

Carbón mineral y biocarbón: de la revolución industrial a la captura de carbono

**Dra. Elizabeth Chávez-García
Facultad de Filosofía y Letras
Universidad Nacional Autónoma de México**

Resumen

La actual crisis climática, la urgente necesidad de producir alimentos saludables y el apremio por vivir en un mundo menos contaminado nos ha llevado a buscar alternativas que mejoren la gestión de los recursos naturales. Bajo este contexto surgen dos tipos de carbones que, a pesar de llevar siglos entre nosotros, podrían volverse piedras angulares para mitigar los efectos del cambio climático global y recuperar sitios degradados. Por un lado, el carbón mineral, básico en la producción de energía eléctrica y productos como el acero. Por el otro, el biocarbón, un mejorador del suelo que podría dar solución a problemas como la seguridad alimentaria y la captura de dióxido de carbono, un agravante del calentamiento global.

Palabras clave

Economía circular, combustibles fósiles, cambio climático, suelo.

Abstract

The current climate crisis, the urgent need to produce healthy food and the pressure to live in a less polluted world has led us to look for alternatives that improve the management of natural resources. Under this context, two types of carbons emerge which, despite having been with us for centuries, could become cornerstones to mitigate the effects of global climate change and recover degraded sites. On the one hand, coal, basic in the production of electrical energy and products such as steel. On the other hand, biochar, a soil amendment that could solve problems such as food security and the capture of carbon dioxide, an aggravating factor of global warming.

Keywords

Circular economy, fossil fuels, climate change, soil.

Introducción

Existen dos tipos de carbones que pueden tener un amplio espectro de usos e incidencia en temas ambientales. Uno de ellos corresponde al primer combustible fósil usado por la humanidad: el carbón mineral. Este material fue desplazado por el gas natural y el petróleo una vez que se hizo mayor uso de estos recursos para industrias como el transporte. Sin embargo, con las predicciones de que estos combustibles durarán menos de 60 años (Mazumder, 2012), el carbón mineral podría tener un apogeo tan importante como el que tuvo en sus inicios.

Tanto el carbón mineral como los otros combustibles fósiles han contribuido al desarrollo y mejoramiento de la calidad de vida en la mayor parte del mundo. Sin embargo, también han sido los que mayoritariamente han contribuido a la crisis climática que estamos viviendo, con repercusiones irreversibles tanto en el ambiente como en el bienestar humano. Por lo que las acciones encaminadas a reducir su impacto y a revertir la degradación ambiental son urgentes.

Aquí es donde aparece en escena otro tipo de material carbonoso conocido como biocarbón. El biocarbón ha sido señalado como un excelente producto para recuperar suelos degradados, aumentar la fertilidad de zonas agrícolas y como un medio para revalorizar los residuos orgánicos. Sin embargo, no todo es color de rosa con el biocarbón, ya que como se verá más adelante, también tiene su lado oscuro.

Carbón mineral: un poco de historia

No existe evidencia registrada de cuándo comenzó la minería del carbón. Sin embargo, se cree que el descubrimiento de una roca negra que se quema cuando se expone al fuego puede haber ocurrido por casualidad en diferentes partes del mundo durante miles de años (Hester y Harrinson, 2018). No obstante, el predominio del carbón ocurrió hasta el siglo XVIII cuando se descubrieron en Norteamérica los grandes yacimientos de carbón mineral y su consumo empezó a ser imparable. Más tarde, en el último tercio de ese mismo siglo, el carbón se constituye como la energía que movía la máquina de vapor, lo que dio origen a la llamada Revolución Industrial (Macías, 2007; Mazumder, 2012).

Las mayores facilidades en el transporte del carbón, originados por la utilización de la locomotora de vapor, llevaron a una extensión generalizada de su consumo (Macías, 2007). Por ejemplo, a principios del siglo XIX, el carbón se utilizó para iluminar ciudades como Londres mediante la producción de gas, lo que se denominó "gas de la ciudad". Más tarde, con el desarrollo de la energía eléctrica, el carbón se vinculó estrechamente a la generación de electricidad. De hecho, la primera central eléctrica de carbón, la cual fue desarrollada por Thomas Edison, entró en funcionamiento hace ya casi un siglo y medio en la ciudad estadounidense de Nueva York en 1882 (World Coal Institute, 2009).

En el siglo XIX se consolidó la extracción y consumo del carbón utilizado para el desarrollo industrial de diversos países. Esto convirtió al carbón en el protagonista de los avances energéticos en todo el mundo, ya que además del transporte ferroviario

y los barcos de vapor, se empleó de forma masiva en la producción de acero. Un hecho notable es que la primera Guerra Mundial le dio un impulso muy grande al carbón mineral como principal fuente de energía. Sin embargo, el petróleo superó al carbón en la década de 1960 con el crecimiento del sector del transporte que requería de combustibles líquidos (World Coal Institute, 2009; Mazumder, 2012).

A partir de la crisis energética de 1973, también conocida como "primera crisis del petróleo", el carbón cobró de nuevo gran interés debido a sus abundantes reservas extraíbles a bajo costo (Macías, 2007). Pero, a partir de los años ochenta disminuyó nuevamente el uso del carbón en los países más avanzados. Sin embargo, naciones como China, India o Brasil lo siguieron utilizando (World Coal Institute, 2009; Mazumder, 2012). Hoy en día se producen cerca de 168 millones de toneladas anuales en todo el mundo, siendo China el mayor productor y consumidor de carbón (British Petroleum Company, 2020).

¿Qué es el carbón mineral y cómo se forma?

El carbón mineral es una roca de color oscuro que deriva de la vegetación que se encontraba hace millones de años, específicamente en el Período Carbonífero (Hester y Harrinson, 2018). La etapa inicial del proceso de formación del carbón consiste en la acumulación de grandes cantidades de restos vegetales en lugares como los pantanos. Esta condición es indispensable porque la materia muerta se descompone fácilmente en ambientes ricos en oxígeno. En cambio, en el agua estancada de los pantanos, los restos vegetales no sufren una descomposición completa. Aquí, las plantas

son desintegradas por microorganismos que liberan gases como el hidrógeno y oxígeno, y conforme éstos escapan, aumenta el contenido de carbono y se forma una capa de *turba* (Mazumder, 2012; Tarbuck y Lutgens, 2013).

La turba es un material blando en el cual son fáciles de reconocer los restos vegetales. Este material puede seguir enterrado y con el tiempo transformarse lentamente en *lignito*, un carbón blando, con un aspecto terroso y opaco. Si este material sigue enterrado y aumenta la temperatura y la presión sobre él, se favorece la pérdida de más gases y la compactación del material. Esto transforma el lignito en una roca negra más dura denominada *hulla*, cuyo grosor puede ser la décima parte de la turba a partir de la cual se formó (Tarbuck y Lutgens, 2013; Hester y Harrinson, 2018).

Cuando las capas donde está contenida la hulla son sometidas a mayor calor y presión asociados con la formación de

montañas, se produce una mayor pérdida de gases y agua, incrementando con ello la concentración de carbono fijado. Este proceso transforma la hulla en *antracita*, una roca negra, brillante y muy dura. Debido a los factores y tiempo involucrados en la formación de la antracita, ésta es un carbón escaso y es más difícil y caro de extraer (Tarbuck y Lutgens, 2013).

El proceso de formación de los distintos carbones puede requerir miles de años y en el transcurso se producen cambios que les imprimen diferentes grados de pureza o calidad dependiendo del contenido de carbono (Figura 1). A nivel internacional se clasifica al carbón mineral según su capacidad energética: los carbones de alto rango como la hulla y la antracita tienen un alto contenido de carbono y, por lo tanto, un alto valor calorífico (22 - 38 MJ/kg) (Hester y Harrinson, 2018). Mientras que los carbones de bajo rango como el lignito son fáciles de quemar, pero

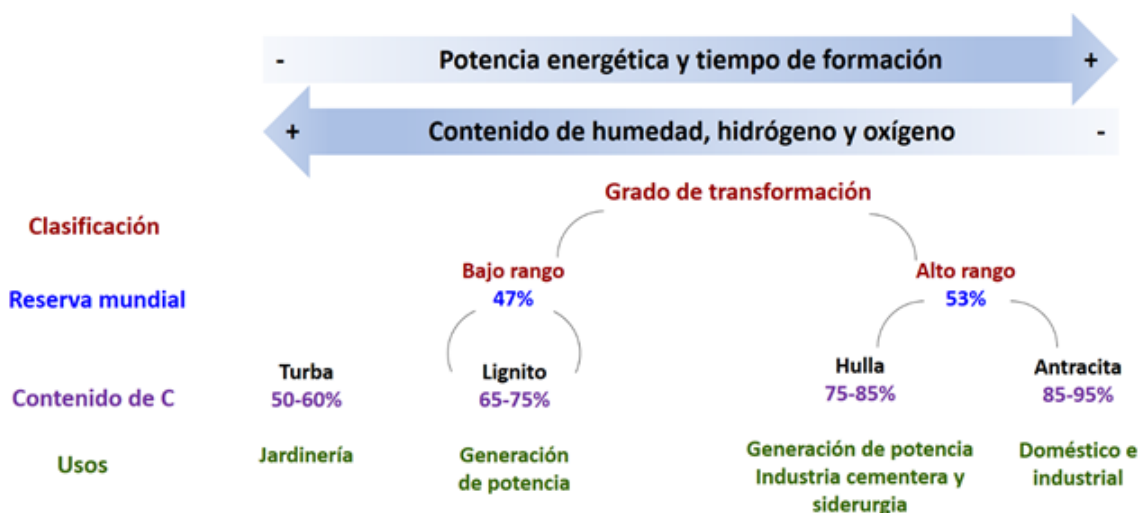


Figura 1. Clasificación del carbón según su capacidad energética, abundancia, contenido de carbono (C) y aplicación final. Modificado de World Coal Institute (2009).

su poder calorífico es relativamente bajo (8 - 20 MJ/kg) (Tarbuck y Lutgens, 2013). Como comparación, el poder calorífico de la gasolina se encuentra entre 43 y 48 MJ/kg y el del petróleo crudo cercano a 60 MJ/kg (CONUEE, 2021).

Usos

El carbón mineral se utiliza principalmente como fuente de energía para diversos procesos industriales. En el sector eléctrico los distintos tipos de carbones, principalmente la hulla, se utilizan como combustible para calentar calderas recubiertas por tubos con agua (Macías, 2007; Hester y Harrinson, 2018). El agua se convierte en vapor por el calor y pasa a una turbina que comienza a girar a alta velocidad y de esta forma se produce electricidad. Actualmente, el carbón alimenta el 41 % de la electricidad mundial y se espera que esta proporción se mantenga en niveles similares durante los próximos 30 años (Hester y Harrinson, 2018).

En el sector siderúrgico y metalúrgico, se emplea el coque (un combustible sólido que se obtiene del carbón mineral) para calentar hornos donde se obtienen metales como el acero. Como dato curioso, se requiere una tonelada de coque para producir 1.3 toneladas de acero (Macías, 2007; Hester y Harrinson, 2018). El carbón también se utiliza como fuente de energía para fundir materias primas como la caliza, un material de construcción u ornamental ampliamente usado en el mundo. De igual forma, se necesitan alrededor de 200 kg de carbón para producir una tonelada de cemento y se necesitan entre 300 y 400 kg de cemento para producir un metro cúbico de concreto (Hester y Harrinson, 2018).

El carbón mineral también se usa en la fabricación de carbones activados con gran capacidad de adsorción para la eliminación de agentes contaminantes del aire y del agua (Macías, 2007). También se pueden producir varios productos químicos a partir de los subproductos del carbón. El alquitrán de hulla refinado se utiliza en la fabricación de productos químicos usados como solvente en la industria química y en la industria farmacéutica. El gas amoníaco recuperado de los hornos de coque se utiliza para fabricar otros productos que después se emplearán en fertilizantes agrícolas, artículos de limpieza o explosivos. Cientos de materiales diferentes tienen carbón o subproductos del carbón como componentes: jabones, medicamentos, solventes, tintes, plásticos y fibras como el nailon o la fibra de carbono, un material extremadamente resistente pero ligero que se utiliza desde la industria de la construcción hasta las raquetas de tenis (Hester y Harrinson, 2018).

Finalmente, el avance tecnológico ha permitido utilizar el carbón como alternativa al petróleo a través de la conversión del carbón en combustible líquido, un proceso denominado "licuefacción del carbón" (Hester y Harrinson, 2018). A partir del carbón también se puede obtener un gas combustible mediante ciclos combinados de gasificación. En estos ciclos el carbón reacciona con oxígeno y vapor de agua para producir un gas compuesto por hidrógeno y monóxido de carbono. Este gas es utilizado posteriormente en una turbina para generar electricidad y en el futuro se cree que podría usarse para la producción de hidrógeno, otro probable combustible de mayor uso en el futuro (Macías, 2007).

Producción y consumo de carbón mineral

Las principales zonas mineras donde se extrae carbón mineral se hallaban en Gran Bretaña (Cardiff y Newcastle), Estados Unidos (Pittsburg), Alemania (Rhur), Polonia (Alta Silesia), China (Shanxi) y Rusia (Donetz) (Macías, 2007). Según el ritmo actual de producción, hay suficientes reservas de carbón para alrededor de 128 años sin considerar el descubrimiento de nuevas reservas o los avances en las técnicas mineras que permitirán alcanzar reservas previamente inaccesibles. Las reservas de carbón están disponibles en casi 70 países, aunque los mayores yacimientos están en los Estados Unidos, Rusia, China e India, siendo Asia la zona donde la producción de carbón ha crecido más rápidamente (Hester y Harrinson, 2018).

El mercado más grande para el carbón mineral es Asia, que actualmente representa el 75 % del consumo mundial, siendo China, Japón y Corea los más grandes importadores para la generación de electricidad y la producción de acero. Algo importante de resaltar es que no es solo la falta de carbón lo que impulsa a los países a importarlo, sino la importancia de obtener tipos específicos de éste como se vio en la Figura 1. Los principales productores de carbón como China, Estados Unidos e India, por ejemplo, también importan grandes cantidades de carbón por razones de calidad (Hester y Harrinson, 2018; British Petroleum Company, 2020).

El carbón y la crisis del medio ambiente

La crisis climática que estamos viviendo se debe principalmente al aumento de los gases de efecto invernadero como el dióxido

de carbono (CO_2), el metano (CH_4) y el óxido nitroso (N_2O). Dichos gases se encuentran naturalmente en la atmósfera y por millones de años han permitido la vida en la Tierra gracias al mantenimiento de una temperatura adecuada para los seres vivos. Es decir, sin los gases de efecto invernadero nos congelaríamos ya que éstos retienen el calor que nos llega del Sol. Sin embargo, la quema de combustibles fósiles como el carbón genera gases de efecto invernadero que, sumados a los ya existentes, están alterando el clima global con consecuencias irreversibles a la escala humana (Tarbuck y Lutgens, 2013).

A pesar de los usos y los avances que se han logrado con el uso del carbón, éste ha tenido y seguirá teniendo un oscuro rastro tras de sí de no tomar acciones respecto a los problemas que ocasiona. La minería del carbón, en particular la minería a cielo abierto requiere la alteración de grandes extensiones de tierra. Esto plantea una serie de desafíos ambientales, incluida la pérdida del suelo, la contaminación acústica y del agua, y los impactos en la biodiversidad local (Hester y Harrinson, 2018). La quema del carbón no sólo genera emisiones de CO_2 , ya que la minería subterránea produce CH_4 . La extracción, procesamiento y uso del carbón libera contaminantes como óxidos de azufre y nitrógeno (precursores de lluvia ácida) o partículas de mercurio que pueden provocar desórdenes neurológicos en humanos y animales (World Coal Institute, 2009). La producción de polvo por la extracción y procesamiento del carbón, por ejemplo, afecta también a la salud de las comunidades aledañas ya que aumenta el riesgo de asma, enfermedades cardíacas y cáncer.

Aunque muchos de estos efectos se

han tratado de controlar mediante nuevas tecnologías que permiten disminuir la emisión de contaminantes, muchos países, sobre todo aquellos en vías de desarrollo no cuentan con un marco legal que controle la extracción y el uso del carbón. Por otra parte, la minería del carbón es solo un uso temporal de la tierra, por lo que es vital que la rehabilitación del sitio se lleve a cabo una vez que las operaciones mineras hayan terminado. En las mejores prácticas, se diseña y ejecuta un plan de rehabilitación para cada mina de carbón, que cubre el período desde el inicio de las operaciones hasta mucho después de que la extracción ha terminado (Hester y Harrinson, 2018). Sin embargo, pocas veces se conocen los proyectos de adecuación del terreno afectado y con frecuencia las autoridades mineras y ambientales no hacen públicos los planes de trabajo, los estudios de impacto ambiental ni los programas de cierre de mina. Además, en la mayoría de los casos, tampoco hay acceso libre a toda la información que tienen las entidades públicas sobre impactos al ambiente o a la salud de la población.

¿Biocarbón?

El biocarbón es un producto sólido altamente estable que se obtiene cuando residuos orgánicos (por ejemplo, desechos animales, agrícolas, industriales, médicos, domiciliarios o de jardinería) se calientan a temperaturas relativamente bajas (entre 300 y 800 °C, aproximadamente) en un contenedor cerrado con poco o ningún aire dentro. Esta descomposición térmica se conoce generalmente como pirólisis y es similar al proceso usado en la producción de carbón vegetal. Sin embargo, el biocarbón se distingue por el hecho de que produce con la intención de aplicarse al suelo como

un elemento para mejorar sus propiedades, así como la productividad de los cultivos y el almacenamiento de carbono en el suelo (Lehmann y Joseph, 2009; Nanda *et al.*, 2016).

Aunque el carbón mineral y el biocarbón pueden ser similares en aspecto, ambos son muy distintos entre sí. Estas diferencias radican no sólo en el uso que ambos pueden tener, sino sobre todo en su génesis, es decir, la forma en que se producen. El carbón mineral se originó de residuos vegetales mediante procesos geológicos en escalas de tiempo de millones de años. El biocarbón, por su parte, se puede producir en cuestión de minutos, horas o inclusive días, dependiendo de las condiciones de la pirólisis (temperatura máxima alcanzada y tiempo de residencia dentro del reactor, principalmente) y a partir de distintos tipos de biomasa (Major, 2011).

Algo interesante del biocarbón es que en la cuenca del río Amazonas hay sitios llamados *terra preta* o tierra negra en portugués que, 1000 años después de su creación, siguen siendo más fértiles que las zonas circundantes. *Terra preta* es un tipo de suelo oscuro y muy fértil resultado de la modificación química de suelos preexistentes. Aunque no está claro su origen, se cree que la *terra preta* se formó involuntariamente a partir de los residuos carbonizados de asentamientos indígenas existentes antes de la llegada de los europeos (Lehmann y Joseph, 2009). Sin embargo, la producción de biocarbón bajo condiciones controladas para producir un mejorador del suelo a la medida de cada tipo de suelo es reciente, por lo que pocos agricultores y público en general han oído hablar de él.

Biocarbón en el suelo

Cuando el biocarbón se mezcla con el suelo, afecta significativamente sus propiedades físicas (retención de humedad, porosidad, compactación), químicas (pH, nutrientes) y biológicas (diversidad, riqueza y actividad de organismos como lombrices, hongos y bacterias). Estos efectos son debidos a las características del biocarbón que residen básicamente en su gran resistencia a la descomposición (decenas a centenas de años), alta porosidad y gran capacidad de retención de nutrientes y agua que mejoran las propiedades del suelo, lo que afecta positivamente su fertilidad y el crecimiento de las plantas y los microorganismos benéficos (Lehmann y Joseph, 2009).

En general, el biocarbón tiene un pH alcalino (≥ 7), lo cual ayuda a contrarrestar la acidez de algunos suelos que pueden presentar problemas por movilidad de aluminio o hierro. Aunque esta alcalinidad deriva principalmente de las condiciones de la pirólisis (altas temperaturas aumentan el pH del biocarbón, Fig. 2), existe la posibilidad de producir biocarbones ácidos ($\text{pH} < 6$), por lo que su aplicación puede extenderse al mejoramiento de suelos salinos y sódicos.

El biocarbón también presenta una alta capacidad de intercambio iónico. Esta propiedad le permite ser un adsorbente eficaz para nutrientes vegetales, lo cual puede representar ahorros significativos en el uso de fertilizantes. El biocarbón también puede retener o absorber materiales tóxicos como hidrocarburos y metales pesados. Éstos pueden ser inmovilizados en las superficies del biocarbón y por tanto se reduce el riesgo para plantas y microorganismos del suelo y se evita su desplazamiento y contami-

nación de otros sitios como cuerpos de agua.

Los efectos del biocarbón en el suelo dependen de parámetros como las características de los residuos (desechos animales como los estiércoles pueden aportar nutrientes como el fósforo o el nitrógeno) y de la pirólisis (temperatura y tiempo, principalmente) que afectan fuertemente las características del biocarbón como su composición y estabilidad (Figura 2). Asimismo, el mejoramiento del sitio depende de las características de los suelos en los que se use, las dosis empleadas o el manejo del sitio. Por lo que, los efectos de la adición de biocarbón pueden ser muy variables y cambiarán con al menos un elemento que se modifique (Major, 2011).

Otros usos del biocarbón

Además de ser un mejorador del suelo, el biocarbón tiene un alto potencial de escalamiento, ya que se podría emplear como sustrato en infraestructura de techos y muros verdes, purificador del agua y del aire tanto a nivel doméstico como industrial, combustible alternativo para la generación de electricidad o como componente de las baterías de litio, cuyas aplicaciones van desde vehículos eléctricos hasta dispositivos portátiles (Kumar *et al.*, 2020). El biocarbón también se ha usado como un aditivo para acelerar el proceso de compostaje, ya que puede mejorar la capacidad de almacenamiento de agua y la aireación de las pilas de composta y de esta forma reducir la emisión de gases de efecto invernadero como el CO_2 (Major, 2011). En el caso de la ganadería, el biocarbón se ha empleado en la alimentación para regular el equilibrio de nutrientes en el tracto intestinal del ganado. Finalmente, dentro de los usos más radicales se encuentra el de

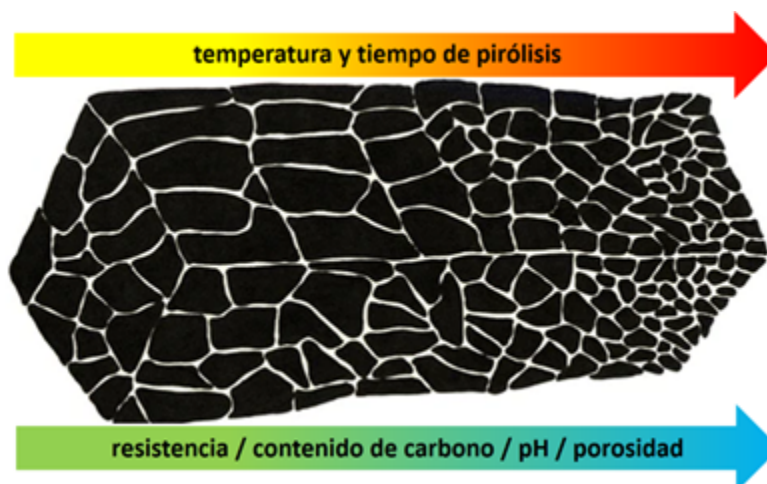


Figura 2. Representación gráfica de los efectos de la pirólisis en propiedades del biocarbón como la resistencia a la degradación o la cantidad de poros, los cuales aumentan con la temperatura y el tiempo que dure la pirólisis. Modificado de Nanda *et al.* (2016).

la construcción, ya que el biocarbón se ha propuesto como un sustituto del cemento (Kumar *et al.*, 2020).

¿Y el cambio climático?

Como se mencionó, uno de los problemas más graves que estamos enfrentando como humanidad es la crisis climática global debido al aumento de gases de efecto invernadero como el CO_2 . Al respecto, la adición de biocarbón al suelo se ha sugerido como un medio para secuestrar el CO_2 atmosférico. Para que esto sea significativo es necesario que el biocarbón sea más estable que la biomasa a partir de la cual se formó. Es importante recordar que el paso del CO_2 atmosférico a biomasa vegetal se produce mediante la fotosíntesis, proceso por el cual las plantas transforman la energía del Sol en materia orgánica o biomasa. Sin embargo, la biomasa vegetal que se forma normalmente se descompone en pocos días o meses, liberando a la atmósfera el CO_2 fijado por las plantas. Por el contrario, la transformación de esta

biomasa en biocarbón desvía el carbono del ciclo biológico rápido a un ciclo mucho más lento, lo que podría significar el secuestro del CO_2 en forma de carbono estable en el suelo (Figura 3) (Lehmann, 2007).

Además de su influencia en el secuestro del CO_2 , cuando se aplica biocarbón al suelo las emisiones de otros gases de efecto invernadero pueden disminuir. Esto es relevante ya que los suelos, principalmente los agrícolas, contribuyen con 25% de las emisiones antropogénicas de CO_2 , CH_4 y N_2O (IPCC, 2014). Al respecto, el biocarbón puede mejorar la aireación del suelo restringiendo los procesos anaeróbicos como la producción de CH_4 y N_2O . Así mismo, al afectar el pH, la disponibilidad de nitrógeno y la calidad de la materia orgánica disponible para los microorganismos, el biocarbón puede disminuir la actividad microbiana que forma tanto CH_4 como N_2O (Major, 2011).

Además de los beneficios al suelo, la

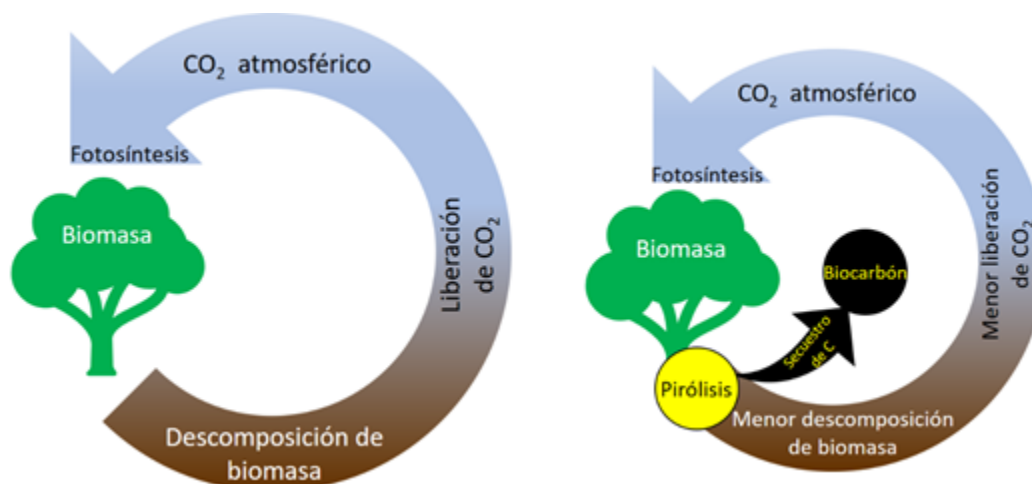


Figura 3. Ciclo del carbono (izquierda) y ciclo del biocarbón (derecha). Las plantas capturan el CO_2 atmosférico mediante la fotosíntesis. Al morir, la biomasa vegetal se descompone y libera el CO_2 . Mediante la pirólisis, una parte de esa biomasa puede convertirse en biocarbón. Al ser un material más estable, el biocarbón permite el secuestro del carbono y se pueden reducir las emisiones de CO_2 a la atmósfera. Modificado de Lehmann (2007).

producción de biocarbón puede favorecer la revalorización de desechos orgánicos, ya que prácticamente cualquier residuo orgánico puede ser usado para producir este compuesto. Esto se puede ver reflejado en: a) mayor facilidad de manejo, ya que el volumen de los residuos disminuye considerablemente (aproximadamente de 30 a 50%), b) eliminación de compuestos tóxicos que son destruidos durante la pirólisis, y c) reducción de la contaminación ambiental en zonas con problemas de exceso de basura como las grandes ciudades, donde el mal procesamiento de la basura también contamina suelos, agua y aire. Asimismo, la pirólisis puede generar gases y líquidos de valor calorífico que pueden ser aprovechados en otros procesos como la misma producción de biocarbón (Lehmann y Joseph, 2009; Nanda *et al.*, 2016).

Debido a esta revalorización de residuos, el

biocarbón puede tener implicaciones en el desarrollo de una economía circular cuyo objetivo es promover la optimización de recursos, reducir el consumo de materias primas y aprovechar los desechos (Graziani, 2018). Por ejemplo, en la agricultura, el biocarbón puede integrarse en: i) prácticas de tratamiento de residuos de poda, cosecha o ganado en el mismo sitio de su generación; ii) temas de seguridad alimentaria al potencialmente incrementar la fertilidad y biodiversidad de los suelos, eficientizar el uso del agua y los fertilizantes y en general aumentar la producción agrícola y iii) la problemática del cambio climático mediante la captura de carbono y disminución de gases de efecto invernadero por parte del suelo. Sin embargo, los esfuerzos por producir y usar el biocarbón se han centrado mayoritariamente en países de mayores ingresos como China, Estados Unidos, Australia o Alemania, siendo escasa

la investigación que se ha desarrollado en países como México.

Efectos secundarios

No todo es color de rosa con el biocarbón, ya que se han documentado varios impactos negativos, atribuidos a cuestiones como (Lehmann y Joseph, 2009; Xiang et al., 2021):

- menor disponibilidad de humedad debido a la alta retención de las moléculas del agua por parte del biocarbón
- baja fertilidad debido a la inmovilización de nutrimentos como el nitrógeno
- mayor emisión de gases de efecto invernadero (CH_4 , CO_2 o N_2O)
- aumento del pH y salinidad del suelo
- movilización del biocarbón durante y después de su aplicación al suelo con el riesgo de contaminación de cuerpos de agua cercanos o inclusive mantos freáticos, donde el efecto del biocarbón no ha sido estudiado a detalle
- aporte de contaminantes, algunos formados durante el proceso de pirólisis (hidrocarburos aromáticos policíclicos) o derivados de la materia prima (metales pesados) con que se produjo el biocarbón y que pueden inducir una toxicidad aguda para los microorganismos y la vegetación
- movilización de contaminantes ya presentes en el suelo como el arsénico por cambio en las condiciones de acidez y alcalinidad del suelo
- efectos adversos en el sistema respiratorio debido a la entrada al cuerpo de

partículas finas del biocarbón, representando una amenaza a la salud humana y animal

- cambios en la diversidad y riqueza de las comunidades de bacterias y hongos del suelo por alteraciones en su entorno y metabolismo
- aumento de la contaminación del aire, ya que las partículas pequeñas y ligeras de biocarbón pueden ingresar fácilmente a la atmósfera en condiciones naturales de viento, lo que resulta en una mayor concentración de PM_{10} (partículas cuyo diámetro es menor que $10\ \mu\text{m}$).

Otra cuestión que puede obstaculizar el uso del biocarbón es el hecho de que la pirólisis convencional emplea combustibles que pueden generar contaminantes como CO_2 o dioxinas y furanos que son precursores de enfermedades como el cáncer. Por lo que el uso y desarrollo de tecnología que emplee energías renovables y limpias son primordiales para que el biocarbón realmente sea producido de forma sustentable. Asimismo, la producción de biocarbón puede ser costosa dependiendo del tipo de tratamiento térmico que se aplique, por lo que, aun existiendo residuos que puedan ser carbonizados, el procesamiento puede no ser costeable. Aunado a esto, puede haber costos adicionales relacionados con el transporte del biocarbón desde el sitio de producción hasta el sitio de aplicación. Por lo que sería recomendable la transferencia de la tecnología de producción a los usuarios finales, es decir, a los agricultores. De esta forma, se podrían carbonizar los residuos en el mismo sitio donde van a ser usados.

Finalmente, debido a que el biocarbón puede durar años (posiblemente siglos),

una vez en el suelo difícilmente se podrán revertir los efectos indeseables que esté produciendo. De ahí que la caracterización (ya que como mencionó sus propiedades pueden variar considerablemente) y los estudios a mayor escala y a largo plazo son esenciales antes de recomendar y aplicar el biocarbón masivamente. Además, tanto la producción como su uso deben contar con parámetros y normatividad que permitan identificar y revertir potenciales riesgos al suelo, a la salud humana y al ambiente en general.

Conclusiones

Ambos tipos de materiales carbonosos han demostrado ser eficientes en su uso y tener un amplio potencial. Sin embargo, tanto el carbón mineral como el biocarbón pueden traer consigo problemas al ambiente o a la salud pública no reversibles. En el caso del carbón mineral, es evidente que la extracción y uso continuarán, por lo que es necesario vigilar y mejorar las prácticas involucradas en cada etapa de su ciclo, para aminorar o evitar en lo posible la degradación del ambiente. Afortunadamente, con la reciente Conferencia de las Naciones Unidas sobre Cambio Climático (la COP26) más de 40 países se comprometieron a ampliar la energía limpia y garantizar una transición justa para abandonar el uso del carbón en las próximas décadas (ONU, 2021).

En cuanto al biocarbón, los beneficios al suelo, la reducción de basura orgánica y la generación de energía durante la pirólisis hacen atractiva la producción de este mejorador del suelo, ya que otro tipo de procesamiento de residuos, como el compostaje, no producen energía utilizable o no pueden ser empleados en cuestiones como la purificación del agua y

el aire. Sin embargo, su uso no puede ser generalizado, ni puede considerarse como la piedra angular en la recuperación de suelos degradados o mejoramiento de zonas de cultivo, ya que como se mencionó, los efectos varían dependiendo del suelo y del tipo de biocarbón.

Referencias

British Petroleum Company, *Statistical Review of World Energy 2020*, 69th edition, 2020, 65 p.

Comisión Nacional para el Uso Eficiente de la Energía (CONUEE), *Lista de combustibles 2020 que se considerarán para identificar a los usuarios con un patrón de alto consumo, así como los factores para determinar las equivalencias en términos de barriles equivalentes de petróleo*, Disponible en: https://www.conuee.gob.mx/transparencia/boletines/SITE/LISTA_DE_COMBUSTIBLES_2020.pdf, (consultado 15 de junio de 2021).

Graziani, P., *Economía circular e innovación tecnológica en residuos sólidos: Oportunidades en América Latina*, Banco de Desarrollo de América Latina, 2018, 90 p. Disponible en: https://scioteca.caf.com/bitstream/handle/123456789/1247/Economia_circular_e_innovacion_tecnologica_en_residuos_solidos_Oportunidades_en_America_Latina.pdf?sequence=9&isAllowed=y (fecha de consulta: 25 de noviembre de 2021).

Hester, R.E. y Harrison, R.M. (eds.), *Coal in the 21st century. Energy needs, chemicals and environmental controls*, Royal Society of Chemistry, *Issues in Environmental Science and Technology*, 45, 224 p, 2018.

- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), 2014: *Summary for Policymakers*. In: Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 30 p, 2014.
- Kumar, A., Anand, A. y Kausha, P., Production, activation, and applications of biochar in recent times. *Biochar* [2], pp. 253–285, 2020.
- Lehmann, J., A handful of carbon, *Nature* 447[7141], pp. 143–144, 2007.
- Lehmann, J. y Joseph, S. (eds.), *Biochar for environmental management: science and technology*, Earthscan, London, 2009, 416 p.
- Macías, C., *El carbón. El recorrido de los minerales*. Comunidad de Madrid, España, 2007, pp. 43-59.
- Major, J., *Biochar for soil quality improvement, climate change mitigation and more. A literature review*, 2011. Disponible en: <https://www.gara.de/fileadmin/gara/Untersuchungen/BiocharSoilFertility.pdf> (fecha de consulta: 29 de noviembre de 2021).
- Mazumder, B., *Coal science and engineering*. Woodhead Publishing India, 2012, 459 p.
- Naciones Unidas (ONU). 2021. *La COP26 se cierra con un acuerdo climático "de compromiso", pero insuficiente, dice António Guterres*. Disponible en: <https://news.un.org/es/story/2021/11/1499972> (fecha de consulta: 27 de noviembre de 2021).
- Nanda, S., Dalai, A.K., Berruti, F. y Kozinski, J.A., Biochar as an Exceptional Bioresource for Energy, Agronomy, Carbon Sequestration, Activated Carbon and Specialty Materials, *Waste and Biomass Valorization* 7, pp. 201–235, 2016.
- Tarbutck, E.J. y Lutgens, F.K., *Ciencias de la Tierra. Una introducción a la geología física*, Pearson Educación S. A., Madrid, 2013, 880 p.
- Xiang, L., Liu, S., Ye, S., Yang, H., Song, B., Qin, F., Shen, M., Tan, C., Zeng, G. y Tan, X., Potential hazards of biochar: The negative environmental impacts of biochar applications. *Journal of Hazardous Materials* 420[126611], 2021.
- World Coal Institute, *The Coal Resource: A Comprehensive Overview of Coal*, World Coal Institute, London, 2009, 44 p.