Estudio fisicoquímico del glifosato: Formación de complejos con Cu(II) y su adsorción en materiales carbonosos bajo variaciones de pH y temperatura.

El glifosato constituye el herbicida de mayor uso a nivel mundial, empleado tanto en agricultura como en el mantenimiento de parques y jardines. Su efectividad para eliminar malezas ha consolidado su presencia en diversas actividades humanas (Greenpeace, s. f.); no obstante, su persistencia ambiental ha suscitado preocupaciones respecto a sus posibles impactos en la salud humana y en los ecosistemas acuáticos. Recientes investigaciones han examinado su interacción química en medios acuosos y han evaluado métodos eficientes para su remoción (Yi et al., 2025).

Un aspecto relevante de su estudio es el comportamiento del glifosato en presencia de metales, en particular el cobre. Al mezclar glifosato con la solución de Barfoed, un reactivo ácido que contiene acetato de cobre(II), se produce una reacción específica. En medio ácido, el glifosato actúa como ligando, uniéndose al ion Cu(II) a través de sus grupos funcionales carboxilato, fosfonato y amino (Coutinho et al., 2007). Esta interacción da lugar a la formación de complejos estables que modifican la reactividad tanto del herbicida como del metal.

Reacción con el reactivo de Barfoed

Para la etapa analítica, se preparó una mezcla compuesta por 5 mL de solución de glifosato y 110 µL del reactivo de Barfoed. Posteriormente se somete a sonicación durante 10 minutos a una temperatura controlada de aproximadamente 50 °C para favorecer la reacción de derivatización (véase Figura 1). Finalmente, se realizó la medición espectrofotométrica en la región ultravioleta-visible (UV-Vis), a fin de cuantificar el compuesto mediante la formación del complejo coloreado correspondiente.

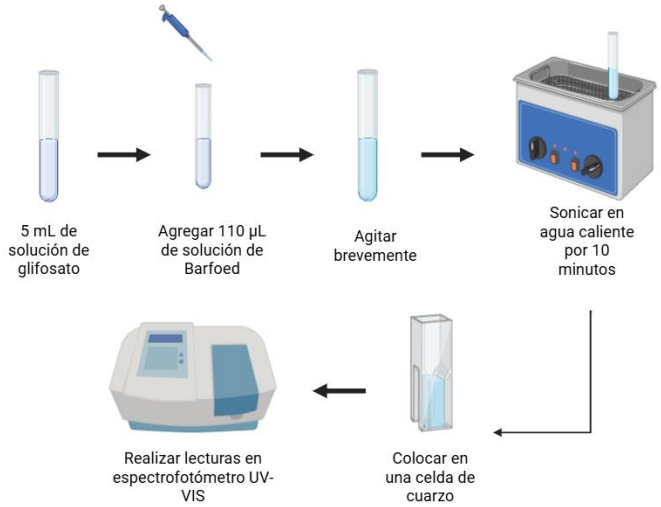
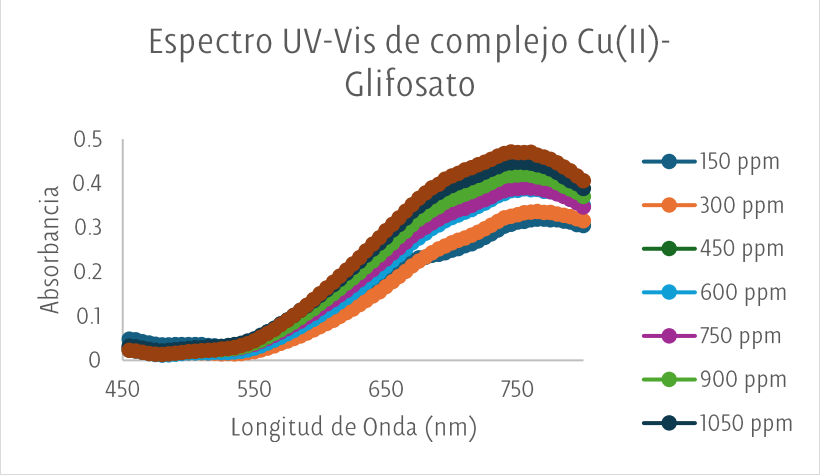


Figura 1. Síntesis y caracterización del complejo Cu(II)-Glifosato

Tradicionalmente, la solución de Barfoed se emplea para detectar azúcares reductores mediante la reducción de Cu(II) a Cu(I) por la formación de un precipitado rojo de óxido de cobre (Barfoed, 1873). Sin embargo, en presencia de glifosato, esta reacción se inhibe. La formación del complejo glifosato-cobre estabiliza el ion Cu(II), impidiendo su reducción y alterando la respuesta esperada (Torres & Pacheco, 2020). Experimentalmente, esta estabilización se evidencia mediante espectroscopía UV-Vis (véase Gráfica 1), donde se observa una banda de absorción característica a 750 nm, indicativa de transiciones electrónicas internas en complejos de Cu(II).



Gráfica 1. Espectro UV-Vis de complejo Cu(II)-Glifosato a diversas concentraciones.

Implicaciones ambientales de los complejos del glifosato

Estas observaciones poseen importantes implicaciones ambientales. La capacidad del glifosato para formar complejos sugiere que puede alterar la movilidad de metales pesados en medios naturales, afectando la disponibilidad de nutrientes esenciales en suelos y cuerpos de agua (Glass, 1984). Además, la formación de complejos podría interferir en métodos convencionales de tratamiento de aguas contaminadas, haciendo necesaria la adaptación de estrategias específicas de remoción.

Una de las estrategias más estudiadas es el uso de carbón activado, material ampliamente reconocido por su elevada capacidad adsorbente. Con el objetivo de optimizar la eliminación de glifosato en agua, investigaciones recientes evaluaron la influencia del pH y la temperatura sobre la eficiencia del carbón activado comercial (CAC). Los resultados indicaron que condiciones ácidas favorecen significativamente la adsorción: a pH 3, la remoción de glifosato superó el 40 %. En cambio, a medida que el pH aumentaba, la eficiencia de adsorción disminuía considerablemente, lo que sugiere que en ambientes alcalinos se debilita la interacción entre el herbicida y la superficie del carbón (véase Figura 2).

Efecto del pH y la temperatura

La temperatura también mostró un efecto relevante. A 25 °C, la adsorción fue óptima en medios ácidos. Sin embargo, a temperaturas superiores, como 35 °C y 45 °C, se observó un leve incremento en la eficiencia en pH neutros o ligeramente ácidos, mientras que, en condiciones muy alcalinas, la capacidad de adsorción se redujo. Este comportamiento se explica por la variación de la carga superficial tanto del glifosato como del carbón activado en función del pH, lo que afecta la afinidad entre ambos (Barja & Afonso, 2005).

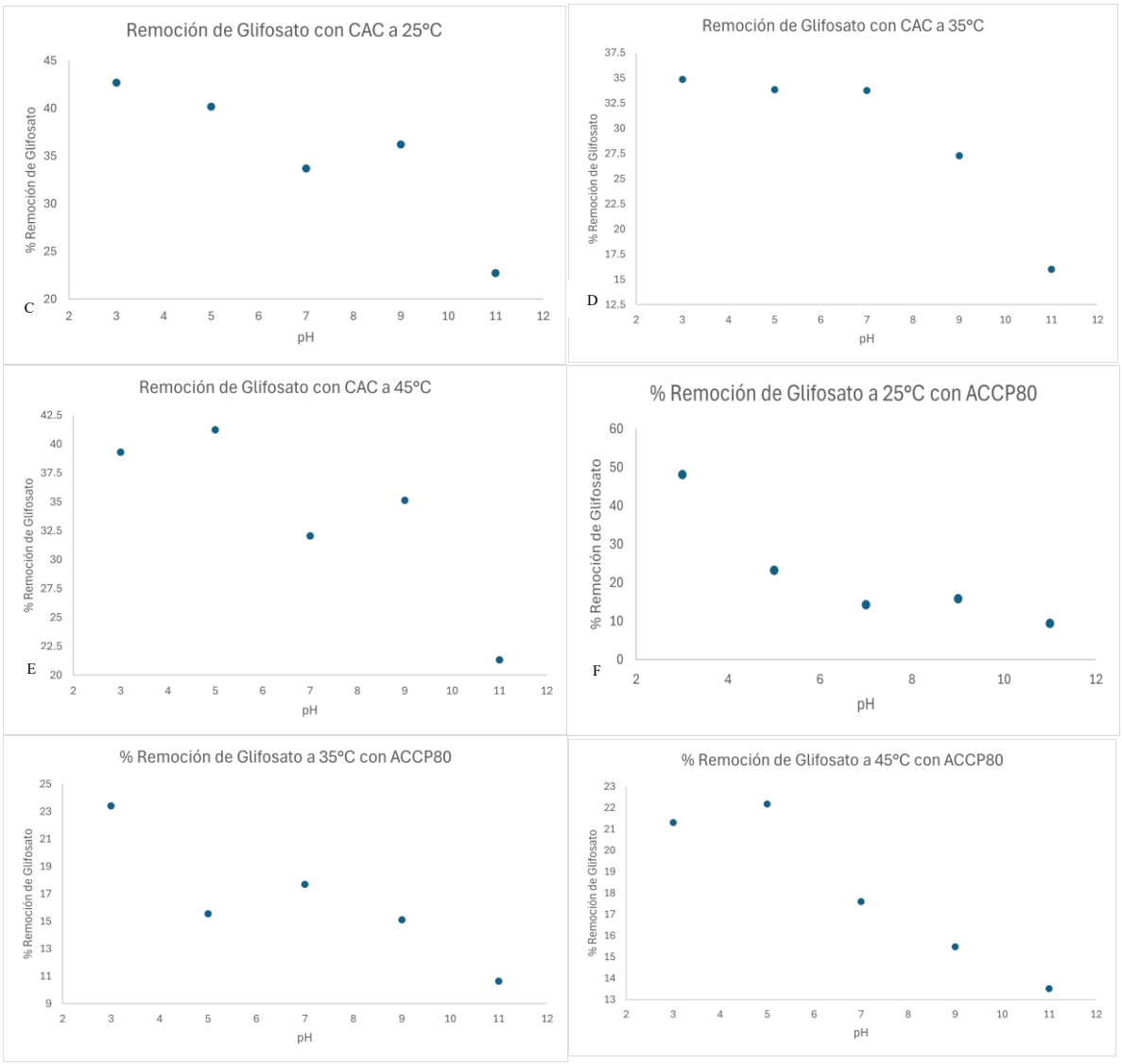


Figura 2. Efecto del pH y la temperatura sobre la remoción de glifosato utilizando CAC y ACCP80.

El análisis conjunto de estos estudios proporciona una visión más integral sobre el comportamiento ambiental del glifosato. Por un lado, se destaca que su capacidad para formar complejos puede aumentar su persistencia y dificultar su detección en ecosistemas acuáticos. Por otro lado, se demuestra que es posible su eliminación mediante procesos de adsorción, siempre que se controlen parámetros críticos como el pH y la temperatura.

Conclusión

En conclusión, investigaciones de este tipo resultan fundamentales para el desarrollo de tecnologías de tratamiento de aguas más eficientes y sostenibles. A medida que el uso global de herbicidas continúa en expansión, comprender la química específica del glifosato permite no solo mitigar sus riesgos ambientales y sanitarios, sino también diseñar estrategias de gestión más eficaces para la protección de la salud humana y del entorno natural.

Referencias:

- Barfoed, C. (1873). Über die Nachweisung des Traubenzuckers neben Dextrin und verwandten Körpern. *Fresenius' Zeitschrift für Analytische Chemie, 12*(1), 27–31. https://doi.org/10.1007/BF01462957
- Barja, B. C., & Afonso, M. D. S. (2005). Amino acid and copper removal by activated carbons. *Journal of Colloid and Interface Science, 291*(2), 400–408. https://doi.org/10.1016/j.jcis.2005.05.089
- Coutinho, C., Silva, M. O., Machado, S. A. S., & Mazo, L. H. (2007). Influence of glyphosate on the copper dissolution in phosphate buffer. Recuperado de https://www.researchgate.net/figure/UV-vis-spectrum-of-CuII-glyphosate-complex-formed-in-buffer-solution_fig4_253404872
- Glass, R. L. (1984). Metal complex formation by glyphosate. *Journal of Agricultural and Food Chemistry, 32*(6), 1249–1253. https://doi.org/10.1021/jf00126a010
- Greenpeace México. (s. f.). *Glifosato: herbicida peligroso para nuestra salud.* https://www.greenpeace.org/mexico/blog/9205/glifosato-herbicida-agente-cancerigeno/
- Torres, E., & Pacheco, M. (2020). *Desarrollo de un método de detección de glifosato en agua* [Tesis de maestría, Benemérita Universidad Autónoma de Puebla].
- Yi, L., Wu, S., Ren, G., Zhou, Q., Li, P., Wang, Y., Tian, X., He, D., & Pan, Q. (2025). Glyphosate detection based on Eu coordination polymer through competitive coordination. *Food Chemistry, 463*(Pt 4), 141554. https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2024.141554

Sobre los autores:

Miguel Angel San Juan García

Contacto: miguel.sanjuanga@udlap.mx

Dr. Felipe Córdova Lozano

Doctor en Química por la Universidad Joseph Fourier de Grenoble, Francia. Maestro en Ciencias en Ingeniería Química por la UDLAP y Licenciado en Química Industrial por la BUAP. Ha publicado 19 artículos internacionales y dirigido 21 tesis. Su investigación se centra en la síntesis y aplicación de nanomateriales para procesos de fotocatálisis y remediación ambiental. Ha colaborado con empresas como Janssen, Jumex, thyssenkrupp y Grupo IDESA en proyectos de análisis y caracterización de materiales. Fue miembro del SNI nivel 1.

Contacto: felipe.cordova@udlap.mx

Dra. Alejandra García García

Doctora en Ciencias con Especialidad en Materiales por el CINVESTAV Querétaro. Es investigadora en el CIMAV Unidad Monterrey y miembro del Sistema Nacional de Investigadores, nivel II. Su investigación se centra en la aplicación de nanomateriales en medio ambiente, salud y energía, así como en el estudio estructural y electrónico de materiales bidimensionales como grafeno, óxido de grafeno y dicalcogenuros de metales de transición.

Contacto: *alejandra.garcia@cimav.edu.mx*