

Principios de química verde aplicados a la síntesis de materiales carbonosos para su uso en remediación ambiental

Principles of green chemistry applied to the synthesis of carbonaceous materials for environmental remediation

Jovanna Zapien-Gómez¹, Elsy Vásquez-Reyez¹, Mauricio Pozuelo-Rivera¹, Andrés M. Zorrilla-Romo¹, Edith A. Flores-Bastida¹, Oscar D. Guzmán-García¹, Judith E. Gutiérrez-Arredondo¹, Edgar Vázquez-Núñez^{1,*}

¹ Grupo de Investigación sobre Aplicaciones Nano y Biotecnológicas para la Sostenibilidad (NanoBioTS). Departamento de Ingenierías Química, Electrónica y Biomédica, División de Ciencias e Ingenierías, Universidad de Guanajuato, León, Guanajuato, México. Loma del Bosque 103, Lomas del Campestre, C.P. 37150.

j.zapiengomez@ugto.mx; e.vasquezreyes@ugto.mx; mpozuelosrivera@ugto.mx; zorrillara2021@licifuq.ugto.mx; ea.floresbastida@ugto.mx; od.guzmangarcia@ugto.mx; gutierrezjudith2013.jg@gmail.com; edgar.vazquez@ugto.mx

Resumen

La contaminación ambiental y la necesidad de remediarla han llevado a la adopción de enfoques sostenibles como los principios de química verde en la síntesis de materiales carbonosos para la remediación ambiental. Esta revisión destaca la importancia de aplicar dichos principios en la síntesis de biocarbón y sus derivados para su uso en la remediación de agua contaminada, aunque podría ser extensiva para la atención de otras matrices ambientales.

Los principios de química verde promueven prácticas más seguras y amigables con el medio ambiente en la síntesis de materiales. Al emplear residuos lignocelulósicos como materia prima para la obtención de biocarbón y compuestos derivados, se reducen los desechos y se aprovechan de mejor manera los recursos renovables. El biocarbón obtenido de residuos lignocelulósicos ha demostrado ser altamente eficiente en la remediación del agua contaminada debido a sus propiedades porosas y alta área superficial, que facilitan la adsorción de contaminantes. Además, el biocarbón puede liberar nutrientes esenciales para el crecimiento de microorganismos beneficiosos, favoreciendo la autorremediación natural del agua y suelo.

A pesar de las ventajas en el uso del biocarbón, es crucial tener en cuenta los posibles efectos negativos durante su manufactura y disposiciones posteriores a su uso. Algunas características, como el contenido de metales pesados o compuestos tóxicos, podrían afectar negativamente los ecosistemas acuáticos y terrestres si no se controlan y disponen adecuadamente.

En nuestro grupo de trabajo consideramos que la síntesis de biocarbón y materiales derivados a partir de residuos lignocelulósicos bajo los principios de química verde representa una opción sostenible y efectiva para la remediación del agua contaminada. Sin embargo, es esencial evaluar la calidad de los materiales producidos y considerar sus efectos a largo plazo en el entorno acuático y terrestre para garantizar una remediación ambiental responsable y sostenible. La combinación de principios de química verde con el potencial de materiales carbonosos ofrece nuevas oportunidades para abordar los desafíos de la contaminación ambiental de manera respetuosa con el medio ambiente.

Palabras clave: Química verde; sustentabilidad; materiales carbonosos; remediación ambiental

Introducción

La degradación ambiental y sus consecuencias en la salud humana y los ecosistemas han alcanzado niveles preocupantes en las últimas décadas. La contaminación del suelo, el agua y el aire, resultado de actividades industriales, agrícolas y urbanas, ha llevado a la pérdida de la biodiversidad y a la escasez de recursos naturales. La destrucción de hábitats, la acumulación de residuos y la presencia de sustancias tóxicas en el entorno plantean desafíos significativos en la búsqueda de soluciones que reviertan o minimicen estos efectos adversos (Celik, 2020).

En este contexto, la química verde ha emergido como una respuesta prometedora y revolucionaria. Esta disciplina, también conocida como química sostenible, aboga por la implementación de principios que promuevan la eficiencia y la responsabilidad ambiental en los procesos químicos y la síntesis de materiales. La consideración de la seguridad, la minimización de residuos, el uso de recursos renovables y la búsqueda de alternativas menos tóxicas son algunos de los pilares fundamentales de la química verde (Mohan & Katakajwala, 2021).

La síntesis de materiales carbonosos para la remediación ambiental es un campo en el que la aplicación de los principios de química verde ha adquirido una relevancia excepcional. Estos materiales tienen propiedades únicas que los hacen idóneos para abordar diversos problemas ambientales, desde la purificación del agua hasta la descontaminación del suelo (Varma, 2019). Sin embargo, tradicionalmente, la producción de materiales carbonosos ha implicado procesos intensivos en el uso de energía y recursos, así como la generación de subproductos nocivos para el medio ambiente. La química verde aborda estos desafíos y plantea enfoques alternativos para sintetizar materiales carbonosos de manera más sostenible y respetuosa con el entorno (Mariotti et al., 2020).

La remediación ambiental, como proceso de restauración y limpieza del medio ambiente contaminado, es una tarea compleja y multifacética que requiere de soluciones integrales y comprometidas. Los enfoques tradicionales de remediación, basados en el uso de productos químicos tóxicos y procesos poco eficientes, a menudo generan impactos negativos adicionales y no logran abordar completamente los problemas de contaminación. Los materiales carbonosos, como el carbón activado, los nanotubos de carbono y el biochar, han demostrado ser una alternativa prometedora en la remediación ambiental debido a su capacidad de adsorción y su capacidad para mejorar la calidad del suelo (Dejen et al., 2023).

El carbón activado, por ejemplo, es ampliamente utilizado en el tratamiento de aguas residuales y potables debido a su alta área superficial y porosidad que permite la retención de una amplia gama de contaminantes, de igual manera, este material se ha empleado como mejorador de la calidad de suelo y regulador de la humedad (Pinnamaneni et al., 2023). Los nanotubos de carbono, con su estructura tubular única, también presentan propiedades excepcionales de adsorción y son objeto de investigación para aplicaciones en la remediación de aguas subterráneas contaminadas. Por otro lado, el biochar, obtenido mediante la pirólisis de biomasa, se ha destacado por sus propiedades de mejora del suelo y su capacidad para atrapar y reducir la disponibilidad de contaminantes en el entorno (Azam et al., 2022).

No obstante, es crucial que la producción de estos materiales se realice considerando los principios de química verde para evitar la generación de nuevos problemas ambientales en el proceso de remediar otros. La química verde busca reducir la huella ambiental de los procesos químicos y materiales, lo que resulta en un menor consumo de recursos, menor generación de residuos y minimización de la toxicidad de los productos.

Finalmente, la química verde ofrece una perspectiva esperanzadora y transformadora para abordar los desafíos de la degradación ambiental y la remediación. La síntesis de materiales carbonosos utilizando los principios de química verde presenta una oportunidad única para desarrollar soluciones más sostenibles, eficientes y respetuosas con el medio ambiente en la lucha contra la contaminación y el restablecimiento del equilibrio ecológico. La integración de estos materiales en los procesos de remediación puede marcar la diferencia en la restauración y preservación de nuestros recursos naturales para las generaciones futuras.

Los principios de química verde: Un enfoque sostenible

Los 12 principios de la química verde fueron establecidos por Paul Anastas y John Warner como una guía para desarrollar procesos químicos más sostenibles y amigables con el medio ambiente (Anastas & Warner, 1998). A continuación, se enlistan estos principios y se explica cómo se aplican en el contexto de la síntesis de materiales carbonosos:

- Prevención de residuos: El primer principio de química verde busca evitar la generación de residuos en la medida de lo posible. En el contexto de la síntesis de materiales carbonosos, esto implica diseñar procesos de síntesis que produzcan el mínimo de subproductos y residuos. Por ejemplo, se pueden optimizar las condiciones de reacción para maximizar la conversión de reactivos en el producto deseado y reducir así la cantidad de desechos generados.

- . **Economía de átomos:** Este principio se enfoca en maximizar la eficiencia en el uso de los átomos presentes en los reactivos para formar el producto deseado. En la síntesis de materiales carbonosos, se busca utilizar reactivos que aporten la cantidad necesaria de carbono y otros elementos requeridos para la formación del material, evitando así el uso innecesario de otros reactivos.
- . **Síntesis más segura:** El tercer principio se centra en minimizar el uso de reactivos y productos químicos peligrosos en el proceso de síntesis. Para los materiales carbonosos, esto implica buscar alternativas menos tóxicas en la producción y evitar el uso de compuestos que puedan generar problemas de toxicidad o contaminación en el ambiente.
- . **Diseño para la eficiencia en el uso de la energía:** La eficiencia energética es clave en la química verde. En la síntesis de materiales carbonosos, se buscan procesos que requieran menor consumo de energía y que utilicen fuentes de energía más limpias y renovables para reducir el impacto ambiental.
- . **Uso de materias primas renovables:** Se busca utilizar materias primas provenientes de fuentes renovables en lugar de recursos no renovables. En la síntesis de materiales carbonosos, se pueden emplear biomasa o residuos orgánicos como fuentes de carbono en lugar de recursos fósiles no renovables.
- . **Reducción de derivados químicos:** El objetivo es minimizar el uso de productos químicos derivados de la síntesis que sean potencialmente dañinos para el medio ambiente. En la síntesis de materiales carbonosos, se evita el uso excesivo de agentes de purificación o procesos que generen subproductos químicos indeseables.
- . **Diseño de productos que sean seguros para el medio ambiente:** Se busca diseñar productos químicos que no sean persistentes, tóxicos o dañinos para el medio ambiente después de su uso. En el caso de los materiales carbonosos, se evalúa su degradabilidad y su impacto ambiental posterior al uso, asegurando que sean seguros para el ambiente en el que serán aplicados.
- . **Uso de catálisis:** La catálisis se utiliza para aumentar la eficiencia de las reacciones químicas y reducir la cantidad de reactivos y energía requerida. En la síntesis de materiales carbonosos, el uso de catalizadores puede acelerar las reacciones de formación del material, disminuyendo el tiempo de síntesis y mejorando la eficiencia global del proceso.
- . **Diseño de productos que se descompongan en productos inocuos:** Los productos químicos sintetizados deben estar diseñados para degradarse en productos finales que no sean dañinos para el ambiente. En el contexto de materiales carbonosos, se busca que, al final de su vida útil, estos materiales se descompongan en productos inocuos, evitando la acumulación de residuos perjudiciales.
- . **Análisis en tiempo real para prevenir la contaminación:** Se promueve el uso de metodologías analíticas en tiempo real para monitorear y controlar los procesos químicos, de manera que se puedan identificar a tiempo posibles desviaciones o problemas que puedan generar contaminación.
- . **Desarrollo de técnicas más seguras para la prevención de accidentes:** La prevención de accidentes y problemas de seguridad es un aspecto esencial en la química verde. En la síntesis de materiales carbonosos, se buscan procedimientos y técnicas seguras que eviten situaciones de riesgo para los trabajadores y el ambiente.
- . **Promoción de la conciencia pública:** El último principio se enfoca en sensibilizar y promover la conciencia pública sobre los desafíos ambientales y la importancia de la química verde como una herramienta para enfrentarlos. La divulgación y educación sobre la importancia de la sostenibilidad en la síntesis de materiales carbonosos fomenta una cultura de responsabilidad ambiental en la sociedad y la industria.

En la Fig. 1 se enlistan los principios de la química verde.

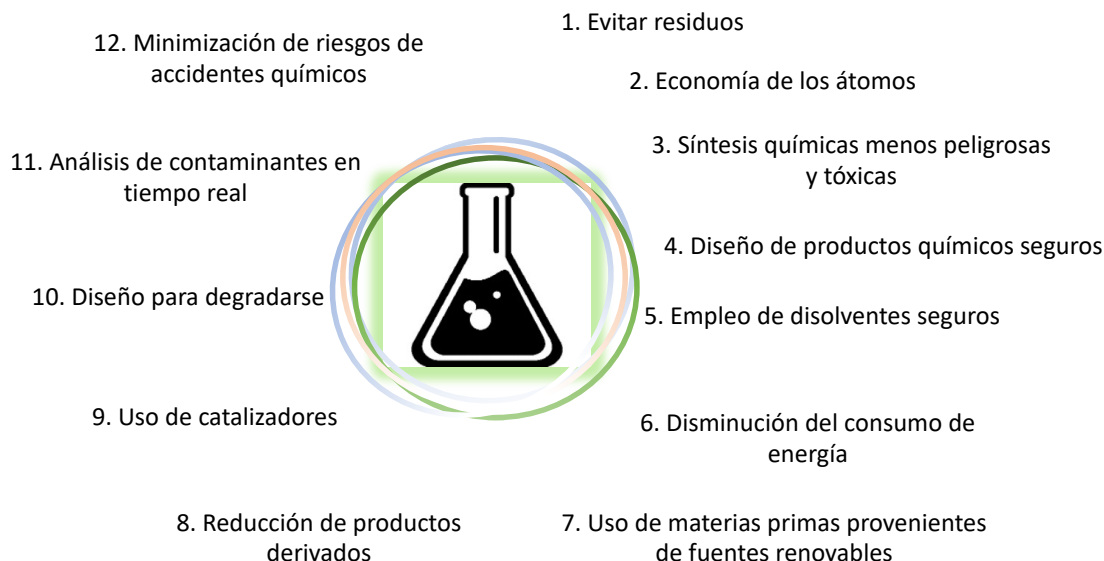


Figura 1. Principios de la química verde

Síntesis de materiales carbonosos y su importancia en la remediación ambiental

Los materiales carbonosos, como el carbón activado, los nanotubos de carbono y el biochar, han demostrado ser altamente eficaces en la remediación ambiental debido a sus propiedades únicas. El carbón activado es un material altamente poroso con una gran capacidad de adsorción, lo que lo hace ideal para eliminar contaminantes del agua y el aire (Meng et al., 2019). Los nanotubos de carbono poseen una gran área superficial y propiedades químicas especiales, lo que los convierte en una opción valiosa para la remoción de contaminantes y la descontaminación de suelos y aguas subterráneas (Patel et al., 2020). Por otro lado, el biochar, producido a través de la pirólisis de biomasa, puede mejorar la calidad del suelo y atrapar contaminantes, reduciendo su disponibilidad en el entorno (Chen et al., 2019).

La síntesis de estos materiales carbonosos generalmente implica procesos químicos y térmicos complejos que pueden generar altas cantidades de residuos y requerir el uso de solventes y compuestos químicos potencialmente tóxicos (Soffian et al., 2022). Por lo tanto, su producción sin considerar los principios de química verde puede resultar en impactos ambientales negativos y problemas de disposición de residuos.

Aplicación de los principios de química Verde en la síntesis de biocarbón a partir de residuos lignocelulósicos

El enfoque sostenible de la química verde se ha aplicado con éxito en la síntesis de biocarbón a partir de residuos para su uso en la remediación del agua. Por ejemplo, la higuera (*Ricinus communis*) que es una planta de rápido crecimiento ampliamente cultivada, y sus residuos, como cáscaras de semillas y bagazo, generados durante la producción de aceite de ricino, pueden ser utilizados como materia prima para la obtención de biocarbón. Al emplear residuos de higuera como fuente de carbono, se evita la utilización de recursos no renovables y se contribuye a la gestión de residuos.

La producción de biocarbón a partir de residuos lignocelulósicos bajo los principios de química verde permite reducir el consumo de energía y solventes tóxicos, así como minimizar la generación de subproductos y residuos. Al utilizar técnicas de síntesis más eficientes y menos dañinas para el medio ambiente, se obtiene un material con características mejoradas y menor impacto ambiental.

Importancia de la síntesis de biocarbón con principios de química verde en la remediación del agua

La importancia de la síntesis de biocarbón con principios de química verde en la remediación del agua radica en su capacidad para abordar los desafíos de la contaminación hídrica de manera sostenible y respetuosa con el medio ambiente. La contaminación del agua es una preocupación creciente a nivel mundial, ya que afecta la salud humana, la biodiversidad acuática y los ecosistemas terrestres. Los enfoques tradicionales de remediación del agua a menudo involucran el uso de productos químicos tóxicos y procesos intensivos en energía, lo que puede generar impactos negativos adicionales y agravar los problemas ambientales existentes (Zahoor & Mushtaq, 2023).

Uno de los principios fundamentales de la química verde es la prevención, que busca evitar la generación de residuos y la producción de sustancias tóxicas desde el inicio de los procesos químicos. En el caso de la síntesis de biocarbón, se emplean residuos y otros materiales de biomasa que de otro modo podrían ser desechados, convirtiéndolos en recursos valiosos y reduciendo la carga ambiental asociada con su disposición inadecuada (Soni et al., 2022). Esta prevención de residuos y la utilización de recursos renovables contribuyen a la sostenibilidad del proceso.

Otro principio importante de la química verde es el diseño más seguro de productos químicos, que se enfoca en la síntesis de materiales que sean menos tóxicos y perjudiciales para el medio ambiente. En la síntesis de biocarbón, se busca utilizar reactivos y condiciones de reacción que no generen productos químicos peligrosos o contaminantes. De esta manera, se asegura que el biocarbón resultante sea seguro para su uso en la remediación del agua sin representar una amenaza para los ecosistemas acuáticos y los seres vivos.

La utilización de solventes y condiciones de reacción más seguros también es un principio relevante en la síntesis de biocarbón. Se busca minimizar el uso de solventes tóxicos y optar por alternativas más benignas y respetuosas con el medio ambiente. Además, se pueden desarrollar procesos de síntesis que requieran menos energía y reduzcan la producción de subproductos no deseados, lo que contribuye a la eficiencia y sostenibilidad del proceso (Clark et al., 2022).

Asimismo, la seguridad intrínseca es un aspecto esencial en la síntesis de biocarbón. Se seleccionan cuidadosamente los reactivos y condiciones de reacción para evitar la formación de compuestos peligrosos o contaminantes durante el proceso de síntesis. Esto garantiza que el biocarbón obtenido sea seguro para su uso en la remediación del agua, minimizando los riesgos asociados con su aplicación.

Además de los principios de química verde mencionados anteriormente, la síntesis de biocarbón para la remediación del agua también se beneficia de la utilización de materiales renovables y abundantes como la biomasa, lo que contribuye a la atomización de los recursos y reduce la dependencia de recursos no renovables.

Retos en la síntesis de biocarbón para la remediación del agua: Una perspectiva desde los principios de la química verde

A pesar de los avances en la aplicación de principios de química verde en la síntesis de biocarbón para la remediación del agua, existen diversos retos y gaps que deben ser atendidos para mejorar la eficiencia y la sostenibilidad de este enfoque prometedor. A continuación, se presentan algunos de los principales desafíos que enfrenta esta área de investigación:

1. Selección de materias primas apropiadas: La selección adecuada de las materias primas es un aspecto clave en la síntesis de biocarbón. Si bien la utilización de residuos de biomasa es una opción sostenible, es fundamental investigar y evaluar diferentes tipos de biomasa para determinar cuáles son las más apropiadas para la producción de biocarbón con características específicas. Además, se deben considerar aspectos como la disponibilidad de la biomasa, su composición química y su impacto en los ecosistemas locales.

2. Optimización de las condiciones de proceso: La optimización de las condiciones de síntesis es un reto importante para maximizar la eficiencia y la calidad del biocarbón producido. Es necesario investigar y

desarrollar metodologías que permitan controlar las variables de proceso, como la temperatura, el tiempo de reacción y la relación estequiométrica de los reactivos, para obtener biocarbón con propiedades óptimas para la remediación del agua.

3. Caracterización y control de calidad del biocarbón: La caracterización completa y precisa del biocarbón es esencial para garantizar su idoneidad y eficacia en la remediación del agua. Se deben implementar técnicas analíticas avanzadas para evaluar la porosidad, área superficial, capacidad de adsorción y estabilidad química del biocarbón. Asimismo, se deben establecer estándares de calidad para asegurar que el biocarbón cumpla con los requisitos necesarios para su aplicación en la remediación.

4. Evaluación de la toxicidad y el impacto ambiental: Aunque la síntesis de biocarbón con principios de química verde busca minimizar la generación de compuestos tóxicos, es fundamental realizar estudios exhaustivos para evaluar la toxicidad del biocarbón producido y su posible impacto ambiental. Se deben realizar pruebas de lixiviación y bioensayos para determinar si el biocarbón liberará contaminantes o afectará negativamente los ecosistemas acuáticos.

5. Estudio de la eficiencia en la remediación: Es necesario llevar a cabo investigaciones que evalúen la eficiencia real del biocarbón en la remediación del agua contaminada. Se deben realizar pruebas a escala piloto y a nivel de laboratorio para determinar cómo el biocarbón se comporta en condiciones reales y qué tipos de contaminantes puede adsorber o degradar de manera más efectiva.

6. Consideraciones de escalabilidad y economía: La escalabilidad de la producción de biocarbón es un aspecto crítico a considerar para su aplicación a gran escala en proyectos de remediación. Se deben evaluar los costos asociados con la síntesis de biocarbón y su viabilidad económica frente a otras tecnologías de remediación disponibles en el mercado.

7. Desarrollo de nuevas Tecnologías y aplicaciones: La investigación y el desarrollo de nuevas tecnologías para la síntesis de biocarbón y su aplicación en la remediación del agua son fundamentales para mejorar y expandir esta área de estudio. La combinación de biocarbón con otras tecnologías de tratamiento de aguas podría ofrecer soluciones más integrales y eficientes para abordar diferentes tipos de contaminantes.

8. Concienciación y participación de los actores relevantes: La concienciación sobre la importancia de la remediación del agua y el uso de biocarbón con principios de química verde debe ser promovida tanto en la comunidad científica como en los sectores gubernamentales, industriales y público en general. La colaboración y participación activa de diferentes actores son fundamentales para impulsar la adopción y aplicación de estas tecnologías sostenibles.

Perspectivas en la síntesis de biocarbón para la remediación sistemas ambientales contaminados considerando los principios de química verde

La síntesis de biocarbón con principios de química verde para la remediación presenta perspectivas prometedoras en el campo de la ingeniería ambiental y la gestión sostenible de los recursos hídricos. A medida que aumenta la preocupación por la degradación ambiental y la escasez de agua limpia y suelos productivos, la búsqueda de soluciones efectivas y respetuosas con el medio ambiente se vuelve cada vez más apremiante. En este contexto, el biocarbón se posiciona como una herramienta valiosa para abordar los desafíos de la contaminación de manera responsable y sostenible.

Una de las principales perspectivas de futuro es el desarrollo continuo de tecnologías más avanzadas y eficientes para la síntesis de biocarbón. Los avances en la caracterización de biomasa y la optimización de las condiciones de reacción permitirán obtener biocarbón con propiedades mejoradas y adaptadas a diferentes tipos de contaminantes presentes. Asimismo, se espera que la investigación en nanotecnología y la modificación de superficies de biocarbón abran nuevas posibilidades en la remediación de contaminantes específicos y en la eliminación de compuestos más persistentes.

Otra perspectiva relevante es la implementación de sistemas integrados de remediación que combinen el biocarbón con otras tecnologías de tratamiento de aguas y suelo. La combinación de biocarbón con técnicas

como la fitorremediación, la coagulación-floculación y la oxidación avanzada podría mejorar la eficiencia global de la remediación y proporcionar soluciones adaptadas a diferentes tipos de fuentes de contaminación.

Además, se espera que los avances en la síntesis de biocarbón permitan su aplicación en áreas más diversas, como la remediación de suelos contaminados y la eliminación de contaminantes emergentes en el agua, como fármacos y productos químicos de uso diario.

En cuanto a la aplicación en escala industrial, la reducción de costos asociados a la síntesis de biocarbón y su producción a gran escala serán aspectos clave para su implementación generalizada. La optimización de los procesos y el uso de materiales de biomasa más disponibles y económicos podrían contribuir a hacer viables económicamente estas tecnologías.

La síntesis de biocarbón siguiendo los principios de química verde representa una prometedora alternativa para la remediación de sistemas ambientales, ofreciendo una solución sostenible y respetuosa con el medio ambiente. Las perspectivas de futuro en esta área son alentadoras, con avances tecnológicos y científicos que abrirán nuevas oportunidades para mejorar la eficiencia y la aplicabilidad del biocarbón en la gestión del agua. La colaboración entre la comunidad científica, la industria y los tomadores de decisiones será fundamental para impulsar estas tecnologías y lograr un futuro más limpio y sostenible en la protección de nuestros recursos hídricos.

Conclusiones

La aplicación de los principios de química verde en la síntesis de biocarbón a partir de residuos para la remediación del agua representa una opción sostenible y prometedora para abordar los desafíos de la contaminación ambiental. Al seguir estos principios, se desarrollan materiales carbonosos más eficientes y respetuosos con el medio ambiente, que contribuyen a la protección y conservación del entorno natural. Sin embargo, es fundamental evaluar cuidadosamente los posibles efectos negativos y establecer disposiciones adecuadas para garantizar que la remediación ambiental sea efectiva y sostenible. La combinación de los principios de química verde con el potencial del biocarbón abre nuevas oportunidades para enfrentar los problemas de contaminación del agua de manera responsable y en armonía con el medio ambiente y las comunidades.

Además, la síntesis de biocarbón también puede beneficiarse de la incorporación de otros principios y enfoques interdisciplinarios para enriquecer su eficacia y sostenibilidad. Entre ellos, el principio de economía circular destaca como una estrategia relevante para mejorar el ciclo de vida del biocarbón y reducir aún más su impacto ambiental. Mediante la implementación de prácticas de economía circular, se promueve la reutilización y el reciclaje de materiales, lo que podría permitir la valorización de subproductos generados durante la síntesis del biocarbón y maximizar el uso de recursos. Además, se podría fomentar la producción descentralizada de biocarbón a pequeña escala, utilizando biomasa local y evitando la necesidad de transportar grandes volúmenes de materiales, lo que disminuiría la huella de carbono asociada. Asimismo, la consideración de aspectos socioeconómicos y participación comunitaria podría fortalecer la aceptación y adopción de estas tecnologías en diferentes contextos. La educación y el compromiso de las comunidades locales en la recolección de biomasa y en la implementación de proyectos de remediación podrían generar un mayor sentido de apropiación y responsabilidad ambiental. La sinergia entre los principios de química verde, la economía circular y la participación comunitaria permitiría una gestión integral y más efectiva de los recursos hídricos, contribuyendo no solo a la remediación del agua contaminada, sino también a la preservación de ecosistemas acuáticos y a la mejora de la calidad de vida de las poblaciones locales.

Bibliografía

- Anastas, P. T., & Warner, J. C. (1998). Principles of green chemistry. *Green chemistry: Theory and practice*, 29, 14821-14842.
- Azam, K., Shezad, N., Shafiq, I., Akhter, P., Akhtar, F., Jamil, F., Shafique, S., Park, Y.-K., & Hussain, M. (2022). A review on activated carbon modifications for the treatment of wastewater containing anionic dyes. *Chemosphere*, 135566.
- Celik, S. (2020). The effects of climate change on human behaviors. *Environment, climate, plant and vegetation growth*, 577-589.
- Chen, W., Meng, J., Han, X., Lan, Y., & Zhang, W. (2019). Past, present, and future of biochar. *Biochar*, 1, 75-87.

- Clark, J. H., Jardine, A., Matharu, A. S., & Stevens, C. V. (2022). *Greener Organic Transformations*. Royal Society of Chemistry.
- Dejen, K. D., Sabir, F. K., Ananda Murthy, H., Ayanie, G. T., Shume, M. S., & Bekele, E. T. (2023). Green Synthesis of Nanomaterials for Environmental Remediation. En *Green Nanoremediation: Sustainable Management of Environmental Pollution* (pp. 27-65). Springer.
- Mariotti, N., Bonomo, M., Fagiolari, L., Barbero, N., Gerbaldi, C., Bella, F., & Barolo, C. (2020). Recent advances in eco-friendly and cost-effective materials towards sustainable dye-sensitized solar cells. *Green chemistry*, 22(21), 7168-7218.
- Meng, J., He, T., Sanganyado, E., Lan, Y., Zhang, W., Han, X., & Chen, W. (2019). Development of the straw biochar returning concept in China. *Biochar*, 1, 139-149.
- Mohan, S. V., & Katakojwala, R. (2021). The circular chemistry conceptual framework: A way forward to sustainability in industry 4.0. *Current Opinion in Green and Sustainable Chemistry*, 28, 100434.
- Patel, D. K., Kim, H.-B., Dutta, S. D., Ganguly, K., & Lim, K.-T. (2020). Carbon nanotubes-based nanomaterials and their agricultural and biotechnological applications. *Materials*, 13(7), 1679.
- Pinnamaneni, S. R., Lima, I., Boone, S. A., Anapalli, S. S., & Reddy, K. N. (2023). Effect of continuous sugarcane bagasse-derived biochar application on rainfed cotton (*Gossypium hirsutum* L.) growth, yield and lint quality in the humid Mississippi delta. *Scientific Reports*, 13(1), 10941.
- Soffian, M. S., Halim, F. Z. A., Aziz, F., Rahman, M. A., Amin, M. A. M., & Chee, D. N. A. (2022). Carbon-based material derived from biomass waste for wastewater treatment. *Environmental Advances*, 9, 100259.
- Soni, R. A., Rizwan, M. A., & Singh, S. (2022). Opportunities and potential of green chemistry in nanotechnology. *Nanotechnology for Environmental Engineering*, 7(3), 661-673.
- Varma, R. S. (2019). Biomass-derived renewable carbonaceous materials for sustainable chemical and environmental applications. *ACS sustainable chemistry & engineering*, 7(7), 6458-6470.
- Zahoor, I., & Mushtaq, A. (2023). Water Pollution from Agricultural Activities: A Critical Global Review. *Int. J. Chem. Biochem. Sci*, 23, 164-176.