

Energéticos fósiles



Los energéticos fósiles son compuestos constituidos principalmente por carbono, uno de los elementos más abundantes en la Tierra. Aquí se desarrolla el tema del origen de los hidrocarburos, a partir del ciclo del carbono y de otros ciclos naturales.

Roberto Trápaga Martínez

...La ceniza estelar del Sol sólo puede reutilizarse como combustible hasta cierto punto. Llegará un momento en que todo el interior solar sea carbono y oxígeno, cuando ya a las temperaturas y presiones dominantes no pueda ocurrir ninguna reacción nuclear más...

Carl Sagan, *Cosmos*

Tan codiciables como para generar conflictos bélicos y con longevidades de hasta centenas de millones de años, los combustibles fósiles han jugado un papel protagónico en el desarrollo de las sociedades actuales. Al percatarse de su utilidad como fuentes de energía —primero del carbón, después del petróleo y del gas natural— las sociedades comenzaron a obtener grandes beneficios de los energéticos fósiles. Sin embargo, la combustión de éstos da lugar a emisiones indeseadas y a la elevación de los niveles de dióxido de carbono de la atmósfera. Hoy resulta urgente volver a encerrar a ese genio, que ha concedido más de tres deseos, en su lámpara maravillosa.

Con la elaboración del llamado Protocolo de Kioto de 1997 —que no ha sido ni el primero ni el último esfuerzo en tal

sentido—, se ha atacado el reto de mitigar el constante incremento en la emisión de dióxido de carbono y otros gases causantes del efecto invernadero en la atmósfera, siguiendo, en mi opinión, la modalidad que a la naturaleza le ha funcionado durante tanto tiempo: los *ciclos de los elementos*. Quizá las medidas que se han adoptado y las nuevas tecnologías que se comienzan a utilizar permitan “cerrar” el *ciclo humano del carbono*. Tarea difícil, pero que vale la pena.

Vayamos por pasos. El carbono es el elemento más importante para la vida en la Tierra. Baste mencionar su participación en las complejas moléculas del ADN y ARN que controlan la reproducción de los organismos vivos para darnos una idea de su trascendencia. El carbono tiene la cualidad de enlazarse consigo mismo y con una gran cantidad de elementos para formar cadenas y grupos con

El ciclo del carbono comenzó desde la formación de la Tierra. Hace entre 4.5 y 3 mil millones de años, se dieron las condiciones propicias para establecer el ciclo geoquímico del carbono

una estabilidad y fortaleza poco usuales. Cada configuración distinta de átomos de carbono produce un compuesto con características químicas propias. Se dice que el carbono es el elemento más amistoso del Universo.

El carbono, junto con el oxígeno, el hidrógeno y el nitrógeno, otros tres elementos esenciales, forma parte de los inmensos ciclos globales que unen al mundo vivo con el inerte. Su unión con el oxígeno ha influido de manera importante sobre las condiciones de la Tierra. Durante mucho tiempo la concentración de dióxido de carbono (CO_2) de la atmósfera de la Tierra fue comparable con la de la atmósfera de Venus (96.5 por ciento). La presión atmosférica era 60 veces mayor que la actual, pero en nuestro planeta, a diferencia de Venus, diversos procesos contribuyeron a que el exceso de carbono se fuera fijando en las rocas.

Echemos un rápido vistazo a estos procesos, particularmente al ciclo del carbono, ya que nos ayudará a entender mejor la formación de los energéticos fósiles.

Un aspecto importante para el inicio de estos ciclos globales fue la capacidad del dióxido de carbono, junto con otros gases, de absorber el calor de la atmósfera, es decir, el llamado *efecto invernadero*. El dióxido de carbono es un termostato natural que controla la temperatura del invernadero planetario, actuando como un vidrio. El dióxido de carbono controla el balance de la energía que la Tierra recibe del Sol y la que ésta emite hacia el espacio. En este proceso de regulación, el dióxido de carbono, junto con el vapor de agua, el metano y otros gases productores de efecto invernadero, permite que la Tierra devuelva al espacio sólo la energía radiante suficiente para que se mantenga un balance térmico apropiado para el desarrollo de la vida.

El ciclo del carbono comenzó desde la formación de la Tierra. Hace entre 4.5 y 3 mil millones de años, se dieron las condiciones propicias para establecer el *ciclo geoquímico del carbono*. Había océanos, atmósfera, continentes y tectónica de placas. También existía la complicidad del Sol, aunque con la diferencia importante de que en esa época este astro sólo brillaba con 70 por ciento de la intensidad que tiene hoy. Para darnos una idea de lo que esto significa en términos de temperatura global, si nuestra estrella brillara hoy con esa intensidad, los icebergs tendrían problemas de tráfico en el canal de Panamá. Así las cosas, la Tierra debería haber permanecido como un planeta sólido de roca y hielo, al menos hasta hace unos dos mil millones de años, cuando la radiación solar alcanzó una mayor intensidad. Sin embargo, parece que esto nunca sucedió, gracias al efecto invernadero.

Durante los primeros miles de millones de años, este efecto ayudó a que se alcanzara un calentamiento tal, que permitió que los océanos se mantuvieran en estado líquido y que la vida se desarrollara mucho antes de lo que se hubiera dado en otras condiciones. Los océanos en estado líquido favorecieron la estructuración del clima global, por la posibilidad de evaporar enormes cantidades de agua a la atmósfera, generando nubosidad, huracanes, tormentas, ríos, etcétera; es decir, constituyendo otro ciclo primordial: el *ciclo del agua* o *hidrológico*.

Posteriormente comenzó la vida, la cual inicialmente dependía para alimentarse de los compuestos disponibles en el mar. Los primeros organismos vivían a una profundidad de al menos 10 metros. La capa de agua actuaba como filtro solar que reducía la radiación ultravioleta del Sol. Al cabo de unos mil millones de años sucedió algo que cambiaría de manera radical las incipientes formas de vida: apareció la clorofila. Esta molécula, que da pigmentación verde a las plantas, propició beneficios inmediatos. Con ella las plantas pudieron tomar energía solar y utilizarla para generar su propio alimento. Con la fotosíntesis comenzó el *ciclo orgánico del carbono*, con células que empezaron a fabricar su alimento a partir de luz solar, agua y dióxido de carbono.

Así, la vida de los océanos comenzó a provocar cambios en el ambiente. La fotosíntesis permitió que esos organismos exhalaran oxígeno como producto de desecho, que al irse acumulando poco a poco en el entorno, indujo modificaciones drásticas en la química de los océanos y de la atmósfera, y generó la capa de ozono que bloquea la agresiva radiación ultravioleta del Sol. Con la reducción de la radiación ultravioleta, los organismos pudieron emigrar hacia la superficie del océano. Y de ahí a la Tierra. Se estima que el oxígeno en la atmósfera alcanzó niveles suficientes para propiciar una enorme diversificación biológica y la ocupación de un mayor número de nichos tanto marinos como terrestres al menos desde hace 550 millones de años.

Mientras el ciclo orgánico comenzaba a establecerse, el ciclo geoquímico del carbono encontraba en éste y en el ciclo



Esquema que ilustra el ciclo hidrológico.

Al cabo de unos mil millones de años sucedió algo que cambiaría de manera radical las incipientes formas de vida: apareció la clorofila

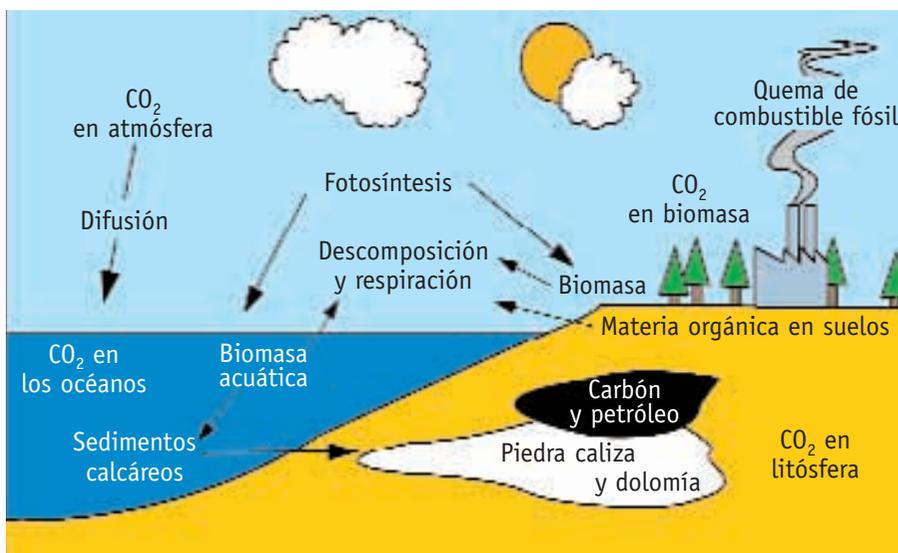
Los organismos fotosintéticos utilizan la energía del Sol, el dióxido de carbono de la atmósfera y el agua para formar materia orgánica, liberando oxígeno al medio

hidrológico los vehículos para almacenar el carbono de la atmósfera en nuevas variedades de roca, tales como las carbonatadas (CaCO_3 , carbonato de calcio), que terminaban en el fondo de los océanos –en forma de conchas de organismos– o en cavernas en la forma de estalactitas o estalagmitas, por mencionar dos ejemplos. El agua con dióxido de carbono tiene la propiedad de disolver minerales silicatados, por lo que al caer la lluvia sobre los continentes, la roca disuelta fluía montaña abajo hacia cavernas, ríos, lagos u océanos. Con este tipo de mecanismos el carbono se fue almacenando en la corteza del planeta.

Aun cuando parte del carbono de la corteza ha regresado a la atmósfera a través del vulcanismo, el ciclo alcanzó un balance apropiado para que las concentraciones del dióxido de carbono en la atmósfera favorecieran la adaptación de las diferentes formas de vida en tales condiciones. El suplemento de los diferentes elementos se mantiene en constante movimiento, entrando y saliendo de diversos reservorios naturales. La distinción principal entre los dos ciclos del carbono es que en el ciclo orgánico se involucran compuestos en los que los átomos de carbono se encuentran unidos principalmente al hidrógeno u otros átomos de carbono –como en la madera o tejido vivo–, mientras que en el geoquímico los compuestos se constituyen principalmente con carbono y oxígeno.

Los organismos fotosintéticos utilizan la energía del Sol, el dióxido de carbono de la atmósfera y el agua para formar materia orgánica, liberando oxígeno al medio. Los organismos que no tienen la capacidad de generar su propio alimento lo hacen a la inversa, liberando dióxido de carbono al ambiente. El ciclo orgánico del carbono va de la mano con el *ciclo del oxígeno*.

Esquema que ilustra el ciclo general del CO_2 .



Después de dar un brevísimo paseo por estos ciclos, veamos en dónde se encuentra el carbono que a lo largo de tanto tiempo ha sido extraído de la atmósfera y resguardado en diferentes depósitos, considerando que por diversas actividades humanas como la emisión de gases, la deforestación, etcétera, existen cambios en las cantidades de determinados reservorios. Para darnos una idea, tomemos como ejemplo los datos estimados que se muestran en la siguiente tabla:

Reservorios de carbono

Depósito	Cantidad (gigatoneladas de carbono)
Atmósfera	750
Bosques o plantas terrestres	610
Materia orgánica en suelos	1 580
Superficie del océano	1 020
Sedimentos marinos	38 100
Energéticos fósiles	
Carbón	4 000
Petróleo	500
Gas natural	500
Total de energéticos fósiles	5 000

Las unidades están en gigatoneladas de carbono (una gigatonelada equivale a mil millones de toneladas métricas). Datos tomados de Kasting (1998). Estos datos no incluyen al carbono contenido en rocas sedimentarias. Pidwirny (1999) ofrece una estimación de un millón de gigatoneladas de carbono contenidas en sedimentos marinos y rocas sedimentarias.

Lo primero que es importante considerar de la tabla es la cantidad de carbono que contienen los depósitos de energéticos fósiles. La conformación de los depósitos de estos energéticos depende de la cantidad de materia orgánica que se genera en la superficie de la Tierra, como veremos más adelante. Actualmente sólo el 0.23 por ciento de la radiación solar que llega a la Tierra es usada para la fotosíntesis (la base de la producción orgánica), y se estima que la fotosíntesis en Tierra toma dióxido de carbono a una tasa de 60 gigatoneladas al año en todo el planeta.

A lo largo de la historia de la vida, menos del 0.1 por ciento de la producción orgánica se ha conservado en sedimentos en forma de compuestos de carbono orgánico, y sólo un 0.01 por ciento de esta materia orgánica en los sedimentos se convierte en campos de petróleo y gas concentrados.

En las siguientes páginas podemos ver por qué sólo una pequeña fracción de la materia orgánica que se genera en la superficie terrestre llega a convertirse en depósitos de energéticos fósiles. Conozcamos cómo se forman éstos.

CARBÓN

Partiendo de una definición general, el carbón es el producto final de la materia vegetal, con cantidades variables, aunque normalmente pequeñas, de material mineral que se acumuló hace millones de años en zonas pantanosas costeras y en lagos. Gran cantidad de este energético se formó durante el periodo Carbonífero (hace entre 360 y 285 millones de años), aunque se conocen depósitos valiosos de los periodos Pérmico, Triásico, Jurásico, Cretácico y Terciario (de hace 285 hasta hace 2 millones de años). Los procesos de formación del carbón continúan hasta nuestros días.

Desde que tienen lugar las condiciones iniciales para la probable formación de un yacimiento, filón o veta, el carbón potencial pasa por una serie de procesos físicos y químicos. Se reconocen cuatro grandes categorías de carbones, conocidas como *rango o grado de carbonización*, que se refieren al nivel particular de desarrollo obtenido por el combustible. De

Gran cantidad de este energético se formó durante el periodo Carbonífero (hace entre 360 y 285 millones de años)

menor a mayor valor energético, éstas son: *lignito*, *carbón sub-bituminoso*, *carbón bituminoso* y *antracita*. En esta serie de carbones, el lignito posee el contenido más bajo de carbono (entre 65 y 70 por ciento), además de un elevado contenido de humedad, mientras que la antracita tiene un contenido de carbón de entre 95 y 98 por ciento, así como una mínima humedad. La antracita pasa por el rango de lignito durante su formación. A mayor contenido de carbón, mayor valor energético. Las diferencias en calor y presión durante las etapas geoquímicas del desarrollo del carbón son los principales factores que definen las diferencias de rango.

Veamos cuál es el panorama durante la formación de yacimientos de carbón. Su origen vegetal se expresa por la presencia de fibras, tallos, hojas y semillas de plantas carbonizadas. Para que se puedan formar grandes depósitos se requiere una gran acumulación de materia prima. Se ha estimado que para producir una tonelada de carbón son necesarias entre 25 y 75 toneladas de vegetación.

Una elevada productividad vegetal se encuentra en zonas donde hay un clima cálido y con una alta precipitación, como las que favorecieron el crecimiento de enormes helechos tropicales, árboles gigantes y una amplia cobertura de musgos durante el periodo Carbonífero. Analizando los fósiles encontrados en capas de carbón de este periodo se han llegado a identificar más de 3 mil especies de plantas terrestres, incluyendo especies de agua dulce y agua estancada.

La continua aportación de plantas muertas en zonas pantanosas favorece la acumulación de lo que se denomina *turba*, que es una masa de vegetación parcialmente descompuesta y el primer estadio en la formación de carbón. Para la formación de turba a gran escala son esenciales las siguientes condiciones: crecimiento vegetal rápido, elevado contenido de humedad y ausencia de oxígeno (condiciones anaeróbicas), las cuales se presentan especialmente en los pantanos y en algunos lagos, donde hay grandes extensiones sin oxígeno a sólo unos cuantos centímetros de la superficie. Los principales tipos de turba son los derivados particularmente del género de musgos *Sphagnum*.

Los pantanos en los que se va acumulando la turba son vastas regiones de altitudes bajas, con mínimo relieve, con extensos deltas de río y, sobre éstos, numerosos flujos de ríos amplios y lentos, acarreado grandes cantidades de lodos, arcillas y ma-

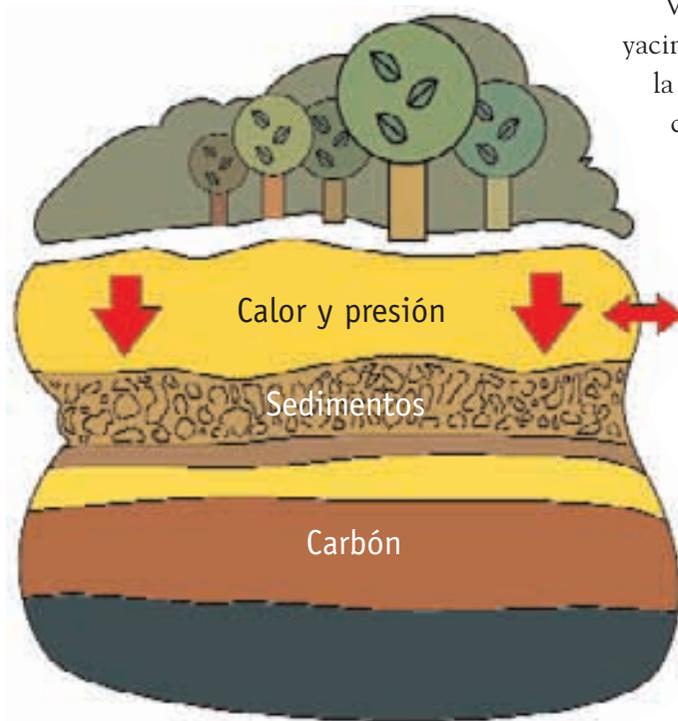


Ilustración de la formación del carbón.

teria orgánicamente degradada. Estas áreas deben estar sujetas a un hundimiento gradual de la superficie —lo que se conoce como *subsistencia*—, acorde con las condiciones de sedimentación de esa área, que permitan asegurar una continua acumulación de turba intercalada con capas de sedimentos que posteriormente se consolidarán en rocas sedimentarias. Este ciclo de inmersiones se repite continuamente, formando una secuencia de bandas horizontales de turba y de rocas sedimentarias inorgánicas; repetición de ambientes en sentido vertical que se describe como depositación rítmica o ciclométrica.

Considerando otros criterios, las vetas de carbón derivadas de turbas de pantanos costeros se conocen como *carbones parállicos*, y generalmente tienen tres metros de espesor, mientras que los filones de carbón formados en grandes cuencas continentales (lagos) se conocen como *carbones límnicos*, y son extremadamente gruesas —hasta 200 metros—, aunque se les encuentra en número reducido.

Conforme se va teniendo un mayor hundimiento, las bandas de turba se van alterando por la acción de la temperatura, la presión y los esfuerzos provocados por los movimientos de la corteza terrestre. Para producir carbón combustible de la más alta calidad se requiere calor de una actividad ígnea cercana. Todos estos procesos toman mucho tiempo; por eso el carbón con un mayor valor energético proviene principalmente del Paleozoico, mientras que los carbones formados durante el Mesozoico y el Terciario tienden a ser lignitos.

La turba no es carbón en sí; es materia orgánica de color entre café y negro, con una apariencia de madera en descomposición. El lignito, el carbón sub-bituminoso y bituminoso, es roca sedimentaria, formada de fragmentos de otras rocas y minerales. La antracita es una roca metamórfica cuyos minerales y textura han sido modificados como consecuencia de intensos cambios en la temperatura, presión y ambiente químico que se presentan a mayores profundidades de la corteza terrestre, y que se conocen como metamorfismo.

El carbón a veces se extrae de minas con una profundidad superior a un kilómetro. Sin embargo, con las nuevas técnicas desarrolladas para utilizar carbón de menor calidad, empiezan a explotarse las vetas de poca profundidad y los depósitos superficiales, que alguna vez fueron poco rentables.

PETRÓLEO Y GAS NATURAL

El petróleo y el gas natural —al igual que el carbón— son productos de la actividad biológica. La mayor parte del petróleo

La turba no es carbón en sí;
es materia orgánica
de color entre café y negro,
con una apariencia
de madera
en descomposición

Ningún petróleo tiene igual composición que otro, debido a diferentes factores que actúan durante su formación

(del latín *petra*, roca y *oleum*, aceite) y del gas natural se han formado a partir de restos orgánicos reducidos por descomposición, depositados originalmente en un ambiente sedimentario marino.

Los depósitos naturales de petróleo contienen una compleja mezcla de compuestos que contienen moléculas formadas por carbono e hidrógeno; de ahí que se les denomine *hidrocarburos*. Ningún petróleo tiene igual composición que otro, debido a diferentes factores que actúan durante su formación. La característica que distingue a los diferentes hidrocarburos son las complejas estructuras moleculares de carbono e hidrógeno que contienen y las cadenas que éstas forman. El petróleo se encuentra en rocas ígneas, metamórficas y principalmente sedimentarias de todas las edades, desde el Precámbrico hasta arenas de menos de un millón de años de antigüedad. Sin embargo, se considera que, independientemente de donde se les encuentre, la mayor parte del petróleo se generó en lodos marinos del Cámbrico o edades anteriores.

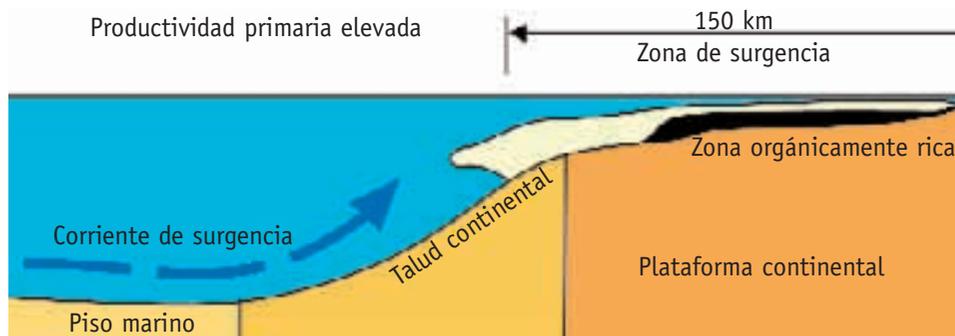
Existen tres tipos de petróleo: a) *aceite crudo*; b) *gas natural*; y c) *formas sólidas y semisólidas*.

El *aceite crudo* (o simplemente crudo) se refiere al petróleo líquido en bruto, que se distingue del aceite ya procesado en las refinerías. El crudo consiste en hidrocarburos líquidos que contienen cantidades variables de gases disueltos, bitumen y otras impurezas. En su estado natural, el petróleo no se mezcla con el agua y tiene una densidad menor que el agua de mar. Sin embargo, el petróleo es soluble en nafta, disulfuros de carbono, éter y benceno. El *gas natural* se compone de hidrocarburos parafínicos ligeros. El más abundante es el gas metano. Las *formas sólidas* y *semisólidas* son hidrocarburos pesados y bitúmenes. Comprenden materiales como el asfalto y el alquitrán, entre otros.

Se han sugerido teorías tanto inorgánicas como orgánicas para explicar el origen del petróleo y el gas natural. Aunque algunos gases —especialmente el metano— y los componentes individuales en el petróleo pueden originarse por procesos inorgánicos, la mayor parte de las evidencias postulan un origen a partir de la materia orgánica. Entre las razones que se inclinan por un origen orgánico del petróleo se tienen:

- La conexión materia orgánica-carbono-hidrógeno, principalmente. El carbono y el hidrógeno son los constituyentes primarios del material orgánico en plantas y animales, además de contener comúnmente partículas microscópicas de material identificable y que muestra la propiedad denominada *levorrotación*, que es la habilidad de rotar la luz polarizada hacia la izquierda, un fenómeno peculiar de las sustancias orgánicas.
- Otra característica química observada en reservorios petroleros son las denominadas porfirinas, que se encuentran en *toda* la materia orgánica y en una gran cantidad de petróleos. La presencia de porfirinas también indica que se debieron desarrollar condiciones anaeróbicas en los procesos tempranos de formación, ya que las porfirinas se oxidan rápida y fácilmente.
- En tercer lugar se deben observar las condiciones físicas. Casi todo petróleo se encuentra en sedimentos que son principalmente de origen marino. Aquellos que no, probablemente migraron allí provenientes de materiales de origen marino cercanos. Las temperaturas en los reservorios donde existen porfirinas nunca exceden los 200 grados centígrados, porque arriba de esta temperatura se destruyen. Más aún, las temperaturas en los reservorios de petróleo raramente exceden los 141 grados centígrados.

Los yacimientos petroleros son el producto final de una secuencia de sucesos: acumulación de materia prima, transformación, migración y configuración del yacimiento.



Acumulación de la materia prima

La materia orgánica que se acumula en los sedimentos del fondo marino se forma principalmente por el plancton marino (productores primarios), que fija el carbono a través de la fotosíntesis. Este plancton habita en mayores cantidades entre la superficie del océano, hasta los 100-150 metros de profundidad, donde se tiene penetración de luz solar (zona fótica). El plancton es microscópico: no obstante, su volumen es tal que cerca del 95 por ciento de la materia viva en el océano es plancton. La mayor productividad se presenta en los primeros 50 metros superficiales de los océanos, y disminuye con la profundidad conforme la penetración de la luz solar es menor. Sólo 10 por ciento de la materia orgánica que se produce en la columna de agua alcanza el fondo marino; 90 por ciento restante se recicla en la cadena alimenticia.

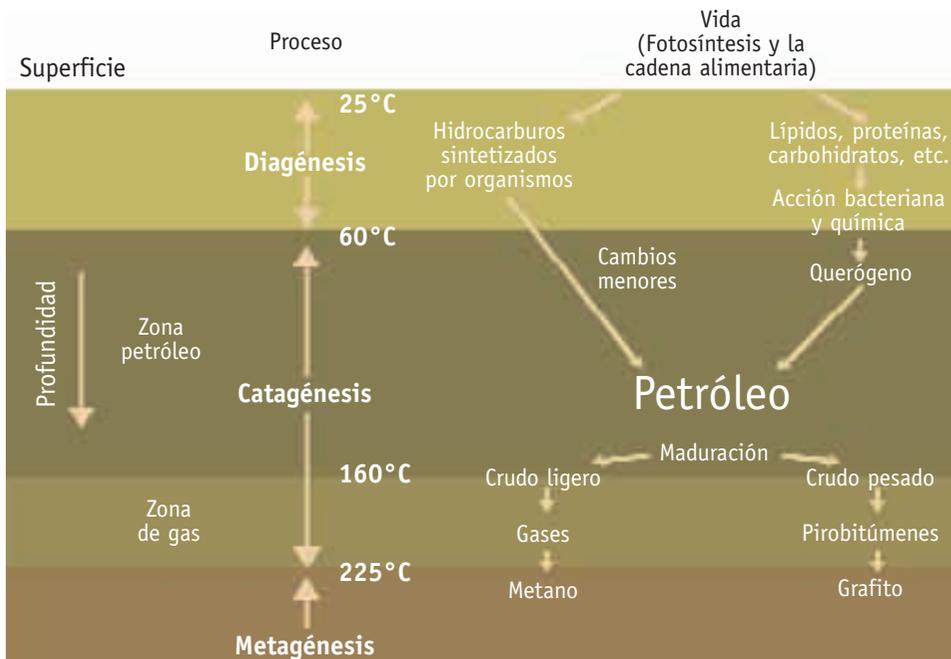
Para que en un lugar determinado se pueda dar una acumulación de materia que sea potencialmente generadora de hidrocarburos, ésta debe ser preservada en los sedimentos. Es fundamental que la aportación de materia orgánica en una zona exceda la de destrucción y ésta *no* se reintegre a la cadena alimenticia, sino que quede enterrada para que pueda convertirse en querógeno –precursor en la génesis del petróleo–, transformaciones similares a las que ocurren en las etapas de conversión de turba en carbón.

Las plataformas y taludes continentales con una productividad de moderada a alta, por efecto de emergimientos de agua del fondo del océano o por aporte de materia orgánica proveniente de ríos, son zonas apropiadas para que se dé una acumulación potencialmente generadora de hidrocarburos, así como también en ambientes marinos que presentan una circulación del fondo restringida o estancada, condiciones anaeróbicas y aporte de sedimentos finos, como sucede en el mar Negro.

Existen crudos que se formaron de algas no marinas y bacterias que crecieron en lagos. Hay ejemplos de ellos en el Oriente Medio y África Central.

Esquema que ilustra la acumulación de la materia orgánica en la plataforma continental y que es uno de los factores importantes para la posterior formación del petróleo y gas.

El plancton es microscópico: no obstante, su volumen es tal que cerca del 95 por ciento de la materia viva en el océano es plancton



Esquema general del origen y maduración del petróleo (modificado de Hunt, 1996).

El querógeno y el bitumen son compuestos orgánicos que se encuentran diseminados en los sedimentos, con la diferencia de que el primero no es soluble en disolventes orgánicos y el segundo sí.

La catagénesis involucra un proceso termodinámico no biogénico. Su influencia se inicia en profundidades mayores a mil metros y con rangos de temperatura de 60 a 180 grados centígrados. La transformación del querógeno se produce por procesos catalizados por temperatura donde ésta y la presión son los agentes dominantes. La temperatura crítica es de 60 grados centígrados, pues implica el comienzo de la formación del crudo. El calor se genera por el proceso de enterramiento y el gradiente geotermal que existe en la corteza terrestre. La roca que contiene los hidrocarburos durante esta fase es la que se conoce como *roca generadora*.

Transformación

Una vez que la materia orgánica es depositada en el piso de la cuenca y paulatinamente enterrada, comienza el proceso de transformación. Es un proceso muy lento, a lo largo del cual se generan diferentes tipos de hidrocarburos y en donde no toda la materia se convertirá en crudo. Hay tres fases durante la transformación de la materia orgánica en hidrocarburos: *diagénesis*, *catagénesis* y *metagénesis*.

La diagénesis se presenta desde que la materia orgánica se deposita y se entierra, hasta que alcanza alrededor de mil metros de profundidad, con temperaturas de hasta 60 grados centígrados. Durante esta fase se presenta descomposición biológica por bacterias y reacciones no biogénicas, como los procesos importantes que producen principalmente querógeno, bitumen, metano, dióxido de carbono y agua.

Aquí hay que considerar dos panoramas importantes. Por un lado, desde que la materia orgánica entra en esta fase se comienza a formar petróleo crudo, y la situación ideal es que, en el momento adecuado, se den las condiciones de migración, que veremos más adelante. Por otro lado, si no se produce tal migración y los hidrocarburos continúan sujetos a un mayor enterramiento, entonces se formará otro tipo de hidrocarburos.

Por encima de los 200 grados centígrados la catagénesis se vuelve destructiva y todos los hidrocarburos son convertidos en metano y grafito. De aquí que la temperatura sea un factor crítico, ya que provee las condiciones estables para largos periodos que le permiten al querógeno una suficiente exposición al proceso de catagénesis, es decir, maduración hacia crudo, misma que se ha considerado entre 15 y 18 millones de años. El petróleo es lo primero que se libera del querógeno, seguido de gas, bióxido de carbono y agua.

La metagénesis entra en acción cuando ya existen presiones y temperaturas muy elevadas, llegando incluso a grados iniciales de metamorfismo. El último hidrocarburo que se libera del querógeno es el gas metano. La relación de hidrógeno y carbono

no disminuye hasta que el remanente comprende prácticamente sólo carbono en la forma de grafito.

Migración

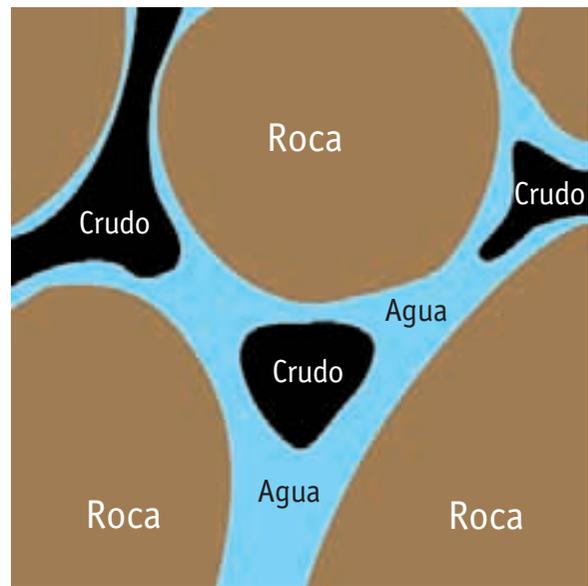
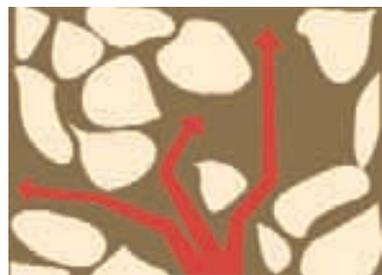
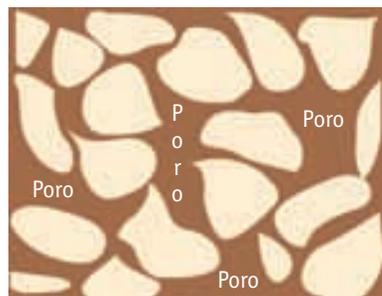
Normalmente, el aceite migrará de las rocas generadoras a través de rocas permeables hasta la superficie de la Tierra, donde se disipa, oxida y destruye. Sin embargo, bajo condiciones favorables, la migración del aceite hacia la superficie en respuesta a gradientes de presión hidrodinámica puede llegar a zonas donde existan dos condiciones primordiales: una configuración estructural apropiada de rocas porosas y permeables llamadas *rocas almacenadoras*, y una cobertura de estratos impermeables llamada *roca selladora*.

Para que un petróleo migre de la roca generadora, es ideal que exista una interestratificación con capas permeables que permitan su flujo (capas transportadoras). La simple gravedad parece explicar la posición de muchos depósitos; sin embargo, para que ello tenga lugar, tanto la roca generadora como la almacenadora deben poseer dos características necesarias para permitir el flujo del crudo: porosidad y permeabilidad. Ambas propiedades son resultado de su constitución litológica, donde la textura de la roca –tamaño y forma de los granos– es muy importante. La porosidad controla el volumen de hidrocarburos presentes en un reservorio determinado, mientras que la permeabilidad controla el volumen de hidrocarburos que puede migrar entre ambas rocas y qué tanto, en su momento, llegar a extraerse durante la explotación.

Trampas

Un reservorio de petróleo se creará si existe una estructura de atrapamiento y se constituye una zona donde se concentran los hidrocarburos que fluyen hacia ese lugar. Aunque se usan diversas clasificaciones de trampas, se reconocen tres grupos básicos, de acuerdo al mecanismo que produce la acumula-

Normalmente, el aceite migrará de las rocas generadoras a través de rocas permeables hasta la superficie de la Tierra, donde se disipa, oxida y destruye



Estas tres figuras esquematizan la porosidad, la permeabilidad y el contenido de los hidrocarburos en los yacimientos.

Los filones o vetas de carbón permanecen donde son formadas, mientras que el petróleo migra por efectos de temperatura y presión

ción de hidrocarburos: por deformación estructural de la roca, debida principalmente a plegamiento o fallamiento, a las que se les denomina *trampas estructurales*; por las variaciones propias que se desarrollan durante la depositación o posteriormente por efecto de procesos diagenéticos que sufra la secuencia sedimentaria, a las que se conocen como *trampas estratigráficas*; y aquellas que resultan de una mezcla de ambas, conocidas como *trampas de combinación*.

A manera de resumen sobre la formación de los energéticos fósiles señalemos las principales diferencias entre el carbón, y el petróleo y el gas. Mientras el primero se constituye principalmente de materia vegetal terrestre, el petróleo se forma principalmente a partir de productores primarios marinos. Por otro lado, los filones o vetas de carbón permanecen donde son formadas, mientras que el petróleo migra por efectos de temperatura y presión. Otra gran diferencia es que mientras más profundamente se forme el carbón, mayor será su valor energético. El petróleo, en cambio, no debe llegar a niveles de metamorfismo.

EL CICLO HUMANO DEL CARBONO

Las especies se adaptan a las diversas condiciones ambientales que les ofrece la Tierra, y así ha sido a lo largo de su historia.

Como vimos al principio, el carbono sale y entra en diferentes reservorios naturales continuamente, en una intrincada red de vías y procesos que constituyen los ciclos geoquímico y orgánico de este elemento. Pero hay que destacar la incidencia humana, que libera el carbono que a la naturaleza le llevó millones de años encerrar en el subsuelo y que, aun cuando representa una parte muy pequeña del carbono total, resulta significativa para los niveles que se habían mantenido durante los últimos miles de años. El hombre liberó al genio de la lámpara, el cual nos ha colmado de beneficios... pero es necesario reintegrar el carbono al subsuelo para cerrar el *ciclo humano del carbono* como un beneficio extra.

Ante la amenaza de alcanzar extremos y romper la estabilidad del entorno que hemos disfrutado en nuestra perspectiva temporal, la comunidad internacional ha intentado establecer medidas que ayuden a evitar extremos dañinos para la vida. Diversos países están destinando recursos a investigaciones dirigidas a eliminar dióxido de carbono de la atmósfera y buscar los reservorios apropiados para encerrarlo, lo que se conoce como *secuestro del carbono*.

Las posibilidades de encerrar el dióxido de carbono son muy amplias. Algunas tecnologías ya han sido establecidas inclusive

desde hace más de dos décadas, mientras que se estudian otras posibilidades que requieren mayor investigación y reducción de costos. Todos los depósitos y las tecnologías actuales muestran fortalezas y debilidades. Mencionemos algunos ejemplos.

Podemos considerar tres grandes áreas: los océanos, la superficie terrestre y el subsuelo.

El océano representa el más amplio depósito potencial de dióxido de carbono, con capacidad de almacenarlo durante cientos de años y con múltiples posibilidades, como incrementar la productividad primaria marina en regiones con una limitada cantidad de nutrientes, o inyectar dióxido de carbono en forma líquida en el piso marino. Sin embargo, aún se desconoce el impacto que pudiera ejercer esto en el ecosistema marino y en la acidificación del océano, o factores que pudieran provocar un eventual regreso del dióxido de carbono a la atmósfera.

En la superficie terrestre se han considerado posibilidades de almacenarlo en bosques y suelos, pero hay limitantes por extensión y dificultades de monitoreo, verificación y temporalidad de almacenamiento.

El caso del subsuelo, o secuestro geológico, es el que más tiempo se ha investigado y al que más tecnologías se han aplicado, algunas con éxito. El dióxido de carbono se toma de chimeneas industriales y se inyecta en reservorios subsuperficiales. Para que el proceso sea efectivo, el dióxido de carbono debe ser un fluido de alta densidad con propiedades tanto líquidas como gaseosas, y mostrar estabilidad a una profundidad promedio de 800 metros (lo que se denomina fase supercrítica). Existen varios tipos de depósitos geológicos apropiados para el secuestro del carbono: mantos acuíferos salinos, pozos petroleros y de gas natural agotados, y filones de carbón no explotables, entre otros.

Para tener una idea del proceso de secuestro, en el caso de los pozos petroleros el inyectar el dióxido de carbono tiene dos finalidades: encerrarlo y recuperar petróleo y gas remanente de los poros del reservorio. El dióxido de carbono inyectado desplaza los fluidos presentes en los poros (sucede lo mismo en los mantos acuíferos salinos), con la diferencia de que la presencia de hidrocarburos afecta la química de la interacción entre la roca y el gas. Comúnmente, el dióxido de carbono y el hidrocarburo se mezclan, expandiendo el volumen del segundo y reduciendo su viscosidad con la profundidad. Estos factores pueden ayudar en la recuperación de hidrocarburos. La mayor parte del crudo remanente y el dióxido de carbono permanecen en el depósito y secuestran el gas de manera efectiva.

Para poder cerrar el ciclo del carbono humano y que el secuestro del carbono juegue un papel importante en mitigar las emisiones antropogénicas de dióxido de carbono liberadas a la atmósfera, se considera necesario almacenar un tercio de lo que se emite. Actualmente se generan 7 gigatoneladas de carbono al año, por lo que se necesita secuestrar al menos 2 gigatoneladas de carbono al año. Una compañía canadiense que ha establecido un proyecto a gran escala para recuperar petróleo y secuestrar

El océano representa el más amplio depósito potencial de dióxido de carbono, con capacidad de almacenarlo durante cientos de años y con múltiples posibilidades

dióxido de carbono está inyectando alrededor de 800 mil toneladas al año. Se estima que para el año 2025 alcanzará una recuperación de 130 millones de barriles de crudo y un secuestro de 19 millones de toneladas de carbono (0.19 gigatoneladas de carbono).

Hoy son todavía escasas las compañías que tienen este tipo de proyectos, lo que lleva a considerar la necesidad de que aumenten de manera importante para aspirar a que, en su conjunto, se puedan secuestrar cientos de millones de toneladas al año y encerrar al genio de la lámpara. La meta aún está lejos, y sólo nos queda disfrutar de los beneficios de los energéticos fósiles y tratar de estar preparados para las consecuencias que se pueden desatar.

Bibliografía

Hunt, J. M. (1996), *Petroleum Geochemistry and Geology* (2a edición), Nueva York, Freeman.
 Kasting, J. F. (1998), "The carbon cycle, climate, and long-term effects of fossil fuel burning", *Consequences*, Vol. 4, No. 1, <http://www.gcric.org/CONSEQUENCES/vol4no1/toc.html>
 Pidwirny, M. J. (1996), *Fundamentals of Physical Geography*, Okanagan University College, versión 1.32 en línea 2002, <http://www.geog.ouc.bc.ca/physgeog>

Otras referencias

Bartlett, K. (2003), "Demonstrating Carbon Sequestration" *Geotimes*, marzo 2003, http://www.geotimes.org/current/feature_demonstrating.html
 Edmonds, J. A. (1999), "Beyond Kyoto: Toward a Technology Greenhouse Strategy", *Consequences*, Vol. 5, No. 1, <http://www.gcric.org/CONSEQUENCES/vol5no1/beyond.html>
 Friedman, S. J. (2003), "Storing Carbon in Earth", *Geotimes*, March 2003, http://www.geotimes.org/current/feature_storing.html
 Gold, T. (1993), "The origin of Methane (and Oil) in the Crust of the Earth", U.S.G.S. Professional Paper 1570, *The future of Energy Gases*, <http://people.cornell.edu/pages/tg21/usgs.html>
 Hanson, B. y R. Bradley (1999), *Black Gold Beneath the Bayous*, Louisiana Earth Science Teacher Professional Development CD-ROM, Versión

1.0, Louisiana Energy & Environmental Resource & Information Center (LEERIC), <http://www.leeric.lsu.edu.bgbb>
 Leet, L.D. y S. Judson (1979), *Fundamentos de Geología Física*. México, Limusa.
 Nybakken, J. W. (1982), *Marine Biology, an Ecological Approach*, Harper and Row.
 Seibold, E. and W. H. Berger (1982), *The Sea Floor –an introduction to Marine Geology*, Nueva York, Springer,
Supplementary Course Notes of Petroleum Geology GEOL463.3, Department of Geological Sciences, University of Saskatchewan, Canada, <http://www.usask.ca/geology/classes/geol463/463notes.html>

Agradecimientos

Mi más profundo agradecimiento a Héctor Domínguez Álvarez, Sergio de Régules Ruiz-Funes, Rolando Ísita Tornell, Martín Bonfil Olivera, Libia Barajas Mariscal y Aline Guevara Villegas. A Esteban, Judith Enciso y Judith Luebbert.

Roberto Trápaga Martínez realizó sus estudios de licenciatura en Biología en la Facultad de Ciencias de la UNAM, para posteriormente llevar a cabo estudios de maestría en Oceanografía Biológica y Pesquera en el Instituto de Ciencias del Mar de la misma institución. En ambos casos presentó trabajos de tesis enfocados a condiciones paleoceanográficas con diferentes grupos de microfósiles. Actualmente colabora en la Dirección General de Divulgación de la Ciencia de la UNAM. Ha presentado diversas pláticas en el área de las geociencias y es coautor, junto con Joaquín Eduardo Aguayo Camargo, del libro *Geodinámica de México y minerales del mar*, de la serie "La Ciencia para todos" del Fondo de Cultura Económica.