

Manufactura y aplicación de hidrocarbón como una alternativa sostenible para el manejo de residuos lignocelulósicos y mejoramiento de suelo

Manufacturing and application of hydrochar as a sustainable alternative for lignocellulosic waste management and soil improvement

Pablo Ignacio Zorrilla Romo¹, Edgar Vázquez Núñez^{1,*}

¹Grupo de Investigación sobre Aplicaciones Nano y Biotecnológicas para la Sostenibilidad Ambiental (NanoBioTS), Departamento de Ingenierías Química, Electrónica y Biomedica, División de Ciencias e Ingenierías, Universidad de Guanajuato, campus León. Loma del Bosque 113, Col. Lomas del Campetres, León, Guanajuato, MX37150

* edgar.vazquez@ugto.mx

Resumen

La manufactura de hidrocarbón ha surgido como una solución sostenible para la gestión de residuos agrícolas y la mejora del suelo. Los residuos lignocelulósicos, provenientes de actividades agrícolas y forestales, pueden transformarse en hidrocarbón mediante pirólisis y carbonización hidrotermal (HTC). Este proceso no solo gestiona residuos de manera efectiva, sino que también mejora significativamente la calidad del suelo y la productividad agrícola. El suelo es esencial para la seguridad alimentaria y el equilibrio ecológico, pero prácticas no sostenibles han llevado a su degradación global.

El uso de biocarbón y hidrocarbón como acondicionadores del suelo ofrece una estrategia prometedora para enriquecer los nutrientes del suelo y mitigar el cambio climático mediante el secuestro de carbono. Estudios han demostrado que el hidrocarbón mejora las propiedades físicas del suelo, como porosidad y capacidad de retención de agua, así como sus propiedades químicas, aumentando la capacidad de intercambio catiónico y la disponibilidad de nutrientes.

Para maximizar los beneficios del hidrocarbón, es crucial realizar más investigaciones sobre su producción y caracterización a partir de diversas biomásas. Además, se deben explorar más a fondo sus aplicaciones en la remediación del agua y el suelo, así como su viabilidad a escala industrial. La evaluación de riesgos ambientales y ecológicos es fundamental antes de su implementación a gran escala. La combinación de hidrocarbón con otras enmiendas del suelo podría ofrecer una estrategia integral para la agricultura sostenible y la gestión de residuos.

Este documento presenta una revisión exhaustiva sobre la manufactura y aplicación del hidrocarbón como una alternativa sostenible para la gestión de residuos lignocelulósicos y la mejora del suelo. Se discuten los procesos de producción, los beneficios potenciales para el suelo, las aplicaciones en la remediación ambiental y las consideraciones para su implementación a gran escala. Además, se identifican brechas en el conocimiento actual y se proponen áreas de investigación futura para optimizar el uso del hidrocarbón en prácticas agrícolas sostenibles.

Palabras clave: Residuos lignocelulósicos, Suelo, Sostenibilidad

Introducción

En la búsqueda de alternativas sostenibles para la gestión de residuos agrícolas, la manufactura de hidrocarbón ha emergido como una opción viable y beneficiosa. Los residuos lignocelulósicos, provenientes

de actividades agrícolas y forestales, representan una fuente abundante de biomasa que puede ser convertida en hidrocarbón a través de procesos de pirolisis y carbonización hidrotermal (HTC) (Güleç et al., 2021). Este material no solo proporciona una solución para la disposición de residuos, sino que también ofrece mejoras significativas en la calidad del suelo y la productividad agrícola (Haq et al., 2021).

El suelo juega un papel fundamental en la seguridad alimentaria, el equilibrio ecológico y actúa tanto como sumidero como fuente de dióxido de carbono a nivel local e internacional. La deforestación, los cambios en el uso de la tierra, el uso excesivo de fertilizantes y productos químicos, las prácticas agrícolas no sostenibles y la irrigación con aguas subterráneas son las principales causas de la degradación del suelo en todo el mundo (Evangelista et al., 2023). Se requieren alternativas para proporcionar un uso sostenible de los recursos del suelo y reducir la degradación global.

El uso de carbón como acondicionador del suelo, aunque no es nuevo, ha ganado interés por su capacidad para enriquecer los nutrientes del suelo y restaurar la ecología mediante el secuestro de carbono. La Tierra Negra del Amazonas es un ejemplo de suelo muy fértil debido a materiales carbonizados estables, resultado de prácticas tradicionales de manejo del suelo y la deposición de cenizas volcánicas (Suárez et al., 2024).

El biochar, un material sólido carbonoso producido por la descomposición térmica de la biomasa en un ambiente con limitación de oxígeno mejora las propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo, la fertilidad y la capacidad de producción de cultivos. Tiene la capacidad de inmovilizar elementos tóxicos y secuestrar carbono durante más de 1000 años, proporcionando un entorno ideal para las actividades microbianas (Khan et al., 2024).

La producción de biochar depende de las características de las materias primas y las condiciones del proceso. La HTC, una forma eficiente de pirolisis húmeda, convierte la biomasa húmeda en hidrochar sin necesidad de pre-secado. El hidrochar de diversas materias primas se ha aplicado como enmiendas del suelo, mostrando promesa en términos de fertilidad y secuestro de carbono. La investigación continúa para optimizar sus beneficios en la agricultura sostenible.

Uso de residuos lignocelulósicos para convertirlos en hidrocarbón

La biomasa representa los materiales biológicos provenientes de plantas o animales y sus desechos y residuos derivados. La utilización de biomasa residual como un recurso sostenible ha sido reconocida por la sociedad principalmente debido a su potencial para reducir las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI). Es posible que se logren emisiones de GEI cercanas a cero al equilibrar la producción y utilización de biomasa vegetal en el futuro (Hiloidhari et al., 2023).

Es crucial buscar tecnologías que sean sostenibles, no contaminantes y efectivas. Para abordar estas preocupaciones, se han encontrado diversos métodos de utilización de biomasa para la recuperación de energía que son económicamente viables y ambientalmente amigables. La biomasa como la lignocelulosa, lodos de depuradora (SS) y residuos sólidos municipales (MSW) se consideran un recurso abundante y renovable que puede convertirse en forma sólida, líquida y gaseosa mediante tecnologías bioquímicas, fisicoquímicas y termoquímicas. Sin embargo, existen desventajas en el uso de la biomasa como recurso sostenible que necesitan ser superadas urgentemente, por ejemplo, su alto contenido de humedad, bajo contenido energético, heterogeneidad, baja densidad y presencia de contaminantes (Ronda et al., 2023).

En otros estudios, los enfoques comunes de utilización de biomasa han incluido la pirolisis, la conversión biológica, la densificación a un combustible sólido y los procesos hidrotermales. La pirolisis enfrenta el principal obstáculo de que el alto contenido de humedad de la biomasa requiere mucho calor para la vaporización. Además, los procesos de conversión biológica, como la fermentación y la digestión anaeróbica, aunque consumen poca energía, requieren más tiempo en comparación con los procesos térmicos. Posteriormente, se ha centrado mucha atención en los procesos de conversión hidrotermal, que han demostrado ser más rentables en comparación con el secado térmico convencional (Danesh et al., 2023).

Los procesos hidrotermales para la utilización de biomasa tienen tanto ventajas como desventajas, y estas se resumen en la Tabla 1.

Tabla 1. Comparación de métodos de utilización de biomasa: ventajas y desventajas

Método de utilización de biomasa	Ventajas	Desventajas	Referencia
Pirolisis	<ul style="list-style-type: none"> - Producción de biocarbón y bioaceite - Reducción significativa del volumen de residuos - Generación de productos de alto valor agregado (bioaceite y gases) 	<ul style="list-style-type: none"> - Requiere alta energía para la vaporización debido a la humedad de la biomasa - Proceso complejo y costoso - Generación de subproductos tóxicos 	(Maaoui et al., 2023)
Conversión biológica (Fermentación y digestión anaeróbica)	<ul style="list-style-type: none"> - Bajo consumo de energía - Producción de biogás como fuente de energía renovable - Mejora la calidad del suelo mediante la producción de compost 	<ul style="list-style-type: none"> - Requiere más tiempo en comparación con procesos térmicos - Necesita condiciones específicas para la eficiencia - Limitada por la degradabilidad de la biomasa 	(Manyi-Loh & Lues, 2023)
Densificación a combustible sólido	<ul style="list-style-type: none"> - Mejora la densidad energética de la biomasa - Facilita el transporte y almacenamiento - Reduce el espacio necesario para el almacenamiento 	<ul style="list-style-type: none"> - Procesos adicionales necesarios para la densificación - Requiere energía adicional para la compactación - Pérdida de algunas propiedades de la biomasa 	(Sarker et al., 2023)

Aplicaciones de hidrocarbón

Adsorción de contaminantes en aguas residuales y gases de combustión

El hidrochar tiene una menor superficie en comparación con los biochars. Sin embargo, debido a la abundancia de funcionalidades ricas en oxígeno y la presencia de grupos funcionales químicamente activos como cetonas, grupos COOH e hidroxilos en la superficie, la capacidad de adsorción del hidrochar es mayor que la del biochar (Navas-Cárdenas et al., 2023). Varios estudios han informado sobre la utilización del hidrochar para eliminar contaminantes minerales y orgánicos de soluciones acuosas. La eficiencia de adsorción de los hidrochar depende de las propiedades fisicoquímicas, las condiciones experimentales y las propiedades del contaminante para su eliminación. Con un aumento en la concentración de hidrochar, aumentan los grupos funcionales de superficie, que son responsables de adsorber contaminantes específicos. Junto con una mayor carga de hidrochar, la eficiencia de adsorción aumenta con la temperatura de la solución. Ronix et al., (2017) produjeron hidrochar derivado de cáscaras de café para eliminar el colorante azul de metileno de la solución acuosa. La eficiencia máxima de adsorción fue de 34.9 mg/g de hidrochar a 210°C durante 4 horas de tiempo de reacción. Regmi et al., (2012) prepararon hidrochar y hidrochar activado mediante el proceso HTC utilizando switchgrass para eliminar cobre y cadmio de la solución acuosa. Los resultados de su investigación revelaron que el hidrochar activado con KOH mostró una adsorción del 100% para el cobre y el cadmio en 24 horas en comparación con el hidrochar y el carbón activado comercial.

Fagnani et al. (2019) prepararon hidrochar y hidrochar activado a partir de bagazo de caña de azúcar mediante la técnica de hidrocarbonización para adsorber CO₂ de un gas de combustión simulado. El hidrochar activado mostró una mayor afinidad por N₂ y CO₂ a 50°C, y la selectividad máxima se encontró en

el rango de 12-50°C para N₂ y CO₂, según la ley de solución ideal adsorbida. Spataru et al. (2016) intentaron eliminar ortofosfato (aniones) y cobre (cationes) de aguas residuales utilizando hidrochar y hidrochar activado derivado de lodos residuales de plantas de tratamiento de agua. Los estudios de adsorción revelaron que el 97% de los ortofosfatos fueron eliminados mediante el hidrochar activado a 6 g/L, mostrando una mayor capacidad de adsorción en comparación con el hidrochar crudo.

Agricultura y Mejora de Cultivos

La adopción del hidrochar para la mejora de cultivos en los sectores agrícolas depende de la naturaleza del hidrochar utilizado, el tipo de materia prima, el proceso de producción y sus condiciones, las propiedades morfológicas y la naturaleza del suelo, ya sea arcilloso, fértil, arenoso o infértil. Al aplicar el hidrochar en el suelo, la respuesta del rendimiento de los cultivos puede ser productiva o contraproducente. La mayor superficie y porosidad del hidrochar mejoran la actividad del suelo mediante una aireación adecuada para los organismos del suelo, suministrando agua y minerales que protegen contra enfermedades infecciosas (Hou et al., 2020). Generalmente, el hidrochar recién producido muestra una naturaleza hidrofóbica debido a la presencia de una baja cantidad de funcionalidades polares en su superficie. Sin embargo, cuando el hidrochar se mezcla en el suelo, con el tiempo se oxida al interactuar con el oxígeno atmosférico, creando una naturaleza más hidrofílica mediante la formación de grupos funcionales fenólicos y carboxílicos en su superficie. Debido a la presencia de estas funcionalidades en la superficie, la capacidad de retención de agua, la capacidad de intercambio catiónico y la capacidad de retención de nutrientes aumentan significativamente (Fan et al., 2022).

Aunque existe una vasta literatura sobre la aplicación del biochar para la mejora del suelo, hay poca información sobre la aplicación del hidrochar para esta función. (Schimmelpfennig et al. (2014) informaron sobre un experimento de crecimiento mediante un estudio de incubación en laboratorio con *Lolium perenne* utilizando un 16% de hidrochar derivado de hierba plateada como materia prima. Durante la incubación, se encontró que el hidrochar se degradaba, pero no mostró un impacto significativo en la respiración del ecosistema durante los experimentos de campo. Además, Bargmann et al. (2014) notaron la indisponibilidad de nitrógeno para las plantas debido a la falta de migración de nitrógeno en la primera semana de adición de hidrochar. Sin embargo, se observó una liberación lenta de nitrógeno con el tiempo. Este comportamiento sugiere que el hidrochar debe mezclarse en el suelo durante varias semanas antes de la siembra. Por lo tanto, se necesita llevar a cabo una investigación en profundidad para evaluar las propiedades ecotoxicológicas del hidrochar y su impacto en los suelos para reducir los efectos negativos del hidrochar en la mejora del suelo para aplicaciones agrícolas.

Aplicación de hidrocarbón para la mejora del suelo

El aumento de la degradación del suelo ha planteado serias amenazas a la producción agrícola, la sostenibilidad del ecosistema y el clima global. El suplemento con carbono orgánico del suelo (COS) es una de las estrategias más importantes y factibles para mejorar la calidad del suelo, aumentar la producción de cultivos, mejorar la captura de carbono y mitigar las emisiones de gases de efecto invernadero (Hou et al., 2020). Los biocarbones son enmiendas del suelo prometedoras y han sido ampliamente estudiados y revisados. Recientemente, un creciente número de estudios ha demostrado que los hidrocarbónes también pueden ser enmiendas del suelo multifuncionales prometedoras. La aplicación de hidrocarbónes puede mejorar las propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo, aumentar la captura de carbono, disminuir la biodisponibilidad y toxicidad de los contaminantes y restaurar la estructura y función del ecosistema. Las materias primas y las condiciones del proceso de carbonización hidrotermal juegan un papel clave en el rendimiento de la aplicación de hidrocarbónes en la mejora del suelo. Sin embargo, la gran variedad de materias primas para la producción de hidrocarbónes induce un rendimiento altamente variado de diferentes

hidrocarbones. En la Fig. 1 se ilustran los efectos mas relevantes en el suelo posterior a la adición de hidrocarbón.

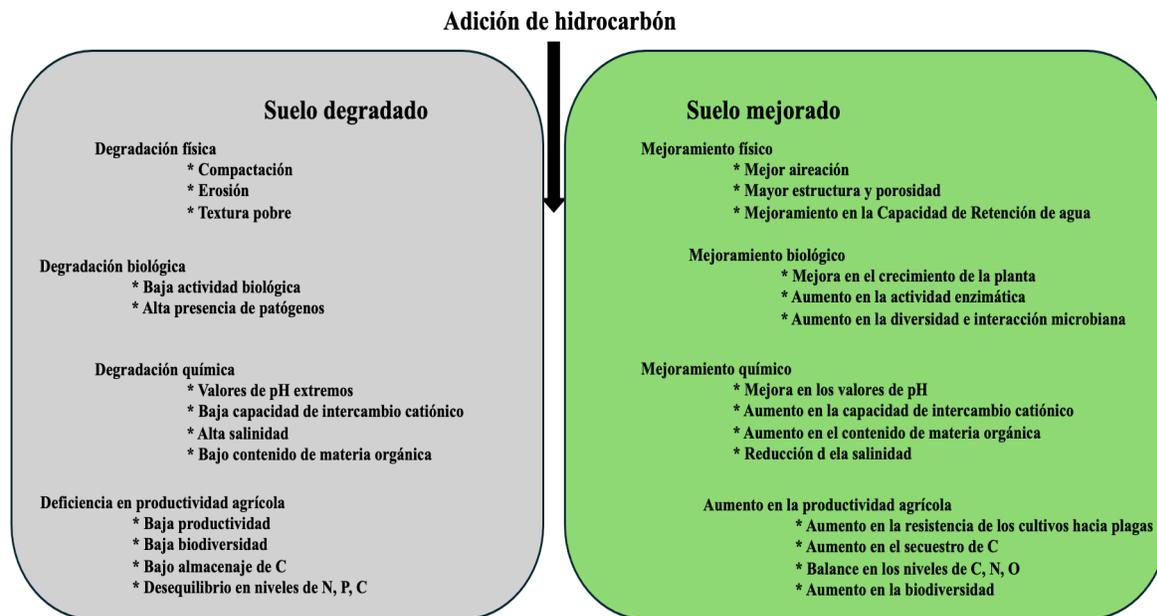


Figura 1. Efectos observados en suelos enmendados con hidrocarbón

Efectos de los hidrocarbones en las propiedades físicas del suelo

La aplicación de hidrocarbones también puede mejorar la CRA del suelo y, por lo tanto, aumentar la capacidad de agua disponible para las plantas (CAP) debido a la retención de agua por los poros de los hidrocarbones, así como al fortalecimiento de la agregación del suelo. Además, la aplicación de hidrocarbones puede aumentar los macroporos del suelo, mejorando así el drenaje del suelo y la absorción de agua por las plantas. Estos efectos positivos están principalmente controlados por la porosidad interna, el área de superficie específica y la superficie hidrofílica de los hidrocarbones (Khosravi et al., 2022). El tamaño de las partículas de carbono es un parámetro importante en el control de la capacidad de retención de agua y la permeabilidad del suelo. Los hidrocarbones producidos a altas temperaturas ($\geq 200^{\circ}\text{C}$) generalmente tienen tamaños de partículas más pequeños y pueden bloquear los microporos del suelo, disminuyendo simultáneamente la entrada y retención de agua. Además, el bloqueo de los microporos del suelo por hidrocarbones de pequeño tamaño puede resultar en una menor porosidad y aireación, aumentando la compactación del suelo (Peng et al., 2023).

La aplicación de hidrocarbones en suelos arenosos puede aumentar la CRA y la CAP de manera más efectiva que en suelos arcillosos y limosos. Varios estudios también han evidenciado que los hidrocarbones mejoran la formación y estabilidad de agregados en suelos limosos y arcillosos (Abel et al., 2013). Por un lado, los grupos funcionales en la superficie de los hidrocarbones, como los grupos hidroxilo ($-\text{OH}$) y carboxilo ($-\text{COOH}$), desencadenan la interacción de puentes catiónicos, responsables principalmente de la formación de microagregados/macroagregados en los suelos (Saha et al., 2019). Por otro lado, la mejora en la agregación del suelo puede resultar de una variedad de sustancias orgánicas, como ácidos orgánicos y grasas producidas por bacterias del suelo, hongos y raíces de plantas, que podrían ser potenciadas por la adición de hidrocarbones. Además, los hidrocarbones pueden mejorar la estabilidad de los agregados del suelo mejor que los biocarbonos debido a su mayor contenido de grupos funcionales y minerales (Taskin et al., 2019).

Hasta ahora, aunque se han demostrado efectos positivos de los hidrocarburos en las propiedades físicas del suelo, se deben considerar más a fondo las grandes lagunas de conocimiento sobre las respuestas de las propiedades físicas del suelo a la aplicación de diferentes tipos de hidrocarburos. Los efectos de las interacciones entre los componentes del suelo, como el COS, los minerales y los microorganismos, con las partículas de hidrocarburos en las propiedades físicas del suelo aún no están claros. Dada la diversidad y complejidad de los entornos del suelo, los mecanismos subyacentes del comportamiento de los hidrocarburos en los suelos bajo diferentes condiciones, como temperatura y humedad, requieren investigaciones adicionales para establecer las relaciones entre las características de los hidrocarburos y las propiedades físicas del suelo.

Efectos de los hidrocarburos en las propiedades químicas del suelo

Se han llevado a cabo estudios para investigar los efectos de la aplicación de hidrocarburos en la mejora de las propiedades químicas de suelos degradados, tales como el pH, la capacidad de intercambio catiónico (CIC), la conductividad eléctrica (CE) y el carbono orgánico del suelo (COS). Dependiendo de los tipos de materias primas y las condiciones de la carbonización hidrotermal (HTC), se ha demostrado que los hidrocarburos mejoran efectivamente suelos altamente meteorizados con propiedades químicas deficientes, como alta CE y baja CIC y COS (Kambo & Dutta, 2015). En comparación con los hidrocarburos, los biocarburos tienen menos efectos en la CIC del suelo, debido a su menor CIC inherente, resultado de una mayor tasa de descomposición de la materia orgánica durante la pirólisis.

La aplicación de biocarburos en suelos ácidos ha sido ampliamente estudiada y altamente recomendada debido a la alcalinidad inherente de los biocarburos, resultado de los minerales concentrados durante la pirólisis de la biomasa. Los hidrocarburos, generalmente de naturaleza ácida ($\text{pH} < 7.38$) debido a la presencia de ácidos orgánicos, pueden disminuir efectivamente el pH del suelo (como en suelos alcalinos y calcáreos), aliviando así el estrés salino y aumentando la disponibilidad de nutrientes (Bona et al., 2023).

Los estudios sobre la aplicación de hidrocarburos en la mejora de la CE del suelo, un indicador de la salinidad del suelo, son muy limitados. Debido a los menores contenidos minerales en los hidrocarburos en comparación con los biocarburos, es razonable hipotetizar que los hidrocarburos aumentarían menos la CE que los biocarburos.

Estudios recientes mostraron que la CIC del suelo, un indicador de la capacidad del suelo para retener y proporcionar nutrientes a los cultivos, puede aumentar con la aplicación de hidrocarburos. La capacidad de los hidrocarburos para aumentar la CIC del suelo, atribuida a las altas áreas de superficie y grupos funcionales que contienen oxígeno en la superficie, depende en gran medida de los tipos de materias primas, las condiciones de HTC y las características e interacciones del suelo. Generalmente, los hidrocarburos derivados de materias primas lignocelulósicas (por ejemplo, paja de cultivos y astillas de madera) exhiben mayor CIC que los derivados de lodos de depuradora y residuos municipales. Se espera una menor CIC para los hidrocarburos producidos a temperaturas más altas ($\geq 200^\circ\text{C}$) debido a la disminución de los grupos funcionales reactivos. Por lo tanto, es más probable que los hidrocarburos derivados de plantas a baja temperatura ($< 200^\circ\text{C}$) mejoren la CIC del suelo que los hidrocarburos derivados de lodos de depuradora producidos a alta temperatura ($\geq 200^\circ\text{C}$) (de Jager et al., 2020).

Debido a la alta diversidad de suelos degradados y las limitaciones técnicas para funcionalizar la funcionalidad de los hidrocarburos, la aplicación de un hidrocarburo individual puede no siempre lograr los efectos positivos esperados en la mejora de la calidad del suelo. La aplicación combinada de hidrocarburos con otras enmiendas del suelo (por ejemplo, compost y cal) y/o fertilizantes químicos podría ser una estrategia alternativa, que merece ser explorada en el futuro.

Efectos de los hidrocarbones como fertilizantes de liberación lenta en la disponibilidad de nutrientes del suelo

Los hidrocarbones generalmente contienen nutrientes como N, P, K, Ca y Mg, y pueden ser utilizados directamente como fertilizantes de liberación lenta para las plantas, especialmente aquellas cultivadas en suelos infértiles. El potencial fertilizante de los hidrocarbones está altamente controlado por los tipos de materias primas y las condiciones de la carbonización hidrotermal (HTC). Por ejemplo, los hidrocarbones derivados de estiércol son más ricos en nutrientes, incluyendo N, P, K, Ca y Mg, que aquellos provenientes de biomasa vegetal. Los hidrocarbones pueden proporcionar directamente N a los cultivos debido a su contenido inherente de N inorgánico (por ejemplo, NH_4^+ y NO_3^-) y N orgánico (por ejemplo, aminoácidos, fosfolípidos y aminoazúcares) originado de materias primas como lodos de depuradora, residuos animales y vegetales. Además, los hidrocarbones pueden mejorar la retención de NH_4^+ y NO_3^- en los suelos mediante sorción por atracción electrostática y llenado de poros, lo que resulta en una liberación lenta de N en los suelos para la absorción de las plantas y disminuye la lixiviación de N del suelo. En comparación con los biocarbones, los hidrocarbones podrían tener mayores capacidades de adsorción para NH_4^+ debido a sus abundantes grupos funcionales que contienen oxígeno, como los grupos carboxilo y cetona (Xiong et al., 2021).

La ventaja de la aplicación de hidrocarbones como fertilizante de P supera su aplicación como fertilizante de N. El P en el hidrocarbón, presentado principalmente en formas asociadas al Al y Ca, puede proporcionar P disponible para las plantas con el tiempo. Por ejemplo, Fei et al., (2019) informaron que un hidrocarbón derivado de lodos de depuradora aumentó el P disponible en el suelo en un 130%. También mostraron que el 86.8% del P disponible representaba el 2% del P total en el hidrocarbón liberado en el suelo. Aunque los hidrocarbones se consideran y aplican como fertilizantes de liberación lenta de P, los hidrocarbones de baja temperatura ($< 200^\circ\text{C}$) podrían liberar P más rápido que los hidrocarbones de alta temperatura ($> 200^\circ\text{C}$) debido a la estabilización del P soluble en agua en el hidrocarbón a medida que aumenta la temperatura durante la HTC. Es notable que hay poca información disponible sobre los efectos de los hidrocarbones en el ciclo del P del suelo, lo cual debería ser explorado en el futuro.

Se necesitan más estudios sobre el potencial de nutrientes inherente de los hidrocarbones y sus efectos asociados en la fertilidad del suelo. Una comparación sistemática de hidrocarbones de diferentes materias primas y condiciones de HTC debería realizarse para evaluar su disponibilidad de nutrientes como fertilizantes de liberación lenta y predecir los posibles impactos en la disponibilidad de nutrientes del suelo en diferentes ambientes. Además, los hidrocarbones como fertilizantes de liberación lenta interactuarían con otras sustancias del suelo, como fertilizantes químicos y pesticidas, afectando su ciclo biogeoquímico y eficiencia. Por lo tanto, se necesita más investigación para investigar el potencial fertilizante de los hidrocarbones en presencia de sustancias comunes del suelo.

Brechas actuales y perspectivas futuras

Con el creciente número de estudios sobre la producción, caracterización y aplicación de hidrocarbón en la mejora del suelo y la remediación ambiental, aún existen varias lagunas que deben llenarse en el futuro. A continuación, se proponen algunas sugerencias para el desarrollo futuro de la tecnología de hidrocarbón:

1. Producción y caracterización

- **Variación de Biomasa:** Aunque se pueden utilizar diversos tipos de biomasa (particularmente residuos biológicos húmedos) con diferentes composiciones químicas en la producción de hidrocarbones, falta información sobre la transformación de estas biomásas para la formación de

hidrocarbones, su composición elemental, estructura superficial y reactividad durante la carbonización hidrotermal (HTC).

- **Mezcla de Materias Primas:** La caracterización de hidrocarbones producidos a partir de mezclas de materias primas sigue siendo limitada.
- **Estudios Comparativos:** Es necesario realizar estudios comparativos más detallados de hidrocarbones producidos a partir de diferentes materias primas, tanto simples como mezclas, para establecer relaciones entre sus propiedades fisicoquímicas, las materias primas y las condiciones de HTC.
- **Mecanismos de Formación:** Se necesita ilustrar los mecanismos de formación de hidrocarbones a partir de diferentes materias primas bajo distintas condiciones de HTC y con diversos aditivos.

2. Aplicación en la mejora del suelo

- **Variedad de Suelos:** Aunque los hidrocarbones muestran un potencial prometedor en la mejora de la calidad y productividad del suelo, se deben utilizar y estudiar diferentes tipos de suelos.
- **Propiedades del Suelo:** Además del potencial fertilizante de los hidrocarbones, se necesita más investigación sobre sus efectos en más categorías de propiedades del suelo, incluyendo la estructura del suelo, salinidad, comunidad microbiana y fauna del suelo, especialmente en la rizosfera.
- **Mitigación de GHG:** Los beneficios de los hidrocarbones en la mitigación de emisiones de gases de efecto invernadero y en la mejora de la captura de carbono deben ser completamente evaluados con investigaciones a largo plazo en laboratorio y a escala de campo.

3. Aplicación en la remediación de agua y suelo

- **Contaminantes Orgánicos e Inorgánicos:** Aunque los hidrocarbones muestran gran potencial en la remediación de contaminantes orgánicos e inorgánicos en el suelo y el agua, falta conocimiento sobre los efectos de los hidrocarbones en la biodisponibilidad y estabilización de contaminantes a largo plazo.
- **Estabilidad de Contaminantes:** Se necesitan estudios a más largo plazo para examinar la estabilidad de los contaminantes adsorbidos o inmovilizados por hidrocarbones en entornos acuáticos y terrestres.
- **Contaminantes Emergentes:** Se deben considerar más contaminantes, particularmente los emergentes como retardantes de llama, plastificantes y microorganismos patógenos, en futuros estudios.
- **Riesgos Potenciales:** Para minimizar los posibles riesgos durante la remediación, se deben seleccionar hidrocarbones con componentes tóxicos mínimos. Es esencial evaluar cuidadosamente los riesgos ambientales y ecológicos de los hidrocarbones antes de cualquier aplicación a gran escala.

4. Industrialización y comercialización

- **Escala Industrial:** A pesar del rápido desarrollo, el uso de hidrocarbones sigue siendo un campo emergente, con la mayoría de los estudios limitados al laboratorio. No existen unidades de producción o utilización industrial en la actualidad.
- **Viabilidad Industrial:** Se necesitan más esfuerzos para examinar la viabilidad de la producción y aplicación de hidrocarbones a escala industrial y desarrollar tecnología HTC comercial y a gran escala.

- **Recomendaciones Futuras:** Se recomienda la investigación en diseño de reactores, catalizadores y reciclaje del agua de proceso para superar las limitaciones tecnológicas y económicas. Se espera la aplicación de energía solar, reactores continuos y técnicas de aprendizaje profundo.

5. Riesgos ambientales y ecológicos

- **Evaluación de Riesgos:** Se deben evaluar los riesgos ambientales y ecológicos de los hidrocarburos desde una perspectiva de ciclo de vida completo, incluyendo la recolección y transporte de materias primas, producción mediante HTC, post-tratamiento y transporte, y aplicación en suelos y aguas.
- **Partículas Finas:** Las partículas finas como los nano hidrocarburos pueden ser producidas y liberadas fácilmente al medio ambiente durante la producción y aplicación, pero los riesgos potenciales de estas partículas no están claros.
- **Tecnologías de Tratamiento:** Es necesario desarrollar tecnologías efectivas para tratar o reciclar el agua de proceso durante la HTC para disminuir los riesgos ambientales y los costos.
- **Componentes Tóxicos:** Se requieren más estudios para examinar los riesgos ambientales y ecológicos de los hidrocarburos que contienen componentes potencialmente tóxicos antes de su aplicación práctica en ecosistemas de suelo y agua.

Referencias

- Abel, S., Peters, A., Trinks, S., Schonsky, H., Facklam, M., & Wessolek, G. (2013). Impact of biochar and hydrochar addition on water retention and water repellency of sandy soil. *Geoderma*, 202, 183-191.
- Bargmann, I., Rillig, M. C., Kruse, A., Greef, J., & Kücke, M. (2014). Effects of hydrochar application on the dynamics of soluble nitrogen in soils and on plant availability. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 177(1), 48-58.
- Bona, D., Bertoldi, D., Borgonovo, G., Mazzini, S., Ravasi, S., Silvestri, S., Zaccone, C., Giannetta, B., & Tambone, F. (2023). Evaluating the potential of hydrochar as a soil amendment. *Waste Management*, 159, 75-83.
- Danesh, P., Niaparast, P., Ghorbannezhad, P., & Ali, I. (2023). Biochar production: Recent developments, applications, and challenges. *Fuel*, 337, 126889.
- de Jager, M., Röhrdanz, M., & Giani, L. (2020). The influence of hydrochar from biogas digestate on soil improvement and plant growth aspects. *Biochar*, 2(2), 177-194.
- Evangelista, S. J., Field, D. J., McBratney, A. B., Minasny, B., Ng, W., Padarian, J., Dobarco, M. R., & Wadoux, A. M.-C. (2023). A proposal for the assessment of soil security: Soil functions, soil services and threats to soil. *Soil Security*, 10, 100086.
- Fagnani, H. M., da Silva, C. T., Pereira, M. M., Rinaldi, A. W., Arroyo, P. A., & de Barros, M. A. (2019). CO₂ adsorption in hydrochar produced from waste biomass. *SN Applied Sciences*, 1, 1-10.
- Fan, J., Li, F., Fang, D., Chen, Q., Chen, Q., Wang, H., & Pan, B. (2022). Effects of hydrophobic coating on properties of hydrochar produced at different temperatures: Specific surface area and oxygen-containing functional groups. *Bioresource Technology*, 363, 127971.
- Fei, Y., Zhao, D., Cao, Y., Huot, H., Tang, Y., Zhang, H., & Xiao, T. (2019). Phosphorous retention and release by sludge-derived hydrochar for potential use as a soil amendment. *Journal of Environmental Quality*, 48(2), 502-509.
- Güleç, F., Riesco, L. M. G., Williams, O., Kostas, E. T., Samson, A., & Lester, E. (2021). Hydrothermal conversion of different lignocellulosic biomass feedstocks—Effect of the process conditions on hydrochar structures. *Fuel*, 302, 121166.
- Haq, I. ul, Qaisar, K., Nawaz, A., Akram, F., Mukhtar, H., Xu, Y., Mumtaz, M. W., Rashid, U., Ghani, W. A. W. A. K., & Choong, T. S. Y. (2021). Advances in valorization of lignocellulosic biomass towards energy generation. *Catalysts*, 11(3), 309.
- Hiloidhari, M., Sharno, M. A., Baruah, D., & Bezbaruah, A. N. (2023). Green and sustainable biomass supply chain for environmental, social and economic benefits. *Biomass and Bioenergy*, 175, 106893.
- Hou, P., Feng, Y., Wang, N., Petropoulos, E., Li, D., Yu, S., Xue, L., & Yang, L. (2020). Win-win: Application of sawdust-derived hydrochar in low fertility soil improves rice yield and reduces greenhouse gas emissions from agricultural ecosystems. *Science of The Total Environment*, 748, 142457.

- 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, S., Irshad, S., Mehmood, K., Hasnain, Z., Nawaz, M., Rais, A., Gul, S., Wahid, M. A., Hashem, A., & Abd_Allah, E. F. (2024). Biochar production and characteristics, its impacts on soil health, crop production, and yield enhancement: A review. *Plants*, *13*(2), 166.
- Khosravi, A., Zheng, H., Liu, Q., Hashemi, M., Tang, Y., & Xing, B. (2022). Production and characterization of hydrochars and their application in soil improvement and environmental remediation. *Chemical Engineering Journal*, *430*, 133142.
- Maaoui, A., Trabelsi, A. B. H., Abdallah, A. B., Chagtmi, R., Lopez, G., Cortazar, M., & Olazar, M. (2023). Assessment of pine wood biomass wastes valorization by pyrolysis with focus on fast pyrolysis biochar production. *Journal of the Energy Institute*, *108*, 101242.
- Manyi-Loh, C. E., & Lues, R. (2023). Anaerobic Digestion of Lignocellulosic Biomass: Substrate Characteristics (Challenge) and Innovation. *Fermentation*, *9*(8), 755.
- Navas-Cárdenas, C., Caetano, M., Endara, D., Jiménez, R., Lozada, A. B., Manangón, L. E., Navarrete, A., Reinoso, C., Sommer-Márquez, A. E., & Villasana, Y. (2023). The role of oxygenated functional groups on cadmium removal using pyrochar and hydrochar derived from *Guadua angustifolia* residues. *Water*, *15*(3), 525.
- Peng, J., Kang, X., Zhao, S., Yin, Y., Zhao, P., Ragauskas, A. J., Si, C., & Song, X. (2023). Regulating the properties of activated carbon for supercapacitors: Impact of particle size and degree of aromatization of hydrochar. *Advanced Composites and Hybrid Materials*, *6*(3), 107.
- Regmi, P., Moscoso, J. L. G., Kumar, S., Cao, X., Mao, J., & Schafran, G. (2012). Removal of copper and cadmium from aqueous solution using switchgrass biochar produced via hydrothermal carbonization process. *Journal of environmental management*, *109*, 61-69.
- Ronda, A., Haro, P., & Gómez-Barea, A. (2023). Sustainability assessment of alternative waste-to-energy technologies for the management of sewage sludge. *Waste Management*, *159*, 52-62.
- Ronix, A., Pezoti, O., Souza, L. S., Souza, I. P., Bedin, K. C., Souza, P. S., Silva, T. L., Melo, S. A., Cazetta, A. L., & Almeida, V. C. (2017). Hydrothermal carbonization of coffee husk: Optimization of experimental parameters and adsorption of methylene blue dye. *Journal of environmental chemical engineering*, *5*(5), 4841-4849.
- Saha, N., Saba, A., & Reza, M. T. (2019). Effect of hydrothermal carbonization temperature on pH, dissociation constants, and acidic functional groups on hydrochar from cellulose and wood. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, *137*, 138-145.
- Sarker, T. R., Nanda, S., Meda, V., & Dalai, A. K. (2023). Densification of waste biomass for manufacturing solid biofuel pellets: A review. *Environmental Chemistry Letters*, *21*(1), 231-264.
- Schimmelpfennig, S., Müller, C., Grünhage, L., Koch, C., & Kammann, C. (2014). Biochar, hydrochar and uncarbonized feedstock application to permanent grassland—Effects on greenhouse gas emissions and plant growth. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, *191*, 39-52.
- Spataru, A., Jain, R., Chung, J. W., Gerner, G., Krebs, R., & Lens, P. N. (2016). Enhanced adsorption of orthophosphate and copper onto hydrochar derived from sewage sludge by KOH activation. *Rsc Advances*, *6*(104), 101827-101834.
- Suárez, J. C., Segura, M., & Andrade, H. J. (2024). Agroforestry systems affect soil organic carbon stocks and fractions in deforested landscapes of Amazonia. *Agroforestry Systems*, 1-13.
- Taskin, E., Branà, M. T., Altomare, C., & Loffredo, E. (2019). Biochar and hydrochar from waste biomass promote the growth and enzyme activity of soil-resident ligninolytic fungi. *Heliyon*, *5*(7).
- Xiong, J., Chen, S., Wang, J., Wang, Y., Fang, X., & Huang, H. (2021). Speciation of main nutrients (N/P/K) in hydrochars produced from the hydrothermal carbonization of swine manure under different reaction temperatures. *Materials*, *14*(15), 4114.