



FACULTAD DE FARMACIA

EL CARBONO Y SUS
DIFERENTES FORMAS

LAURA ARJONA VEGAS



Universidad de Sevilla



Facultad de Farmacia

Departamento de Química Orgánica y Farmacéutica

Grado en Farmacia

EL CARBONO Y SUS DIFERENTES FORMAS

Trabajo Fin de Grado

Revisión bibliográfica

Autora: Laura Arjona Vegas

Tutora: D^a Elsa Galbis Fuster

En Sevilla, junio de 2021

RESUMEN

El carbono es el sexto elemento de la tabla periódica y uno de los elementos más abundantes del universo. La formación del carbono se produce en el interior de estrellas adultas y se conoce como proceso triple alfa. Es un átomo tetravalente, y sus orbitales pueden presentar hibridación sp , sp^2 y sp^3 . Según cual adopten, formará un tipo de estructura diferente.

Encontramos carbono puro en estructuras cristalinas como el diamante y el grafito o en estructuras amorfas como el mineraloide shunguita. También podemos encontrarlo combinado con otros elementos formando, por ejemplo, la calcita.

Otra gran fuente de carbono son los combustibles fósiles como el carbón. En estado sólido, según el grado de carbonificación y grado de pureza, podemos distinguir entre: antracita, hulla, subbituminoso, lignito y turba. En estado líquido, el petróleo, es la principal fuente de energía del planeta y de su destilación se obtiene el combustible fósil de menor impacto medioambiental, el gas natural.

El carbono es el componente principal de la lignina y la celulosa y además forma parte de esqueletos de moluscos, equinodermos y crustáceos. Está estrechamente ligado a los biocombustibles, donde destacan bioetanol y biodiésel, de gran interés como alternativa a los recursos no renovables.

Del carbono podemos obtener gran cantidad de materiales con diversísimas aplicaciones en el mercado, desde cauchos, plásticos y bioplásticos o carbón activado.

Por último, podemos encontrar carbono en variedad de estructuras multiatómicas denominadas formas alotrópicas que pueden ser tridimensionales (diamante y grafito), bidimensionales (grafeno), monodimensionales (nanotubos) o de dimensión casi atómica (fullerenos).

Palabras clave: carbono, fuentes de carbono, combustibles fósiles, biocombustibles, alotropías carbono.

INDICE

1. INTRODUCCIÓN	4
1.1. <i>Aspectos históricos. Formación del carbono</i>	4
1.2. <i>Hibridaciones del carbono</i>	5
2. OBJETIVOS	7
3. METODOLOGÍA	8
4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	9
1.1. <i>Fuentes de carbono</i>	9
1.2. <i>El carbono y los combustibles fósiles</i>	11
1.3. <i>El carbono en la biosfera</i>	16
1.4. <i>El carbono y los biocombustibles</i>	17
1.5. <i>Materiales y usos industriales</i>	19
1.6. <i>Estados alotrópicos del carbono</i>	22
1.6.1. <i>Diamante</i>	24
1.6.2. <i>Grafito</i>	24
1.6.3. <i>Grafeno</i>	25
1.6.4. <i>Fullerenos</i>	27
1.6.5. <i>Nanotubos de carbono</i>	29
5. CONCLUSIÓN	31
6. BIBLIOGRAFÍA	33

1. INTRODUCCIÓN

El carbono es el sexto elemento de la tabla periódica, representado por el símbolo C y perteneciente a la serie de los no metales. Sólido, estable, y con masa atómica 12,01 u. Es uno de los elementos más abundantes tanto de la atmósfera, compuesta principalmente por CH_4 (Pla García y Menor Salván, 2017) como de la corteza terrestre (McDonough y Sun, 1995) y está presente en todas las sustancias orgánicas. Tanto es así que la química orgánica se conoce como “química del carbono”.

El carbono presenta dos isótopos naturales y estables, el ^{12}C , en un 98'9%, y el ^{13}C , en un 1'1%; y trece inestables (que se descomponen radiactivamente) desde el 8C hasta el ^{22}C , donde destaca el ^{14}C , ya que es el único que podemos encontrar en la naturaleza, aunque solo a nivel de trazas (Doadrio, 2016).

1.1. Aspectos históricos. Formación del carbono

La formación del carbono data de hace unos 14.000 millones de años, ya que, aunque entonces, en la explosión del Big Bang, solo se formaron hidrógeno, helio y trazas de litio, el carbono, como el resto de elementos químicos, se formó algunos cientos de millones de años después, debido a la fusión nuclear de los protones en el interior de las estrellas. Este proceso no llegó a conocerse hasta mediados del siglo pasado cuando cuatro físicos, Burbidge, Margaret y Geoffrey, William Fowler y Fred Hoyle desvelaron en un artículo publicado en *Review of Modern Physics* la que se conoció como la teoría de la nucleosíntesis estelar (Carmona Guzmán, 2013).

La formación del carbono se conoce como proceso triple alfa (Nguyen y cols., 2012), donde tres núcleos de helio (partículas alfa) se fusionan para formar un núcleo de carbono (Figura 1). Este proceso ocurre en el interior nuclear de estrellas adultas con masa similar a la del Sol, donde la temperatura alcanza alrededor de los 100 millones de grados, 85 millones de grados más a la temperatura alcanzada en el núcleo solar. La temperatura es un factor muy importante para la formación ya que, en estrellas jóvenes de menor temperatura donde se produce la fusión de núcleos de hidrógeno para la formación de helio, y posterior fusión de estos para la formación de berilio, este isótopo de berilio, imprescindible para la formación de carbono, es muy inestable y se desintegra

con facilidad. A mayor vida de la estrella y por consiguiente mayor temperatura nuclear, se forman gran cantidad de núcleos de berilio, lo que hace posible el choque de éste con otras partículas alfa, produciendo entonces la formación de carbono y después, otras reacciones hasta originar los demás elementos de la tabla periódica (Carmona Guzmán, 2013; Cortina Gil y Martínez Pinedo, 2008; Doadrio, 2016)

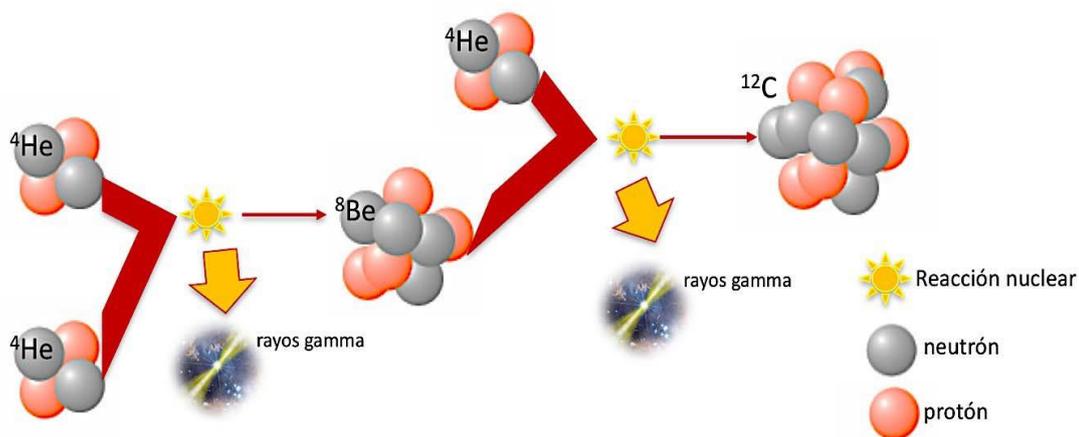


Figura 1. Proceso triple alfa donde tres núcleos de ${}^4\text{He}$, dan lugar a un núcleo de ${}^{12}\text{C}$, con un intermediario de ${}^8\text{Be}$ (Droadrio, 2016).

1.2. Hibridaciones del carbono

El átomo de carbono, en estado fundamental de mínima energía y aislado presenta una configuración electrónica $1s^2 2s^2 2p^2$, lo que haría pensar que se trata de un átomo divalente al solo poder formar enlaces con los electrones que ocupan el orbital 2p y que su forma más estable sería la combinación con dos átomos de hidrógeno. Sin embargo, este átomo presenta la peculiaridad que, en el estado excitado, uno de los electrones del orbital 2s, pasa al orbital 2p, presentando la configuración $1s^2 2s^1 2p_x^1 2p_y^1 2p_z^1$, lo que convierte al carbono en un átomo tetravalente que puede dar lugar a tres tipos de hibridación (figura 2) (Menéndez Díaz, 2012; Sánchez Echeverría y cols., 2000; Tascón, 2007):

- Hibridación digonal o sp: formación de dos orbitales híbridos. Primero un electrón de p_x se traslada a p_z y posteriormente un electrón de s pasa a p_x . Responsable de la estructura lineal de los carbinos.

- Hibridación trigonal o sp^2 : formación de tres orbitales híbridos. Primero un electrón de p_y se traslada a p_z y posteriormente un electrón de s pasa a p_y . Responsable de la estructura plana en forma de panal de abeja característica del grafito.
- Hibridación tetragonal o sp^3 : formación de cuatro orbitales híbridos. Un electrón de s pasa a p_z . Responsable de la estructura tridimensional del diamante.

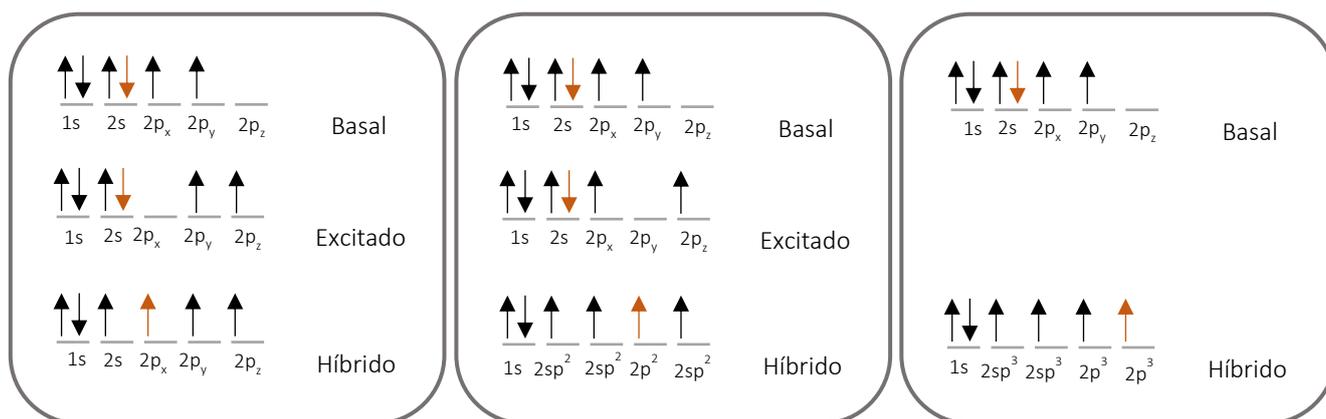


Figura 2. Distintas hibridaciones del átomo de carbono. De izquierda a derecha: hibridación sp o digonal, hibridación sp^2 o trigonal e hibridación sp^3 o tetragonal (Versión adaptada, Sánchez y cols., 2000).

Sin embargo, en contraposición a esto, estudios actuales (Malischewski y Seppelt, 2017) señalan que, además de la tetravalencia del carbono, es posible hablar de la hexavalencia, donde un átomo de carbono puede enlazarse a otros seis del mismo tipo formando el dicatión pentagonal-piramidal de hexametilbenceno (Figura 3) (Castillo y cols., 2018; Malischewski y Seppelt, 2017).

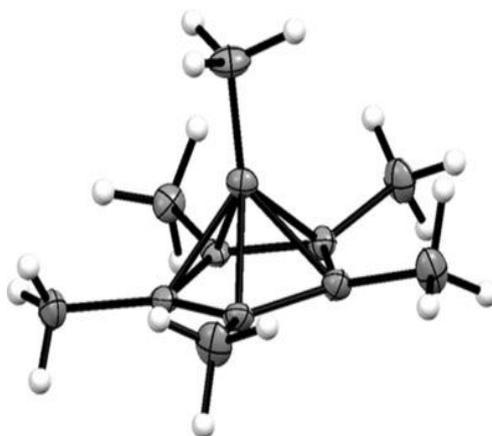


Figura 3. Estructura del dicatión pentagonal-piramidal de hexametilbenceno propuesta por Malischewski y Seppelt, 2017.

2. OBJETIVOS

El objetivo de este trabajo es realizar una revisión bibliográfica a través de diversas bases de datos científicas acerca de un elemento químico tan importante y versátil como es el carbono. Además, se llevará a cabo un estudio pormenorizado de sus diversas manifestaciones en la materia, haciendo un repaso de las diferentes fuentes de carbono existentes, qué y cuáles son los combustibles fósiles y sus métodos de obtención, del carbono presente en la biosfera, los biocombustibles, los usos industriales de los materiales de carbono y, para terminar, los cinco estados alotrópicos en los que puede presentarse el carbono.

3. METODOLOGÍA

La metodología empleada para la realización de esta revisión se ha basado en la consulta y selección de información recogida de diversas fuentes como libros electrónicos, artículos científicos y páginas webs.

Los artículos y libros se buscaron en su mayoría a través de FAMA, el catálogo de la Biblioteca de la Universidad de Sevilla que, una vez identificado como usuario de dicha universidad, da acceso a una serie de bases de datos de interés: Dialnet (de gran utilidad al poseer en su mayoría artículos en español), Scencedirect, Web of Science o Scielo, entre otras. Además, complementariamente también se utilizó Google académico.

En primer lugar, cabe destacar la gran diversidad de artículos encontrados debido a la importancia y versatilidad del carbono.

Se siguió la siguiente estrategia de búsqueda: primero se realizó una extensa lectura de varios documentos para poder aportar una visión general del tema y una vez definidos los puntos a tratar, se llevó a cabo una búsqueda más específica de cada uno de ellos. Como filtros se utilizaron principalmente que fueran de acceso abierto y de máxima actualidad, intentando que tuvieran una antigüedad máxima de 5-7 años, aunque debido a la complejidad del tema se ha tenido que recurrir en ciertos casos a artículos de un periodo superior a 10 años. Como palabras claves se han utilizado “carbono”, “fuentes de carbono”, “combustibles fósiles”, “biocombustibles”, “alotropías carbono”, entre otras. Una vez realizada la búsqueda con los filtros especificados se llevó a cabo una selección de los artículos obtenidos, primero por el título, luego por el resumen y en caso necesario se recurrió al contenido.

Con respecto a las imágenes y esquemas, se han intentado rehacer siempre que ha sido posible, haciendo uso del programa ChemDraw.

Para la realización y orden de la bibliografía se ha empleado Mendeley como gestor bibliográfico.

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

1.1. Fuentes de carbono

Para encontrar fuentes de carbono solo tenemos que mirar a nuestro alrededor, ya que este elemento se encuentra en todas partes, como sustancia elemental o combinado (Boada Ferrer, 2020).

Podemos encontrar carbono puro, por ejemplo, en estructuras tan opuestas como son el diamante y el grafito (Figura 4). En el primero, el carbono se encuentra con hibridación sp^3 , unido a otros cuatro átomos de carbono formando una red tridimensional plegada, y en el grafito presenta una estructura laminar formando una red hexagonal plana, consecuencia de la hibridación sp^2 . Esto hace que, aunque con idéntica composición, estos materiales tengan unas características tan opuestas: mientras que el diamante es uno de los materiales más excepcionales, siendo uno de los más duros que existen, transparente o incoloro y se comporta como aislante eléctrico (Wort y Balmer, 2008), el grafito es un material blando, negro, fácilmente deslaminable y gran conductor.

Evidencias teóricas y experimentales muestran que, a elevadas temperaturas, es posible el proceso de grafitización, que es la formación de carbonos hibridados sp^2 en la superficie del diamante (Kamali, 2021). Por otra parte, también es posible la formación de diamantes sintéticos a partir de grafito, de lo que se hablará más adelante.

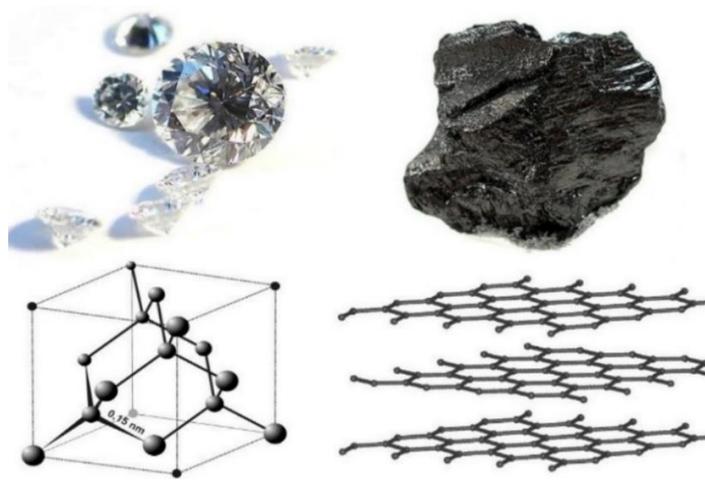


Figura 4. Diamante y grafito con su estructura tridimensional (Dominio público).

Entre los minerales de la <<nueva era>>, podemos encontrar un mineraloide de carbono casi puro, la shungita (Figura 5). Estos mineraloides se diferencian de los minerales en que sus átomos no se ordenan en estructuras cristalinas, sino que forman sustancias amorfas. La shungita solo se encuentra en la región rusa de Karelia, y la cantidad de carbono en ella puede oscilar del 10 al 100% distinguiendo, según un porcentaje decreciente de carbono, cinco tipos: shungita-1 (98-100%), shungita-2 (35-80%) shungita-3 (20-35%), shungita- 4 (20-35%) y shungita-5 (menos del 10%) (Gubernat y cols., 2017). Las shungita se trata de un mineraloide vítreo negro, no cristalino, no grafitizado y estructuralmente heterogéneo. Posee una resistencia muy alta en entornos químicamente agresivos, alta conductividad eléctrica y baja conductividad térmica. Sus propiedades fisicoquímicas y estructurales son de gran utilidad en la industria y medioambiente, incluyendo la metalurgia y producción electrotérmica de ferroaleaciones, purificación de agua por su gran capacidad absorbente de sustancias tanto orgánicas como inorgánicas, como relleno en materiales refractarios y resistentes a los ácidos, sustituto de grafito en pinturas y pastas ignífugas (que protegen contra el fuego), rellenos conductores de electricidad para proteger contra la radiación electromagnética en un amplio rango de frecuencias (Melezhik y cols., 2004). Además, en su interior se han encontrado trazas de fullerenos (Boada Ferrer, 2020) y aunque la obtención de estos a partir de la shungita todavía es materia de estudio, podría suponer una caída de sus altos precios, comparables a los precios del oro.

A este mineraloide se le han atribuido, aunque nunca demostradas, propiedades terapéuticas, como la capacidad de captar las radiaciones electromagnéticas (Boada Ferrer, 2020).

Combinado con otros elementos, el carbono también tiene gran presencia en minerales de carbonato cálcico, como la calcita, que es el polimorfo más estable y que en su variedad denominada espato de Islandia (figura 5) puede presentar birrefringencia o doble refracción. Esta propiedad hace que se emplee para la fabricación de instrumentos ópticos de precisión como microscopios ópticos petrográficos (Kristjánsson, 2012) o prismas polarizadores por birrefringencia como el prisma de Nicol (Vallés, 2015).

El carbonato cálcico, además de ser muy utilizado en muchos procesos y productos industriales, es crucial en muchos procesos biológicos, contribuyendo a un balance positivo del CO₂, amortiguando lluvias ácidas, absorbiendo compuestos tóxicos y reduciendo la actividad bacteriana en el agua (Wojas y cols., 2019).



Figura 5. Shungita (izquierda) y calcita (derecha) en su variedad espato de Islandia (Dominio público).

También de origen orgánico y una gran fuente de carbono son los combustibles fósiles, de los que hablaremos en el siguiente apartado.

1.2. El carbono y los combustibles fósiles

El proceso geológico de formación de materiales con contenido creciente en carbono a partir de materiales orgánicos se denomina carbonificación. Así pues, la carbonificación es una forma de creación de combustibles fósiles y se divide en dos etapas: diagénesis y metamorfismo.

El proceso de diagénesis comienza con el enterramiento de restos vegetales donde, aun a poca profundidad donde todavía hay oxígeno y cubiertos por agua, las primeras encargadas de la descomposición son las bacterias aeróbicas. Una vez consumido el

oxígeno, es el turno de las anaeróbicas, hasta que el pH, que se va acidificando durante la descomposición por la producción de ácidos húmicos, es demasiado bajo para la supervivencia bacteriana. Es durante el proceso de diagénesis donde se genera la turba, la forma más impura de combustible fósil. Con el transcurso de los años, esta turba se va enterrando cada vez más, y con el aumento de la presión y la temperatura suceden las transformaciones por metamorfismo, formando distintos tipos de carbones minerales, con diversa pureza, como el lignito, hulla y antracita (León Altamirano, 2008; Menéndez Díaz, 2012).

Existen diversas clasificaciones de los carbones, por ejemplo, según su pureza en carbono, que depende del grado de carbonificación. Así, de mayor a menor pureza se pueden clasificar en: antracita, hulla (o bituminoso), subbituminoso, lignito y turba.

	Carbono (%)	Humedad (%)	Materia volátil (%)	Poder calorífico (MJ/Kg)
Antracita	86 – 98	< 3	< 5	23 – 33
Bituminoso (Hulla)	45 – 86	5 – 10	10 – 30	24 – 35
Subbituminoso	35 – 45	15 – 30	30 – 40	20 – 21
Lignito	25 – 42	40 – 60	40 – 50	10 – 20
Turba	< 25			

Tabla 1. Valores promedio de los distintos tipos de carbones.

Como podemos observar en la tabla 1, conforme disminuye el contenido en carbono, aumenta la humedad y la materia volátil. Aunque la antracita es el carbón mineral de más alto rango por su contenido en carbono, debido a su bajo contenido en materia volátil presenta un poder calorífico inferior al de los carbones bituminosos.

Pertenciente a la familia del lignito, es interesante destacar al azabache, roca sedimentaria fósil de color negro intenso y aspecto homogéneo y brillante, compuesto principalmente por vitrinita. Este se encuentra en pocos puntos del planeta y ha sido desde tiempos prehistóricos de gran utilidad en joyería como piedra semipreciosa o como amuleto (Menéndez Menéndez, 2021).

Aunque podemos encontrar diferentes usos de los carbones minerales, como el uso de la turba en jardinería por su capacidad de retención de agua, la gran mayoría de ellos se destinan a la producción de energía eléctrica en centrales térmicas o como combustible

para la producción de energía térmica. Especialmente la hulla y los carbones bituminosos se usan en la industria metalúrgica para la producción de coque, donde se obtiene además brea de alquitrán de hulla, de gran utilidad en la industria del aluminio y para la producción de ánodos de carbono o electrodos de grafito, y que viene cobrando importancia como precursor de materiales avanzados de carbono (Camporredondo Saucedo y cols., 2012).

Asociada a estos minerales y más concretamente a su extracción y trabajo en mineras, es importante conocer la llamada enfermedad del pulmón negro, neumoconiosis o antracosis, una enfermedad pulmonar caracterizada por el depósito nodular difuso de polvo en los pulmones. Existen diferentes factores de riesgo asociados a esta enfermedad, pero cuanto mayor es el rango de los carbones, más citotoxicidad presentan: cuanto mayor es el contenido en cuarzo, más sílice presentan, aumentando los radicales libres, lo que provoca una mayor respuesta inflamatoria en los trabajadores que lo inhalan. Además, los carbones de rango superior recién arrancados contienen partículas de tamaño inferior, por lo que tendrán más facilidad de llegar a las vías respiratorias inferiores (Pescador Vargas y Roa Culma, 2016).

También de origen orgánico, pero que en condiciones normales de presión y temperatura se encuentra en estado líquido, podemos hablar del petróleo. El petróleo es una sustancia de carácter oleaginoso compuesto principalmente por una mezcla de hidrocarburos. Según el peso molecular de los hidrocarburos obtenidos durante el fraccionamiento del petróleo se pueden diferenciar diversos derivados como gases licuados de petróleo (propano y butano), querosenos, petróleos lampantes, aceites, gasóleos de automoción y calefacción, asfalto (Boluada y cols., 2019).

Como se muestra en el gráfico 1, el petróleo constituye la principal fuente de energía del planeta, de la cual sigue dependiendo la humanidad para su desarrollo, y es que la energía es imprescindible para potenciar el bienestar social, y en la mayoría de los casos para generar riqueza industrial y comercial (Rivero Gutierrez y cols., 2016). Tanto es así, que el petróleo ha sido desde tiempos remotos fuente de conflictos internacionales, guerras, revoluciones internas de países, y cuyo volumen de transacciones comerciales es el más alto que jamás se haya visto (Fronjosa, 2011).

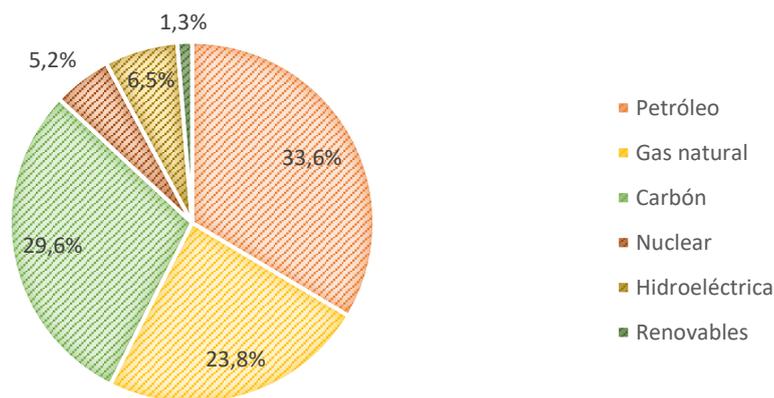


Gráfico 1. Consumo mundial de energía primaria. Fuente: International Energy Agency (Versión adaptada, Rivero Gutierrez y cols., 2016).

El crudo, como se denomina el petróleo sin refinar, es un compuesto más denso que el agua y de olor fuerte y característico, que varía en función del yacimiento de donde se obtenga en cuanto a la composición y el color, lo que depende de la edad y de las condiciones de su formación. Pero el crudo por sí mismo no tiene casi ninguna aplicación, por lo que su importancia radica, en gran medida de su utilización como carburante de automoción o materia prima para la industria petroquímica ya que, entre los derivados del petróleo, las gasolinas están entre los más utilizados (Rivero Gutierrez y cols., 2016). Tanto las gasolinas como los diferentes derivados del petróleo pueden obtenerse por destilación fraccionada que se realiza en torres de destilación (figura 6) y va separando las diferentes fracciones según su rango de ebullición, que dependerá del número de carbonos por el que están formados los hidrocarburos. Tras la destilación de los elementos más volátiles donde se obtiene metano, propano, butano (20°C) se obtiene la nafta ligera, gasolina ligera o ligroína (20 – 150°C) que, tras otra destilación, se obtiene éter de petróleo y por redestilación (55 – 60°C), hexano comercial. Una tercera fracción de destilación (150 – 200°C) forma la nafta pesada, pero por su bajo octanaje (comportamiento antidetonante) debe someterse a reformado catalítico para elevarlo a los niveles comerciales, obteniéndose así las gasolinas de destilación directa. Estas últimas también pueden obtenerse a partir de fracciones pesadas de petróleo mediante craqueo térmico o catalítico de hidrocarburos de mayor peso molecular (Boluada y cols., 2019). El craqueo catalítico es el proceso de refinado más importante en la destilación

del crudo, ya que con la presencia de un catalizador y sin oxígeno, se obtienen reacciones más rápidas y selectivas obteniéndose gasolinas de octanaje cercano a 100 con un rendimiento considerable.

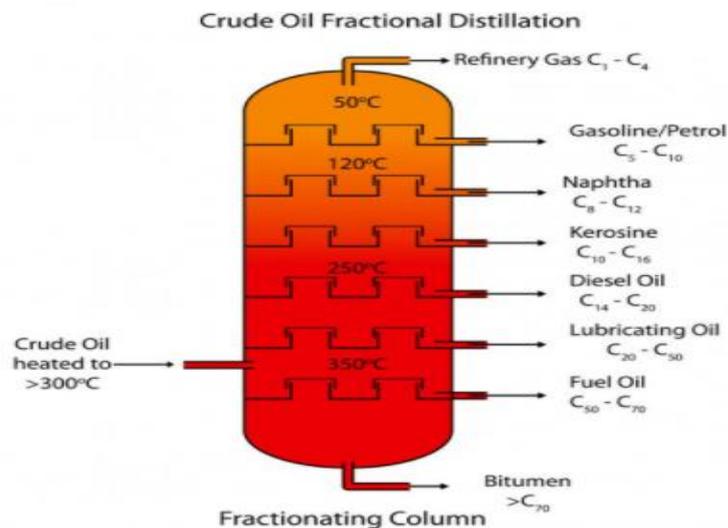


Figura 6. Ejemplo de torre de destilación donde se muestra la temperatura a la cual se obtienen los diferentes derivados del petróleo según el número de carbonos por el que están formados (dominio público).

También de la destilación del petróleo obtenemos el gas natural, que como podemos ver en el gráfico 1 su porcentaje de consumo no es tan inferior al del petróleo o el carbón. Es una mezcla de gases ligeros donde se encuentra en mayor proporción el metano, pero también etano, dióxido de carbono, propano y butano. Es el combustible fósil con menor impacto medioambiental de todos los usados y aunque también produce CO_2 , debido a la alta proporción de hidrógeno-carbono de sus moléculas, sus emisiones son un 40-50% menores a las del carbón y un 25-30% menores de las del fuelóleo (grafico 2).

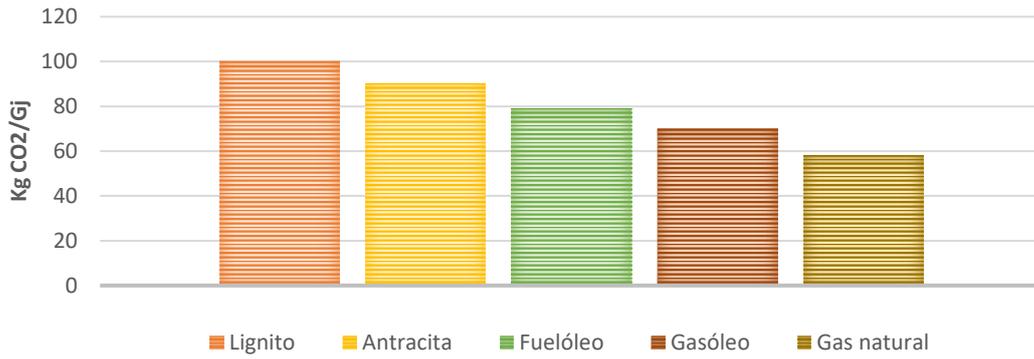


Gráfico 2. Emisión de CO₂ en la combustión de diferentes tipos de carbón, fuelóleo, gasóleo y gas natural.

La creciente demanda de energía y el uso del petróleo generan un impacto negativo medioambiental, tanto a nivel de contaminación como de degradación de hábitats y organismos, por ello, una gran alternativa por su bajo costo, biodegradabilidad y no toxicidad pueden ser los biomateriales (Negi y cols., 2021).

1.3. El carbono en la biosfera

El carbono no es solo una fuente de energía para la tecnología, sino que también es el elemento de la vida y de la energía metabólica. Casi el 99% de la masa del cuerpo humano está formada por solo seis elementos, siendo el carbono el segundo más predominante (grafico 3).

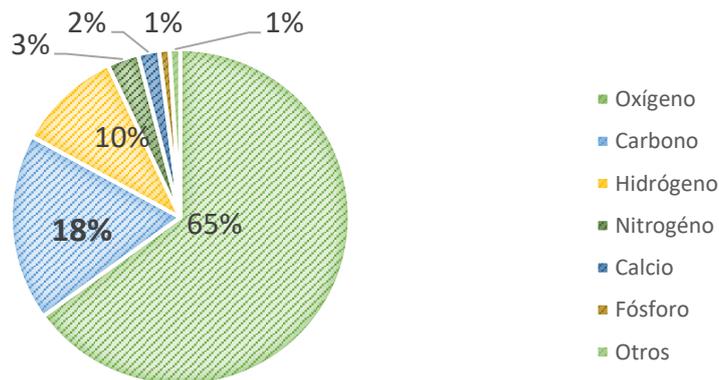


Gráfico 3. Porcentaje de los elementos químicos que componen el organismo humano.

Tanto el reino animal como el vegetal están compuestos mayoritariamente por carbono:

- Es el componente principal de la lignina, de la que están formadas las plantas en su mayoría.
- Es el componente principal de la celulosa, biomolécula que forma la mayor parte de biomasa terrestre y que, actualmente, además de la multitud de usos ya conocidos, está tomando importancia en la industria del petróleo (Abbas y cols., 2020), tanto en los procesos de extracción, como aditivo, o incluso para el tratamiento de las aguas residuales generadas (Peng y cols., 2020),
- Forma parte de esqueletos de moluscos, equinodermos o crustáceos formando la quitina, de la que por desacetilación se obtiene el quitosano, con múltiples usos en la industria alimentaria como conservante (Valenzuela V. y Arias, 2012) en la agricultura, mejorando cultivos o como polímero encapsulador de fertilizantes (Dima y cols., 2017; Molina Zerpa y cols., 2017), en salud pública en el tratamiento de aguas de consumo (Rodríguez Díaz y cols., 2015), en la industria farmacéutica en la elaboración de pomadas y apósitos con efecto cicatrizante (Baltodano y cols., 2019; Luján de Pinedo y cols., 2018) o también, como la celulosa, en la industria del petróleo, en procesos de exploración, transporte y refinación (Negi y cols., 2021).

1.4. El carbono y los biocombustibles

Se entiende por biocombustible aquel combustible que se obtiene de cualquier tipo de materia orgánica que haya tenido su origen inmediato en el proceso biológico de organismos recientemente vivos, como plantas o desechos metabólicos (por ejemplo, el estiércol), o lo que es lo mismo, aquel que se obtiene de biomasa, que comprende productos tanto de origen vegetal como animal (Salinas y Gasca, 2010).

Con esta definición de biocombustible, podemos observar que, de la misma forma que ocurría en los combustibles fósiles, el carbono está estrechamente ligado a ellos, ya que, en épocas remotas, los combustibles fósiles también tuvieron su origen biológico como los biocombustibles.

La clasificación más extendida agrupa a los biocombustibles según el tipo de materia orgánica de la que provienen, ya que todos tienen la misma composición química.

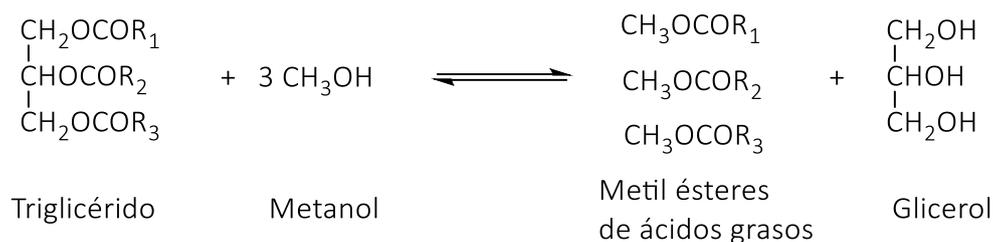
- Los biocombustibles de primera generación se producen a partir de aceites o azúcares comestibles, provenientes de plantas como maíz, caña de azúcar, girasol o soja.
- Los biocombustibles de segunda generación se obtienen de materias primas no aprovechables en alimentación, como son los residuos forestales y agrícolas, con elevado contenido de celulosa y lignina, de las que ya hemos hablado anteriormente.
- Los biocombustibles de tercera generación provienen de organismos que pueden producir su alimento a partir de energía solar y CO₂, como las algas.
- Los biocombustibles de cuarta generación se producen a partir de organismos genéticamente modificados para que capturen más cantidad de CO₂ del ambiente (Campos-martín y cols., 2020; Ramos y cols., 2016).

Los biocombustibles más usados y desarrollados son el bioetanol y el biodiésel.

El bioetanol, o etanol de biomasa, se obtiene a partir de la fermentación de azúcares: del maíz, soja, colza, caña de azúcar o remolacha. Brasil es el principal productor con un 45% de la producción mundial, mientras que la Unión Europea solo genera un 3% de ésta.

El biodiésel, por el contrario, se fabrica mediante reacciones de transesterificación (esquema 1) de aceites vegetales extraídos de plantas oleaginosas principalmente o de grasas de origen animal, y Alemania concentra el 63% de la producción (Hernández Rodríguez y Hernández Zárata, 2008).

El biodiesel ha alcanzado gran interés como fuente alternativa de energía, ya que presenta muchas características atractivas: no tóxico, biodegradable, no inflamable, técnicamente viable y competitivo económicamente (Serna y cols., 2011). Además, el uso de microalgas para su producción se presenta como muy buena opción, ya que éstas tienen gran eficiencia fotosintética, son más eficaces en la asimilación de CO₂ y otros nutrientes con respecto a las plantas, acumulan entre 20 y 80% de triglicéridos, no requieren de tierras cultivables y pueden cultivarse en agua salobre, requiriendo menor consumo de agua renovable (Fernández Linares y cols., 2012).



Esquema 1. Reacción general de transesterificación.

La condición de recurso finito y no renovable de los combustibles fósiles, sumado a la alta contaminación atmosférica generada, han sido factores desencadenantes para el desarrollo de los biocombustibles y, aunque no son la solución definitiva de los problemas energéticos, económicos y ambientales que padece el planeta, son una fuente alternativa de energía (Cortés Marín y cols., 2009) especialmente en el sector del transporte (Campos-martín y cols., 2020).

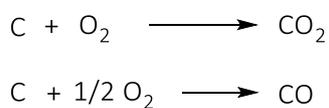
Pero, en contraposición a todos los beneficios anteriormente citados, la realidad es que el uso de biocombustibles tiene efectos tan perjudiciales como el alza del precio de los alimentos, como ocurrió en Argentina con la carne de vaca al utilizarse los pastos como plantaciones para biocombustibles, en México con el maíz, en Italia con la pasta e incluso en España, donde en 2007 se registró una subida del precio del pan causada por el aumento en origen del precio de la harina. Otros de estos efectos perjudiciales son la creciente competencia por la tierra y el agua y la deforestación. Además, estos biocombustibles, en mayor o menor medida, siguen emitiendo CO₂ en su combustión, por lo que siguen contribuyendo al calentamiento global (Hernández Rodríguez y Hernández Zárate, 2008).

1.5. Materiales y usos industriales

Quizás uno de los compuestos más fáciles de obtener a partir del carbono es el CO₂, que presenta aplicaciones tan simples como por ejemplo el inflado de las ruedas de las bicicletas, y que tantos problemas ocasiona cuando aumenta en la atmósfera (Boada Ferrer, 2020). Diferentes autores afirman que el dióxido de carbono es uno de los gases de efecto invernadero más importantes, siendo el cambio climático global asociado al

aumento potencial de la temperatura superficial del planeta unos de los problemas ambientales más severos que se enfrentan en el presente siglo (Burbano Orjuela, 2018). Por ello, en marzo de 2014 se establece el Real Decreto 163/2014 (BOE, 2014) por el que se crea el registro de la huella de carbono, que se define como el conjunto de emisiones de gases de efecto invernadero producidas, directa o indirectamente por personas, organizaciones, productos o eventos en términos de CO₂, para sensibilizar e incentivar a la sociedad en la lucha contra el cambio climático y conseguir así una economía baja en carbono.

Otro de los grandes problemas relacionados ocurre cuando la combustión de materia orgánica se produce de manera incompleta (esquema 2). Cuando el oxígeno es insuficiente en lugar de formarse dióxido de carbono, se forma monóxido de carbono y pueden darse desde intoxicaciones accidentales hasta la conocida como “muerte dulce” producida por la unión del CO a los grupos hemo de la hemoglobina, con una afinidad 230 veces superior que el oxígeno, impidiendo así el transporte de este a los tejidos, hipoxia tisular y muerte (Domínguez Luna, 2016).



Esquema 2. Reacciones de combustión completa (arriba) con formación de dióxido de carbono e incompleta (abajo) con formación de monóxido de carbono.

Los materiales elastoméricos, conocidos como cauchos, son materiales insustituibles para productos como llantas, calzado, tuberías, correas de transmisión o piezas para sellamiento de fluidos, por sus características de elasticidad y resistencia química. El problema de estos materiales surge debido al gran impacto negativo que ocasionan en el medio ambiente y en la salud humana. Por ello, además del aumento de exigencias por parte de la legislación ambiental tanto a fabricantes como a comercializadores y usuarios, el reto está en la búsqueda de alternativas para el reaprovechamiento de los residuos del caucho. Así, las aplicaciones del caucho reciclado con mayor potencial se encuentran en el sector de las construcciones civiles e infraestructuras, como asfaltos, pavimentos o aislantes tanto sísmicos como acústicos. Otras aplicaciones, aun en desarrollo, podrían

ser la elaboración de filtros para la limpieza de agua contaminada o como componente en materiales compuestos de matriz elastomérica para su uso, por ejemplo, en calzados, piezas de carrocería como parachoques, guardabarros o sellos, adhesivos y sellantes o termoplásticos elastoméricos (Peláez Arroyave y cols., 2017).

Otro material cuyo uso en la sociedad está a la orden del día es el plástico. Los plásticos son materiales sintéticos, normalmente derivados del petróleo. Sus propiedades de impermeabilidad, baja relación peso/volumen y resistencia a diversos agentes físicos, químicos y biológicos además de su fácil producción y bajo coste, hacen que sea un material ampliamente usado y que, solo en España, se utilicen en torno a cuatro millones de toneladas.

Debido a la mala separación de residuos y su resistencia a la biodegradación, el plástico se acumula en el medioambiente, donde puede permanecer más de 500 años o incluso no llegar a degradarse nunca. Es por ello que se están buscando alternativas a estos plásticos derivados del petróleo, intentando generar plásticos degradables con las mismas propiedades de los primeros. Estas alternativas las encontramos, por ejemplo, en los bioplásticos, que son plásticos producidos con materias primas renovables, lo que hace que, una vez terminada su vida útil, se trate como residuos orgánicos, de fácil degradación y en un corto periodo de tiempo (Ibáñez Lopez, 2016).

Con unas aplicaciones totalmente diferentes, encontramos el carbón activado, que son carbones con una estructura ultra porosa altamente desarrollada. Los carbones activos primitivos eran preparados a partir de madera carbonizada (carbón vegetal) y parecen haber tenido aplicaciones médicas. No fue hasta 1881 cuando se conoció el término adsorción para describir como algunos materiales carbonizados atrapaban los gases, y fue entonces cuando R. von Ostrejko, considerado el inventor del carbón activado, desarrolló varios métodos para producirlo.

Actualmente el carbón activado puede producirse a partir de cualquier material rico en carbono, pero, según cual sea, se llevará a cabo un proceso de activación diferente, y se obtendrán también unas propiedades diferentes, como la dureza, resistencia a la abrasión y radio de poro.

El carbón activado posee la capacidad de adherir o retener en su superficie uno o más componentes (átomos, moléculas, iones) disueltas en el líquido que está en contacto con él, lo que se denomina poder adsorbente, y es responsable de purificar, desodorizar y

decolorar el agua u otros líquidos o gases. En la actualidad, además, el carbón activado está teniendo un gran éxito en la industria cosmética tanto en mascarillas faciales purificantes, champús, en los filamentos de cepillos faciales o dentales, en los dentífricos para potenciar el efecto blanqueante y sobre todo en la cosmética anti-polución, por su capacidad para eliminar toxinas y suciedad (León Méndez y León Méndez, 2020; Moliner, 2016).

Muchos otros materiales de carbono, sectores y aplicaciones podemos verlos esquematizados en la figura 7.

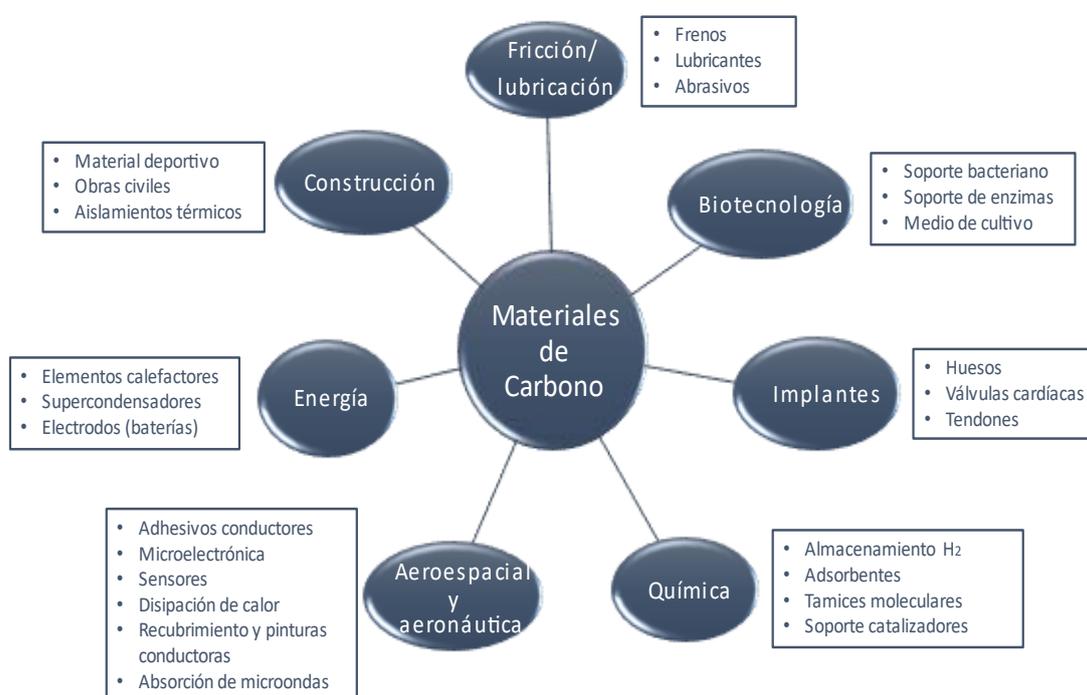


Figura 7. Aplicaciones de los materiales de carbono (Versión adaptada, Borrell Tomas y Salvador Moya, 2015).

1.6. Estados alotrópicos del carbono

El átomo de carbono aislado posee una vida media muy corta, estabilizándose en una variedad de estructuras multiatómicas con diferentes configuraciones moleculares, denominadas formas alotrópicas (misma composición química, diferente ordenación atómica). Esta diversidad en el ordenamiento espacial se encuentra ligada a los tres tipos de hibridación ya comentados. Así, aunque estén compuestas únicamente de carbono,

estas formas alotrópicas presentan estructuras bien diferenciadas, y poseen también propiedades radicalmente distintas.

Tal y como podemos observar en la figura 8, los alótropos del carbono pueden ser (Méndez y cols., 2012):

- Tridimensionales: grafito (el alótropo más abundante) y diamante.
- Bidimensionales: grafeno.
- Monodimensionales: Nanotubos.
- Cero dimensionales: fullerenos.

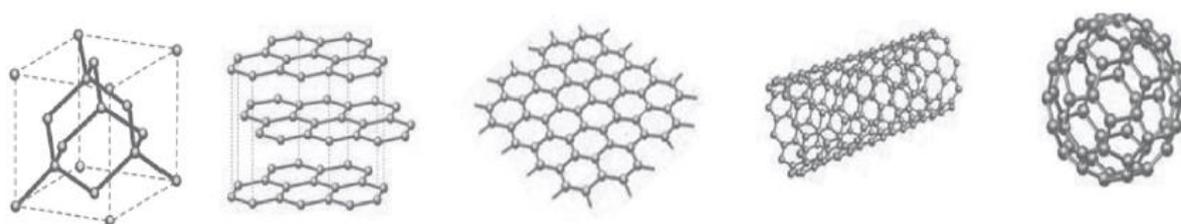


Figura 8. Formas alotrópicas del carbono. De izquierda a derecha, diamante y grafito en tres dimensiones; grafeno en dos dimensiones; nanotubos en una dimensión y fullerenos en dimensión cero (dimensión casi atómica) (Méndez y cols., 2012)

En la tabla 2 encontramos valores de algunas propiedades físicas de las formas alotrópicas del carbono, donde podemos observar que sus características intrínsecas son muy diferentes.

Propiedades	Diamante	Grafito	Grafeno	Fullereno	Nanotubo
Estructura	Cristalina cúbica	Hexagonal laminar	Monocapa atómica	Esferas hexágono-pentágono	Hexagonal cilíndrica
Color	Transparente	Negro	Negro	Negro	Negro
Dureza	Muy duro	Blando	Duro	Suave	Duro
Conductividad eléctrica	No conductor	Conductor	Conductor	Conductor	Conductor
Densidad (g/m³)	3.52	2.25	0.77	1.72	1.40

Tabla 2. Propiedades físicas comparativas de los alótropos del carbono.

1.6.1. *Diamante*

Diamante y grafito, de los que ya se ha hablado con anterioridad, son las principales formas alotrópicas del carbono. En el caso del diamante, debido a la hibridación sp^3 de los carbonos, presenta una estructura tridimensional de enlaces covalentes, confiriéndole una dureza por encima de cualquier otro material existente (Kamali, 2021). Así, el término diamante proviene de la palabra griega *adamas*, que significa “el más fuerte”. Esta estructura atómica también hace que el diamante sea aislante eléctrico.

La mayoría de los diamantes naturales se forman en procesos geológicos a presiones y temperaturas muy elevadas, propias de las profundidades de la corteza terrestre y salen al exterior a través de erupciones volcánicas. Para la síntesis de los primeros diamantes se llevó a cabo la idea de utilizar grafito como soluto, y saturar con él una disolución usando como disolvente un metal fundido, para lo que se usó triolita, de la que están constituidos muchos meteoritos. A una temperatura de 1500°C y 68000 atmósferas se lograron obtener los primeros diamantes, y aunque sí poseían la dureza, carecían del brillo y la calidad de los diamantes minerales, ya que el disolvente metálico se introducía en la red cristalina, y átomos de nitrógeno presentes en el aire sustituían algunos de los átomos de carbono de ésta. Aumentando aún más la presión y temperatura para eliminar las impurezas metálicas e introduciendo aluminio metálico en la reacción para que se combinara con el nitrógeno, se consiguieron obtener diamantes con una calidad comparable a las gemas naturales, solamente distinguibles en la capacidad de los sintéticos de emitir luz unos segundos tras ser irradiados con luz ultravioleta de alta intensidad. Esto es debido a que la red cristalina en los diamantes sintéticos se desarrolla combinándose un sistema octaédrico en unas partes con un sistema cúbico en otras, mientras que los naturales la estructura es uniformemente octaédrica (Gasque Silva, 2001). Algunos de los usos del diamante son la elaboración de discos abrasivos, taladradoras y, lógicamente, como gemas en joyería.

1.6.2. *Grafito*

El grafito, por el contrario, por su hibridación sp^2 forma láminas planas de átomos de carbono, formando un sistema de anillos condensados, con las láminas ordenadas de forma hexagonal y paralelas entre sí. El grafito es un material anisótropo, por lo que sus propiedades físicas varían según la dirección en la que se midan: las láminas se deslizan

con facilidad unas sobre otras en paralelo, confiriendo un carácter untuoso, pero en dirección perpendicular a los planos basales resultan ser muy resistentes (Doadrio, 2016; Farias Cepeda y cols., 2017). Es uno de los materiales más inerte químicamente, resistiendo a la mayoría de los álcalis, ácidos y gases corrosivos, y su reactividad aumenta con la temperatura, reaccionando con el oxígeno por encima de 300-400°C.

Aunque el grafito natural es muy abundante y relativamente fácil extraíble, éste contiene numerosas imperfecciones e impurezas. Por ello, para ciertas aplicaciones es necesario llevar a cabo un proceso de purificación previo. El grafito sintético puede obtenerse de muchas formas, entre las que destaca la grafitización de carbón no grafitico, el depósito químico en fase de vapor o CVD (*Chemical Vapor Deposition*) de hidrocarburos a altas temperaturas y la cristalización de metales fundidos saturados con carbono (Menéndez Díaz, 2012). Efectuando una pirólisis de hidrocarburos a temperaturas por encima de los 2000°C y un posterior tratamiento térmico por encima de los 2700°C y presiones elevadas se obtiene el llamado HOPG (*highly ordered/oriented pyrolytic graphite*), un grafito pirolítico altamente ordenado/orientado que se suele usar como monocromador de neutrones y rayos X. O por cristalización de hierro fundido sobresaturado con carbono, se obtiene el grafito *Kish* (Liu y Loper, 1991), con mayor cristalinidad que el anterior y empleado para la obtención de grafenos a escala de laboratorio. Otros usos del grafito son la elaboración de minas de lápices, como lubricante sólido, en la elaboración de electrodos de grafito o en la construcción de reactores nucleares.

1.6.3. Grafeno

Si logramos separarle al grafito una única lámina de átomos de carbono (figura 9), obtenemos el grafeno, que forma una red cristalina hexagonal y de un solo átomo de espesor. El grafeno presenta, al igual que el grafito, hibridación sp^2 , lo que hace que por cada átomo de carbono quede libre un electrón de su última capa de valencia, creando por toda la lámina una nube electrónica, y haciendo al grafeno mejor conductor que el cobre (Farias Cepeda y cols., 2017). Además de gran conductor, también posee otras magnificas propiedades de elasticidad, ya que tiene una enorme resistencia a la rotura sin deformarse, permeabilidad, ligereza, y nula citotoxicidad.

El grafeno ha sido durante las últimas décadas empleado como modelo de estudio de diversos materiales grafiticos, pero a pesar de ello, no fue posible su aislamiento hasta 2004, lo que consiguieron los físicos Andre Geim y Konstantin Novoselov , y por lo que obtuvieron el Nobel de Física en 2010 (Lee y cols., 2016).

Actualmente existen diversos métodos para producir grafeno a nivel industrial, como la exfoliación mecánica y química, la deposición química de vapor utilizando catalizadores metálicos, la técnica de crecimiento epitaxial mediante CVD u otros métodos alternativos como la reducción química, electroquímica y térmica del óxido de grafeno (Farias Cepeda y cols., 2017), pero el problema de todos ellos es su escasa rentabilidad económica y que son nocivos para el medio ambiente. Por ello, la investigación ahora se centra en la obtención de grafeno a partir de métodos alternativos más sostenibles, consiguiéndose la obtención a partir de la reducción de óxido de grafeno por *Escherichia Coli*, *Shewanella* o la reducción del óxido de grafeno exfoliado a través del té verde, aprovechando la capacidad reductora de los anillos aromáticos de los polifenoles del té (Felli y cols., 2016). El grafeno, por su gran versatilidad, tiene aplicaciones en campos tan opuestos como son las telecomunicaciones y electrónica en la elaboración de procesadores de alta frecuencia, cables de alta velocidad o pantallas táctiles flexibles; en recubrimientos y tintas para la elaboración de pinturas que absorben energía (Doadrio, 2016); en construcción o incluso en medicina y biomedicina, como biosensor para la detección de determinadas biomoléculas, en terapia génica como vector genético para el tratamiento del cáncer de ovario (Wang y cols., 2020), en ingeniería tisular para producir “*scaffolds*” sintéticos (Felli y cols., 2016) o en terapia antitumoral, tanto para vehiculizar fármacos, como de mediadores para generar calor localizado, como para la localización y visualización de este tipo de patología (Doello y cols., 2015).

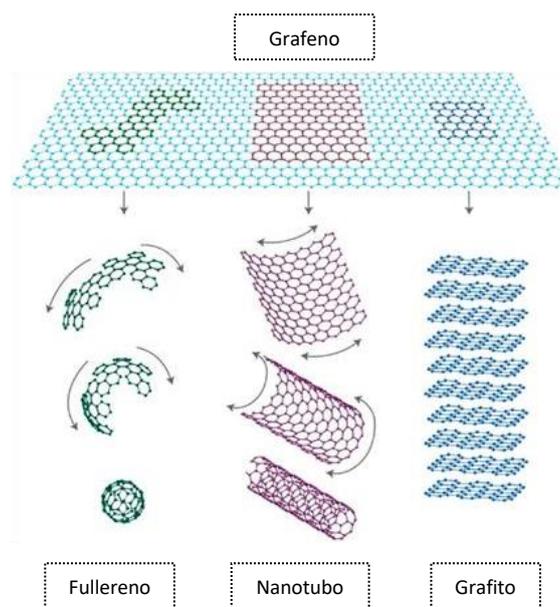


Figura 9. Representación de la lámina de grafeno y de los materiales carbonáceos derivados de él.

Como podemos observar en la figura 9, si la lámina de grafeno la envolvemos en forma de esfera, arqueados en estructuras de cero dimensiones, obtenemos los fullerenos, y enrollándola cilíndricamente en estructuras de una dimensión, dará lugar a los nanotubos, las otras dos alotropías del carbono.

1.6.4. Fullerenos

El descubrimiento de los fullerenos se produjo en 1985, y fue uno de los descubrimientos más importantes de la historia de la química que involucraba al carbono hasta la fecha. Por ello, Harry Kroto, Robert Curl y Richard Smalley fueron galardonados con el premio Nobel de química en 1996 (Martín, 2011; Suarez Navarro, 2018).

Los fullerenos son moléculas altamente simétricas en forma de jaulas cerradas formadas exclusivamente por átomos de carbono, siempre en número par, distribuidos formando anillos pentagonales y hexagonales.

Se han obtenido numerosos fullerenos, pero el más conocido es el C_{60} , también conocido como "Buckminsterfullereno" o "Buckyball" debido a la asociación con las cúpulas geodésicas construidas por el arquitecto Richard Buckminster Fuller y por seguir su mismo patrón estructural (figura 10) (Alegret y cols., 2014). Este se forma en el proceso de generación de los fullerenos por vaporización de grafito en un arco eléctrico, y está constituido por 60 átomos de carbono, 30 dobles enlaces carbono-carbono con geometría formada por 12 pentágonos y 20 hexágonos (Suarez Navarro, 2018).

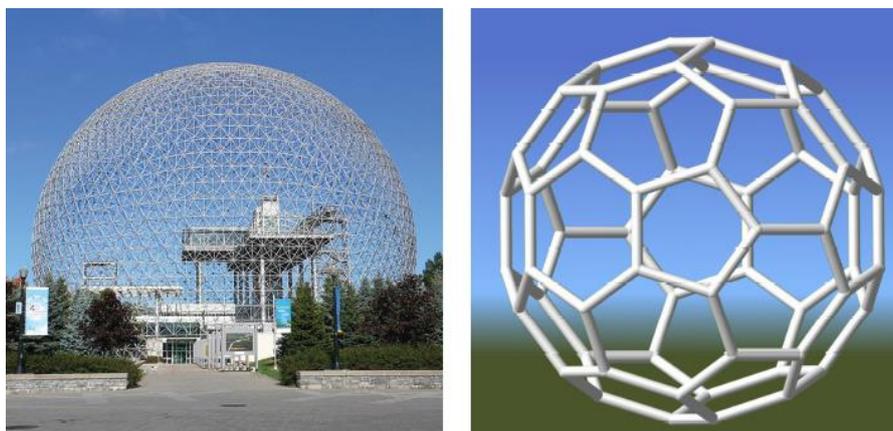


Figura 10. A la izquierda el Museo Medioambiental de Canadá, dentro de una cúpula geodésica diseñada por R. Buckminster Fuller y a la derecha la representación del fullereno C_{60} (Alegret y cols., 2014).

Las expectativas tanto en investigación básica como en sus previsible aplicaciones tecnológicas han hecho de los fullerenos uno de los sistemas más estudiados en ciencia a nivel internacional. Las excepcionales propiedades químicas, electroquímicas y fotofísicas les hacen ser unos candidatos ideales para el desarrollo de la electrónica molecular orgánica. Son de gran interés debido a su posible aplicación en la obtención de dispositivos fotovoltaicos o cables moleculares (Martín, 2011) y, además, el estudio de las aplicaciones biológicas ha atraído una atención creciente a pesar de su baja solubilidad en medios fisiológicos. Las características únicas de los fullerenos (tamaño, hidrofobicidad y capacidad de transferencia de electrones) los convierten en grandes candidatos para su uso en biología, química médica y biotecnología donde, como podemos ver en la tabla 3, algunos de ellos han demostrado su eficacia en transcripción genética por su capacidad de escisión del DNA; como inhibidores de varias enzimas, como la proteasa del VIH; como captadores de radicales frente a la apoptosis o enfermedades neurodegenerativas o en su comportamiento como antibacterianos (Baena y cols., 2002).

Efecto biológico	Especie de destino	Enfermedad	Fullereno activo
Agente antioxidante	Lipoproteínas de baja densidad	Arteriosclerosis	Hexasulfobutil fullereno C ₆₀
Neuroprotector	Proteína β amiloide	Alzheimer	Fullerenol
	Células granulares cerebelosas	Estrés oxidativo	Ácido C ₃ -fullero-tris-metanocarboxílico
Agente antibacteriano	Tuberculosis micobacteriana	Tuberculosis	Derivados catiónicos de fullereno
	<i>Escherichia coli</i>	Meningitis bacteriana	C ₆₀ Fullereno

Tabla 3. Tendencias actuales en el uso biológico de fullerenos y derivados (Versión adaptada, Baena y cols.,

1.6.5. Nanotubos de carbono

Con respecto al descubrimiento de los nanotubos de carbono, éste no está tan claro por los numerosos artículos publicados, aunque tradicionalmente se le asigna al científico japonés Sumio Iijima, en 1991 (Martín, 2011; Suarez Navarro, 2018).

Existen diferentes tipos de nanotubos de carbono en función de las capas de grafeno por las que están formados. Así, podemos hablar de nanotubos de carbono de pared sencilla y de pared múltiple.

Los nanotubos de carbono de pared sencilla tienen una estructura consistente en una lámina de grafeno enrollada sobre sí misma, con los átomos de carbono covalentemente enlazados a tres átomos de carbono vecinos y un cuarto enlace deslocalizado entre los demás átomos. Presentan un diámetro que varía entre 1.4-2nm, dimensiones de un átomo de grosor, y longitudes de hasta 100 micras. Los nanotubos de carbono de pared múltiple consisten en capas de láminas de grafeno enrolladas concéntricamente con un espacio entre ellas de 0.36nm, diámetro externo de 10 a 50nm y con los átomos de carbono enlazados también de forma covalente a otros tres, pero con la diferencia que el cuarto enlace no se encuentra deslocalizado, si no que forma enlaces débiles de tipo Van der Waals con las demás hojas de grafeno.

Sin embargo, los nanotubos de carbono presentan como desventajas su pobre solubilidad en agua, que pueden formar aglomerados y su toxicidad, lo que puede solucionarse con modificaciones superficiales. Al hacerlos más solubles en agua aumentamos su biocompatibilidad. Estas modificaciones pueden ser de tipo covalente, como la oxidación en la superficie del nanotubo con ácidos fuertes y mezclas con ultrasonido y elevada

temperatura o la incorporación de polímeros; y de tipo no covalente como la adsorción de diversos compuestos sobre la superficie del nanotubo que, aunque son más débiles, presentan la ventaja de que no afectan a la estructura del éste (Sáenz Galindo y cols., 2017). Una vez modificados, los nanotubos de carbono muestran una diversidad de aplicaciones potenciales que incluyen la terapia fototérmica, imagen fotoacústica, administración de fármacos y otras aplicaciones biomédicas. Alguno de los métodos desarrollados con los nanotubos es, por ejemplo, la unión a estos de DNA, péptidos y proteínas. Al ser más pequeños que las células sanguíneas pueden transportarse por el organismo y tienen la capacidad de detectar y destruir células que pueden ser cancerosas o estar infectadas por virus (Andrade Guel y cols., 2012).

5. CONCLUSIÓN

Podemos concluir que:

- Existe un gran número de fuentes de carbono, tanto en estructuras cristalinas o amorfas de carbono puro, como combinado con otros elementos.
- Otra gran fuente de carbono son los combustibles fósiles. Estos combustibles fósiles pueden encontrarse en la naturaleza como sustancias sólidas, líquidas o gaseosas. Los combustibles fósiles en estado sólido son los carbones, y su contenido en carbono varía en función del grado de carbonificación. Aunque tienen gran variedad de usos, el principal es la producción de energía eléctrica en centrales térmicas. El petróleo es un combustible fósil en estado líquido, y de su destilación, en estado gaseoso se obtiene el gas natural. El petróleo es la principal fuente de energía del planeta, seguido, en segundo lugar, del gas natural.
- Tanto el reino animal como el vegetal están compuestos mayoritariamente de carbono. La lignina y la celulosa son los principales componentes de la biomasa terrestre y la quitina, de esqueletos de moluscos, equinodermos o crustáceos.
- La condición de recurso finito y no renovable de los combustibles fósiles, además de la alta contaminación atmosférica generada han sido factores desencadenantes para el desarrollo de biocombustibles. Entre estos se encuentran el bioetanol y el biodiesel, que han alcanzado gran interés como fuente alternativa de energía.
- Del carbono se pueden obtener gran variedad de materiales con multitud de aplicaciones. Así, además del CO₂ que es uno de los gases que más problemas ocasiona al planeta, podemos obtener cauchos (insustituibles en productos como llantas, calzado, tuberías, etc.) plásticos (elaborados a partir del petróleo) y bioplásticos (producidos con materias primas renovables), o carbón activado, con una estructura ultraporosa altamente desarrollada que está tomando gran éxito en la industria cosmética.
- Las formas alotrópicas son estructuras con una misma composición química (todas ellas formadas por carbono puro) pero diferente ordenación atómica. Esta diversidad en el ordenamiento espacial hace que las estructuras tengan propiedades muy distintas unas de otras. Las principales y más antiguas alotropías

del carbono son el diamante y el grafito, seguidas del grafeno, fullerenos y nanotubos de carbono. Tanto grafeno, como fullerenos y nanotubos, por su gran versatilidad, se están implantando a gran velocidad en numerosos campos de la sociedad actual.

6. BIBLIOGRAFÍA

Abbas G, Irawan S, Memon KR, Khan J. Application of cellulose-based polymers in oil well cementing. *Journal of Petroleum Exploration and Production Technology* 2020;10:319-25.

Alegret N, Rodríguez-Forteza A, Poblet JM. Sinfonía de fullerenos: la magia de la encapsulación. *Anales de la Real Sociedad Española de Química* 2014;110:121-30.

Andrade Guel ML, López López LI, Sáenz Galindo A. Nanotubos de carbono: funcionalización y aplicaciones biológicas. *Revista mexicana de ciencias farmacéuticas* 2012;43:9-18.

Baena JR, Gallego M, Valcárcel M. Fullerenes in the analytical sciences. *Trends in analytical chemistry* 2002;21:187-98.

Baltodano LC, Yaipen JE, Fuertes CM. «Obtención, caracterización y diseño de una forma farmacéutica semisólida (ungüento) a base de quitosano con efecto cicatrizante». *Revista ECIPeru* 2019:77-85.

Boada Ferrer M. Carbono: el elemento estrella. *Investigación y Ciencia (Scientific American)* 2020;Enero:82-5.

Boluada CJ, Macías M, González J. La complejidad química de las gasolinas de automoción. *Ciencia, Ingenierías y Aplicaciones* 2019;2:51-79.

Borrell Tomas MA, Salvador Moya MD. *Materiales de carbono: del grafito al grafeno*. vol. 2. Barcelona: 2015.

Burbano Orjuela H. El carbono orgánico del suelo y su papel frente al cambio climático. *Revista de Ciencias Agrícolas* 2018;35:82.

Camporredondo Saucedo JE, Martínez Flores R, García Lara AM, Garza García M, Sifuentes Barrea CF. Contribuciones fundamentales para el desarrollo tecnológico de materiales avanzados de carbono a partir de alquitrán de hulla. *Prospectiva* 2012;10:7-12.

Campos-martín JM, Chica A, Domine ME, García T, Pawelec B, Luis J, y cols. *Biocombustibles*. Grupo español del carbón 2020:38-44.

Carmona Guzmán E. *Elementos Químicos, Moléculas Y Vida*. Real Academia de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales 2013;106:69-80.

Castillo A, Ramírez M, Ferrer R. El Carbono Hexavalente. Un Nuevo Descubrimiento a ser enseñado en Química Orgánica. *Educación en Contexto* 2018;IV:15-31.

Cortés Marín E, Suárez Mahecha H, Pardo Carrasco S. Biocombustibles y autosuficiencia energética. DYNA (Colombia) 2009;76:101-10.

Cortina Gil D, Martínez Pinedo G. Núcleos en el Universo. Revista española de física 2008;22:14-21.

Dima J, Sequeiros C, Zaritzky N. Síntesis de microesferas de quitosano para encapsular y liberar fertilizante. Jornadas ITE 2017:595-600.

Doadrio AL. Los elementos químicos: Un manual extenso. Madrid (España): Real Academia Nacional de Farmacia; 2016.

Doello K, Cabeza L, Ortiz R, Arias JL, Melguizo C, Prados J. Magnetic Nanoparticles in Cancer Diagnosis and Treatment. Actualidad Medica 2015;100:139-44.

Farias Cepeda L, Flores oyervides JD, Rosales Marines L, Sáenz Galindo A, López Lopez L. Grafeno, el material del futuro: Síntesis y propiedades. CienciaAcierta 2017:1-7.

Felli E, Victoria Martínez E, Campillo-Fernández AJ, Serrano Aroca Á, San Vicente Mártir Valencia V. El grafeno y sus derivados en la ingeniería tisular. Nereis 2016;8:71-81.

Fernández Linares LC, Montiel Montoya J, Millán Oropeza A, Badillo Corona JA. Producción de biocombustibles a partir de microalgas. Ra Ximhai 2012;8:101-16.

Fronjosa E. El negocio del petróleo. Cuadernos Unimetanos 2011;25:13-44.

Gasque Silva L. Carbono. Diamantes sintéticos. Educación química 2001;12:111-2.

Gubernat A, Pichór W, Lach R, Zientara D, Sitarz M, Springwald M. Low-temperature synthesis of silicon carbide powder using shungite. Boletín de la Sociedad Española de Cerámica y Vidrio 2017;56:39-46.

Hernández Rodríguez M, Hernández Zárate J. Verdades y mitos de los biocombustibles. Elementos: Ciencia y cultura 2008;15:15-8.

Ibáñez Lopez ME. Bacterias productoras de polímeros para su utilización como plásticos biodegradables. MoleQla: Revista de Ciencias de la Universidad Pablo de Olavide 2016;23:72-5.

Kamali AR. Black diamond powder: On the thermal oxidation and surface graphitization. Applied Surface Science 2021;551:149371.

Kristjánsson L. Iceland spar and its legacy in science. History of Geo- and Space Sciences 2012;3:117-26.

- Lee J, Kim J, Kim S, Min DH. Biosensors based on graphene oxide and its biomedical application. *Advanced Drug Delivery Reviews* 2016;105:275-87.
- León Altamirano C. El carbón, ¿Garantía del futuro energético?. *Enseñanza de las Ciencias de la Tierra* 2008;16:229-38.
- León Méndez G, León Méndez D. Uso del carbón activado en la industria cosmética. *Corporación universitaria Rafael Nuñez* 2020;2:4-12.
- Liu S, Loper CR. Kish, a source of crystalline graphite. *Carbon* 1991;29:1119-24.
- Luján de Pinedo M, Ayala Jara C, Castillo Saavedra E, Pinedo Torres CA, González Puetate I, Durand Luján CS. Dressing based on *Vaccinium corymbosum* L. and chitosan with high skin regenerative capacity. *Scientia Agropecuaria* 2018;9:223-9.
- Malischewski M, Seppelt K. Crystal Structure Determination of the Pentagonal-Pyramidal Hexamethylbenzene Dication $C_6(CH_3)_6^{2+}$. *Angewandte Chemie - International Edition* 2017;56:368-70.
- Martín N. Sobre fullerenos, nanotubos de carbono y grafenos. *ARBOR Ciencia, Pensamiento y Cultura* 2011;187:115-31.
- McDonough WF, Sun S s. The composition of the Earth. *Chemical Geology* 1995;120:223-53.
- Melezhik VA, Filippov MM, Romashkin AE. A giant Palaeoproterozoic deposit of shungite in NW Russia: Genesis and practical applications. *Ore Geology Reviews* 2004;24:135-54.
- Méndez Medrano G, Rosu HC, Torres González LA. Grafeno : el alótropo más prometedor del carbono. *Acta Universitaria* 2012;22:20-3.
- Menéndez Díaz JÁ. El carbón en la vida cotidiana. De la pintura rupestre al ascensor espacial. CreateSpace; 2012.
- Menéndez Menéndez A. Aproximación al pasado, presente y futuro de la industria azabachera, un patrimonio cultural, material e inmaterial, en vías de extinción 2021:479-92.
- Molina Zerpa JA, Colina Rincón M, Rincón D, Vargas Colina JA. Efecto del uso de quitosano en el mejoramiento del cultivo del arroz (*Oryza sativa* L. variedad sd20a). *Revista de Investigación Agraria y Ambiental* 2017;8:151-65.
- Moliner R. Del carbón activo al grafeno: Evolución de los materiales de carbono. *Boletín del Grupo Español del Carbón* 2016:2-5.

Negi H, Verma P, Kumar R. A comprehensive review on the applications of functionalized chitosan in petroleum industry. *Carbohydrate Polymers* 2021;266:1-17.

Nguyen NB, Nunes FM, Thompson IJ, Brown EF. Low-temperature triple-alpha rate in a full three-body nuclear model. *Physical Review Letters* 2012;109:1-5.

Peláez Arroyave GJ, Velásquez Restrepo SM, Giraldo Vásquez DH. Aplicaciones de caucho reciclado: Una revisión de la literatura. *Ciencia e Ingeniería Neogranadina* 2017;27:27-50.

Peng B, Yao Z, Wang X, Crombeen M, Sweeney DG, Tam KC. Cellulose-based materials in wastewater treatment of petroleum industry. *Green Energy and Environment* 2020;5:37-49.

Pescador Vargas B, Roa Culma LA. Dualidad, la locomotora minera vs. el pulmón negro. *Revista med* 2016;24:88-99.

Pla García J, Menor Salván C. La composición química de la atmósfera primitiva del planeta Tierra. *Anales de la Real Sociedad Española de Química* 2017:16-26.

Ramos F, Díaz S, Villar M. Biocombustibles. CH CDMX 2016;25:69-73.

Real Decreto 163/2014, de 14 de marzo, por el que se crea el registro de huella de carbono, compensación y proyectos de absorción de dióxido de carbono. (BOE núm. 77, de 29 de marzo de 2014). *Actualidad Jurídica Ambiental* 2014:39-40.

Rivero Gutierrez HL, Calzadilla León L, Yamaret Fernández YC, Lugo Martínez RA, Luis Orozco JD, López Hervis CY. Refinación del petróleo: Características generales y principales productos del esquema hidroskimming. *Monografías Universidad de Matanzas «Camilo Cienfuegos»* 2016:1-24.

Rodríguez Díaz YJ, De la Cruz Frías GA, López Mena WE, Ricaurte Valdés L, Morales Gutiérrez ML. Uso de un polímero natural (quitosano) como coagulante durante el tratamiento de agua para consumo. *Ingeniare* 2015:25-32.

Sáenz Galindo A, Rangel Lucio DA, Ramirez Mendoza L, López López LY, Fuentes Aviles JG, Esparza González SC. Aplicaciones de nanotubos de carbono. *CienciaAcierta* 2017:1-8.

Salinas E, Gasca V. Los bioiocombustibles. *El cotidiano* 2010:75-82.

Sánchez Echeverría JD, Calderón Beruecos Z, García Becerril ML. *Química II*. vol. 2. 2000.

Serna F, Barrera L, Montiel H. Impacto social y económico en el uso de biocombustibles. *Journal of Technology Management and Innovation* 2011;6:100-14.

Suarez Navarro M. Fullerenos «a la carta», catálisis asimétrica asistida por metales y ligandos

quirales. Anales de la Academia de Ciencias de Cuba 2018;7:102-17.

Tascón JMD. Materiales de carbono: Estructuras y formas. Optica Pura y Aplicada 2007;40:149-59.

Valenzuela V. C, Arias JI. Potenciales aplicaciones de películas de quitosano en alimentos de origen animal: una revisión. Avances en Ciencias Veterinarias 2012;27:33-47.

Vallés JA. La belleza de lo inhomogéneo. Optica Pura y Aplicada 2015;48:167-70.

Wang Y, Sun G, Gong Y, Zhang Y, Liang X, Yang L. Functionalized Folate-Modified Graphene Oxide/PEI siRNA nanocomplexes for targeted ovarian cancer gene therapy. Nanoscale Research Letters 2020;15:57.

Wojas NA, Swerin A, Wallqvist V, Järn M, Schoelkopf J, Gane PAC, y cols. Iceland spar calcite: Humidity and time effects on surface properties and their reversibility. Journal of Colloid and Interface Science 2019;541:42-55.

Wort CJH, Balmer RS. Diamond as an electronic material. Materials Today 2008;11:22-8.