

Materiales adsorbentes alternativos para la remoción de contaminantes en agua

Gabriela Peña Velasco

Departamento de Farmacobiología, CUCEI, Universidad de Guadalajara, Blvd. Marcelino García Barragán 1421, Guadalajara, Jalisco, México.

Resumen: Se estima que el consumo de agua a nivel mundial se duplicará para el año 2050, por lo que la remoción de contaminantes en los compartimentos acuáticos se convierte en una estrategia a corto plazo para contrarrestar los problemas derivados de las sequías y la escasez de agua. Este trabajo aborda factores críticos, perspectivas y limitaciones de un compuesto organometálico a base de hierro en el tratamiento de aguas residuales. El material propuesto fue Fe-MIL-101, obtenido mediante una síntesis asistida por microondas, que redujo el tiempo de síntesis hasta siete veces en comparación con otros adsorbentes. Las propiedades texturales del adsorbente sintetizado se analizaron mediante adsorción-desorción de N₂, lo que permitió una mejor comprensión de los posibles mecanismos sinérgicos de adsorción que mejoran su capacidad para remover contaminantes. Finalmente, se evaluaron las eficiencias de remoción y la reutilización de Fe-MIL-101, mostrando un desempeño prometedor para la remoción de contaminantes emergentes en agua.

1. Introducción

El agua es un recurso natural indispensable para la vida humana y el sustento del medio ambiente, que, como consecuencia de un acelerado crecimiento poblacional e industrializado, ha sufrido un preocupante deterioro. El uso inadecuado de este recurso ha dado lugar a una crisis hídrica, que consiste en una demanda de agua potable mayor a la disponible.

Actualmente la aparición sistemática de contaminantes emergentes (CEs) en agua se ha convertido en una de las líneas prioritarias de investigación a nivel mundial. Estos contaminantes se han detectado en diversos compartimentos ambientales [1-3] asociando a las aguas residuales como una posible fuente de introducción de CEs al medio ambiente. Sin embargo, hoy en día, la Organización Mundial de la Salud (OMS) estima que alrededor del 80% de las aguas residuales se vierten en ríos y lagos con un tratamiento parcial, y que al menos el 10% de la población mundial consume alimentos regados con aguas residuales sin tratar [4].

En este contexto, la literatura sugiere que la eliminación de contaminantes del agua residual puede contribuir a un aumento de recursos hídricos facilitando su reutilización y promoviendo la preservación de las fuentes de agua dulce. Además

Recibido: mayo 27, 2025

Aceptado: junio 15, 2025

autor de correspondencia:
gabriela.pvelasco@academico
s.udg.mx

© 2025 Ciencia Aplicada

de representar una ventaja económica en comparación a recursos obtenidos mediante desalinización [5].

Existen múltiples métodos (físicos, químicos y biológicos) para el tratamiento de agua; no obstante, persiste el debate sobre las estrategias más sostenibles para su gestión. Es así como la adsorción continúa liderando las investigaciones debido a su bajo costo, operación a temperatura ambiente, tecnología escalable [6] y capacidad de remover mezclas de residuos de CE's del entorno acuático [7].

Una clase de compuestos organometálicos identificados como MOFs (por sus siglas en inglés metal-organic frameworks) han sido considerados en las últimas décadas como materiales adsorbentes superiores [8]. Esto se debe principalmente a su estructura nanoporosa tridimensional (3D), que proporciona una superficie altamente porosa, con elevada estabilidad química y térmica, así como mayores capacidades de adsorción en diversas condiciones en comparación con los adsorbentes convencionales [9]. Por lo tanto, se han estudiado rigurosamente para posibles aplicaciones de remediación ambiental.

Sin embargo, actualmente existen miles de familias de MOFs, por lo que se debe realizar una evaluación cuidadosa para seleccionar la más adecuada para el tratamiento de aguas residuales. Específicamente, los factores a considerar para dicha aplicación incluyen su estabilidad en agua y sus propiedades texturales, que en conjunto favorezcan una interacción con el contaminante.

En su investigación Joseph et al. [10] identificaron que las MOFs a base de hierro se encuentran entre las soluciones más prometedoras para superar las limitaciones de las tecnologías convencionales, gracias a su baja toxicidad, alta estabilidad acuosa y abundantes sitios activos en su superficie, lo que facilita la interacción con compuestos de diverso origen.

Este trabajo se centra en la síntesis del MOF Fe-MIL-101, su caracterización textural y su aplicación en pruebas preliminares para la remoción de pesticidas presentes en agua.

Desde una perspectiva de sustentabilidad ambiental, el estudio proporciona información relevante sobre un material adsorbente alternativo, ambientalmente seguro y económicamente viable, que puede contribuir a la implementación de estrategias de bajo costo para su aplicación en la eliminación de CE's peligrosos en ambientes acuáticos reales.

2. Metodología

2.1 Síntesis de Fe-MIL-101

En las últimas décadas ha surgido el concepto de “Fast Chemistry” (Química Rápida) cuyo objetivo principal es la reducción del tiempo de las reacciones químicas. En este contexto, y con el fin de desarrollar alternativas eficientes, rápidas, económicas y de menor impacto ambiental para la obtención de materiales adsorbentes, se implementó una síntesis asistida por microondas [11]. La cual de manera muy general consiste en la mezcla homogénea de los reactivos precursores disueltos en solventes para posteriormente ser sometidos a calentamiento mediante radiación microondas.

La síntesis de Fe-MIL-101 consistió en disolver en 42 mL de dimetilformamida (DMF), cloruro férrico hexahidratado ($\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$) y ácido tereftálico, en una proporción molar (1:1). La mezcla se agitó durante 10 min, añadiendo posteriormente 1 mL de ácido acético, y se continuó la agitación a temperatura ambiente por 30 min. En la segunda etapa, la solución se distribuyó en 6 tubos de teflón especializados para radiación microondas, en volúmenes iguales, y se sometieron a una temperatura de 150°C por 30 min en un equipo CEM Mars 6 Microwave. Tras el enfriamiento a temperatura ambiente, se procedió a una etapa de purificación del material mediante lavados sucesivos con DMF, metanol y agua, con movimientos vibratorios en un agitador múltiple Vortex durante 2 min por lavado con centrifugación intermedia para eliminar residuos de solventes y reactivos sin reaccionar. Finalmente, el sólido recuperado se secó a 85°C por 12 h (ver Figura 1).



Figura 1. Esquema general de la síntesis asistida por microondas del Fe-MIL-101.

2.2 Caracterización de Propiedades Texturales

En el estudio de materiales, las técnicas de caracterización permiten conocer a fondo sus propiedades fisicoquímicas. Para las MOFs utilizadas como adsorbentes, es fundamental determinar su porosidad y área superficial, entendida esta última como la superficie exterior total de un material expuesta al ambiente; la cual influye directamente en la reactividad e interacción con otras sustancias [12].

En este trabajo se utilizó la técnica de fisisorción de nitrógeno, basada en la adhesión física de moléculas de nitrógeno en la superficie del material adsorbente. Para ello se empleó un equipo ASAP 20 de Micromeritics Instrument Corporation.

El material fue previamente desgasificado a 100°C durante 12 h, y las mediciones de adsorción se realizaron a -196°C.

2.3 Experimentos Preliminares para Remoción de Contaminantes en Agua

Los estudios preliminares de adsorción de contaminantes se realizan mediante experimentos por lotes (*batch adsorption*), los cuales consisten en añadir una cantidad conocida del material adsorbente a una solución que contiene una concentración conocida del contaminante. Enseguida se somete a agitación controlada y se mide la concentración del contaminante a lo largo del tiempo, con el fin de estudiar el equilibrio y la cinética de adsorción.

Para evaluar el desempeño de Fe-MIL-101 como material adsorbente, se estudió la remoción simultánea en agua de dos pesticidas: glifosato (GLY) y su metabolito ácido aminometilfosfónico (AMPA). Brevemente, se añadieron 0,05 g de Fe-MIL-101 a 15 mL de solución de GLY y AMPA a una concentración de 2 mg/L. La solución se agitó 150 rpm durante 30 min en un agitador orbital digital a temperatura ambiente (298 K). Se tomaron alícuotas de 1 mL al inicio y al final de la adsorción, y se analizaron mediante cromatografía líquida de alta resolución acoplada a espectrometría de masas (HPLC-MS/MS) de Agilent Technology.

3. Resultados Experimentales

3.1 Comparación del proceso de síntesis de Fe-MIL-101 con otros materiales adsorbentes

En el tratamiento del agua, uno de los principales desafíos asociados a los procesos de adsorción es desarrollar materiales adsorbentes mediante síntesis que sean sostenibles, rentables y menos invasivas [13]. La Tabla 1 resume la duración de las síntesis para distintos materiales adsorbentes reportados previamente. Como puede observarse, la mayoría de ellos requiere tiempos de síntesis superiores a 16 h, debido a la implementación de estrategias de modificación en los materiales que buscan mejorar la especificidad y acelerar la tasa de adsorción de contaminantes [14]. Sin embargo, estas modificaciones rara vez consideran el impacto ambiental asociado a su producción a gran escala.

En contraste, el proceso de síntesis de Fe-MIL-101 desarrollado en este trabajo tomó tan solo 0,5 h, y al considerar también el tiempo de secado (8 horas), el proceso completo representa una alternativa significativamente más eficiente. Adicionalmente, la metodología asistida por microondas empleada favorece la reproducibilidad y estandarización del procedimiento, facilitando su escalado industrial [15].

Tabla 1. Comparación de los tiempos de síntesis para obtención de materiales adsorbentes.

Adsorbente	Tiempo de síntesis*	Aplicación	Ref
Fe ₃ O ₄ @SiO ₂ @UiO-67	~ 28 h	Remoción de glifosato	[16]
MIL-101(Fe)/SCB	32 h	Adsorción de glifosato	[17]
Polímeros magnéticos con impresión molecular	~ 62 h	Adsorción de pesticidas	[18]
RED-Fe-NH ₂ -SBA-15	~ 31 h	Remoción de glifosato	[19]
Carbón microporoso funcionalizado	~ 16 h	Adsorción de flumequina	[20]
Carbón activado derivado de huesos de durazno	~ 35 h	Adsorción de pesticidas	[21]
MOFs@MPCA aerogel	24 h	Adsorción de pesticidas	[22]
Fe ₃ O ₄ @SiO ₂ /MIL-101(Cr)	46 h	Adsorción de pesticidas	[23]
Fe-MIL-101	8.5 h	Adsorción de glifosato y AMPA	<i>Este trabajo</i>

*El tiempo de secado está incluido en el tiempo de síntesis.

3.2 Propiedades Texturales de Fe-MIL-101

Además de contar con un proceso de síntesis eficiente y reproducible, se busca que los materiales adsorbentes para prácticas ambientales sean capaces de remover simultáneamente una mezcla de contaminantes presentes en matrices acuosas [24]. En este sentido, las MOFs presentan ventajas notables, ya que su estructura tridimensional y sus componentes metálicos favorecen múltiples mecanismos de interacción con los contaminantes.

La Figura 2 muestra los resultados obtenidos del análisis de fisisorción de N₂ para el Fe-MIL-101 sintetizado. En el gráfico 2a) se observa la isoterma de adsorción-desorción de N₂ clasificada como Tipo I según la IUPAC [25], lo cual indica la presencia de una estructura microporosa (diámetros de poros < 2 nm). Esta clasificación se confirmó mediante el análisis de la distribución de tamaño poro mostrado en el gráfico 2b), donde se aprecia una distribución de poros entre 1 y 30 nm, con la mayor concentración alrededor de 1.7 nm. El área superficial de Fe-MIL-101 calculada por el método BET (Brunauer–Emmett–Teller) fue de 204 m²/g.

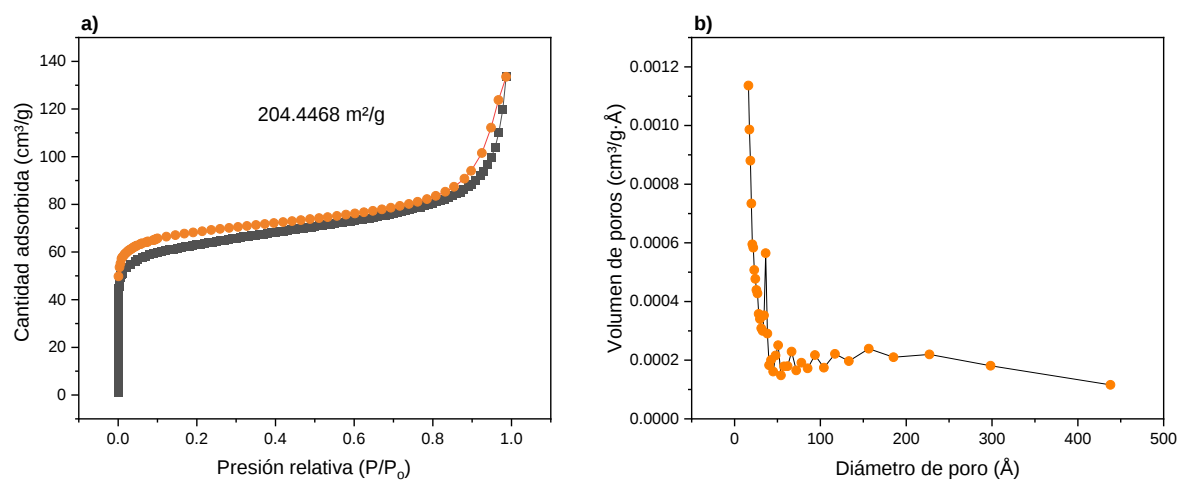


Figura 2. (a) Isothermas de adsorción-desorción de N₂ y (b) Distribución del tamaño de poro de Fe-MIL-101.

3.3 Adsorción de pesticidas usando Fe-MIL-101

Para descartar problemas de reproducibilidad en la síntesis del Fe-MIL-101 que pudieran impactar en su aplicación como material adsorbente, para los experimentos de adsorción se emplearon tres lotes independientes, sintetizados en diferentes fechas. Asimismo, con el fin de evaluar la viabilidad de reutilización del material, se llevaron a cabo ciclos consecutivos de adsorción, recuperando el Fe-MIL-101 mediante centrifugación, seguido de tres lavados con agua desionizada y secado por 8 h, antes de su reuso.

La Figura 3a-b presenta los resultados de los experimentos de adsorción y la prueba de reuso de Fe-MIL-101 en la adsorción simultánea de GLY y AMPA, respectivamente. Se alcanzaron eficiencias de adsorción entre 90.8 – 97.3% para GLY y entre 54.8 – 68.6% para AMPA después de 30 min de contacto con Fe-MIL-101. Con respecto a la reutilización de Fe-MIL-101, se observó una ligera disminución en la eficiencia de remoción tras tres ciclos, pasando del 97 al 92% para GLY, y del 69 al 51% para AMPA. Para aplicaciones a gran escala, la reutilización de los adsorbentes es una de las características más significativas en la remoción de contaminantes.

Estos resultados preliminares demuestran la capacidad funcional y reutilizable del Fe-MIL-101 para su empleo en la remoción de contaminantes en agua y su potencial como alternativa viable para aplicaciones a mayor escala.

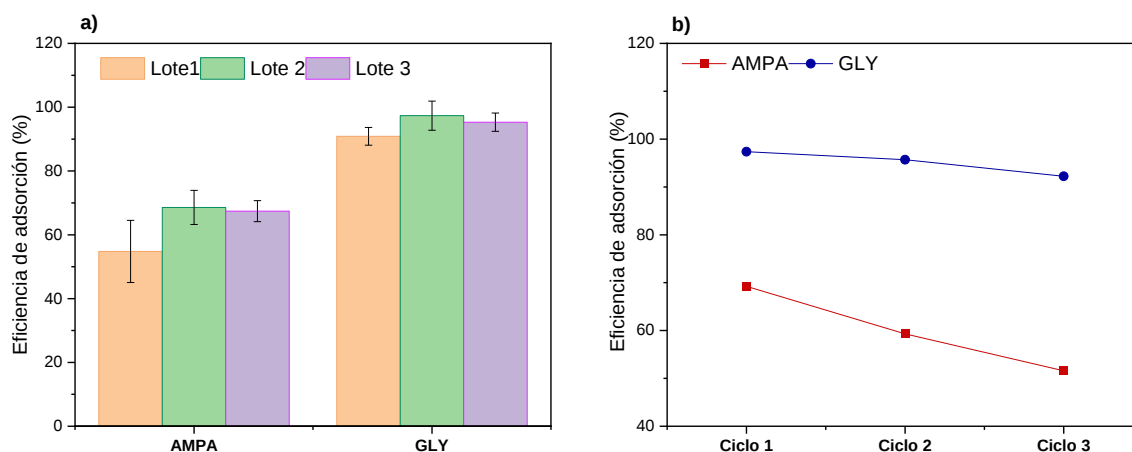


Figura 3. (a) Experimentos de adsorción de GLY-AMPA a 2 mg/L después de 0,5 h utilizando 0,05 g de Fe-MIL-101 a temperatura ambiente. (b) Prueba de reutilización de Fe-MIL-101.

6. Conclusiones

Se requiere una investigación mucho más amplia para determinar si el tratamiento de agua (superficial y residual) mediante MOFs basados en hierro puede representar una alternativa menos invasiva para la preservación de los recursos hídricos. Los hallazgos de este estudio preliminar demostraron que, mediante síntesis asistida por microondas, se obtuvo Fe-MIL-101 en un tiempo total de 8.5 h. Asimismo, se comprobó una eficiencia de remoción superior al 98% para glifosato y del 70% para su metabolito AMPA.

Además, se evidenció la posibilidad de reutilización del material hasta por tres ciclos, sin una disminución significativa de las eficiencias de remoción de los contaminantes seleccionados.

Para avanzar en la aplicación práctica de este tipo de materiales, son necesarios enfoques interdisciplinarios en el tratamiento de agua, que contemplen la incorporación de MOFs. Si bien la evaluación del flujo, el soporte, la capacidad de adsorción y la reutilización del Fe-MIL-101 han sido evaluados a detalle en condiciones de laboratorio, una limitación significativa de la investigación global sigue siendo la ausencia de estudios en ambientes acuáticos reales.

Agradecimientos

G. Peña agradece a la Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación (SECIHTI), por el apoyo recibido para el desarrollo del trabajo de investigación a través de la beca de estancia posdoctoral (EPM 2023, CVU 588460).

Referencias

1. J. M. Galindo-Miranda, C. Guízar-González, E. J. Becerril-Bravo, G. Moeller-Chávez, E. León-Becerril, and R. Vallejo-Rodríguez, "Occurrence of emerging contaminants in environmental surface waters and their analytical methodology - A review," *Water Sci. Technol. Water Supply*, vol. 19, no. 7, pp. 1871–1884, 2019. <https://doi.org/10.2166/ws.2019.087>
2. I. Vázquez-Tapia *et al.*, "Occurrence of emerging organic contaminants and endocrine disruptors in different water compartments in Mexico – A review," *Chemosphere*, vol. 308, pp. 1-12, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2022.136285>
3. C. Peña-Guzmán *et al.*, "Emerging pollutants in the urban water cycle in Latin America: A review of the current literature," *J. Environ. Manage.*, vol. 237, pp. 408–423, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2019.02.100>
4. P. Drechsel, M. Qadir, and D. Galibourg, "The WHO Guidelines for Safe Wastewater Use in Agriculture: A Review of Implementation Challenges and Possible Solutions in the Global South," *Water*, vol. 14, no. 6, pp. 1-20, 2022. <https://doi.org/10.3390/w14060864>
5. A. Jodar-Abellan, M. I. López-Ortiz, and J. Melgarejo-Moreno, "Wastewater treatment and water reuse in Spain. Current situation and perspectives," *Water*, vol. 11, no. 8, pp. 17–22, 2019. <https://doi.org/10.3390/w11081551>
6. T. Rasheed *et al.*, "Environmental threatening concern and efficient removal of pharmaceutically active compounds using metal-organic frameworks as adsorbents," *Environ. Res.*, vol. 185, p. 109436, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2020.109436>
7. S. S. Kaushal *et al.*, "Watershed 'chemical cocktails': forming novel elemental combinations in Anthropocene fresh waters," *Biogeochemistry*, vol. 141, no. 3, pp. 281–305, 2018. <https://doi.org/10.1007/s10533-018-0502-6>
8. H. Kaur, N. Devi, S. S. Siwal, W. F. Alsanie, M. K. Thakur, and V. K. Thakur, "Metal-Organic Framework-Based Materials for Wastewater Treatment: Superior Adsorbent Materials for the Removal of Hazardous Pollutants," *ACS Omega*, vol. 8, no. 10, pp. 9004–9030, 2023. <https://doi.org/10.1021/acsomega.2c07719>
9. M. Ding, X. Cai, and H. L. Jiang, "Improving MOF stability: Approaches and applications," *Chem. Sci.*, vol. 10, no. 44, pp. 10209–10230, 2019. <https://doi.org/10.1039/c9sc03916c>
10. J. Joseph, S. Iftkhar, V. Srivastava, Z. Fallah, E. N. Zare, and M. Sillanpää, "Iron-based metal-organic framework: Synthesis, structure and current technologies for water reclamation with deep insight into framework integrity," *Chemosphere*, vol. 284, pp. 1-35, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.131171>
11. J. Prado-Jongal and E. Morán, "Síntesis asistida por microondas de sólidos inorgánicos," *Real Sociedad Española de Química, An. Química*, vol. 107, no. 2, pp. 129-136, 2011.
12. M. Nasrollahzadeh, "Biopolymer-based metal nanoparticle chemistry for sustainable applications," India, Elsevier Inc., 2021.
13. K. Boukayouht, L. Bazzi, and S. El Hankari, "Sustainable synthesis of metal-organic frameworks and their derived materials from organic and inorganic wastes," *Coord. Chem. Rev.*, vol. 478, p. 214986, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.ccr.2022.214986>
14. M. Du *et al.*, "Insight into the synthesis and adsorption mechanism of adsorbents for efficient phosphate removal: Exploration from synthesis to modification," *Chem. Eng. J.*, vol. 442, p. 136147, 2022. <https://doi.org/10.1016/J.CEJ.2022.136147>

15. R. S. Forgan, "Reproducibility in research into metal-organic frameworks in nanomedicine," *Commun. Mater.*, vol. 5, no. 1, pp. 1–5, 2024. <https://doi.org/10.1038/s43246-024-00475-7>
16. Q. Yang *et al.*, "The simultaneous detection and removal of organophosphorus pesticides by a novel Zr-MOF based smart adsorbent," *J. Mater. Chem. A*, vol. 6, no. 5, pp. 2184–2192, 2018. <https://doi.org/10.1039/c7ta08399h>
17. R. yi Zhou, J. xia Yu, and R. an Chi, "Selective removal of phosphate from aqueous solution by MIL-101(Fe)/bagasse composite prepared through bagasse size control," *Environ. Res.*, vol. 188, no. 693, pp. 1–10, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2020.109817>
18. A. Masoumi, K. Hemmati, and M. Ghaemy, "Recognition and selective adsorption of pesticides by superparamagnetic molecularly imprinted polymer nanospheres," *RSC Adv.*, vol. 6, no. 55, pp. 49401–49410, 2016. <https://doi.org/10.1039/c6ra05873f>
19. S. Fiorilli *et al.*, "Iron oxide inside SBA-15 modified with amino groups as reusable adsorbent for highly efficient removal of glyphosate from water," *Appl. Surf. Sci.*, vol. 411, pp. 457–465, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2017.03.206>
20. Z. Zhao, B. Liang, M. Wang, Q. Yang, M. Su, and S. Liang, "Microporous carbon derived from hydroxyl functionalized organic network for efficient adsorption of flumequine: Adsorption mechanism and application potentials," *Chem. Eng. J.*, vol. 427, p. 130943, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2021.130943>
21. S. Harabi *et al.*, "Adsorption of Pesticides on Activated Carbons from Peach Stones," *Processes*, vol. 12, no. 1, p. 238, 2024. <https://doi.org/10.3390/pr12010238>
22. W. Liang, B. Wang, J. Cheng, D. Xiao, Z. Xie, and J. Zhao, "3D, eco-friendly metal-organic frameworks@carbon nanotube aerogels composite materials for removal of pesticides in water," *J. Hazard. Mater.*, vol. 401, p. 123718, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2020.123718>
23. J. Ma *et al.*, "Metal organic frameworks (MOFs) for magnetic solid-phase extraction of pyrazole/pyrrole pesticides in environmental water samples followed by HPLC-DAD determination," *Talanta*, vol. 161, pp. 686–692, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.talanta.2016.09.035>
24. O. Solcova, M. Dlaskova, and F. Kastanek, "Innovative Sorbents for the Removal of Micropollutants from Water," *Molecules*, 30, 1444, pp. 1–22, 2025. <https://doi.org/10.3390/molecules30071444>
25. R. A. W. Sing, K.S.W., Everet, D. H., Haul, "Reporting Physisorption Data for Gas/Solid Systems with Special Reference to the Determination of Surface Area and Porosity," *Pure Appl. Chem.*, vol. 57, no. 4, pp. 603–619. 1985.