad en masa, relacionadas con corrientes marinas ascendentes, en zonas de mezclas de aguas con cambios de temperatura, de salinidad, carencia de oxígeno (consecuencia a veces con un desarrollo ingente de organismos). Los organismos, depositados en el fondo del mar junto con arenas finas y margas, forman cienos sapropélicos que constituyen la fuente del petróleo. La formación de dichos depósitos, su conservación y fosilización, requiere entre otras condiciones una elevada productividad orgánica.

Medios sedimentarios. Se presenta en cuencas sedimentarias de grandes dimensiones: gran extensión y gran potencia (1000 m), en depresiones con notable subsidencia: surcos subsidentes, donde se suceden lateral y verticalmente distintos medios sedimentarios: distintas facies, de forma que se produce un ciclo completo de sedimentación.

Las condiciones más favorables a la formación de petróleo son: Ambientes marinos, parálidos, neríticos, salobres, con la parte superior oxigenada, de alta energía, favorable al desarrollo del plancton y por tanto alta productividad orgánica, y el fondo reductor, de baja energía, para que se conserve la materia orgánica depositada. Épocas transgresivas, ya que favorecen la productividad orgánica. Velocidad de sedimentación alta, ya que favorece el enterramiento. Depósitos de grano fino, ya que contienen más materia orgánica. Alternancia de facies, con arcillas que actúan como rocas madre y arenas como almacén.

3.2. DIAGÉNESIS: MADURACIÓN

Después del depósito, el enterramiento que tiene lugar debe ser el preciso (ni poco, ni mucho) para que se forme el petróleo. En esas condiciones diagenéticas tiene lugar la maduración de la materia orgánica y se puede hablar de un metamorfismo orgánico, con cambio total del material. La evolución comienza cuando se cubren unos pocos metros (10 m). Los procesos están inducidos por la presión y la temperatura (nunca muy elevada, menor de 200°C). Son más favorables las áreas de gradiente geotérmico alto, donde el ritmo de sedimentación además sea muy alto, también la composición orgánica determina la velocidad de maduración.

Se distinguen las siguientes etapas (**Fig. 3**):

- Diagénesis temprana. Tiene lugar desde las primeras etapas de la sedimentación, donde produce la degradación bacteriana de la materia orgánica (por bacterias metanógenas), formándose aminoácidos y azúcares con desprendimiento de gas natural (metano) y CO₂. En esta etapa se genera un producto insoluble denominado *kerógeno*, como resultado de la transformación del biopolímero depositado en la superficie, en el geopolímero presente en el interior del sedimento. Se establecen distintos tipos de kerógeno en relación con las diferencias que presenta la materia orgánica de partida:

- Tipo I (H muy alto, O bajo), de origen algal, rico en aceites.
 - Tipo II (H alto, O bajo), de origen marino, pobre en aceites.
 - Tipo III (H bajo, O alto), de plantas terrestres, moderado en aceites.
- **Catagénesis.** Tiene lugar a temperaturas de 70 a 100°C y profundidades de 2 a 3,5 Km, en zonas con gradientes geotérmicos normales. Esta etapa constituye la fase principal de generación del petróleo, en ella se produce la descomposición del kerógeno y la formación del petróleo líquido (soluble en disolventes orgánicos), debido a modificaciones estructurales de los hidrocarburos, mayoritariamente rotura de las cadenas ("cracking" natural). Suele ir acompañada de algo de gas húmedo, y en la superficie del yacimiento los procesos de alteración producen betunes o asfaltos.
- **Metagénesis.** Tiene lugar cuando se completa la catagénesis, normalmente a temperaturas de 110 a 130°C. En esta etapa se rompen las cadenas ("cracking") y desaparecen los hidrocarburos de cadenas largas (líquidos), formándose metano en cantidades crecientes. Primero se alcanza un estadio de gas húmedo y posteriormente evoluciona a gas seco.

En resumen, el tipo de petróleo depende del tipo de kerógeno y por tanto de la materia orgánica de partida; así, las cutículas de plantas son más favorables a producir gas y la materia algal petróleo líquido. También puede generarse a partir de carbones húmicos o sapropélicos, si la temperatura durante el enterramiento es la apropiada, en este caso el petróleo generado es más viscoso, ceroso.

Formación de yacimientos. Los yacimientos de petróleo son el resultado de un ambiente paleogeográfico, sedimentológico, estratigráfico, hidrogeológico y térmico favorables, y además con un desarrollo temporal preciso, para que la materia orgánica alcance un grado de evolución adecuado. Requieren del conocimiento de toda la cuenca sedimentaria, ya que intervienen las distintas facies, unas como medios de depósito y otras como rocas almacén.

Las condiciones de formación de hidrocarburos son frecuentes en las cuencas sedimentarias, pero su acumulación y posterior concentración en yacimientos de petróleo es menos frecuente. La materia orgánica se encuentra dispersa en las rocas, en zonas de alta productividad es más abundante y se pueden formar concentraciones, pero pronto comienza su transformación y los hidrocarburos en fase líquida comienzan a emigrar por las rocas (fases vagabundas) hasta que en condiciones favorables encuentran una barrera que lo impida. La migración primaria es la que tiene lugar en las rocas madre y la migración secundaria en las rocas almacén.

La formación de yacimientos depende de la geometría de la cuenca, de su evolución temporal, y del encuentro preciso entre el movimiento de los hidrocarburos y la trampa que los fija. La exploración de petróleo requiere conocimientos geológicos globales de la cuenca sedimentaria, su historia geológica completa con toda la sucesión de acontecimientos. Para ello se utilizan técnicas geofísicas y sondeos; también tienen interés los estudios petrográficos para determinar si las características diagénéticas de la cuenca son favorables a la formación de petróleo, por ejemplo, el color del polen (amarillo si se mantiene orgánico, marrón con el desarrollo de petróleo y negro con el gas), o la reflectividad de la vitrinita (características de la diagénesis).