

Biocarbón a partir de macroalgas: Potencial uso en remediación, enmienda de suelos y secuestro de carbono

Seaweed biochar: Potential use in soil remediation, amendment, and carbon sequestration

Loretto Contreras-Porcía^{1,2,3*}, Benjamín Pinilla-Rojas^{1,2,3}, Jorge Rivas⁴, Octavia Barra⁵, Cristóbal Girardi⁶, Rosanna Ginocchio^{2,6}, Nancy Pizarro⁷ y Jean Pierre Remonsellez¹

¹Centro de Investigación Marina Quintay (CIMARQ), Facultad de Ciencias de la Vida, Universidad Andres Bello, Santiago 8331150, Chile

²Center of Applied Ecology and Sustainability (CAPES), Santiago 8331150, Chile

³Instituto Milenio en Socio-Ecología Costera (SECOS), Santiago 8370251, Chile

⁴Centro Acuicola Pesquero de Investigación Aplicada (CAPIA), Facultad de Recursos Naturales y Medicina Veterinaria, Universidad Santo Tomás, Puerto Montt, Chile

⁵Gerencia de Sustentabilidad, Fundación Chile, Santiago, Chile

⁶Facultad de Agronomía y Sistemas Naturales, Pontificia Universidad Católica de Chile, Santiago, Chile

⁷Departamento de Ciencias Químicas, Facultad de Ciencias Exactas, Universidad Andres Bello, Viña del Mar, Chile

*Autor corresponsal: lorettocontreras@unab.cl

Abstract. This review presents the production and use of biochar in terms of definition, chemical structure, utilization, and current global market, with an emphasis on the biotechnological applications of seaweed biochar. For this purpose, a literature search was conducted in various databases, using keywords and algorithms in both Spanish and English. The results indicate that biochar from seaweed is an efficient alternative for the remediation of terrestrial and/or aquatic ecosystems. The capacity to capture different types of pollutants (microplastics, heavy metals, polycyclic aromatic hydrocarbons, among others) provides biochar properties that make it an appropriate material for environmental remediation, including the reduction of greenhouse gas emissions. The co-production of biochar and bioenergy is an alternative to mitigating the effects of climate change, displacing the use of fossil fuels and sequestering carbon in stable soil reserves. In addition, the use of biochar as a soil amendment and fertilizer is a significant tool for increasing food security and expanding crop areas in zones with physically and chemically degraded soils, characterized by low organic matter content, inadequate chemical fertilizer content, poor water retention and toxicity from pollutants. Therefore, the use of seaweed biochar is an environmental tool with high added value.

Key words: Biochar, sustainability, soil amendment, remediation, carbon sequestration

Resumen. Esta revisión presenta la producción y uso del biocarbón en los aspectos de definición, estructura química, utilización y mercado global actual, con énfasis en las aplicaciones biotecnológicas del biocarbón de macroalgas marinas. Para esto se realizó una búsqueda bibliográfica en diversas bases de datos, utilizando palabras claves y algoritmos en español como en inglés. Los resultados indican que el biocarbón proveniente de macroalgas marinas es una eficiente alternativa para la remediación de ecosistemas terrestres y/o acuáticos. La capacidad de captura de diferentes tipos de contaminantes (microplásticos, metales pesados, hidrocarburos aromáticos policíclicos, entre otros) proporciona al biocarbón propiedades que establecen que sea un material apropiado para la remediación ambiental, incluyendo la reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero. La coproducción de biocarbón y bioenergía es una alternativa para aminorar los efectos del cambio climático, desplazando el uso de combustibles fósiles y secuestrando carbono en reservas estables del suelo. Adicionalmente, el uso del biocarbón como enmienda de suelos y fertilizantes, es una herramienta significativa para acrecentar la seguridad alimentaria y aumentar las áreas de cultivo en zonas con suelos degradados física y químicamente, caracterizados por bajo contenido de materia orgánica, inadecuados contenidos de fertilizantes químicos, deficiente retención de agua y toxicidad por contaminantes. Por lo tanto, el uso del biocarbón de macroalgas es una herramienta ambiental de alto valor agregado.

Palabras clave: Biocarbón, sustentabilidad, enmienda de suelo, remediación, secuestro de carbono

Información del artículo

Recibido: 21/08/2024

Aceptado: 16/01/2025

Editor responsable: Pilar Muñoz Muga

La revisión por pares es responsabilidad del equipo editorial

RBMO-UV y en modalidad doble ciego

Como citar en estilo RBMO

Contreras-Porcía L, B Pinilla-Rojas, J Rivas, O Barra, C Girardi, R Ginocchio, N Pizarro & JP Remonsellez. 2025. Biocarbón a partir de macroalgas: Potencial uso en remediación, enmienda de suelos y secuestro de carbono. Revista de Biología Marina y Oceanografía 60(1): 1-13. <<https://doi.org/10.22370/rbmo.2025.60.1.5379>>

INTRODUCCIÓN

El biocarbón es el producto de la descomposición térmica de materiales orgánicos (biomasa) en su gran mayoría desde desechos vegetales, con escaso o limitado suministro de oxígeno, a temperaturas relativamente bajas (inferiores a los 700 °C) (Ok *et al.* 2016) y se puede definir como “un material sólido obtenido de una conversión termoquímica de biomasa en un ambiente limitado de oxígeno” (Escalante-Rebolledo *et al.* 2016). La composición química del biocarbón puede ser muy similar a la del carbón utilizado como combustible, y la



principal diferencia entre ambos radicaría en el objetivo para el cual fueron producidos (Schahczenski 2010). Sin embargo, el biocarbón presenta una mayor relación oxígeno:carbono (O:C) debido al proceso al cual se somete en su producción. En contraste, las transformaciones del carbón mineral ocurren a escalas geológicas, lo que reduce significativamente su contenido de oxígeno.

Numerosos estudios sugieren que los componentes del biocarbón son altamente recalcitrantes en los suelos, aunque una parte puede ser oxidada a CO₂; esto es, que resisten la oxidación química y biológica que ocurre naturalmente en los suelos, por lo que su tiempo de residencia es de cientos a miles de años; al menos de 10 a 10 mil veces mayor que los tiempos de residencia de la mayoría de la materia orgánica del suelo. Esta propiedad infiere su uso para aportar a reducir el exceso de CO₂ ambiental al secuestrarlo en los suelos (Woolf *et al.* 2010, Escalante-Rebolledo *et al.* 2016). Aunque es posible generar biocarbón a partir de distintas biomásas de origen vegetal, se han comenzado a describir nuevas alternativas de producción del biocarbón a través de biomasa de macroalgas marinas, las que presentan propiedades que permiten elaborar un biocarbón con variadas propiedades de uso, las cuales incluyen la enmienda de suelos y remediación (Araya *et al.* 2021, Dang *et al.* 2023, Ginocchio *et al.* 2023). Sin embargo, son pocos los trabajos que entregan información global de las características y usos posibles de este biomaterial cuando es generado a partir de macroalgas marinas (*e.g.*, Dang *et al.* 2023). En este contexto, el objetivo de esta revisión ha sido presentar el desarrollo temático relacionado con el biocarbón con énfasis en su producción, estructura química, utilización, particularmente en el obtenido a partir de algas marinas y en el estado actual del mercado global.

METODOLOGÍA

Se realizó una revisión bibliográfica utilizando las bases de datos electrónicas Google Scholar, Scopus y Web of Science (WOS). La búsqueda se basó en las siguientes palabras claves y algoritmos tanto en español como en inglés: i) biocarbón o char y algas o macroalgas, ii) suelo y agua o enmienda y agua de mar y iii) secuestro de carbono o gases de efecto invernadero. No se incluyó un filtro al año de la publicación. Para analizar el mercado del biocarbón, se realizó una revisión bibliográfica en las bases de datos ScienceDirect, ProQuest, EBSCO y OECDiLibrary, utilizando las siguientes palabras claves en inglés y español: i) mercado de biocarbón, ii) precio de biocarbón y iii) modelo de biocarbón, para publicaciones a contar del 2020. Finalmente, se determinó la elegibilidad de las publicaciones de acuerdo con los objetivos de este trabajo, empleando como criterio la pertinencia de la información contenida en los artículos de manera que permitieran robustecer los argumentos y el contenido de la investigación.

DESARROLLO TEMÁTICO

CARACTERÍSTICAS DEL BIOCARBÓN

El biocarbón, una vez producido, experimenta cambios químicos y estructurales durante los procesos de “envejecimiento” a través del tiempo (Cheng & Lehmann 2009), lo que modifica sus propiedades físicas y químicas. Cada partícula de biocarbón consiste en dos fracciones estructurales principales, láminas juntas de grafeno cristalino y estructuras aromáticas amorfas ordenadas (Fig. 1), ambas asociadas con enlaces de carbono en forma de anillos aromáticos con oxígeno o hidrógeno. Estos enlaces entre estructuras aromáticas de C–O y C–H gobiernan la estabilidad del biocarbón y son usados para medir su grado de aromaticidad. Además, poseen estructuras de carbono oxidadas y alifáticas muy fácilmente degradables (*e.g.*, Hammes *et al.* 2006, Lehmann & Joseph 2009).

La composición química de los biocarbones es muy variable y depende del tipo de biomasa de origen. El nitrógeno de la biomasa original puede no estar disponible, ya que, dependiendo del origen de la biomasa, este elemento puede presentar una fuerte afinidad por parte del biocarbón, respecto al suelo donde puede aplicarse. Por otro lado, el fósforo generalmente es conservado durante la volatilización de moléculas orgánicas asociadas y está presente como cenizas dentro del biocarbón, las que al solubilizarse lo dejan disponible para las plantas (Mašek & Brownsort 2011). Estudios de caracterización de biocarbones han consignado reacciones donde el pH varía de ácido a alcalino, con una media de 8,1 y un intervalo de entre 6,2 y 13. En cuanto a la capacidad de intercambio catiónico (CIC) ésta es muy variable, debido a su química superficial y dependiendo del contenido de carbono (grupos carboxílicos) (Chan & Xu 2009). El biocarbón es capaz de adsorber fuertemente aniones fosfato, debido a que las cargas superficiales del biocarbón pueden ser positivas, principalmente en los biocarbones recién preparados (Luo *et al.* 2023). En efecto, recientemente se demostró que el biocarbón obtenido de *Ulva intestinalis* puede absorber iones fosfato hasta un 83,4% en solución (Niedzbala *et al.* 2024).

El biocarbón puede presentar valores elevados de la relación carbono:nitrógeno (C:N). Cuando esta relación es alta, como ocurre en materiales leñosos ricos en lignina, la liberación de nitrógeno disponible para las plantas y los microorganismos disminuye o incluso puede ser nula, debido a la baja degradabilidad del material (Escalante-Rebolledo *et al.* 2016). Debido a su recalcitrancia, el uso del biocarbón como mejorador de suelos no conlleva un aumento de carbono lábil, la relación C:N efectiva no aumenta, por lo que no se tiene un efecto adverso en la asimilación de nitrógeno por las plantas (Kimetu *et al.* 2008).

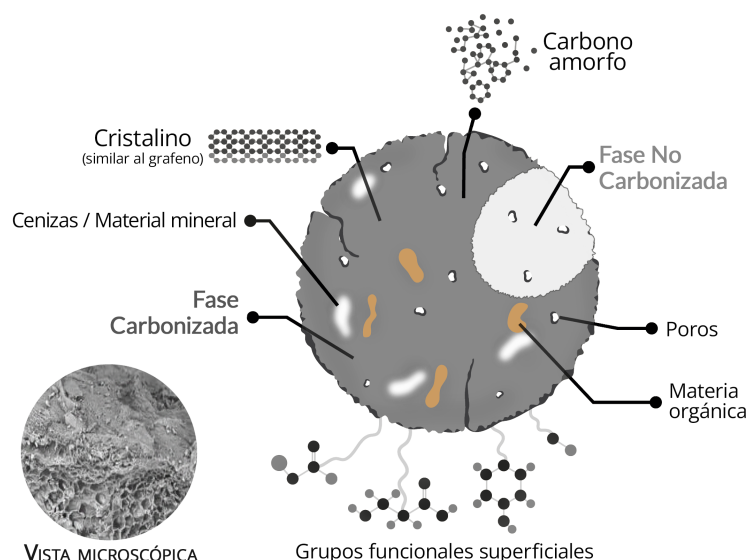


Figura 1. Esquema del biocarbón y su contenido (modificado de Ok *et al.* 2016) / Biochar scheme and its content (modified from Ok *et al.* 2016)

A medida que avanza el envejecimiento del biocarbón se generan más cargas negativas que positivas, por lo cual, se incrementa la acidez superficial con el consecuente decrecimiento de la basicidad (Cheng & Lehmann 2009). Los cambios en las cargas superficiales del biocarbón están correlacionados muy fuertemente con el tiempo y temperaturas anuales medias. Los biocarbones maduros presentan mayor CIC que los jóvenes, por su contacto con el oxígeno y agua (Cheng *et al.* 2008). La CIC se reduce conforme a la disminución del pH del biocarbón; así los valores de CIC son bajos a pH bajo y se incrementan a pH alcalinos.

Los procesos de transformación de la biomasa se agrupan en tres grandes grupos: bioquímicos por acción microbiológica, termoquímicos por procesos térmicos y fisicoquímicos. Los procesos térmicos se clasifican en pirólisis, gasificación, combustión y licuefacción, y se producen diferentes fracciones; sólidas, líquidas y gaseosas (Ok *et al.* 2016, Afanasjeva *et al.* 2018).

OBTENCIÓN DE BIOCARBÓN A PARTIR DEL PROCESO DE PIRÓLISIS

La pirólisis es el proceso de degradación térmica en vacío, o en presencia de un gas inerte, y con ausencia de gases reductores u oxidantes (Boateng 2020). En el mecanismo de pirólisis se produce la descomposición de la materia orgánica, generándose una mezcla de productos (tar), constituida por una fracción sólida (char-biochar), una líquida (aceite-bioaceite) y otra gaseosa (gas-biogás), a través de un proceso endotérmico (Montoya *et al.* 2014, Afanasjeva *et al.* 2018) (Fig. 2).

La clasificación de los procesos de pirólisis considera varios criterios, los principales se asocian a la velocidad y temperatura máxima a la cual se calienta la muestra (Afanasjeva *et al.* 2018, Bastidas & Miño 2019, Boateng 2020); de esta forma, la pirólisis se clasifica en:

- **Pirólisis rápida o flash:** Es un proceso rápido y continuo que busca la producción de combustible líquido a partir de biomasa. Durante la etapa de enfriamiento y condensación, se forma un líquido de color marrón oscuro (bioaceite), con rendimientos cercano al 75%. Para realizar la pirólisis flash es necesario contar con reactores especiales con una atmósfera sin oxígeno y un rango de temperaturas entre 400 y 950 °C.
- **Pirólisis intermedia:** El proceso se lleva a cabo entre 300 y 500 °C. Las reacciones químicas son fáciles de controlar debido a sus condiciones de operación y se pueden obtener rendimientos de hasta el 55% del bioaceite. Se caracteriza por permitir alimentaciones con grandes tamaños de partícula, ya sea gruesa, triturada o trozada.
- **Pirólisis lenta:** Es un proceso que se lleva a cabo entre los 300 y 700 °C, con velocidades de calentamiento lentas y tiempos de reacción que van desde horas hasta días. Las condiciones de este proceso permiten la obtención de productos gaseosos, líquidos y sólidos, sin embargo, su objetivo principal es la producción de un material sólido mediante carbonización. El rendimiento del biocarbón puede ser sobre el 35%.

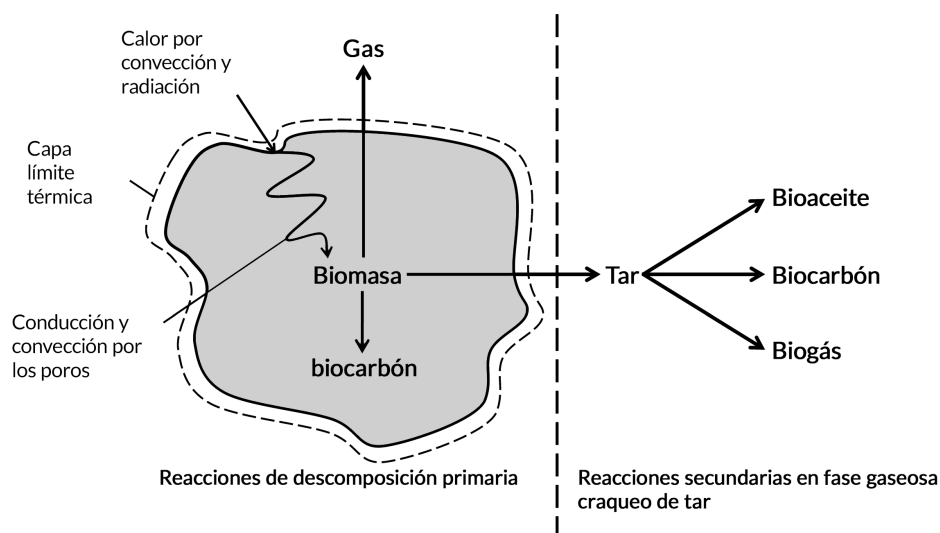


Figura 2. Esquema general del proceso de pirólisis en biomasa y productos obtenidos. Tar refiere a una mezcla de productos, constituida por una fracción sólida (biocarbón), una líquida (bioaceite) y otra gaseosa (biogas) (Fuente: Montoya *et al.* 2014) / General scheme of the pyrolysis process in biomass and obtained products. Tar refers to a mixture of products, consisting of a solid fraction (biochar), a liquid fraction (bio-oil) and a gaseous fraction (gas) (Source: Montoya *et al.* 2014)

- **Torrefacción:** Es un proceso realizado entre 225 y 300 °C, con el objetivo de aumentar la densidad de energía y propiedades de la biomasa.
- **Hidropirólisis:** Es un proceso en que las reacciones se producen bajo presiones de hidrógeno, que minimiza la formación de radicales libres.

Para la obtención de biocarbón, desde el proceso de pirólisis, Urien (2013) establece tres etapas generales:

Biomasa → agua + residuo no reactivo

Residuo no reactivo → compuestos volátiles y gases + biocarbón (1)

Biocarbón (1) → compuestos volátiles y gases + biocarbón (2)

La primera etapa implica pérdida de humedad por la eliminación de agua desde la biomasa (25-200 °C), posteriormente la descomposición de carbohidratos, y proteínas (200-350 °C), lípidos (350-500 °C) y luego componentes remanentes como alcanos que son moléculas con n-C30, los cuales se pueden transformar en cadenas alifáticas más cortas (Petersen *et al.* 2024). Esto da por resultado una mezcla compuesta por el biocarbón, bioaceites, líquidos pirolíticos o aceites biocombustibles (fracción líquida) y gases como metano, hidrógeno, etano, propano, buteno (fracción gaseosa), la cual se aprovecha como combustible en el mismo proceso de pirólisis (Urien 2013). A mayor temperatura en los procesos de pirólisis, aumenta la proporción relativa de carbono aromático por la pérdida de compuestos volátiles y se lleva a cabo la

conversión de carbonos, de oxialquilos a arilos y oxiarilos cuyas estructuras son semejantes a la del furano (Baldock & Smernik 2002). Las láminas de grafeno poliaromático comienzan a crecer lateralmente a 330 °C, sustituyendo a la fase de carbono amorfo. A 600 °C, el proceso de carbonización es dominante, eliminando la mayoría de los átomos que no son de carbono, como Ca, Mg, K, del material original, lo que aumenta la proporción de carbono (Escalante-Rebolledo *et al.* 2016).

La composición de la fracción sólida (biocarbón) depende de la fuente de biomasa, pero esta puede contener compuestos con diferentes grupos funcionales (aldehídos, alcoholes, ácidos, cetonas, éteres, hidrocarburos, compuestos alifáticos y oxigenados) (Singh *et al.* 2017). El tamaño de sus partículas depende del material original. El biocarbón es altamente poroso y suele compararse con un “arrecife subterráneo”, ya que proporciona un hábitat adecuado para diversos microorganismos. Además, presenta una baja densidad (0,30-0,43 g cm⁻³) y una elevada área superficial (200-400 m² g⁻¹) (Escalante-Rebolledo *et al.* 2016).

Para determinar y caracterizar el biocarbón se realiza un análisis proximal, mediciones de humedad, material volátil, contenido de cenizas, porcentaje de carbono, hidrógeno, oxígeno, y nitrógenos totales, porcentaje de carbono orgánico, análisis termogravimétrico, y análisis espectroscópico, entre otros (*e.g.*, Bird *et al.* 2011, Singh *et al.* 2017, Araya *et al.* 2021). El análisis físico-químico permite entonces definir sus posibles usos.

PRINCIPALES USOS DEL BIOCARBÓN

Según lo descrito en la literatura (*i.e.*, Ahmad *et al.* 2014, Jeffery *et al.* 2015, Olmo 2016, Hepburn *et al.* 2019), son cuatro los principales usos descritos para la producción de biocarbón. El primero tiene relación con su potencial para reducir las emisiones de CO₂, actuando como sumidero de C y aportando así a la mitigación del cambio climático. Otro uso importante es aportar a la gestión adecuada y valorización de residuos orgánicos. Adicionalmente, su uso como enmienda de suelos agrícolas y degradados es de alta relevancia para mejorar características fisicoquímicas de los suelos, lo que permite, por ejemplo, reducir la necesidad de uso de fertilizantes químicos, aportar en la mitigación de emisiones de óxidos de nitrógeno desde el suelo y mitigación de contaminantes. De acuerdo a Hepburn *et al.* (2019), si la aplicación de biocarbón condujera a un aumento del rendimiento de la biomasa tropical en un 25%, la reducción asociada de las necesidades de tierras equivaldría a 185 millones de hectáreas, y daría lugar a un beneficio neto acumulativo de emisiones acumuladas de 180 Gt de CO₂ hasta 2100.

La iniciativa internacional del biocarbón (IBI), establecida en el 2006, tiene como objetivo fomentar la colaboración entre las partes interesadas, las buenas prácticas de la industria y las normas medioambientales y éticas para apoyar sistemas de biocarbón que sean seguros y económicamente viables. En este contexto, el uso del biocarbón de macroalgas puede seguir estos lineamientos de colaboración y prácticas socio-ecológicas ambientales. Los principales lineamientos de aplicaciones del biocarbón en general serían:

Contribuir a resolver la crisis mundial de seguridad alimentaria y garantizar la seguridad del suelo con el uso de biocarbón para:

- Mejorar la fertilidad del suelo y productividad de los cultivos y agro-silvicultura
- Aumentar la fertilidad de los suelos degradados y marginales
- Mejorar la mitigación y adaptación al cambio climático en los sistemas agrícolas

Contribuir a resolver la crisis mundial del cambio climático con el uso del biocarbón para:

- Reducir de forma segura y eficaz las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) en sumideros estables en el suelo
- Aliviar las emisiones de GEI asociadas a la descomposición de residuos de origen urbano y rural
- Compensar el uso de combustibles fósiles mediante bioenergía y bioproductos de alto valor

Contribuir a que la producción agrícola a todas las escalas sea más sostenible mediante:

- El mantenimiento de la producción con menores insumos de fertilizantes químicos
- Reciclando de forma más productiva los materiales de desechos agrícolas y orgánicos, y ayudando a la recuperación de tierras
- Propiciar la seguridad hídrica mediante la mejora de la retención de agua en el suelo y el aumento de la calidad del agua, a través de la reducción de la lixiviación de nutrientes hacia cuerpos y reservas de agua (IBI 2022)¹

Según diversos estudios, la aplicación de biocarbón ha demostrado importantes beneficios medioambientales, como la mejora de las propiedades fisicoquímicas y biológicas de los suelos y un aumento significativo del crecimiento de las plantas y del rendimiento de los cultivos (Roberts *et al.* 2015, Ok *et al.* 2016, Lian *et al.* 2023). El biocarbón constituye un sustituto económicamente viable del carbón activado para la eliminación de contaminantes inorgánicos y orgánicos en suelos aguas (Singh *et al.* 2021, Hung *et al.* 2022, Ginocchio *et al.* 2023, Jagadeesh & Sundaram 2023, Wang *et al.* 2023a, b; Mondal *et al.* 2024a), ya que se puede producir a partir de diversas fuentes de biomasa de alta volatilidad (*e.g.*, Araya *et al.* 2021). En este sentido, las interrelaciones entre las aplicaciones del biocarbón y las áreas de estudio y de utilización son amplias y complejas, lo que se traduce en un alcance considerable de sus potencialidades (Fig. 3) (Ok *et al.* 2016).

UTILIZACIÓN DEL BIOCARBÓN PRODUCIDO A PARTIR DE LA BIOMASA DE MACROALGAS MARINAS

Una de las características de las aplicaciones que puede tener el biocarbón producido a partir de algas marinas es la obtención de un nuevo valor agregado diferente al valor económico y ecosistémico que existe actualmente en la mayoría de los biocarbones. De esta forma se han preparado biocarbones desde diferentes macroalgas o desde residuos de macroalgas de procesos industriales (Putri *et al.* 2024), los cuales difieren en la concentración de sus componentes y por ende en sus propiedades fisicoquímicas, pudiendo ser utilizados en diversas aplicaciones (Farobie *et al.* 2024, Mondal *et al.* 2024b). Este material es un buen adsorbente de metales pesados y metaloides tanto en tierra como en agua. Por ejemplo, Liu *et al.* (2021) obtuvieron un biocarbón a partir de algas con una capacidad de adsorción de Cd (II) en solución acuosa de 135,7 mg g⁻¹, explicando el comportamiento a través del modelo de Langmuir y una cinética de pseudo segundo orden. Truong *et al.* (2022) estudiaron un biocarbón

¹IBI. 2022. International Biochar Initiative <<https://biochar-international.org/standard-certification-training/online-training/>>

obtenido desde *Sargassum hemiphyllum*, con el cual se logró la remoción desde solución acuosa de Cu(II), Ni(II), Zn(II) y Cd(II). Araya *et al.* (2021), utilizando biocarbón de *Macrocystis pyrifera*, determinaron una capacidad de adsorción acuosa de Cu²⁺ entre 58-94 mg g⁻¹, adsorción que es bien representada a través de un modelo de cinética de pseudo primer orden. En la macroalga *Kappaphycopsis cottonii* se determinó la alta adsorción del colorante azul de metileno, alcanzándose una adsorción máxima de 133,33 mg g⁻¹ (Saeed *et al.* 2020). El proceso de adsorción implicó el mecanismo de quimisorción, formando una monocapa de colorante azul de metileno en la superficie del biocarbón. Es, por tanto, que las investigaciones anteriormente mencionadas, indican el potencial uso del biocarbón de algas marinas para la remoción de estos metales pesados y moléculas orgánicas. Recientemente se demostró el beneficio de usar biocarbón producido a partir de *M. pyrifera* en suelos degradados en Puchuncaví, Chile central, una zona altamente contaminada por cobre y acidificada (Ginocchio *et al.* 2023). Particularmente, esta investigación evaluó las capacidades de inmovilización

de cobre en el suelo, neutralización del pH y mejora de nutrientes del biocarbón cuando se incorpora a un suelo degradado. Como el estado nutricional del suelo degradado era muy bajo, también se consideró el uso de vermicompost. Los suelos experimentales (suelo degradado del valle de Puchuncaví, el suelo anterior enmendado con biocarbón de *M. pyrifera* (B), vermicompost (H), o su mezcla (BH), y un suelo de fondo) se colocaron en macetas y se mantuvieron en un invernadero (4 semanas), posteriormente, se sembró ballica (*Lolium perenne*) y se cultivó hasta la semana 11. El suelo degradado enmendado con el biocarbón aumentó significativamente el pH del suelo, disminuyeron los iones Cu²⁺ y aumentó el nitrógeno disponible. En cuanto al crecimiento de las plantas, H y BH aumentaron significativamente la biomasa, pero el suelo enmendado con H mostró un mayor rendimiento debido a su mayor estado nutricional. Este trabajo concluyó que el biocarbón de *M. pyrifera* puede ser una enmienda eficaz para suelos degradados, aunque se debe considerar su combinación con una enmienda orgánica.

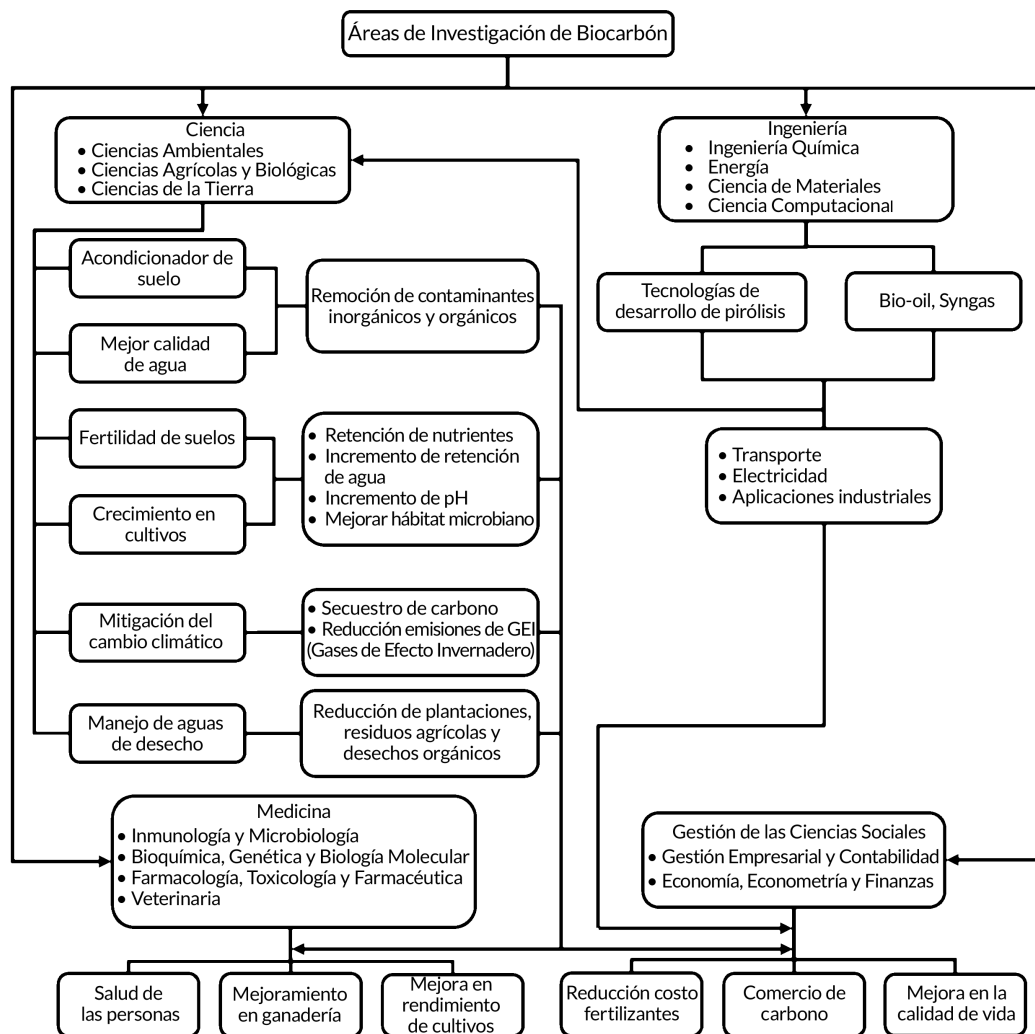


Figura 3. Interrelaciones entre el desarrollo del biocarbón y la economía, el medio ambiente y la sociedad (Fuente: Ok *et al.* 2016) / Interrelation between biochar development and the economy, the environment, and society (Source: Ok *et al.* 2016)

POTENCIAL DE REMEDIACIÓN DEL BIOCARBÓN ORIGINADO A PARTIR DE ALGAS MARINAS

El biocarbón producido de algas marinas puede ser utilizado en la remediación de ecosistemas terrestres y/o acuáticos, no solo removiendo metales pesados, sino también hidrocarburos aromáticos policíclicos (PAHs) y bifenilos policlorados (PCBs), incluso fertilizantes, microplásticos y antibióticos (*e.g.*, Singh *et al.* 2021, Hung *et al.* 2022, Jagadeesh & Sundaram 2023, Wang *et al.* 2023a, b; Mondal *et al.* 2024b). Esta capacidad para capturar diversos tipos de contaminantes posiciona al biocarbón como una herramienta potencial para la remediación ambiental (Wang *et al.* 2023b, Xia *et al.* 2023). Asimismo, es posible desarrollar productos que cumplan estas funciones y que, al mismo tiempo, sean accesibles para la población, aprovechando las propiedades del biocarbón. Uno de los productos que puede elaborarse a partir de biocarbón de algas es un filtro (Gwenzi *et al.* 2017), capaz de retener y tratar contaminantes presentes en productos de consumo humano, incluidos metales, contribuyendo así a reducir riesgos para la salud (Inyang & Dickenson 2015, Damania *et al.* 2019, Palansooriya *et al.* 2020). De esta manera, la producción de filtros basados en biocarbón generado a partir de biomasa de algas otorga un valor agregado al material, trascendiendo su utilidad ecológica o económica tradicional (Kandale *et al.* 2011, Abdel-Raouf *et al.* 2012).

POTENCIAL DE SECUESTRO DE CARBONO DEL BIOCARBÓN DE MACROALGAS

La elaboración de biocarbón a partir de algas mitigaría el CO₂ atmosférico y contribuiría a la reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero (Hepburn *et al.* 2019, Lian *et al.* 2023). Esto se debe a que el biocarbón estabiliza el carbono fijado por las algas transformándolo en un material de larga duración, lo que evita su retorno a la atmósfera como CO₂ (Sun *et al.* 2021). Además, su aplicación en suelos mejora sus propiedades físicas y químicas, favorece el crecimiento vegetal y promueve el almacenamiento adicional de carbono en los ecosistemas donde es aplicado (Roberts *et al.* 2015, Lian *et al.* 2023). No obstante, para asegurar su contribución a la mitigación del cambio climático, es fundamental evaluar todas las etapas de su ciclo de vida y garantizar que la producción y uso de este bioproducto no genere emisiones de carbono adicionales que contrasten los beneficios logrados. Por ejemplo, la fase de producción de biocarbón puede requerir un alto consumo de energía y su transporte a largas distancias también aumenta las emisiones, lo que

afectaría su huella de carbono general (Afshar & Mofatteh 2024). Durante los últimos años se ha propuesto que las macroalgas generan una contribución potencialmente significativa al secuestro global de carbono (Krause-Jensen *et al.* 2018, Farghali *et al.* 2023), esto es debido a su gran capacidad para absorber CO₂ del océano y a sus tasas de producción por unidad de superficie excepcionalmente elevadas (Pessarrodona *et al.* 2022). Además, las macroalgas forman los hábitats costeros con vegetación más extensos del océano a nivel mundial y se estima que cubren unos 3,4 millones de km², sustentando una producción primaria neta mundial de aproximadamente 1,5 pg de C al año (Krause-Jensen & Duarte 2016).

La productividad primaria asociada a los ecosistemas marinos y costeros forma parte fundamental del ciclo biogeoquímico de carbono a escala global (IPCC 2019)². En el caso de las macroalgas, el carbono en forma de biomasa no permanece estático en estos ecosistemas, sino que sigue diferentes rutas (Duarte & Cebrián 1996, Hobday 2000, Krumhansl & Scheibling 2012, Krause-Jensen & Duarte 2016), muy ligadas a su ciclo de vida y dinámica del ecosistema. Algunos de sus productos algales pueden servir como alternativas y sustituir a otros que generan emisiones intensivas de gases de efecto invernadero, o incluso suprimir estas emisiones (Fujita *et al.* 2023). Esto conlleva la posibilidad de retener carbono a largo plazo en un depósito fuera del ecosistema marino. El biocarbón es justamente uno de estos productos (Farghali *et al.* 2023), puesto que, al aplicarlo en suelos, el carbono que contiene queda retenido de forma segura por cientos de años (Sun *et al.* 2021), evitando su liberación a la atmósfera. Además, es una herramienta de almacenamiento de carbono con ventajas sustanciales para mejorar el potencial del suelo (Bird *et al.* 2011), ya que no solo funciona como enmienda de sitios contaminados, suelos degradados o de baja fertilidad (Roberts *et al.* 2015), sino que también mejora las propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo, y se puede utilizar como fertilizante, representando un beneficio para la actividad agrícola y vida vegetal (Lian *et al.* 2023, Bekchanova *et al.* 2024). Lo anterior se explica porque posibilita la retención de nutrientes esenciales (Adams *et al.* 2020) y humedad, principalmente en suelos arenosos (Razzaghi *et al.* 2020) y aumenta la diversidad microbiana de la rizosfera y reserva de carbono del suelo, aportando una mayor fijación de carbono a través de la fotosíntesis, por ende, una mejora del rendimiento de los cultivos agrícolas (Adams *et al.* 2020), y a la vez contribuyendo a la reducción de las emisiones netas de CO₂.

²IPCC. 2019. IPCC Special Report on the Ocean and Cryosphere in a Changing Climate. Chapter 5: Changing ocean, marine ecosystems, and dependent communities. Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), Geneva. <<https://www.ipcc.ch/srocc/>>

Lian *et al.* (2023) realizaron un balance de carbono a lo largo del ciclo de vida del cultivo de *Laminaria japonica* en la bahía de Ailian, China, y determinaron que la fuente total de absorción de carbono de las algas marinas ($982,53 \text{ gC m}^{-2} \text{ año}^{-1}$) es mayor que la fuente de emisión de carbono de las algas marinas ($884,8 \text{ gC m}^{-2} \text{ año}^{-1}$). De esta manera, su huella de carbono es negativa ($-1146,8$ toneladas de CO_2 anuales), es decir, pueden contribuir al carbono azul. Aunque se ha señalado el potencial de secuestro de carbono del biocarbón de macroalgas y se ha definido el proceso de pirólisis óptimo para obtener bioproductos de alta calidad, faltarían estudios exhaustivos que evalúen el balance de emisiones de gases de efecto invernadero de todo el proceso de producción de estos bioproductos a partir del cultivo de macroalgas (*e.g.*, Ly *et al.* 2015, Roberts *et al.* 2015, Norouzi *et al.* 2016, 2017; Contreras-Porcía *et al.* 2018, Wang *et al.* 2018, Lian *et al.* 2023, Alam *et al.* 2024). Además, se requiere mayor investigación en la cuantificación y verificación de los beneficios climáticos y socioeconómicos, como la huella ambiental asociada a su producción (Fujita *et al.* 2023). En ese contexto, Alam *et al.* (2024) evalúan las consecuencias medioambientales vinculadas al ciclo de vida completo de las biorrefinerías de macroalgas que producen lípidos, biodiesel, biocarbón y bioaceite, determinando que el consumo de energía y uso de ácido sulfúrico, cloroformo y otros productos químicos en el proceso son aspectos que generan impactos en la calidad de los ecosistemas y en la salud de las personas. Estos impactos se asocian al secado de la biomasa, extracción ácida de lípidos, transesterificación y procesos de pirólisis (Alam *et al.* 2024). Además, sugirieron que el impacto de los procesos está directamente influenciado por las cantidades y tipos de productos químicos utilizados, por lo que la adopción de productos químicos alternativos y seguros puede tener un impacto positivo en el ciclo de vida general y del medio ambiente (Alam *et al.* 2024). Por lo tanto, es crucial que los estudios en esta área se centren en la búsqueda de alternativas para disminuir la huella de carbono y evaluar los impactos ambientales generados por los procesos asociados a este tipo de iniciativas, desde el cultivo de las macroalgas hasta la elaboración del biocarbón.

MERCADO ECONÓMICO DEL BIOCARBÓN

En términos generales, la viabilidad económica del biocarbón, depende del producto y beneficios para el usuario. En el caso de la biomasa residual, los beneficios pueden incluir el aumento de la producción y reducción de las necesidades de fertilizantes, así como la estabilización

del carbono orgánico. Además, la producción y aplicación del biocarbón para la electricidad y gestión de residuos pueden ser económicamente viables. Adicionalmente, los sistemas de biocarbón contribuyen al desarrollo económico de las comunidades locales. En última instancia, esta combinación de cuidado del medio ambiente, economía y resultados sociales conduce a un desarrollo sostenible (Ok *et al.* 2016). En este mismo sentido, el biocarbón se alinea con los fundamentos de la economía circular (Yaashikaa *et al.* 2020, Seow *et al.* 2022, Donner & de Vries 2023) y la bioeconomía (European Commission 2012), promoviendo el uso de materias primas por mayor tiempo o bien entregarles un valor agregado a nuevos productos.

Para analizar el mercado del biocarbón es importante considerar el contexto dentro del cual se ha desarrollado a nivel mundial. En este sentido sus características distintivas, como su baja conductividad térmica, alta porosidad, gran superficie, renovabilidad, alta estabilidad, alto contenido en carbono y densidad aparente (Seow *et al.* 2022), sumado al uso de residuos de otros procesos como materia prima -los que se transforman en nuevos productos- le dan una amplia gama de ventajas medioambientales, que son altamente reconocidas como una ayuda para resolver los problemas existentes. El mercado mundial del biocarbón alcanzó los 1.700 millones de dólares en 2022 y se prevé que alcance los 3.470 millones en 2028 (IMARC Group)³. El precio de venta del biocarbón varía según el país, las materias primas utilizadas y los volúmenes de producción. En América Latina, los precios por tonelada oscilan entre US\$ 2.600 en Argentina, US\$ 1.700 en Perú, US\$ 2.949 en Colombia y US\$ 2.300 en Ecuador (Suasnavas 2023). En California, Estados Unidos, los precios oscilan entre US\$ 100 y US\$ 250 por tonelada (Elias *et al.* 2022), mientras que en Europa se sitúan entre US\$ 600 y US\$ 700 la tonelada (Buckland *et al.* 2021). Estas variaciones de precio dependen de la normativa de cada país, costes laborales y energéticos y distancia entre la fuente de biomasa y lugar de producción. Pero el precio del biocarbón también depende de las vías de síntesis (temperatura y tiempo) y materias primas utilizadas.

A pesar de las numerosas investigaciones sobre los usos del biocarbón y métodos de producción, el mercado aún no se ha consolidado debido a la falta de estandarización de los procesos y calidad del producto final, basado principalmente al contenido de C y otros derivados del carbono (cenizas, algunas azúcares, proteínas u otros compuestos orgánicos formados en el proceso) (Campion *et al.* 2023, Kurniawan *et al.* 2023, Marousek *et al.*

³IMARC. Biochar market size, share, and trends by feedstock type, technology type, product form, application, region, and forecast 2025-2033. Report ID: SR112025A1637. IMARC Group, Brooklyn. <<https://www.imarcgroup.com/biochar-market>>

2023). Haeldermans *et al.* (2020) realizaron un estudio comparativo tecno-económico y un análisis de riesgo de Monte Carlo para una planta de producción de tres toneladas de biocarbón por hora utilizando seis flujos de residuos diferentes, determinando que el precio mínimo de venta se situaría entre US\$ 453 y US\$ 897 por tonelada utilizando pirólisis convencional, mientras que para la pirólisis asistida por microondas, el precio se elevaría entre US\$ 586 y US\$ 1.017 por tonelada. Rizwan *et al.* (2023) afirman que el precio de venta de equilibrio para el biocarbón producido a 300 °C es de US\$ 220, mientras que para 450 °C es de US\$ 280. En ambos estudios, las evaluaciones económicas tienen en cuenta el coste de las materias primas y condiciones de pirólisis. Esto sería importante, ya que el cálculo del precio mínimo de venta del biocarbón varía considerablemente de un país a otro (Rex *et al.* 2023).

Debido a que uno de los costos importantes en la producción de biocarbón lo representa la biomasa y las condiciones en que se desarrolle la pirólisis, una forma de mejorar la rentabilidad en la producción de biocarbón sería por el uso de fuentes de biomasa de bajo costo junto con la adopción de tecnologías de procesamiento eficientes (Venkatesh *et al.* 2022). En este sentido, el uso de algas, y en particular de algas de cultivo (Fundación Chile)⁴ varadas o aquellas de mareas verdes como materia prima (e.g., caso de Chile, Algarrobo, Mutizabal-Aros *et al.* 2024), sería una oportunidad cierta para el desarrollo de esta industria, en la medida que se definan las condiciones óptimas de producción, tanto en términos de la calidad del producto final como de sus costos, sumado a una disponibilidad de biomasa que permita una producción continua. Ambos aspectos, de acuerdo a la bibliografía (Haeldermans *et al.* 2020, Campion *et al.* 2023, Kurniawan *et al.* 2023, Marousek *et al.* 2023), son fundamentales para que el mercado del biocarbón se logre consolidar e integrar en los mercados internacionales como un producto validado y competitivo.

CONCLUSIÓN

El biocarbón es un material sólido obtenido de una conversión termoquímica de biomasa en un ambiente limitado de oxígeno, y se caracteriza por ser un producto versátil y sostenible con un amplio espectro de aplicaciones, especialmente aquel obtenido desde algas marinas. Desde su capacidad para secuestrar carbono en una estructura recalcitrante, ayudando a reducir emisiones de CO₂, hasta su uso en la mejora de la calidad del

suelo y la remediación de contaminantes, este material ofrece beneficios significativos para el medio ambiente, economía y sociedad en general. Con el mercado del biocarbón experimentando un crecimiento constante, su potencial económico está en aumento. La variabilidad en los precios refleja las distintas condiciones, regulaciones y costos asociados con su producción y distribución en diferentes regiones del mundo. En este sentido, el uso de biomasa de algas como materia prima para la producción del biocarbón, tanto de aquellas provenientes de cultivo, varadas o de mareas verdes, sería una oportunidad cierta para el desarrollo del mercado de las algas marinas.

DECLARACIONES

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a los fondos otorgados para llevar a cabo esta investigación: Center of Applied Ecology and Sustainability (CAPES) ANID PIA/BASAL AFB240003 e Instituto Milenio en Socio-ecología Costera (SECOS) ICN 2019_015.

CONFLICTO DE INTERESES

Los autores declaran que no existen conflictos de intereses.

CONTRIBUCIÓN DE LOS AUTORES

Todos los autores contribuyeron a la investigación y preparación del manuscrito y participaron en editar la versión borrador y aprobar el manuscrito final.

FINANCIAMIENTO

ANID PIA/BASAL AFB240003 y ANID – Programa Iniciativa Científica Milenio – ICN2019_015 ICM-ANID, Instituto Milenio en Socio ecología Costera (SECOS).

USO DE HERRAMIENTA DE IA

No se utilizó herramienta de inteligencia artificial en este trabajo.

LITERATURA CITADA

- Abdel-Raouf N, AA Al-Homaidan & IBM Ibraheem. 2012. Agricultural importance of algae. African Journal of Biotechnology 11: 11648-11658. <<https://doi.org/10.5897/AJB11.3983>>
- Adams JMM, LB Turner, TA Toop, ME Kirby, C Roslin, E Judd, R Inkster, L McEvoy, WM Mirza, MK Theodorou & J Gallagher. 2020. Evaluation of pyrolysis chars derived from marine macroalgae silage as soil amendments. GCB Bioenergy 12(9): 706-727. <<https://doi.org/10.1111/gcbb.12722>>

⁴Fundación Chile. Iniciativa. Carbono azul. Acciones en pro del desarrollo de proyectos de almacenamiento y secuestro de carbono en Chile. <<https://fch.cl/iniciativa/carbono-azul/>>

- Afanasjeva N, LC Castillo & JC Sinisterra. 2018. Biomasa lignocelulósica. Parte II. Tendencias en la pirólisis de biomasa. *Journal of Science with Technological Applications* 5: 4-22. <<https://doi.org/10.34294/j.jsta.18.5.31>>
- Afshar M & S Mofatteh. 2024. Biochar for a sustainable future: Environmentally friendly production and diverse applications. *Results in Engineering* 23, 102433. <<https://doi.org/10.1016/j.rineng.2024.102433>>
- Ahmad M, AU Rajapaksha, JE Lim, M Zhang, N Bolan, D Mohan, M Vithanage, SS Lee & YS Ok. 2014. Biochar as a sorbent for contaminant management in soil and water: A review. *Chemosphere* 99: 19-33. <<https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2013.10.071>>
- Alam SN, B Singh, A Guldhe, S Raghuvanshi & KS Sangwan. 2024. Sustainable valorization of macroalgae residual biomass, optimization of pyrolysis parameters and life cycle assessment. *Science of the Total Environment* 919, 170797. <<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.170797>>
- Araya M, J Rivas, G Sepúlveda, C Espinoza-González, S Lira, A Meynard, E Blanco, N Escalona, R Ginocchio, E Garrido-Ramírez & L Contreras-Porcia. 2021. Effect of pyrolysis temperature on copper aqueous removal capability of biochar derived from the kelp *Macrocystis pyrifera*. *Applied Sciences* 11(19), 9223. <<https://doi.org/10.3390/app11199223>>
- Baldock JA & RJ Smernik. 2002. Chemical composition and bioavailability of thermally altered *Pinus resinosa* (Red pine) wood. *Organic Geochemistry* 33: 1093-1109. <[https://doi.org/10.1016/S0146-6380\(02\)00062-1](https://doi.org/10.1016/S0146-6380(02)00062-1)>
- Bastidas DX & NA Miño. 2019. Caracterización comparativa del proceso de pirólisis de dos biomásas, 202 pp. Universidad Central del Ecuador, Quito.
- Bekchanova M, L Campion, S Bruns, T Kuppens, J Lehmann, M Jozefczak, A Cuypers & R Malina. 2024. Biochar improves the nutrient cycle in sandy-textured soils and increases crop yield: a systematic review. *Environmental Evidence* 13, 3. <<https://doi.org/10.1186/s13750-024-00326-5>>
- Bird MI, CM Wurster, PH de Paula Silva, AM Bass & R de Nys. 2011. Algal biochar-production properties. *Bioresource Technology* 102(2): 1886-1891. <<https://doi.org/10.1016/j.biortech.2010.07.106>>
- Boateng AS. 2020. Pyrolysis of biomass for fuels and chemicals, 276 pp. Academic Press, London. <<https://doi.org/10.1016/C2018-0-03824-4>>
- Buckland H, C Rius, F Tempestilli, E Buysman, T Nguyen, NT Truc & A Flammini. 2021. Market analysis of biochar produced by small-scale pyrolysis units in Vietnam, 66 pp. United Nations Industrial Development Organization, Vienna.
- Campion L, M Bekchanova, R Malina & T Kuppens. 2023. The costs and benefits of biochar production and use: A systematic review. *Journal of Cleaner Production* 408, 137138. <<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.137138>>
- Chan KY & ZH Xu. 2009. Biochar: Nutrient properties and their enhancement. In: Lehmann J & S Joseph (eds). *Biochar for environmental management: Science and Technology*, pp. 67-84. Earthscan, London.
- Cheng C-H & J Lehmann. 2009. Ageing of black carbon along a temperature gradient. *Chemosphere* 75: 1021-1027. <<https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2009.01.045>>
- Cheng C-H, J Lehmann & MH Engelhard. 2008. Natural oxidation of black carbon in soils: Changes in molecular form and surface charge along a climosequence. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 72: 1598-1610. <<https://doi.org/10.1016/j.gca.2008.01.010>>
- Contreras-Porcia L, M Araya, E Garrido-Ramírez, C Bulboa, JP Remonsellez, J Zapata, C Espinoza & J Rivas. 2018. Biochar production from seaweeds. In: Charrier B, T Wichard & CRK Reddy (eds). *Protocols for macroalgae research*, pp. 175-185. CRC Press, Phycomorph & COST (European Cooperation in Science and Technology).
- Damania R, S Desbureaux, AS Rodella, J Russ & E Zaveri. 2019. Quality unknown: the invisible water crisis, 120 pp. World Bank, Washington DC. <<http://hdl.handle.net/10986/32245>>
- Dang B-T, R Ramaraj, K-P-H Huynh, M-V Le, I Tomoaki, T-T Pham, VH Luan, PTL Na & DPH Tran. 2023. Current application of seaweed waste for composting and biochar: A review. *Bioresource Technology* 375, 128830. <<https://doi.org/10.1016/j.biortech.2023.128830>>
- Donner M & H de Vries. 2023. Innovative business models for a sustainable circular bioeconomy in the French agrifood domain. *Sustainability* 15, 5499. <<https://doi.org/10.3390/su15065499>>
- Duarte CM & J Cebrián. 1996. The fate of marine autotrophic production. *Limnology and Oceanography* 41(8): 1758-1766. <<https://doi.org/10.4319/lo.1996.41.8.1758>>
- Elias M, J Hunt, J Remucal, P Saksa & DL Sanchez. 2022. Biochar carbon credit market analysis: Examining the potential for coupled biochar and carbon credit production from wildfire fuel reduction projects in the Western U.S., 44 pp. Blue Forest Conservation, Berkeley. <<https://pacificbiochar.com/wp-content/uploads/BiocharCarbonCreditAnalysis-BFReports20221.pdf>>
- Escalante-Rebolledo A, G Pérez-López, C Hidalgo-Moreno, J López-Collado, J Campo-Alves, E Valtierra-Pacheco & J Etchevers-Barra. 2016. Biocarbón (biochar) I: Naturaleza, historia, fabricación y uso en el suelo. *Terra Latinoamericana* 34: 367-382.
- European Commission. 2012. Innovating for sustainable growth: a bioeconomy for Europe, 59 pp. Directorate-General for Research and Innovation. Publications Office, Luxembourg. <<https://data.europa.eu/doi/10.2777/6462>>
- Farghali M, IMA Mohamed, AI Osman & DW Rooney. 2023. Seaweed for climate mitigation, wastewater treatment, bioenergy, bioplastic, biochar, food, pharmaceuticals, and cosmetics: a review. *Environmental Chemistry Letters* 21: 97-152. <<https://doi.org/10.1007/s10311-022-01520-y>>
- Farobie O, A Amrullah, W Fatriasari, ABD Nandiyanto, L Ernawati, S Karnjanakom, SH Lee, R Selvasembian, NIW Azelee & M Aziz. 2024. Co-pyrolysis of plastic waste and macroalgae *Ulva lactuca*, a sustainable valorization approach towards the production of bio-oil and biochar. *Results in Engineering* 24, 103098. <<https://doi.org/10.1016/j.rineng.2024.103098>>
- Fujita R, SAugyte, J Bender, P Brittingham, AH Buschmann, M Chalfin, J Collins, KA Davis, JB Gallagher, R Gentry, RL Gruby, K Kleisner, M Moritsch, N Price, L Roberson, J Taylor & C Yarish. 2023. Seaweed blue carbon: Ready? Or not? *Marine Policy* 155(12), 105747. <<https://doi.org/10.1016/j.marpol.2023.105747>>

- Ginocchio R, M Araya, J Machado, LM Fuente, F Orrego, EC Arellano & L Contreras-Porcia. 2023.** Seaweed biochar (sourced from marine water remediation farms) for soil remediation: Towards an integrated approach of terrestrial-coastal marine water remediation. *BioResources* 18: 4637-4656. <<https://doi.org/10.15376/biores.18.3.4637-4656>>
- Gwenzi W, N Chaukura, C Noubactep & FND Mukome. 2017.** Biochar-based water treatment systems as a potential low-cost and sustainable technology for clean water provision. *Journal of Environmental Management* 197: 732-749. <<https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2017.03.087>>
- Haeldermans T, L Campion, T Kuppens, K Vanreppelen, A Cuypers & S Schreurs. 2020.** A comparative techno-economic assessment of biochar production from different residue streams using conventional and microwave pyrolysis. *Bioresource Technology* 318, 124083. <<https://doi.org/10.1016/j.biortech.2020.124083>>
- Hammes K, RJ Smernik, JO Skjemstad, A Herzog, UF Vogt & MWI Schmidt. 2006.** Synthesis and characterization of laboratory-charred grass straw (*Oriza sativa*) and chestnut wood (*Castanea sativa*) as reference materials for black carbon quantification. *Organic Geochemistry* 37: 1629-1633. <<https://doi.org/10.1016/j.orggeochem.2006.07.003>>
- Hepburn C, E Adlen, J Beddington, EA Carter, S Fuss, N Mac Dowell, JC Minx, P Smith & CK Williams 2019.** The technological and economic prospects for CO₂ utilization and removal. *Nature* 575: 87-97. <<https://doi.org/10.1038/s41586-019-1681-6>>
- Hobday AJ. 2000.** Abundance and dispersal of drifting kelp *Macrocystis pyrifera* rafts in the Southern California Bight. *Marine Ecology Progress Series* 195: 101-116. <<https://www.jstor.org/stable/24855014>>
- Hung C-M, C-W Chen, C-P Huang, J-W Cheng & C-D Dong. 2022.** Algae-derived metal-free boron-doped biochar as an efficient bioremediation pretreatment for persistent organic pollutants in marine sediments. *Journal of Cleaner Production* 336, 130448. <<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.130448>>
- Inyang M & E Dickenson. 2015.** The potential role of biochar in the removal of organic and microbial contaminants from potable and reuse water: A review. *Chemosphere* 134: 232-240. <<https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2015.03.072>>
- Jagadeesh N & B Sundaram. 2023.** Adsorption of pollutants from wastewater by biochar: a review. *Journal of Hazardous Materials Advances* 9, 100226. <<https://doi.org/10.1016/j.hazadv.2022.100226>>
- Jeffery S, TM Bezemer, G Cornelissen, TW Kuyper, J Lehmann, L Mommer, SP Sohi, TF van de Voorde, DA Wardle & JW van Groenigen. 2015.** The way forward in biochar research: targeting trade-offs between the potential wins. *GCB Bioenergy* 7: 1-13. <<https://doi.org/10.1111/gcbb.12132>>
- Kandale A, AK Meena, MM Rao, P Panda, AK Mangal, G Reddy & R Babu. 2011.** Marine algae: an introduction, food value and medicinal uses. *Journal of Pharmacy Research* 4: 219-221.
- Kimetu JM, J Lehmann, SO Ngoze, DN Mugendi, JM Kinyangi, S Riha, L Verchot, JW Recha & AN Pell. 2008.** Reversibility of soil productivity decline with organic matter of differing quality along a degradation gradient. *Ecosystems* 11: 726-739. <<https://doi.org/10.1007/s10021-008-9154-z>>
- Krause-Jensen D & CM Duarte. 2016.** Substantial role of macroalgae in marine carbon sequestration. *Nature Geoscience* 9(10): 737-742. <<https://doi.org/10.1038/ngeo2790>>
- Krause-Jensen D, P Lavery, O Serrano, N Marbà, P Masque & CM Duarte. 2018.** Sequestration of macroalgal carbon: the elephant in the Blue Carbon room. *Biology Letters* 14(6), 20180236. <<https://doi.org/10.1098/rsbl.2018.0236>>
- Krumhansl KA & RE Scheibling. 2012.** Production and fate of kelp detritus. *Marine Ecology Progress Series* 467: 281-302. <<https://doi.org/10.3354/meps09940>>
- Kurniawan TA, MHD Othman, X Liang, HH Goh, P Gikas, K-K Chong & KW Chew. 2023.** Challenges and opportunities for biochar to promote circular economy and carbon neutrality. *Journal of Environmental Management* 332, 117429. <<https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2023.117429>>
- Lehmann J & S Joseph. 2009.** Biochar for environmental management: an introduction. In: Lehmann J & S Joseph (eds). *Biochar for environmental management: Science, technology and implementation* 1: 1-15. Earthscan, London.
- Lian Y, R Wang, J Zheng, W Chen, L Chang, C Li & SC Yim. 2023.** Carbon sequestration assessment and analysis in the whole life cycle of seaweed. *Environmental Research Letters* 18, 074013. <<https://doi.org/10.1088/1748-9326/acdae9>>
- Liu P, D Rao, L Zou, Y Teng & H Yu. 2021.** Capacity and potential mechanisms of Cd (II) adsorption from aqueous solution by blue algae-derived biochars. *Science of the Total Environment* 767, 145447. <<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.145447>>
- Luo D, L Wang, H Nan, Y Cao, H Wang, TV Kumar & C Wang. 2023.** Phosphorus adsorption by functionalized biochar: a review. *Environmental Chemistry Letters* 21: 497-524. <<https://doi.org/10.1007/s10311-022-01519-5>>
- Ly HV, SS Kim, HC Woo, JH Choi, DJ Suh & J Kim. 2015.** Fast pyrolysis of macroalgae *Saccharina japonica* in a bubbling fluidized-bed reactor for bio-oil production. *Energy* 93(2): 1436-1446. <<https://doi.org/10.1016/j.energy.2015.10.011>>
- Marousek J, B Minofar, A Marouskova, O Strunecký & B Gavurová. 2023.** Environmental and economic advantages of production and application of digestate biochar. *Environmental Technology & Innovation* 30, 103109. <<https://doi.org/10.1016/j.eti.2023.103109>>
- Mašek O & P Brownsort. 2011.** Biochar production. In: Shackley S & S Sohi (eds). *An assessment of the benefits and issues associated with the application of biochar to soil*, pp. 37-44. UK Biochar Research Centre, Edinburgh.
- Mondal AK, C Hinkley, S Kondaveeti, PHN Vo, P Ralph & U Kuzhiumparambil. 2024a.** Influence of pyrolysis time on removal of heavy metals using biochar derived from macroalgal biomass (*Oedogonium* sp.). *Bioresource Technology* 414, 131562. <<https://doi.org/10.1016/j.biortech.2024.131562>>
- Mondal AK, C Hinkley, L Krishnan, N Ravi, F Akter, P Ralph & U Kuzhiumparambil. 2024b.** Macroalgae-based biochar: preparation and characterization of physicochemical properties for potential applications. *RSC Sustainability* 2: 1828-1836. <<https://doi.org/10.1039/D4SU00008K>>

- Montoya J, F Janna, EF Castillo, J Acero, C Gómez, J Sarmiento, CF Valdés, LL Garzón, J Osorio, D Tirado, LA Blanco, N Moreno, G Marrugo & EY Ospina. 2014. Pirólisis rápida de biomasa, 41 pp. Universidad Nacional de Colombia, Medellín.
- Mutizabal-Aros J, ME Ramírez, PA Haye, A Meynard, B Pinilla-Rojas, A Núñez, N Latorre-Padilla, FV Search, FJ Tapia, GS Saldías, SA Navarrete & L Contreras-Porcia. 2024. Morphological and molecular identification of *Ulva* spp. (Ulvophyceae; Chlorophyta) from Algarrobo Bay, Chile: Understanding the composition of green tides. *Plants* 13(9), 1258. <<https://doi.org/10.3390/plants13091258>>
- Niedzbala N, E Lorenc-Grabowska, P Rutkowski, J Chęćmanowski, A Szymczycha-Madeja, M Welma & I Michalak. 2024. Potential use of *Ulva intestinalis*-derived biochar adsorbing phosphate ions in the cultivation of winter wheat *Triticum aestivum*. *Bioresource and Bioprocessing* 11, 27. <<https://doi.org/10.1186/s40643-024-00741-z>>
- Norouzi O, S Jafarian, F Safari, A Tavasoli & B Nejati. 2016. Promotion of hydrogen-rich gas and phenolic-rich bio-oil production from green macroalgae *Cladophora glomerata* via pyrolysis over its bio-char. *Bioresource Technology* 219: 643-651. <<https://doi.org/10.1016/j.biortech.2016.08.017>>
- Norouzi O, A Tavasoli, S Jafarian & S Esmailpour. 2017. Catalytic upgrading of bio-products derived from pyrolysis of red macroalgae *Gracilaria gracilis* with a promising novel micro/mesoporous catalyst. *Bioresource Technology* 243: 1-8. <<https://doi.org/10.1016/j.biortech.2017.06.072>>
- Ok YS, SM Uchimiya, SX Chang & N Bolan. 2016. Biochar: Production, characterization, and applications, 438 pp. CRC Press Taylor & Francis Group, New York.
- Olmo M. 2016. Efectos del biochar sobre el suelo, las características de la raíz y la producción vegetal. Tesis Doctoral, Departamento de Botánica, Ecología y Fisiología Vegetal, Universidad de Córdoba, Córdoba, 157 pp. <<https://helvia.uco.es/xmlui/handle/10396/13381>>
- Palansooriya KN, Y Yang, YF Tsang, B Sarkar, D Hou, X Cao, E Meers, J Rinklebe, K-H Kim & YS Ok. 2020. Occurrence of contaminants in drinking water sources and the potential of biochar for water quality improvement: A review. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology* 50: 549-611. <<https://doi.org/10.1080/10643389.2019.1629803>>
- Pessarrodona A, J Assis, K Filbee-Dexter, MT Burrows, J-P Gattuso, CM Duarte, D Krause-Jensen, PJ Moore, DA Smale & T Wernberg. 2022. Global seaweed productivity. *Science Advances* 8(37), eabn2465. <<https://doi.org/10.1126/sciadv.abn2465>>
- Petersen HI, H Deskur, A Rudra, SB Ørberg, D Krause-Jensen & H Sanei. 2024. Pyrolysis of macroalgae: Insight into product yields and biochar morphology and stability. *International Journal of Coal Geology* 286, 104498. <<https://doi.org/10.1016/j.coal.2024.104498>>
- Putri AH, S Steven, FD Oktavia, E Restiawaty, IB Adilina, M Safaat, P Hernowo, T Prakoso, AN Istyami, M Pratiwi & Y Bindar. 2024. Pyrolysis of macroalgae residue from the agar industry for silica-rich biochar and other sustainable chemicals: Process performances, product applications, and simple business scenario. *Biofuels, Bioproducts and Biorefining* 18: 391-409. <<https://doi.org/10.1002/bbb.2597>>
- Razzaghi F, PB Obour & E Arthur. 2020. Does biochar improve soil water retention? A systematic review and meta-analysis. *Geoderma* 361, 114055. <<https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2019.114055>>
- Rex P, KRM Ismail, N Meenakshisundaram, P Barmavatu & AVSLS Bharadwaj. 2023. Agricultural biomass waste to biochar: A review on biochar applications using machine learning approach and circular economy. *ChemEngineering* 7(3), 50. <<https://doi.org/10.3390/chemengineering7030050>>
- Rizwan M, G Murtaza, F Zulfiqar, A Moosa, R Iqbal, Z Ahmed, S Irshad, I Khan, T Li, J Chen, M Zhang, KHM Siddique, L Leng & H Li. 2023. Sustainable manufacture and application of biochar to improve soil properties and remediate soil contaminated with organic impurities: a systematic review. *Frontiers in Environmental Science* 11, 1277240. <<https://doi.org/10.3389/fenvs.2023.1277240>>
- Roberts DA, NA Paul, SA Dworjanyan, MI Bird & R de Nys. 2015. Biochar from commercially cultivated seaweed for soil amelioration. *Scientific Reports* 5, 9665. <<https://doi.org/10.1038/srep09665>>
- Saeed AAH, NY Harun, S Sufian, AA Siyal, M Zulfiqar, MR Bilad, A Vaganathan, A Al-Fakih, AAS Ghaleb & N Almahbashi. 2020. *Eucheuma cottonii* seaweed-based biochar for adsorption of methylene blue dye. *Sustainability* 12(24), 10318. <<https://doi.org/10.3390/su122410318>>
- Schahczenski J. 2010. Biochar and sustainable agriculture, 12 pp. ATTRA - National Center for Appropriate Technology, Butter. <<https://pacificfarmers.com/wp-content/uploads/2015/08/biochar.pdf>>
- Seow YX, YH Tan, NM Mubarak, J Kansedo, M Khalid, ML Ibrahim & M Ghasemi. 2022. A review on biochar production from different biomass wastes by recent carbonization technologies and its sustainable applications. *Journal of Environmental Chemical Engineering* 10(1), 107017. <<https://doi.org/10.1016/j.jece.2021.107017>>
- Singh A, R Sharma, D Pant & P Malaviya. 2021. Engineered algal biochar for contaminant remediation and electrochemical applications. *Science of the Total Environment* 774, 145676. <<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.145676>>
- Singh B, M Camps-Arbestain & J Lehmann. 2017. Biochar a guide to analytical methods, 321 pp. Csiro Publishing, Clayton.
- Suasnavas GS. 2023. Análisis de la producción de biochar a partir de residuos ganaderos en Ecuador. Tesis de Máster, Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales, Universidad Politécnica de Madrid, Madrid, 80 pp. <https://oa.upm.es/75222/1/TFM_GANDI_SALVADOR_SUASNAVAS_RUBIO.pdf>
- Sun J, O Norouzi & O Mašek. 2021. A state-of-the-art review on algae pyrolysis for bioenergy and biochar production. *Bioresource Technology* 346, 126258. <<https://doi.org/10.1016/j.biortech.2021.126258>>
- Truong Q-M, P-N-T Ho, T-B Nguyen, W-H Chen, X-T Bui, AK Patel, RR Singhania, C-W Chen & C-D Dong. 2022. Magnetic biochar derived from macroalgal *Sargassum hemiphyllum* for highly efficient adsorption of Cu (II): Influencing factors and reusability. *Bioresource Technology* 361, 127732. <<https://doi.org/10.1016/j.biortech.2022.127732>>

- Urien A. 2013.** Obtención de biocarbones y biocombustibles mediante pirólisis de biomasa residual. Tesis de Máster, Universidad Nacional de Educación a Distancia, Madrid, 83 pp. <https://digital.csic.es/bitstream/10261/80225/1/BIOCARBONES_CENIM_CSIC.pdf>
- Venkatesh G, KA Gopinath, KS Reddy, BS Reddy, M Prabhakar, C Srinivasarao, VV Kumari & VK Singh. 2022.** Characterization of biochar derived from crop residues for soil amendment, carbon sequestration and energy use. *Sustainability* 14(4), 2295. <<https://doi.org/10.3390/su14042295>>
- Wang S, B Cao, X Liu, L Xu, Y Hu, S Afonaa-Mensah, AE-F Abomohra, Z He, Q Wang & S Xu. 2018.** A comparative study on the quality of bio-oil derived from green macroalga *Enteromorpha clathrata* over metal modified ZSM-5 catalysts. *Bioresource Technology* 256: 446-455. <<https://doi.org/10.1016/j.biortech.2018.01.134>>
- Wang Q, L Zhang, Y Chen, J Yin & J-Y Li. 2023a.** An application of waste algae biochar in aquaculture water to remove co-existed cadmium and PAHs and the corresponding mechanism. *Environmental Technology* 44: 1392-1404. <<https://doi.org/10.1080/09593330.2021.2003438>>
- Wang Y, C Ma, D Kong, L Lian & Y Liu. 2023b.** Review on application of algae-based biochars in environmental remediation: Progress, challenge and perspectives. *Journal of Environmental Chemical Engineering* 11, 111263. <<https://doi.org/10.1016/j.jece.2023.111263>>
- Woelf D, JE Amonette, FA Street-Perrott, J Lehmann & S Joseph. 2010.** Sustainable biochar to mitigate global climate change. *Nature Communications* 1, 56. <<https://doi.org/10.1038/ncomms1053>>
- Xia L, W Chen, B Lu, S Wang, L Xiao, B Liu, H Yang, CL Huang, H Wang, Y Yang, L Lin, X Zhu, WQ Chen, X Yan, M Zhuang, CC Kung, YG Zhu & Y Yang. 2023.** Climate mitigation potential of sustainable biochar production in China. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 175, 113145. <<https://doi.org/10.1016/j.rser.2023.113145>>
- Yaashikaa PR, PS Kumar, S Varjani & A Saravanan. 2020.** A critical review on the biochar production techniques, characterization, stability and applications for circular bioeconomy. *Biotechnology Reports* 28, e00570. <<https://doi.org/10.1016/j.btre.2020.e00570>>