

Aprovechamiento de residuos orgánicos para la producción de biochar: una estrategia sostenible para la mejora de suelos en la provincia de Cáceres



José Carlos Escudero García

Beatriz Ledesma Cano

Silvia Román Suero

Teresa Sosa Díaz

ÍNDICE:

1. Introducción y contexto.....	3
2. Fundamentos del biochar.....	5
3. Otra alternativa más sostenible: el hidrochar.....	6
4. Potencial de aplicación en la provincia de Cáceres.....	7
4.1 Generación de residuos.....	8
4.2 Aplicaciones agronómicas en suelos degradados.....	10
5. Necesidades y retos.....	12
6. Conclusiones.....	13
7. Bibliografía.....	14

Resumen

La producción de biochar a partir de residuos orgánicos representa una oportunidad estratégica para la provincia de Cáceres, al permitir valorizar recursos locales, mejorar la salud de los suelos, reducir emisiones de gases de efecto invernadero y dinamizar el medio rural.

1. Introducción y contexto

A escala global, el crecimiento demográfico ha obligado a un incremento de producción de alimentos con técnicas abusivas y poco sostenibles, como el uso excesivo de fertilizantes y técnicas de manejo intensivo que contribuyen a la pérdida y contaminación de los suelos (Cabrera, 2002; Ferreras et al., 2007). El suelo no solo nos brinda el 95% de los alimentos que consumimos, sino que también nos aporta casi todos los servicios y funciones de los ecosistemas necesarios para la existencia de la vida sobre la Tierra. Por ello, su degradación se ha convertido en una de las mayores preocupaciones actuales (García et al., 2001). Las amenazas más significativas para la función del suelo son la erosión, la pérdida de carbono orgánico, el desequilibrio de nutrientes y la contaminación.

Además, el suelo juega un papel importante como regulador climático al ser el mayor reservorio terrestre de carbono. Su capacidad de almacenar carbono convierte al suelo en un aliado crucial para mitigar el cambio climático (Pereira dos Santos & Marcondes, 1990). Las actividades humanas, como la agricultura intensiva, la deforestación y la quema de combustibles fósiles, han alterado significativamente este equilibrio, incrementando las emisiones de gases de efecto invernadero (IPCC, 2014; Stern et al., 2014). Del mismo modo, la biomasa residual no gestionada, especialmente, la de una determinada humedad, da lugar a emisiones de CO₂ o CH₄, lo cual añade interés a la transformación de estos residuos en formas estables de carbono.

Concretamente, la agricultura es responsable de entre el 10 y el 12% de las emisiones antropogénicas de CO₂, además de generar la mayor parte de los óxidos de nitrógeno derivados del alto uso de fertilizantes (Davison et al., 2009; Smith et al., 2014). La quema de residuos de la biomasa de las especies vegetales cultivadas son una parte importante de este porcentaje. Esta práctica es muy antigua y estaba destinada a reincorporar nutrientes al suelo y sanear los cultivos de plagas y enfermedades.

La Ley 7/2022 de Residuos y Suelos Contaminados (art. 27.3) prohíbe la quema de restos vegetales agrícolas y silvícolas, pero en enero de 2023, tras flexibilizarse la normativa, sólo en la provincia de Cáceres se recibieron 5.095 declaraciones responsables para quemas agrícolas. Este dato refleja que, incluso bajo control y con declaración previa, la práctica sigue siendo muy habitual.

Aunque este hábito simplifica la limpieza del terreno, también conlleva la eliminación de organismos beneficiosos, el incremento de la erosión, contaminación del aire, emisiones de gases de efecto invernadero y un alto porcentaje de incendios forestales provocados por la expansión de estos fuegos no controlados.

En este contexto, el traslado de estos residuos orgánicos a plantas de procesamiento termoquímico para producir biochar o hidrochar mediante procesos como la pirólisis o la carbonización hidrotermal emerge como una solución viable. A diferencia de la quema o descomposición natural donde el carbono absorbido por las plantas se libera nuevamente como CO₂, estos procesos fijan el carbono en formas estables que pueden permanecer en el suelo durante siglos (Pratt & Moran, 2010). Esto convierte al biochar en una herramienta clave para mitigar el calentamiento global, mejorar la fertilidad del suelo y avanzar hacia una agricultura sostenible. Según el Premio Nobel de la Paz Rattan Lal, mejorar las prácticas agrícolas y convertir el suelo en un sumidero de carbono atmosférico puede revertir la tendencia actual.

El impulso de prácticas agrícolas sostenibles como la valorización de residuos mediante biochar e hidrochar se enmarca en varios marcos estratégicos y normativos clave:

- Agenda 2030 y los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS), especialmente los ODS 2 (Hambre cero), 12 (Producción y consumo responsables), 13 (Acción por el clima) y 15 (Vida de ecosistemas terrestres).
- Pacto Verde Europeo y Estrategia de la UE sobre Biodiversidad y Suelos, que promueven el secuestro de carbono, la recuperación de suelos degradados y la agricultura circular y regenerativa.
- Política Agraria Común (PAC) 2023-2027 y el Plan Estratégico de la PAC (PEPAC) de España, que incluyen ecoesquemas para el mantenimiento de suelos vivos y prácticas de carbono agrícola.
- Ley 7/2022 de residuos y suelos contaminados para una economía circular, que impulsa la valoración de biorresiduos y desincentiva la quema o abandono de residuos agrícolas.

Estas normativas y políticas proporcionan el marco legal, pero se necesitarían otras que sirvieran como instrumentos de financiación y apoyo para iniciativas como la que aquí se propone.

2. Fundamentos del biochar

La existencia de suelos altamente fértiles como la Terra Preta del Amazonas, originados por poblaciones indígenas a partir de la incorporación prolongada de residuos orgánicos y carbón vegetal, ha servido de inspiración para el desarrollo moderno del biochar (Glaser et al., 2001; Knauer, 2016). El biochar es un material carbonoso rico en carbono, obtenido mediante la pirólisis de biomasa en condiciones de baja o nula presencia de oxígeno. Su estructura porosa y su alta capacidad de retención de agua y nutrientes lo convierten en una herramienta eficaz para la mejora de suelos agrícolas y forestales.

Desde un punto de vista agronómico, el biochar mejora la estructura del suelo, reduce su densidad aparente, incrementa la retención de agua y nutrientes, y promueve la actividad biológica (Laird et al., 2009; Makoto y Yasuyuki, 2010; Baronti et al., 2014). Su eficacia depende de factores como la materia prima, la temperatura de pirólisis y las condiciones del suelo y del cultivo. Biochars con baja

relación H:C y O:C suelen tener mayor estabilidad y capacidad de adsorción. Además, tratamientos como la activación con KOH o la magnetización pueden potenciar sus propiedades fisicoquímicas (Sun et al., 2015; Regmi et al., 2012).

En cuanto a su impacto en la biota del suelo, numerosos estudios apuntan a un aumento de la biomasa microbiana, cambios en la comunidad de microorganismos y beneficios indirectos en el crecimiento vegetal (Steiner et al., 2007; Elad et al., 2010). Sin embargo, también se han detectado efectos negativos puntuales sobre algunos grupos de fauna edáfica o fitotoxicidad por compuestos volátiles, que pueden mitigarse mediante lavados previos o compostaje del biochar (Buss & Masek, 2014).

El biochar también puede mitigar emisiones de gases de efecto invernadero al estabilizar carbono en el suelo y reducir las emisiones de N_2O y CH_4 en algunos contextos agrícolas (Liu et al., 2014; Agegnehu et al., 2016). Asimismo, por su alta porosidad y carga superficial, es capaz de inmovilizar contaminantes orgánicos e inorgánicos, incluidos metales pesados, lo que lo convierte en una herramienta efectiva para la remediación de suelos degradados (He et al., 2019; Song et al., 2012).

3. Otra alternativa más sostenible: el hidrochar

El hidrochar es un producto carbonoso similar al biochar, pero obtenido mediante la carbonización hidrotermal, un proceso termoquímico que transforma biomasa bajo condiciones de presión y temperatura moderadas (180–250 °C) en un medio acuoso. Al ocurrir en un recipiente cerrado, este proceso no resulta en emisiones gaseosas de compuestos hidrocarbonados como ocurre en la pirólisis, y la captura del carbono de la biomasa es más eficiente.

Además, a diferencia del biochar, el hidrochar puede producirse a partir de biomásas con alto contenido en humedad, como lodos de depuradora, estiércoles, algas, residuos agroindustriales o vegetales, sin necesidad de pre-secado, lo que reduce costes energéticos y operativos (Kruse et al., 2013; Toptas et al., 2018).

Presenta menor contenido de metales pesados y alcalinotérreos, y en ciertos casos, mayor poder calorífico que el biochar (Kambo & Dutta, 2015).

La calidad del hidrochar depende de la materia prima, la temperatura, el tiempo de residencia y la relación agua/biomasa. Su aplicación en suelos puede mejorar características como el pH, la capacidad de intercambio catiónico, la retención de humedad y la disponibilidad de nutrientes, aunque con menor estabilidad a largo plazo en comparación con el biochar (Bejarano & Aguilar, 2017; Gronwald et al., 2016).

Sus efectos sobre la biota del suelo y los cultivos dependen de las dosis aplicadas, el tipo de biomasa y las condiciones de aplicación. Concentraciones elevadas pueden ser fitotóxicas para las herbáceas, pero pretratamientos como el lavado o el compostaje pueden reducir estos efectos negativos (Busch et al., 2013; Bargmann et al., 2014 Colin et al., 2025). En dosis moderadas, el hidrochar puede favorecer la germinación, el crecimiento de raíces y la colonización por micorrizas (Salem et al., 2013; Rilling et al., 2010). Esto permite un uso con doble función: herbicida frente arvenses y fertilizante de suelos.

En cuanto a la mitigación de gases de efecto invernadero, su menor estabilidad frente al biochar limita su papel como sumidero de carbono, aunque puede aportar beneficios fertilizantes y de mejora de suelo a corto plazo. Por otro lado, algunos estudios han demostrado su potencial como adsorbente de contaminantes orgánicos y metales pesados, sobre todo cuando se activa químicamente (Sun et al., 2015; Xue et al., 2012).

En definitiva, el hidrochar representa una alternativa complementaria al biochar con ventajas logísticas y ciertas propiedades agronómicas prometedoras, si bien requiere un análisis más detallado de sus impactos ambientales y económicos a largo plazo, y de estudios de estabilidad del carbono, para consolidarse como estrategia viable de valorización de residuos.

4. Potencial de aplicación en la provincia de Cáceres

La provincia de Cáceres, con una fuerte base agroganadera y forestal, genera anualmente grandes cantidades de residuos orgánicos que, en muchos casos, no son valorados adecuadamente. Paralelamente, los suelos de muchas comarcas presentan signos de degradación, baja fertilidad y pérdida de materia orgánica, lo que repercute en la productividad agrícola y la sostenibilidad ambiental. Esta propuesta se enmarca en las estrategias de economía circular, mitigación del cambio climático y fomento de la bioeconomía rural impulsadas por la Unión Europea y por las instituciones regionales.

4.1 Generación de residuos

Según el Anuario de Estadística Agraria de 2024, en la provincia de Cáceres se destinan 239.529 hectáreas a uso agrícola, lo que representa una parte sustancial del territorio provincial. Esta superficie está ocupada por cultivos de gran relevancia económica y territorial, tanto extensivos como intensivos, entre los que destacan la producción de aceituna, tomate, maíz, ciruela, cereza, tabaco, patatas, arroz, melocotón, nectarina, trigo, avena, pimentón y uva en menor cantidad.

La actividad agrícola vinculada a estos cultivos genera una gran cantidad y diversidad de residuos orgánicos que podrían ser aprovechados mediante procesos como la pirólisis para obtener biochar o la carbonización hidrotermal para producir hidrochar. Entre los principales residuos agronómicos cabe destacar:

- Residuos fibrosos, como paja, tallos y rastrojos provenientes de cultivos extensivos como el maíz, el trigo, la avena o el tabaco, con alto contenido en celulosa y hemicelulosa. Estos residuos generan biochars con elevada porosidad, alta capacidad de retención de agua y propiedades absorbentes útiles en la mejora del suelo (Huang et al., 2024; Banitalebi et al., 2019; Wijitkosum, 2022; Liao et al., 2018). Además, dichos residuos presentan contenidos moderados de cenizas (4-10 %) por lo que pueden aportar minerales inorgánicos útiles como calcio, magnesio y potasio, que catalizan reacciones beneficiosas durante la carbonización hidrotermal y mejoran las

propiedades del hidrochar como enmienda del suelo, especialmente en cuanto a estructura y pH (Shanmugam et al., 2025).

- Residuos leñosos, generados en las podas anuales de frutales, olivos y viñedos, ricos en carbono y lignina, y con buena estabilidad estructural, lo que los hace muy apropiados para aplicaciones como enmienda carbonosa, retención hídrica o mejora de la estructura del suelo (Khan et al., 2022). Este tipo de biomasa produce biochars con alto contenido en carbono fijo y elevada capacidad de intercambio catiónico (Taskin et al., 2019).

Además, la actividad agroindustrial asociada a estos cultivos genera subproductos de transformación con alto potencial, como:

- Pulpa, pieles, pepitas y raspones en el procesado del tomate, la uva o la fruta de hueso que pueden ser utilizados para la fabricación de piensos.
- Huesos y cáscaras en el caso de frutas con endocarpio duro como aceituna o ciruela.
- Orujo, alperujo y alpechín, subproductos derivados del proceso de extracción del aceite de oliva, cuya gestión sigue siendo un desafío ambiental, pero que presentan oportunidades de valoración mediante diferentes tecnologías para la obtención de aguardientes, licores, vinagres o ácido oxálico, y cuyos residuos se acumulan en charcas de decantación.

Estos residuos aportarían compuestos fenólicos y ácidos grasos que pueden mejorar la reactividad del biochar y sus propiedades como adsorbente (Borja & Fernández-Rodríguez, 2021; Lobo & Dorta, 2019; Gurudas et al., 2023).

Asimismo, la provincia de Cáceres cuenta con una notable cobertura forestal, representando más del 50 % de su superficie, incluyendo dehesas, montes de encinas, alcornoques y zonas con matorral mediterráneo como los jarales (MITECO, 2023). Estas áreas generan residuos forestales como ramas, cortezas, restos de desbroce y de saneamientos de terrenos invadidos por matorrales o limpiezas silvícolas, cuya acumulación incrementa el riesgo de incendios forestales. Se estima que la región puede generar una alta cantidad anual de biomasa forestal residual (MAPA, 2022), que podría ser valorada energéticamente o

convertida en biochar para suelos pobres, taludes, márgenes forestales o como material estructurante en compostaje

Por otro lado, la provincia de Cáceres presenta una destacada actividad ganadera, con un número considerable de explotaciones de porcino, ovino, vacuno y avícola. Esta actividad genera volúmenes importantes de estiércoles y purines, cuya gestión representa uno de los principales retos ambientales del sector. Su valorización mediante tecnologías de carbonización supone una alternativa sostenible y de alto valor añadido frente a las prácticas tradicionales como el almacenamiento, vertido o aplicación directa al suelo.

El estiércol sólido puede ser utilizado directamente en procesos de pirólisis, mientras que los purines líquidos, al presentar un alto contenido en agua, requieren un pretratamiento (separación sólido-líquido) para poder ser aprovechados. La fracción sólida resultante, rica en materia orgánica y nutrientes, es adecuada para la producción de biochar. Estudios como los de Steiner et al. (2007) y Chen et al. (2014) han demostrado que el biochar procedente de estiércol mejora la eficiencia en el uso de nutrientes, reduce la lixiviación de nitrógeno, y disminuye las emisiones de gases de efecto invernadero como el N_2O . Asimismo, investigaciones más recientes (Tag et al., 2020) evidencian que el biochar elaborado a partir de purín porcino seco puede aumentar la retención de agua y nutrientes en suelos agrícolas.

Por su parte, el hidrochar obtenido por hidrocarbonización se presenta como una alternativa prometedora para el tratamiento de estiércoles húmedos y purines sin necesidad de secado previo. Se consigue así la transformación de residuos orgánicos problemáticos en productos útiles para la agricultura (enmiendas del suelo, sustratos, adsorbentes) y con potencial para la remediación ambiental (Mariuzza et al., 2022). Además, integrando estas tecnologías con el compostaje o el tratamiento biológico, se puede lograr una mayor estabilidad del producto final y una mejor aceptación por parte de los agricultores.

4.2 Aplicaciones agronómicas en suelos degradados

Comarcas del norte y centro de la provincia de Cáceres, caracterizadas por sistemas de secano cerealista y pastizales, presentan suelos con bajo contenido en materia orgánica, lo que conlleva una serie de desequilibrios estructurales, químicos y biológicos limitantes para la productividad y la sostenibilidad agronómica.

La adicción de biochar y/o hidrochar al suelo generaría agregados más estables aumentando el poro total y mejorando la aireación e infiltración de agua. La incorporación de estos carbones particulados reduciría la densidad aparente, mejoraría su estructura y ayudaría a elevar la capacidad de intercambio catiónico y retención de nutrientes como Ca^{2+} , K^+ y NH_4^+ . Además, el carbono del biochar es muy estable (puede persistir siglos en el suelo), lo que lo convierte en una herramienta eficaz de secuestro de CO_2 y mejora de fertilidad a largo plazo.

Esta actividad también conllevaría beneficios socioeconómicos. La inversión inicial para la instalación de una planta móvil de pirólisis oscila entre los 60.000 y los 150.000 euros, según capacidad y nivel de automatización, y el precio de mercado del biochar varía ampliamente, situándose entre 200 y 700 euros por tonelada, dependiendo de la calidad del producto, su certificación y su origen (Straits Research, 2023). Además, el uso del biochar puede generar ingresos complementarios a través de los mercados de carbono. Según el estándar europeo EBC C-Sink, una tonelada de biochar aplicada correctamente puede fijar entre 2,3 y 3 toneladas de CO_2 equivalente. Si estos créditos de carbono se venden a precios de entre 30 y 80 euros por tonelada de CO_2 , un proyecto que produzca 1.000 toneladas de biochar podría generar entre 69.000 y 240.000 euros adicionales anuales (European Biochar Certificate, 2023).

Así, la implementación de plantas o unidades móviles de producción de biochar e hidrochar, estratégicamente ubicadas cerca de áreas con alta densidad de cultivos leñosos u hortofrutícolas, y el desarrollo de unidades piloto de pirólisis o hidrocarbonización en zonas ganaderas clave de la provincia podría no solo reducir la carga ambiental de estos residuos y contribuir a los objetivos de descarbonización del sector primario, sino también favorecer la generación de

empleo verde, dinamizar económicamente las zonas rurales de la provincia, establecer cadenas cortas de valor (empleo, formación, servicios) y fijar población.

5.- Necesidades y retos

Aunque el territorio aporta abundantes residuos y existe un ecosistema regional favorable (empresas, centros tecnológicos, investigaciones), faltan iniciativas de valorización y conocimiento técnico sobre el biochar en el medio agrario, no existen infraestructuras o experiencias reales ni proyectos piloto que movilicen recursos, como tampoco hay apoyos específicos a nivel normativo y financiero, no existen líneas de subvención regionales o estatales específicas para biochar o hidrochar. Los únicos apoyos identificados están en programas de investigación o innovación, pero sin medidas que faciliten su aceptación por parte de agricultores o cooperativas.

Por todo ello, para impulsar el uso del biochar como enmienda orgánica para la mejora de suelos en la provincia de Cáceres a partir de residuos orgánicos locales en el marco de una economía circular, sería necesario llevar a cabo las siguientes acciones:

1. Diagnóstico de residuos: Cartografía y cuantificación de residuos orgánicos disponibles.
2. Producción y caracterización del biochar: Evaluar el potencial de generación de biochar a partir de residuos existentes en la provincia.
3. Ensayos agronómicos: Analizar los efectos del biochar en diferentes tipos de suelo y cultivos locales.
4. Evaluación ambiental: Medición de indicadores de mejora edáfica y reducción de emisiones.
5. Diseñar experiencias piloto de producción y aplicación de biochar.
6. Difusión y transferencia: Promover la formación técnica y la sensibilización de los actores implicados.
7. Proponer medidas de apoyo institucional para el desarrollo de esta estrategia.

Para poder llevar a cabo estas actuaciones se identifican los siguientes actores clave:

- Diputación de Cáceres
- Universidad de Extremadura
- Grupos de acción local y mancomunidades
- Empresas agroindustriales y de gestión de residuos
- Cooperativas agrarias y asociaciones de agricultores
- Centros de investigación y transferencia tecnológica

6. Conclusiones

En conjunto, la gestión forestal, agricultura, ganadería e industria cacereña no solo produce alimentos y materias primas, sino también una importante cantidad de biomasa residual infravalorada, cuya transformación en biochar e hidrochar permitiría:

- Reducir la quema incontrolada o el abandono de residuos vegetales en campo.
- Evitar la contaminación del suelo y del agua por acumulación de purines y estiércoles mal gestionados, transformándolos en productos más estables que reducen las emisiones de gases, los malos olores y el riesgo de filtraciones de excesos de nitratos y patógenos.
- Valorar los subproductos agroindustriales reduciendo la carga contaminante de estos residuos.
- Generar productos útiles para la agricultura como enmiendas orgánicas, mejoradores del suelo o bioadsorbentes para contaminantes.
- Mejorar la fertilidad de los suelos degradados o pobres en materia orgánica de las comarcas cacereñas.
- Contribuir a la mitigación del cambio climático mediante el secuestro estable de carbono.
- Impulsar oportunidades de diversificación económica y empleo verde en el medio rural.

Para ello, es necesario el apoyo institucional, la colaboración entre actores y el desarrollo de proyectos piloto que sirvan de referencia a nivel regional y nacional.

7. Bibliografía:

- Agegnehu, G., Nelson, P. N., & Bird, M. I. (2016). The soil microbial biomass response to biochar and organic amendments in a dryland soil. *Science of the Total Environment*, 550, 233–243. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.01.097>
- Banitalebi, G., Mosaddeghi, M. R., & Shariatmadari, H. (2019). Feasibility of agricultural residues and their biochars for plant growing media: Physical and hydraulic properties. *Waste Management*, 87, 577–589. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2019.02.034>
- Bargmann, I., Pfister, C., & Glaser, B. (2014). Hydrothermal carbonization of manure: Effects of process conditions on hydrochar properties. *Journal of Environmental Management*, 146, 375–382.
- Baronti, S., Vaccari, F. P., Miglietta, F., et al. (2014). Impact of biochar application on plant water relations in *Vitis vinifera* (L.). *European Journal of Agronomy*, 53, 38–44.
- Bejarano, J., & Aguilar, L. (2017). Caracterización del hidrochar obtenido por carbonización hidrotermal. *Revista de Química Agrícola y Alimentaria*, 30(2), 78–85.
- Biochar International. (2022). *Global Biochar Market Report*. <https://www.biochar-international.org/>
- Borja, R., & Fernández-Rodríguez, M. J. (2021). Energy recovery as added value from food and agricultural solid wastes. In S. Kumar, R. Kumar, A. Pandey (Eds.), *Current Developments in Biotechnology and Bioengineering* (pp. 151–174). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-821009-3.00007-5>
- Busch, D., Kammann, C., Grünhage, L., & Müller, C. (2013). Biochar affects community composition of microbial communities in a clayey soil. *Soil Biology and Biochemistry*, 65, 113–121.
- Buss, W., & Masek, O. (2014). Mobile organic compounds in biochar – A potential source of contamination–phytotoxic effects on cress seed (*Lepidium sativum*). *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 100, 53–60.
- Cabrera, D. (2002). *Agricultura y deterioro del suelo*. Ediciones del Sur.
- Chen, L., et al. (2014). Biochar derived from dairy manure as soil amendment: Carbon sequestration and pollution remediation. *Bioresource Technology*, 152, 429–434.
- Colin, J., Sarrion, A., Diaz, E., de la Rubia, M. A., & Mohedano, A. F. (2025). Ecotoxicity assessment of hydrochar from hydrothermal carbonization of biomass waste. *Sustainable Chemistry and Pharmacy*, 44, 101909. <https://doi.org/10.1016/j.scp.2025.101909>

- Davison, E. A., et al. (2009). Agricultural activities and greenhouse gas emissions. *Soil Biology and Biochemistry*, 41(7), 1375–1383.
- Elad, Y., David, D. R., Harel, Y. M., Borenshtein, M., Ben Kalifa, H., Silber, A., & Graber, E. R. (2010). The biochar effect: Plant resistance to biotic stresses. *Soil Biology & Biochemistry*, 42(5), 583–589.
- European Biochar Certificate. (2023). *EBC C-Sink standard and carbon markets*. <https://www.european-biochar.org/en/download>
- Ferreras, L. A., Gómez, E., Toresani, S., Firpo, I., & Rotondo, R. (2007). Impacto de las prácticas agrícolas sobre la calidad del suelo. *Ciencia del Suelo*, 25(1), 15–24.
- García, C., Hernández, T., & Costa, F. (2001). *La degradación del suelo*. Ediciones Mundi-Prensa.
- Glaser, B., Lehmann, J., & Zech, W. (2001). Ameliorating physical and chemical properties of highly weathered soils in the tropics with charcoal: A review. *Biology and Fertility of Soils*, 35(4), 219–230.
- Gronwald, M., Don, A., Tiemeyer, B., & Helfrich, M. (2016). Influence of hydrochar and biochar on the microbial biomass and enzyme activities in arable soils. *Journal of Soils and Sediments*, 16(8), 1849–1861.
- Gurudas Lade, V., Mahajan, K. P., & Rukhane, P. V. (2023). Technologies for the production of value-added products from agro-wastes and their possible applications. In N. A. Raut et al. (Eds.), *360-Degree Waste Management* (Vol. 1, pp. 39–66). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-90760-6.00007-2>
- He, L., Zhong, H., Liu, G., et al. (2019). Mechanisms and applications of biochar in soil remediation: A review. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 171, 190–201.
- Huang, C., Chen, Y., Jin, L., & Yang, B. (2024). Properties of biochars derived from different straw at 500 °C pyrolytic temperature: Implications for their use to improve acidic soil water retention. *Agricultural Water Management*, 301, 108953. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2024.108953>
- IPCC. (2014). *Fifth Assessment Report (AR5)*. Intergovernmental Panel on Climate Change.
- Kambo, H. S., & Dutta, A. (2015). A comparative review of biochar and hydrochar in terms of production, physico-chemical properties and applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 45, 359–378.
- Khan, M. A., Hameed, B. H., Siddiqui, M. R., Allothman, Z. A., & Alsohaimi, I. H. (2022). Hydrothermal conversion of food waste to carbonaceous solid fuel-a review of recent developments. *Foods*, 11, 4036. <https://doi.org/10.3390/foods11244036>
- Knauer, J. (2016). *Terra preta y biochar. Del conocimiento indígena a la innovación tecnológica*. Ed. IASS.
- Kruse, A., Funke, A., & Titirici, M.-M. (2013). Hydrothermal carbonization of biomass: New aspects of the process. *Energy & Environmental Science*, 6, 3701–3710.

- Laird, D. A., Brown, R. C., Amonette, J. E., & Lehmann, J. (2009). Review of the pyrolysis platform for coproducing bio-oil and biochar. *Bioresource Technology*, 100(23), 5740–5748.
- Liao, F., Yang, L., Li, Q., Li, Y.-R., Yang, L.-T., Anas, M., & Huang, D.-L. (2018). Characteristics and inorganic N holding ability of biochar derived from pyrolysis of agricultural and forestal residues in southern China. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 134, 544–551.
- Liu, X., Zhang, A., Ji, C., Joseph, S., Bian, R., et al. (2014). Biochar's effect on crop productivity and the dependence on experimental conditions: A meta-analysis of literature data. *Plant and Soil*, 373(1–2), 583–594.
- Lobo, M. G., & Dorta, E. (2019). Utilization and management of horticultural waste. In E. M. Yahia (Ed.), *Postharvest Technology of Perishable Horticultural Commodities* (pp. 639–666). Woodhead Publishing. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-813276-0.00019-5>
- MAPA. (2022). *Anuario de Estadística Forestal*. Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación.
- Makoto, K., & Yasuyuki, H. (2010). Charcoal as a habitat for ectomycorrhizal fungi. *Soil Biology & Biochemistry*, 42(7), 1826–1831.
- Mariuzza, D., Lin, J. C., Volpe, M., Fiori, L., Ceylan, S., & Goldfarb, J. L. (2022). Impact of co-hydrothermal carbonization of animal and agricultural waste on hydrochars' soil amendment and solid fuel properties. *Biomass and Bioenergy*, 157, 106329. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2021.106329>
- Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación. (2022). Plan Estratégico de la Política Agraria Común (PAC) 2023–2027 de España. <https://www.mapa.gob.es/es/pac/pepac/>
- Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico. (2022). Ley 7/2022, de 8 de abril, de residuos y suelos contaminados para una economía circular. Boletín Oficial del Estado, 85, 1–88. <https://www.boe.es/eli/es/l/2022/04/08/7>
- MITECO. (2023). *Anuario de Estadísticas Forestales*. Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico. <https://www.miteco.gob.es/>
- Pereira dos Santos, R., & Marcondes, A. M. (1990). *Ciclo global del carbono*. Agrosistemas.
- Pratt, K., & Moran, D. (2010). Evaluación del ciclo de vida del biochar. *International Journal of Environmental Studies*, 67(3), 317–329.
- Regmi, P., Garcia Moscoso, J. L., Kumar, S., Cao, X., & Mao, J. (2012). Removal of copper and cadmium using magnetite impregnated biochar. *Science of the Total Environment*, 433, 636–641.
- Rilling, M. C., Bossio, D. A., & Gryndler, M. (2010). Carbon sequestration and soil fertility: Biochar's potential. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 138(3), 299–308.
- Salem, A., et al. (2013). Effect of hydrochar application on soil microbial community. *European Journal of Soil Biology*, 56, 62–68.

- Shanmugam, V., Kaynak, E., Das, O., & Padhye, L. P. (2025). The effects of feedstock types and their properties on hydrothermal carbonisation and resulting hydrochar: A review. *Current Opinion in Green and Sustainable Chemistry*, 53, 101024. <https://doi.org/10.1016/j.cogsc.2025.101024>
- Smith, P., et al. (2014). Greenhouse gas mitigation in agriculture. *Nature Climate Change*, 4(6), 478–485.
- Song, W., Guo, M., & Zhang, G. (2012). Sorption and desorption of metals and metalloids from biochars. *Bioresource Technology*, 118, 514–521.
- Steiner, C., Teixeira, W. G., Lehmann, J., Nehls, T., de Macêdo, J. L. V., Blum, W. E. H., & Zech, W. (2007). Long term effects of manure, charcoal and mineral fertilization on crop production and fertility on a highly weathered Central Amazonian upland soil. *Plant and Soil*, 291, 275–290.
- Stern, N., et al. (2014). *The Economics of Climate Change: The Stern Review*. Cambridge University Press.
- Straits Research. (2023). *Biochar Market: Growth, Trends, COVID-19 Impact, and Forecast (2023–2028)*. <https://www.straitsresearch.com/report/biochar-market>
- Sun, K., Ro, K. S., Guo, M., Novak, J. M., Mashayekhi, H., & Xing, B. (2015). Properties of biochar from hydrothermal carbonization of biomass: Characterization and environmental applications. *Bioresource Technology*, 178, 337–343.
- Tag, D., et al. (2020). Valorization of pig manure-derived biochar for agricultural soil application. *Agronomy*, 10(6), 859. <https://doi.org/10.3390/agronomy10060859>
- Taskin, E., de Castro Bueno, C., Allegretta, I., Terzano, R., Rosa, A. H., & Loffredo, E. (2019). Multianalytical characterization of biochar and hydrochar produced from waste biomasses for environmental and agricultural applications. *Chemosphere*, 233, 422–430. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2019.05.204>
- Toptas, A., Yılmaz, T., Elibol, G., Karagöz, S., & Tay, T. (2018). Hydrothermal carbonization of biomass: Design of experiments and process optimization. *Journal of Cleaner Production*, 172, 2734–2745.
- Wijitkosum, S. (2022). Biochar derived from agricultural wastes and wood residues for sustainable agricultural and environmental applications. *International Soil and Water Conservation Research*, 10(2), 335–341. <https://doi.org/10.1016/j.iswcr.2021.09.006>
- Xue, Y., Gao, B., Yao, Y., Inyang, M., Zhang, M., Zimmerman, A. R., & Ro, K. S. (2012). Removal of Cu(II) from aqueous solution by hydrothermal carbonization chars derived from food waste. *Bioresource Technology*, 121, 24–27.