

Alternatives to mitigate the impact of glyphosate, a highly toxic herbicide used in agriculture in Mexico

ALTERNATIVAS PARA MITIGAR EL IMPACTO EN EL USO DE GLIFOSATO, HERBICIDA ALTAMENTE TÓXICO EMPLEADO EN LA AGRICULTURA EN MÉXICO

Barbara Michelle Sánchez Fabila ¹, Rubén Ruiz Ramos ², Sandra Loera Serna ^{1*}

La agricultura es una de las actividades más importantes en el mundo, responsable de la provisión de insumos y alimentos. La demanda de alimentos se ha incrementado en los últimos años y con ella, la implementación de sustancias químicas que mejoren la productividad en los cultivos. Entre los principales productos usados en este tipo de industria están los plaguicidas (que incluyen a los insecticidas, fungicidas y herbicidas) y los fertilizantes sintéticos. En las últimas décadas, el uso de todos estos compuestos ha aumentado de forma preocupante y, en ocasiones, desmedida, generando que especies nocivas como bacterias, hongos y malezas que afectan a los cultivos importantes se vuelvan más resistentes y requieran mayor concentración o compuestos más tóxicos. Otra preocupación es la exposición colateral que tenemos los humanos a estos compuestos, lo que ocasiona graves problemas de salud. Existen múltiples reportes acerca de los efectos tóxicos y carcinogénicos que tienen dichos compuestos, como se documenta en este trabajo, particularmente centrado en el uso del glifosato, un herbicida altamente tóxico, usado en México y en el mundo. Finalmente, se ofrecen alternativas para la eliminación de este compuesto, basadas en técnicas que van desde la biorremediación hasta el uso de tecnologías de punta, como el uso de nanomateriales, incluso para su monitoreo ambiental.

Palabras clave: Agricultura, Herbicida, Glifosato.

Agriculture is one of the most important activities worldwide, responsible for providing raw materials and food. The demand for food has increased in recent years, and with it the implementation of products that enhance the efficiency of crops. Among the main products used in this industry are pesticides (insecticides, fungicides, and herbicides) and synthetic fertilizers. The use of these compounds has risen alarmingly and sometimes excessively in recent decades, contributing to the development of resistance in harmful species such as bacteria, fungi, and weeds and require higher concentrations or more harmful compounds. Another concern is the collateral exposure that humans have to these compounds, which causes serious health problems. There are multiple reports about the toxic and carcinogenic effects of these compounds, as documented in this paper, particularly about the use of a highly toxic herbicide in Mexico and the world called glyphosate. Finally, alternatives are offered for the elimination of this compound, based on techniques ranging from bioremediation to others using cutting-edge technologies, such as the use of nanomaterial, even for environmental monitoring.

Keywords: Agriculture; Herbicide; Glyphosate.

Recibido: 1 de abril de 2025. Aceptado en forma final: 2 de septiembre de 2025

Cómo citar este artículo: Sánchez-Fabila, B.M., Ruiz Ramos, R. y Loera-Serna, S.: "Alternativas para mitigar el impacto en el uso de glifosato, herbicida altamente tóxico empleado en la agricultura en México". Revista de Química, 2025, 39 (2), 2-12. DOI: <https://doi.org/10.18800/quimica.202502.001>

¹ Universidad Autónoma Metropolitana Unidad Azcapotzalco, Av. San Pablo 420, Col. Nueva El Rosario, Alcaldía Azcapotzalco, Ciudad de México C.P. 02128, México.  <https://orcid.org/0009-0009-5239-7787> (al2232800307@azc.uam.mx)

² Facultad de Medicina, Universidad Veracruzana, C. Agustín de Iturbide S/N, Zona Centro, 91700 Veracruz, México.

 <https://orcid.org/0000-0003-0044-9652> (ruruiz@uv.mx).

* Autora responsable:  <https://orcid.org/0000-0001-9562-3195> (sls@azc.uam.mx)



INTRODUCCIÓN

Desde hace algunas décadas, el uso de herbicidas se ha convertido en una práctica común en la agricultura moderna para controlar el crecimiento de plantas consideradas malezas y aumentar la productividad de los cultivos. Uno de los herbicidas más ampliamente utilizado actualmente es el glifosato, conocido por su eficacia y bajo costo (**Figura 1**). Sin embargo, en los últimos años, ha surgido un debate y controversia sobre su uso extensivo y los riesgos tanto para la salud humana, como para el ambiente. De la amplia gama de productos químicos agrícolas utilizados en esta actividad, muchos de ellos se aplican en concentraciones que superan los límites permitidos por los organismos internacionales responsables de la salud pública. Esta situación plantea un problema de alto riesgo, ya que, a pesar de las controversias sobre los riesgos derivados de su uso, lo cierto es que hay evidencias científicas de que el uso de estos productos, como el glifosato, tiene efectos tóxicos para los seres humanos y para otros organismos.

En ese sentido, se han implementado nuevas tecnologías que permitan afrontar y contribuir con los desafíos asociados a la persistencia y eliminación de herbicidas, como el glifosato. En el campo de la ciencia de materiales, se están desarrollando nuevos compuestos con propiedades únicas y aplicaciones innovadoras, en particular, buscando la inocuidad, la eficiencia y la sostenibilidad, para sustituir el glifosato o mitigar su impacto.

¿CUÁLES SON LOS IMPACTOS GLOBALES Y LOCALES DEL USO DE LOS PLAGUICIDAS?

Entre los plaguicidas existen diferentes tipos como los fungicidas, nematocidas, acaricidas, herbicidas, insecticidas, etc. Los herbicidas, por ejemplo, son sustancias químicas naturales o sintéticas utilizadas para inhibir, interrumpir o controlar el desarrollo o crecimiento de plantas no deseadas (no necesariamente dañinas), comúnmente conocidas como malezas, en terrenos destinados a ser cultivados. La agricultura es la principal actividad que utiliza plaguicidas (68%), seguida por la industria (por ejemplo: alimentaria, química, forestal, etc.) y el comercio (17%), y el uso doméstico y jardinería (8%). Según reportes basados en datos sobre el uso de plaguicidas del Servicio Nacional de Estadísticas Agrícolas (NASS, por sus siglas en inglés de *National Agriculture Statistical Service*) y de la Agencia de Protección del Ambiente de los Estados Unidos de América (EUA) (EPA, por sus siglas en inglés de *Environmental Protection Agency*), tan solo en EUA, en 1974 (el mismo año que fue comercializado el glifosato por Monsanto®) fueron usadas 635 toneladas métricas del ingrediente activo glifosato (alrededor del 57 % para uso agrícola y 43% para otros usos). En 2014 se usaron casi 200 veces más de esta última cifra (125 384 toneladas), de los cuales alrededor de 90 % fue para uso agrícola. Es decir, entre 1974 y 2015, tan solo en EUA, se habían aplicado más de 1,6 millones de toneladas de glifosato como ingrediente activo, lo que representó el 19 % del uso global de glifosato, estimado en 8,6 millones de toneladas¹.

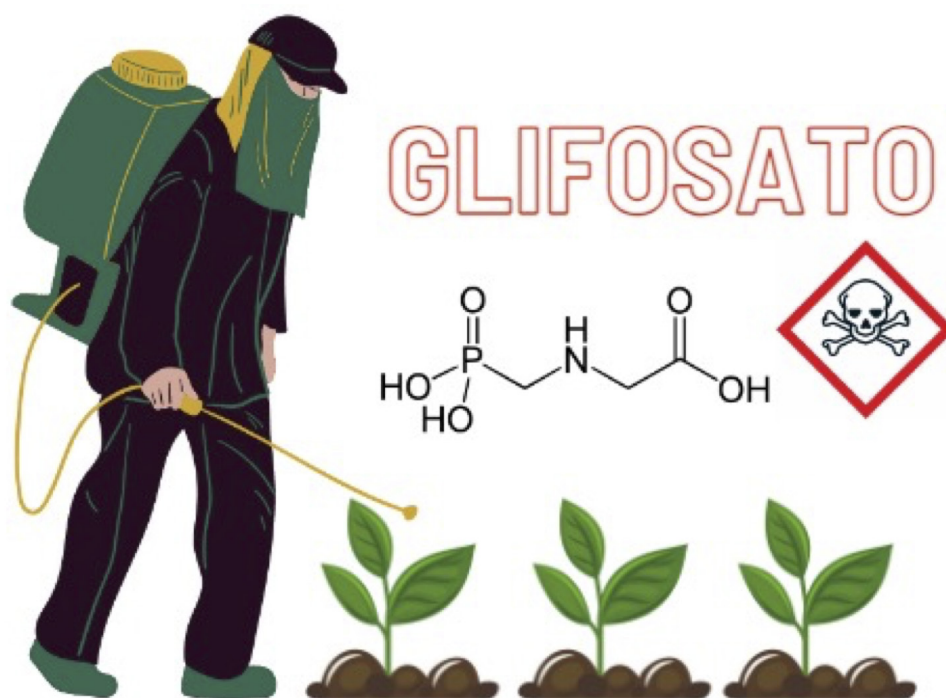
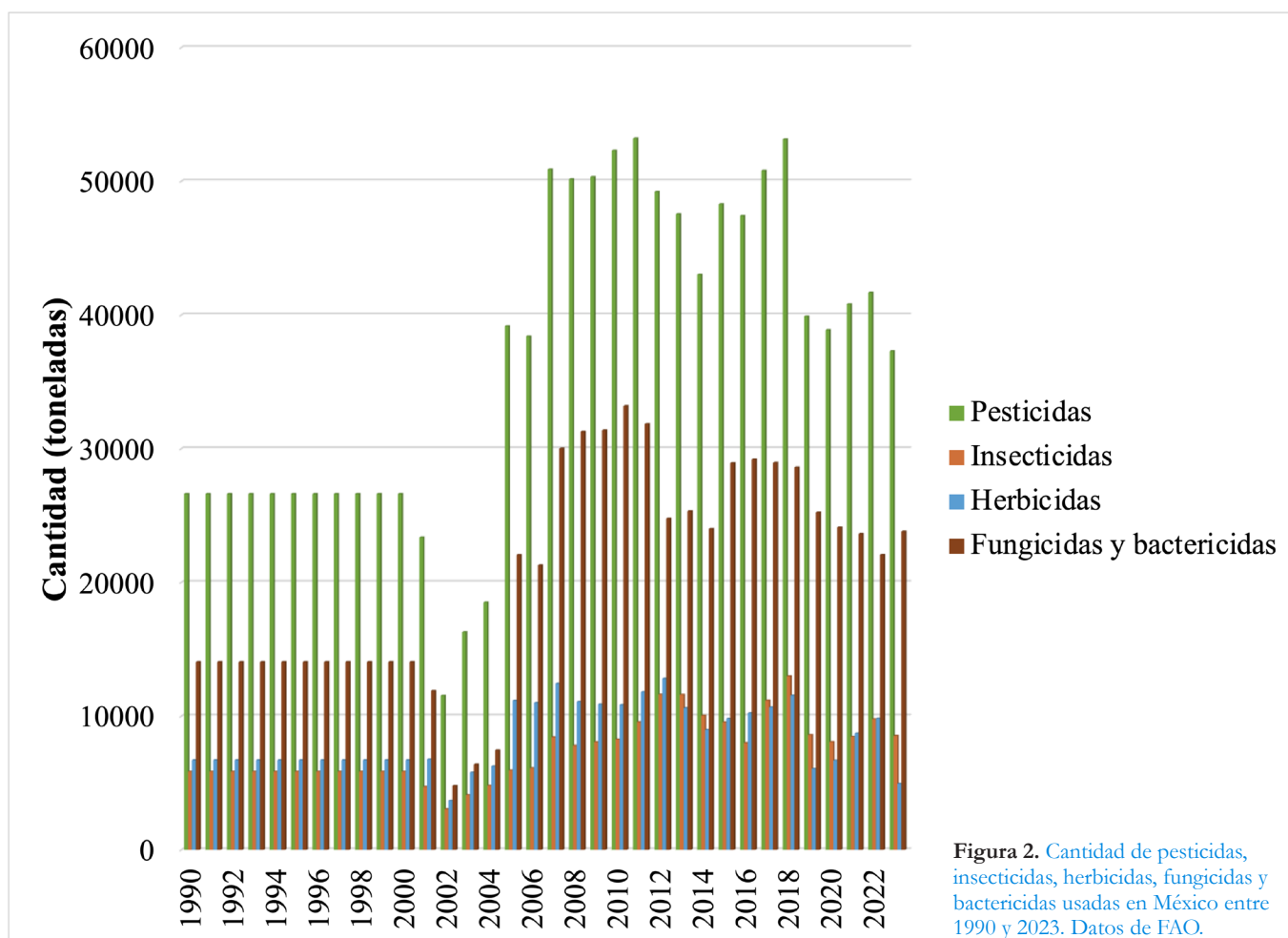


Figura 1. Estructura química del glifosato y su aplicación en la agricultura.

Según la Gaceta del Senado de 2018, que cita datos de la Asociación Mexicana de la Industria Fitosanitaria (AMIFAC) y el Centro Mario Molina, se estima que en México se utilizan anualmente alrededor de 55,000 toneladas de plaguicidas. Este volumen de uso genera aproximadamente 7,000 toneladas de envases vacíos y contaminados ².

Particularmente en México, de los datos registrados por la FAO (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura, ONUAA) en la **Figura 2** se pueden observar las cantidades usadas, desde 1990 hasta el 2023, de pesticidas, insecticidas, herbicidas, fungicidas y bactericidas. En los primeros 10 años se observa que las cantidades se mantienen, sin embargo, en el año 2001 el consumo de estos compuestos bajó considerablemente hasta el 2004 y posteriormente se registró un aumento que alcanzó poco más de 53,000 toneladas en el caso de pesticidas ³. Dicha disminución alrededor de 2001 no se atribuye a algún hecho histórico, pero se reconoce el aumento de la conciencia social respecto al uso de estos compuestos.

Sin embargo, debido a la alta toxicidad de las sustancias utilizadas en las tierras de cultivo y áreas de almacenamiento, el uso de dichos plaguicidas amenaza directamente a la especie humana, pero también a otros organismos importantes para su subsistencia, como aquellas especies vitales (polinizadores, por ejemplo) para la producción de alimentos. Además, estas sustancias participan en procesos de bioacumulación en diferentes sistemas biológicos, lo que significa que se transportan a través de las cadenas tróficas favoreciendo su distribución y permanencia en el ambiente, incluso tiempo después de su aplicación, y aún de su prohibición. Un ejemplo de ello es el glifosato, componente activo del herbicida más utilizado en mundo. Precisamente, debido al aumento en la diversidad de cultivos en los que es usado, así como los aumentos dramáticos en los volúmenes aplicados en la agricultura, los niveles de glifosato y su metabolito principal, el ácido aminometilfosfónico (AMPA) se han detectado en el aire, el suelo y el agua, por lo que los estudios ambientales han dado cuenta de los posibles impactos del glifosato en las comunidades microbianas del suelo y de lombrices de tierra⁴⁻⁶, de las mariposas monarca⁷, de algunos crustáceos⁸ y en las abejas melíferas⁹.



1. El glifosato

El glifosato es un compuesto de la familia de los organofosforados (N-fosfonometilglicina), **Figura 1**. Este compuesto fue descubierto en 1950 por el científico suizo Henri Martin. El glifosato originalmente estaba considerado para aplicaciones farmacológicas, sin embargo, estas no fueron identificadas. Veinte años después la empresa Monsanto® (St. Louis, MO, EUA) en donde laboraba John Franz descubrió que el glifosato tenía actividad herbicida y en 1974 formularon el producto comercial llamado Roundup®. Actualmente, el glifosato es aplicado utilizando una variedad de formas químicas, que incluyen diversas sales, tales como la de isopropilamina, de amonio, diamónica, de dimetilamonio y de potasio¹⁰.

El enlace covalente entre los átomos de carbono y fósforo es característico de los compuestos organofosforados y proporciona al glifosato varias propiedades químicas y físicas, como alta adsorción, alta solubilidad en agua, insolubilidad en solventes orgánicos y compatibilidad con otras sustancias. Actualmente, existen cientos de herbicidas a base de glifosato comercializados bajo diferentes marcas en más de 100 países de todo el mundo, por lo que el glifosato es considerado el herbicida más utilizado en todo el mundo ^{11, 12}.

El gran aumento observado (**Figura 3**) en el uso de glifosato a lo largo de los años ha generado una mayor preocupación debido a su demostrada toxicidad y las eventuales consecuencias para la salud humana y ambiental. Debido a que la descomposición de glifosato también se produce en las propias plantas, estudios realizados muestran que el glifosato se ha encontrado en productos vegetales, tales como aceite de oliva y otros aceites, cereales como el

centeno, trigo, arroz y pseudo cereales, frutas, jugos de frutas, vino y cervezas¹³⁻¹⁷. Por lo anterior, y debido a que el glifosato se aplica de forma intensiva en los campos de cultivo, sus residuos han sido frecuentemente detectados en el ambiente, y no solo en plantas o sus derivados, sino también en muestras de suelo, agua, productos alimenticios diversos, e incluso también en la orina humana, por lo tanto, el número de estudios sobre los efectos del glifosato en especies vivas también aumentó en los últimos años.

2. Toxicidad del glifosato

En 2015 el glifosato fue catalogado por la Agencia Internacional de Investigación en Cáncer (IARC, por sus siglas en inglés) como probable carcinógeno 2A, lo cual significa que existen pruebas de que puede causar cáncer en los humanos, pero dichas pruebas no son concluyentes ¹⁸. Adicionalmente, en 2019, la Agencia de Sustancias Tóxicas y Registro de Enfermedades de los EUA (ATSD, por sus siglas en inglés), en un informe sobre la toxicidad del glifosato, concluyó, al igual que la IARC, que existe un riesgo potencial de cáncer asociado con el uso de glifosato¹⁹. Sin embargo, los estudios referidos por estos organismos generalmente no abordan una amplia gama de posibles efectos adversos desencadenados por la interrupción en los procesos metabólicos o de desarrollo mediados por el sistema endocrino. Se ha demostrado que este herbicida puede actuar a través de varios mecanismos además de la inducción de genotoxicidad al causar daño al ácido desoxirribonucleico (ADN), pues también lo hace mediante la generación de estrés oxidativo, lo cual ocasiona daño celular por la presencia de radicales libres que afectan la estructura y función de macromoléculas (ADN, proteínas, lípidos), mediante alteraciones en mecanismos celulares

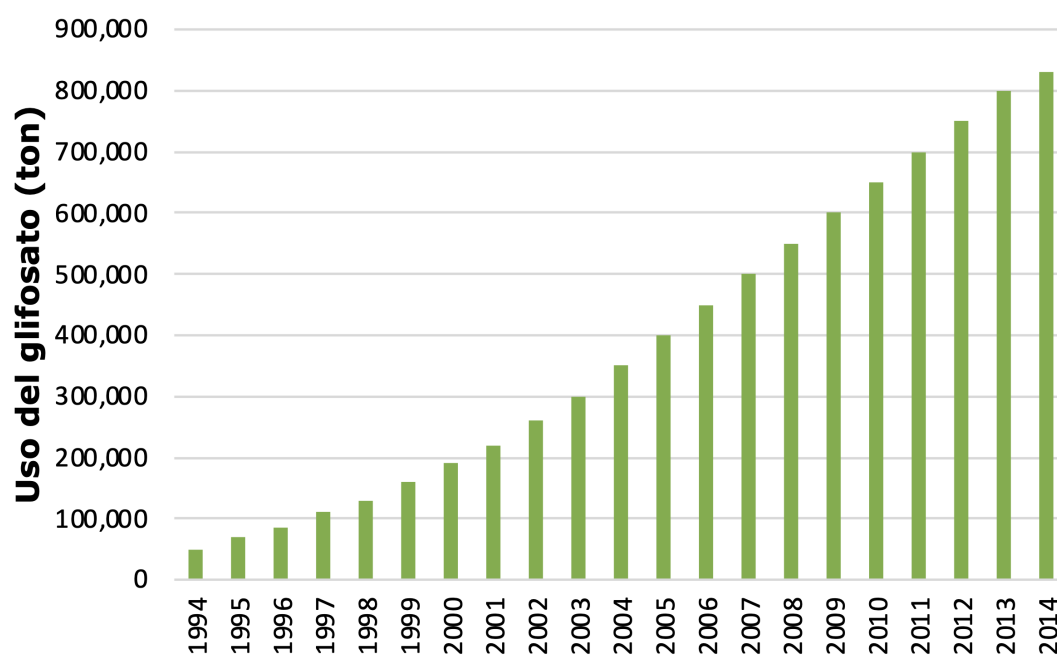


Figura 3. Evolución del consumo anual de glifosato a nivel mundial entre 1994 y 2014. Elaborada con base en los datos de: Conacyt, Expediente científico sobre el glifosato y los cultivos GM. *Cons Nac Cienc y Tecnol* 2020, 31.

mediados por receptores (particularmente disrupción endocrina) e incluso causando alteraciones epigenéticas y teratogénicas²⁰⁻²³.

Al ser el herbicida más utilizado a nivel mundial, la exposición humana al glifosato es sumamente frecuente (tanto en entornos rurales como urbanos). Esta exposición puede clasificarse en ocupacional o no ocupacional (**Figura 4**). Dado que en las poblaciones rurales hay mayor número de personas que se dedican a la agricultura, que es donde se usan principalmente los plaguicidas, este grupo de población se considera ocupacionalmente expuesto junto a quienes se dedican a la jardinería o al mantenimiento de infraestructuras relacionadas. La exposición no ocupacional hace referencia a las poblaciones urbanas en las cuales el uso de estos compuestos es menos común, pero puede darse mediante el consumo de productos o el contacto ocasional. En ese sentido, existen estudios que han evaluado los posibles riesgos para los vertebrados y los seres humanos que incluyen evidencias no solo de un aumento riesgo de cáncer, sino además de una variedad de otros posibles impactos adversos en el desarrollo, el hígado, el riñón, o los procesos metabólicos^{20, 21, 24-33}.

La toxicidad del glifosato y de los herbicidas que lo contienen depende de varios factores como la dosis, el tiempo de exposición, la vía de ingreso y la presencia de otros compuestos en la formulación del herbicida, tales como algunas sustancias tensoactivas con actividad como disruptores endócrinos. Adicional a lo anterior, se han reportado los efectos estrogénicos aditivos o sinérgicos de la genisteína presente en la soya transgénica resistente a glifosato, por lo que cuando es consumida como suplemento dietético y se encuentra contaminada con glifosato, aumentan los riesgos de desarrollo de cáncer de mama²¹. Por lo anterior, es importante considerar todos estos efectos al evaluar los riesgos para la salud asociados con la exposición al glifosato y no solo considerar los posibles efectos carcinogénicos. Los

daños a la salud han sido observados no solo en humanos sino también en animales y células humanas expuestas al glifosato y a sus diferentes formulaciones. Estos daños han sido recopilados por Soares y colaboradores³⁴ y se muestran en la **Tabla 1**.

Tabla 1. Daños a la salud para seres humanos y animales relacionados con el uso de glifosato. Datos de Soares y colaboradores³⁴.

ESPECIE	DAÑO A LA SALUD
Conejos	- Irritante a los ojos - Daños oculares
Pez cebra	- Cardiotoxicidad - Aumento de la mortalidad - Malformaciones
Ratas	- Efectos hepatotóxicos - Disfunción hepática - Pérdida de células tubulares por apoptosis
Humanos	- Toxicidad aguda, lo que conduce a pérdida de peso, trastornos gastrointestinales, pulmonares, renales y hepáticos - Riesgo de enfermedad celíaca - Efectos cardio tóxicos y arritmias - Estresan y oxidan ciertos órganos, particularmente el hígado - Trastornos del sistema endocrino - Malformaciones en fetos
Células humanas	- Compromete el funcionamiento de la acetilcolinesterasa lo que lleva a una desregulación en la transmisión de los impulsos nerviosos y la aparición de trastornos neurológicos - Daño a los cromosomas y desoxirribosa (ADN) - Cambios morfológicos en los eritrocitos

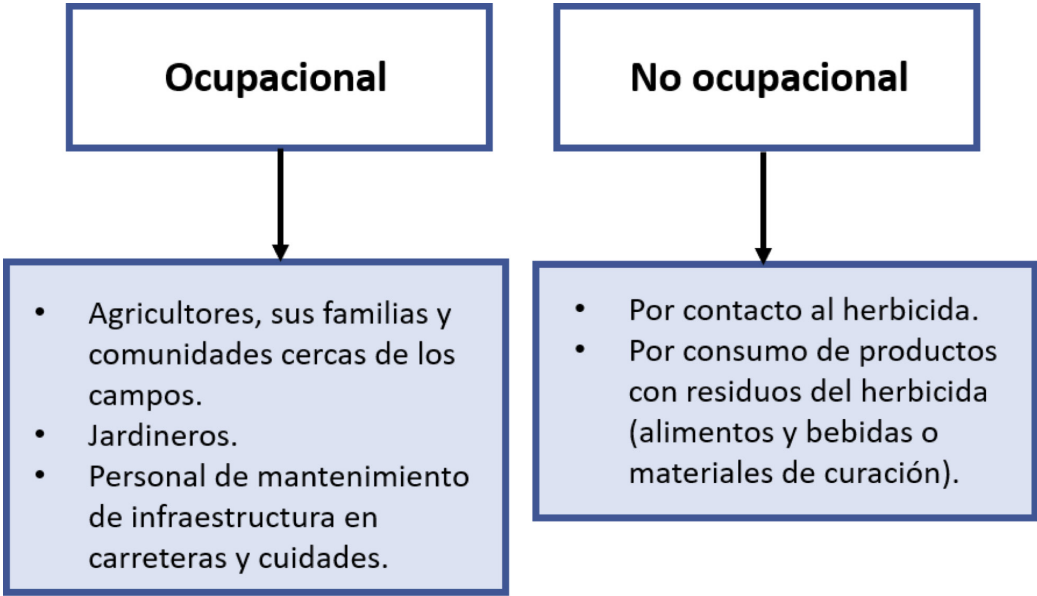


Figura 4. Diferentes formas de exposición humana al glifosato. Elaborada en base a la información de Conacyt, Expediente científico sobre el glifosato y los cultivos GM. *Cons Nac Cienc y Tecnol* 2020, 31.

3. Uso del glifosato en México

Es importante considerar que en México no existen límites aceptables específicos para el glifosato en el agua potable, aunque la Norma Mexicana NOM-201-SSA1-2015 establece que los compuestos orgánicos no halogenados, incluido el glifosato, no deben exceder los 10 µg/L. En contraste, y como referencia, en la Unión Europea el límite máximo permitido de glifosato en productos de consumo humano debe ser menor a 0.1 µg/L (*The Council of the European Union*, 1998). Resulta alarmante que la norma mexicana permita exceder en 100 veces el límite aceptable de glifosato en agua para consumo humano que reporta la Unión Europea para productos también de consumo humano.

Los estudios del glifosato en México se han realizado en diversos cuerpos de agua (**Figura 5**). En las aguas costeras de la Península de Yucatán, por ejemplo, se ha encontrado glifosato cerca de las áreas con una mayor concentración de zonas agrícolas³⁵. También se han detectado residuos de glifosato en cuerpos de agua ubicados dentro de Áreas Naturales Protegidas (ANP) en el estado de Chiapas [36]. Asimismo, de acuerdo con un estudio realizado en el municipio de Hopelchén en el estado de Campeche, también se encontraron residuos de glifosato en aguas subterráneas, agua potable embotellada, y la orina de campesinos de varias localidades³⁷. En consecuencia, es importante considerar, debatir y analizar nuevas regulaciones en México para

no exponer la salud humana y el ambiente, debido a que las concentraciones de glifosato en aguas subterráneas y potables indican una exposición excesiva en la población.

ALTERNATIVAS PARA LA ELIMINACIÓN DE GLIFOSATO ACUMULADO

Los potenciales daños que puede causar el uso de herbicidas a base de glifosato, tal como se ha mostrado en la **Tabla 1**, llevan a preguntarse si existen métodos o alternativas eficientes que permitan la eliminación de este de los lugares en los que se haya acumulado. Esto es posible usando principalmente dos metodologías: mediante la degradación del glifosato o mediante su adsorción del medio en el que se encuentra. Algunas ideas básicas de cada método se muestran en la **Figura 6** y a continuación se detallará mejor cada una de ellas.

En resumen, "adsorber" se refiere a la captura física de sustancias en la superficie de un material, mientras que "degradar" implica la eliminación mediante la descomposición más completa de las sustancias del ambiente transformando el compuesto original en sustancias más simples. La adsorción es un proceso ampliamente utilizado para tratar y purificar agua contaminada con glifosato debido a su simplicidad, no toxicidad, diseño de bajo costo y alta eficiencia. La selección adecuada del material adsorbente es crucial. Entre

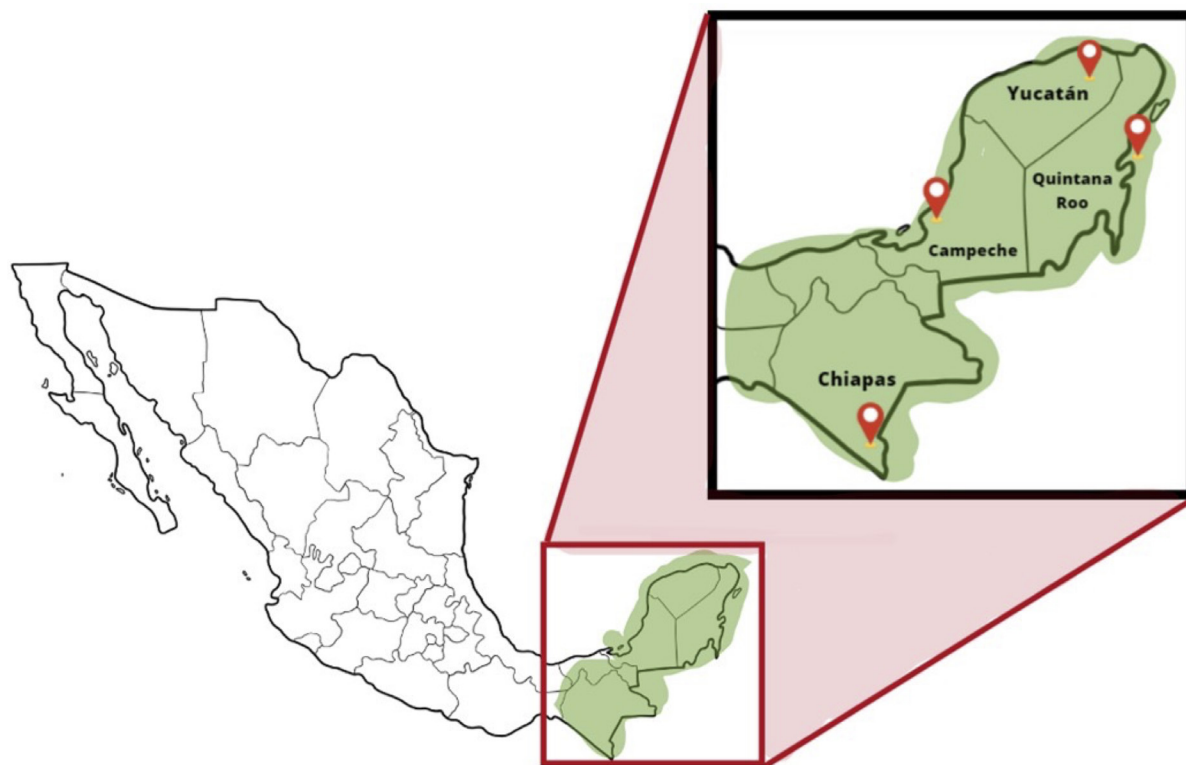


Figura 5. Puntos geográficos en los que se encontró glifosato en cuerpos de agua. Mapa elaborado con base en los datos de las referencias ^{35, 37 y 36}.

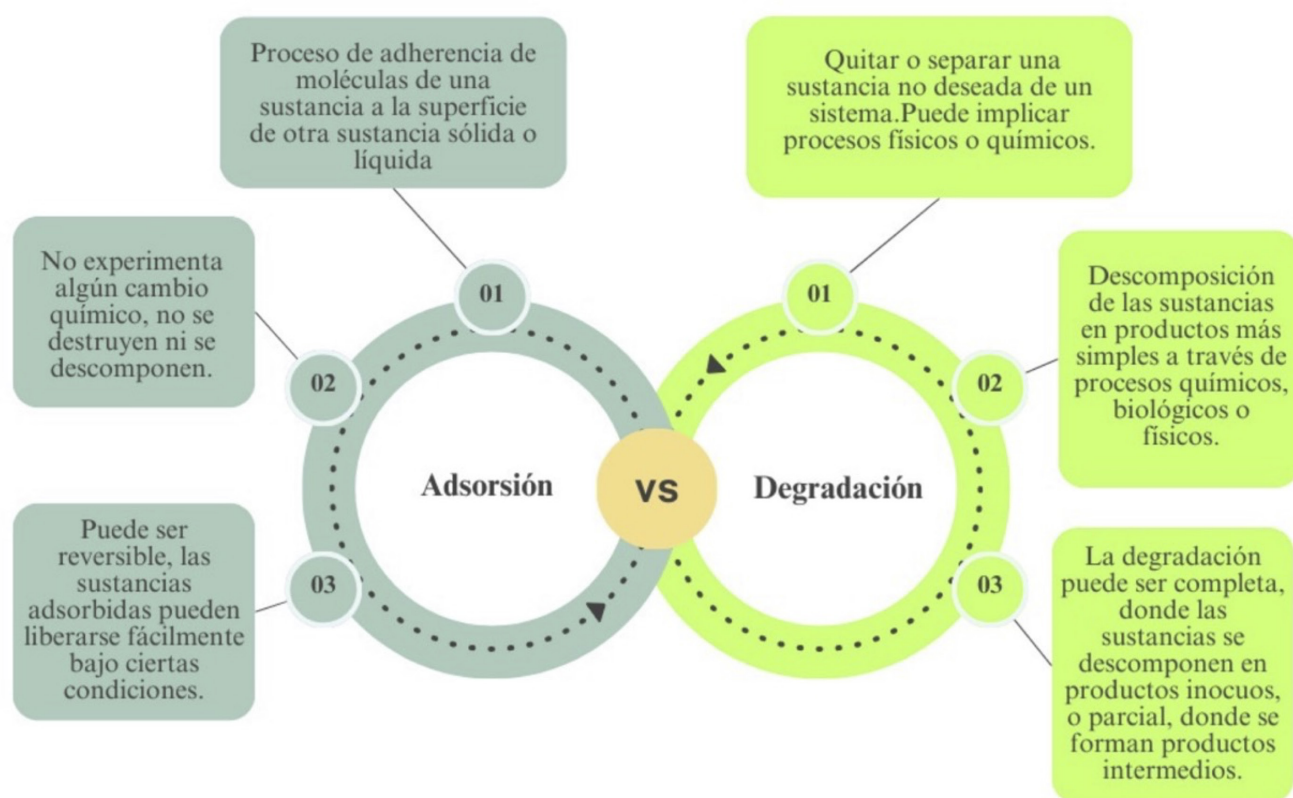


Figura 6. Características de los procesos de adsorción y de degradación.

los materiales que se han utilizado como adsorbentes para eliminar el glifosato de las aguas residuales se encuentran las sustancias arcillosas, el carbón activado, las zeolitas, el biocarbón, el óxido de grafeno y materiales adsorbentes a base de hierro y resinas. Mediante el uso combinado de oxidación electroquímica y adsorción se ha eliminado más del 99 % del glifosato en muestras de aguas residuales³⁸.

En trabajos como el de López-Escandon³⁹ se utilizan alternativas de biorremediación en las que se emplea el uso de microorganismos (bacterias, hongos, plantas) capaces de degradar el glifosato y convertirlo en nuevos compuestos menos dañinos que reducen los riesgos de exposición ambiental.

Para la detección del glifosato también se han diseñado sensores electroquímicos basados en grafeno, como se reporta en el trabajo de Lui y colaboradores⁴⁰, o usando materiales muy novedosos e innovadores, tales como las redes metal orgánicas o MOFs, por sus siglas en inglés (*Metal Organic-Frameworks*), reportado en el trabajo de Gu y colaboradores⁴¹. Estas últimas estructuras podrían ser consideradas un instrumento prometedor y de suma utilidad ya que ayudarían a determinar la cantidad presente de glifosato en las sustancias y, con ello, permitiría tener un control y monitoreo adecuado para tomar medidas preventivas si los niveles de glifosato son altos, brindando una mayor seguridad

en los alimentos, al ambiente, a la salud y para promover prácticas agrícolas más sostenibles.

En general existen diferentes procesos para eliminar o adsorber glifosato y en la **Tabla 2** se presentan los más comunes, así como las generalidades de cada uno y ejemplos de estudios que han demostrado la eficiencia que estos pueden tener. Se ha planteado que puede existir sinergia entre los diferentes métodos empleados, lo que potencia la degradación o eliminación del glifosato.

CONCLUSIONES

El uso de herbicidas, como el glifosato, conlleva riesgos significativos para la salud humana y el ambiente, especialmente mediante la contaminación del agua y por lo tanto de productos de consumo humano. Si bien el interés en la comunidad científica por esta problemática es evidente, los esfuerzos no han sido suficientes para erradicar el uso del glifosato. En ese sentido, se vuelve necesario implementar regulaciones sobre el uso de este compuesto que deben ser actualizadas, reforzadas y bien estipuladas por las dependencias responsables, para evitar el uso indiscriminado del glifosato. Dado que existen evidencias de la presencia de este compuesto en recursos tan vitales como el agua, aun con las normativas actuales, es fundamental explorar y desarrollar

Tabla 2. Resumen de procesos de degradación de glifosato: características, aplicaciones y resultados relevantes.

PROCESO	CARACTERÍSTICA DEL PROCESO	APLICACIONES	ESTUDIOS RELACIONADOS CON EL PROCESO (Parámetros de estudio / principal resultado)	REF.
DEGRADACIÓN				
Biorremediación con microorganismos	Utilización de microorganismos (bacterias, hongos) para degradar el glifosato en el suelo y el agua mediante procesos metabólicos. Puede ser in situ (en el lugar de la contaminación) o ex situ (el material contaminado se traslada para su tratamiento)	Suelo contaminado, agua subterránea, efluentes agrícolas, reactores biológicos	Cepas: <i>Pseudomonas</i> spp. GA07, GA09 y GC04. Mostraron alta capacidad de degradación de glifosato	42
			Cepa de <i>Pseudomonas</i> sp. degrada el glifosato con mayor eficacia a pH= 7, C=0.5 g/L, T= 30 y 35 °C y un tamaño de inóculo del 1 % (v/v)	43
			Cepa: <i>Bacillus subtilis</i> Bs-15. Las condiciones óptimas fueron C=10.000 mg/L, T= 35 °C y pH= 8	44
			Cepas: <i>Arthrobacter</i> sp. y <i>Bacillus</i> sp. Sobrevivieron en presencia de C=100 mg/L. La degradación (t=96 h) fue: <i>Arthrobacter</i> sp. → 93.84% <i>Bacillus</i> sp. →76.37 %	45
			Las condiciones que obtuvieron las mejores remociones fueron: Carbón activado → pH=8, T=50 °C, y t=1.7 h Cads= 11.4 g/L Biocarbón → pH=5, T=50 °C, y t=1.9 h, Cads= 12.3 g/L	46
			Fenton, electro-Fenton, fotoelectrooxidación y fotoelectro-Fenton. El tratamiento fotoelectro-Fenton fue el más eficaz en la degradación	47
			Combinación de peróxido de hidrógeno y radiación UV. La conversión de glifosato aumenta significativamente a partir de un pH de 3 a 7.	48
			Procesos de precipitación de CaO y oxidación avanzada (POA). Con 1 g de CaO en 100 mL se eliminó el 79 % Con POA fue de 99 % después de la segunda unidad de disposición.	49
			La eficiencia de la fotodegradación aumenta con el aumento del tiempo de iluminación. Los medios ácidos o alcalinos son favorables para la degradación fotocatalítica del glifosato con TiO ₂ .	50
			El aluminio y el hierro son los electrodos más comunes para la eliminación de pesticidas mediante electrocoagulación con eficiencias superiores al 99 %.	51
			Enzimas: peroxidasa de manganeso (MnP), la lacasa, la lignina peroxidasa (LiP) y la peroxidasa de rábano picante (HRP) puras. MnP junto con MnSO ₄ y Tween 80 degradaron 20 pesticidas con un porcentaje entre 20 y 100 %.	52
			La concentración de glifosato en la solución nutritiva disminuyó de 43.09 µg mL ⁻¹ a 0.45 µg mL ⁻¹ en 30 días y que <i>V. myuros</i> absorbió el 99% y degradó el 80 %	53
ADSORCIÓN				
Adsorción con carbón activado	Uso de carbón activado, un material poroso con alta superficie específica, para atraer y retener las moléculas de glifosato mediante interacciones físicas y químicas	Columnas de filtración en plantas de tratamiento de agua, aplicación directa al suelo contaminado, sistemas de remediación ex situ	La capacidad de adsorción en equilibrio fue de 30.79 mg/g a un pH=3	54
Adsorción con biomasa residual	Utilización de materiales de bajo costo derivados de residuos agrícolas o industriales (ej. cáscaras de arroz, bagazo de caña, aserrín) que, tras un tratamiento o sin él, pueden adsorber glifosato	Filtros a pequeña escala, remediación in situ en áreas agrícolas, tratamiento de efluentes	Bagazo de caña natural y tratado en medio alcalino. % de adsorción > 65 %.	55

Nanomateriales adsorbentes (diferentes al carbón activado)	Uso de nanomateriales como nanotubos de carbono, óxidos metálicos nanoporosos, o polímeros nanoestructurados con alta área superficial y sitios de adsorción específicos para el glifosato.	Filtros avanzados, remediación <i>in situ</i> a escala nanométrica, sensores para detección y remoción simultánea	Se han estudiado nanoestructuras de carbono, nanopartículas y óxidos metálicos, puntos cuánticos y redes metal orgánicas. Las nanopartículas metálicas (Ag, Au y Fe); óxidos metálicos (MgO y CuO); materiales a base de carbono (nanotubos de carbono, carbón activado y óxido de grafeno); y MOF (UiO-67, Cu-BTC y ZIF-8) actúan como excelentes adsorbentes para la eliminación de OPP en fase acuosa.	56
Procesos de filtración con membranas	Utilización de membranas semipermeables con diferentes tamaños de poro (ósmosis inversa, nanofiltración, ultrafiltración) para separar el glifosato del agua	Plantas de tratamiento de agua potable y residual, sistemas de purificación a nivel industrial	Membranas biopoliméricas preparadas con quitosano (CS), alginato (AG) y una combinación de quitosano/ alginato (CS/AG). CS adsorbió → 10.88 mg /g CS/AG → 8.70 mg/g AG no adsorbió	57
Adsorción con arcillas modificadas	Uso de materiales arcillosos naturales o modificados químicamente para aumentar su capacidad de adsorción de glifosato. La modificación puede incluir el uso de tensioactivos o la intercalación de otros compuestos.	Remediación <i>in situ</i> de suelos, tratamiento de aguas contaminadas en sistemas de bajo costo.	Montmorillonita cálcica (CM) y montmorillonita procesada con ácido aminometilfosfónico (APM). En todas las dosis redujo significativamente y consistentemente la biodisponibilidad.	58
			Hetero estructura arcillosa porosa (PCH). La cantidad máxima casi se duplica con PCH, pasando de 13.5 mg/g de arcilla natural a 27.5 mg/g de PCH.	59

Abreviaturas adicionales: Concentración (C), Concentración de adsorbente (C_{ads}), Plaguicidas Organofosforados (OPP).

soluciones efectivas para implementar procesos basados en la adsorción o degradación del glifosato en el ambiente. El uso de materiales nuevos y procesos innovadores ofrece métodos eficientes y sostenibles para reducir la presencia de glifosato en el ambiente y proteger la salud de este y de las personas. Trabajar con equipos multidisciplinarios y realizar estudios que permitan tener un panorama más extenso y profundo permitirá proponer las mejores soluciones posibles. Es necesario promover el uso responsable de herbicidas y fomentar la adopción de prácticas agrícolas más sostenibles para mitigar los impactos negativos asociados a estos compuestos.

REFERENCIAS

- Benbrook, C.M., Trends in glyphosate herbicide use in the United States and globally. *Environ. Sci. Eur.*, **2016**, *28*, 1-15.
- SENADO DE LA REPÚBLICA de México, L.L., GACETA: LXIV/1PPO-61/870 **36**. 2018.
- FAO, Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. 2025.
- Gaupp-Berghausen, M., Hofer, M., Rewald, B., Zaller, J.G. Glyphosate-based herbicides reduce the activity and reproduction of earthworms and lead to increased soil nutrient concentrations. *Scientific Reports*, **2015**, *5*(1), 12886.
- Kremer, R.J., Environmental implications of herbicide resistance: soil biology and ecology. *Weed Science*, **2014**, *62*(2), 415-426.
- Eker, S., Ozturk, L., Yazici, A., Erenoglu, B., Romheld, V., Cakmak, I. Foliar-applied glyphosate substantially reduced uptake and transport of iron and manganese in sunflower (*Helianthus annuus* L.) plants. *J. Agric. Food Chem.*, **2006**, *54*(26), 10019-10025.
- Pleasants, J.M., K.S. Oberhauser, Milkweed loss in agricultural fields because of herbicide use: effect on the monarch butterfly population. *Insect Conserv. Divers.*, **2013**, *6*(2): p. 135-144.
- Cuhra, M., Traavik, T., Dando, M., Primicerio, R., Holderbaum, D., Bohn, T., Glyphosate-residues in roundup-ready soybean impair *Daphnia magna* life-cycle. *J. Agric. Food Chem.* **2015**, *4*, 24-36.
- Balbuena, M.S., Tison, L., Hahn M.L., Greggers, U., Menzel, R., Farina W.M. Effects of sublethal doses of glyphosate on honeybee navigation. *J. Exp. Biol.*, **2015**, *218*(17): p. 2799-2805.
- Dill, G.M., Sammons, R.D., Feng, P.C.C., Kohn, F., Kretzmer, K., Mehrsheikh, A., Bleeke, M., Honegger, J.L., Farmer, D., Wright, D. and Haupfear, E.A.: *Glyphosate: discovery, development, applications, and properties*. En Nandula V.K. (Ed.) "Glyphosate resistance in crops and weeds: history, development, and management", Wiley, 2010: pp. 1-33.
- Valavanidis, A., *Glyphosate, the Most Widely Used Herbicide. Health and safety issues. Why scientists differ in their evaluation of its adverse health effects*. Reporte independiente, 2018.
- Tang, Q., Tang, J., Ren, X., Li, C.: Glyphosate exposure induces inflammatory responses in the small intestine and alters gut microbial composition in rats. *Environ. Pollut.*, **2020**, *261*, 114129.
- Battaglin, W.A., Meyer, M.T. Kuivila, K.M. Dietze, J.E.: Glyphosate and its degradation product AMPA occur frequently and widely in US soils, surface water, groundwater, and precipitation. *JAWRA*, **2014**, *50*(2): p. 275-290.
- Borggaard, O.K. and A.L. Gimsing, Fate of glyphosate in soil and the possibility of leaching to ground and surface waters: a review. *Pest Manag. Sci.*, **2008**, *64*(4): p. 441-456.
- Chang, F.-C., M.F. Simcik, and P.D. Capel, Occurrence and fate of the herbicide glyphosate and its degradate aminomethylphosphonic acid in the atmosphere. *Environ. Toxicol. Chem.*, **2011**, *30*(3), 548-555.
- Chiesa I.M., Nobile M., Panseri S., Arioli F.: Detection of glyphosate and its metabolites in food of animal origin based on ion-chromatography-high resolution mass spectrometry (IC-HRMS). *Food Addit. Contam.: A*, **2019**, *36*(4), 592-600.
- Coupe, R.H., et al., Fate and transport of glyphosate and aminomethylphosphonic acid in surface waters of agricultural basins. *Pest Manag. Sci.*, **2012**, *68*(1): p. 16-30.
- International Agency for Research on Cancer: *Agents Classified by the IARC Monographs*. 2025. (Consulta agosto 2025)
- Vainio, H., Public health and evidence-informed policy-making:

- The case of a commonly used herbicide. *Scand. J. Work Environ. Health*, **2020**, 46(1): p. 105-109.
20. Paganelli A, Gnazzo V, Acosta H, López SL, Carrasco AE., Glyphosate-based herbicides produce teratogenic effects on vertebrates by impairing retinoic acid signaling. *Chem. Res. Toxicol.*, **2010**, 23(10), 1586-1595.
 21. Thongprakaisang S, Thiantanawat A, Rangkadilok N, Suriyo T, Satayavivad J., Glyphosate induces human breast cancer cells growth via estrogen receptors. *Food Chem. Toxicol.*, **2013**, 59: p. 129-136.
 22. Muñoz, J.P., T.C. Bleak, Calaf, G.M., Glyphosate and the key characteristics of an endocrine disruptor: A review. *Chemosphere*, **2021**, 270: p. 128619.
 23. Bukowska, B., Woźniak, E., Sicińska, P., Mokra K, Michalowicz J.: Glyphosate disturbs various epigenetic processes in vitro and in vivo—a mini review. *Sci. Total Environ.*, **2022**, 851, 158259.
 24. Antoniou M., Habib M.E.M., Howard, C.V., Jennings R.C., Leifert C., Nodari, R.O., Robinson C.J., Fagan J. Teratogenic effects of glyphosate-based herbicides: divergence of regulatory decisions from scientific evidence. *J. Environ. Anal. Toxicol.*, **2012**, 4(006): p. 2161-0525.
 25. Mesnage R, Defarge N, Spiroux de Vendômois J, Séralini GE., Potential toxic effects of glyphosate and its commercial formulations below regulatory limits. *Food Chem. Toxicol.*, **2015**, 84, 133-153.
 26. Cattani, D., de Liz Oliveira Cavalli V.L., Heinz Rieg C.E., Domingues J.T., Dal-Cim T., Tasca, C.I., Mena Barreto Silva, F.R., Zamoner A. Mechanisms underlying the neurotoxicity induced by glyphosate-based herbicide in immature rat hippocampus: involvement of glutamate excitotoxicity. *Toxicology*, **2014**, 320: p. 34-45.
 27. Jayasumana, C., Gunatilake, S., and Senanayake P: Glyphosate, hard water and nephrotoxic metals: are they the culprits behind the epidemic of chronic kidney disease of unknown etiology in Sri Lanka? *Int. J. Environ. Res. Public Health*, **2014**, 11(2): p. 2125-2147.
 28. Hokanson R, Fudge R, Chowdhary R, Busbee D: Alteration of estrogen-regulated gene expression in human cells induced by the agricultural and horticultural herbicide glyphosate. *Hum. Exp. Toxicol.*, **2007**, 26(9): p. 747-752.
 29. Ma, J., Y. Bu, and X. Li, Immunological and histopathological responses of the kidney of common carp (*Cyprinus carpio* L.) sublethally exposed to glyphosate. *Environ. Toxicol. Pharmacol.*, **2015**, 39(1): p. 1-8.
 30. Romano MA, Romano RM, Santos LD, Wisniewski P, Campos DA, de Souza PB, Viau P, Bernardi M.M, Nunes MT, de Oliveira CA.: Glyphosate impairs male offspring reproductive development by disrupting gonadotropin expression. *Arch. Toxicol.*, **2012**, 86(4): p. 663-673.
 31. Schinasí, L. and M.E. Leon, Non-Hodgkin lymphoma and occupational exposure to agricultural pesticide chemical groups and active ingredients: a systematic review and meta-analysis. *Int. J. Environ. Res. Public Health*, **2014**, 11(4) 4449-4527.
 32. Spisák S., Solymosi N., Ittész P, Bodor A., Kondor D, Vattay G., Barták B.K., Sipos F, Galamb O., Tulassay Z, Szállási Z., Rasmussen S, Sicheritz-Ponten T, Brunak S, Molnár B, Csabai I.: Complete genes may pass from food to human blood. *PLoS One*, **2013**, 8(7): e69805.
 33. Zdziarski I.M., Edwards J.W., Carman J.A., Haynes J.I. GM crops and the rat digestive tract: a critical review. *Environ Int.*, **2014**, 73, 423-433.
 34. Soares D, Silva L, Duarte S, Pena A, Pereira A. Glyphosate Use, Toxicity and Occurrence in Food. *Foods*. **2021**, 10(11), 2785.
 35. Arellano-Aguilar, O., Rendón von Osten, O. *La huella de los plaguicidas en México*. E. Martínez. Greenpeace México. AC Las Flores, **2016**. (Consultado: abril 2025)
 36. Ruiz-Toledo J., Castro R., Rivero-Pérez N., Bello-Mendoza R., Sánchez D., Occurrence of glyphosate in water bodies derived from intensive agriculture in a tropical region of southern Mexico. *Bull. Environ. Contam. Toxicol.*, **2014**, 93, 289-293.
 37. Rendón-von Osten, J. and R. Dzul-Caamal: Glyphosate residues in groundwater, drinking water and urine of subsistence farmers from intensive agriculture localities: a survey in Hopelchén, Campeche, Mexico. *Int. J. Environ. Res. Public Health*, **2017**, 14(6): p. 595.
 38. Jönsson, J., Camm, R., Hall, T., Removal and degradation of glyphosate in water treatment: a review. *J. Water Supply: Res. Technol.—Aqua*, **2013**, 62(7): p. 395-408.
 39. López Escandon, V., *Evaluación in-vitro de la biodegradación del glifosato en suelo utilizando Pleurotus ostreatus*. Tesis. Universidad El Bosque: Bogotá, 2022.
 40. Liu, H., Chen, P. Liu, Z., Liu, J., Yi, J., Xia, F., Zhou, C. Electrochemical luminescence sensor based on double suppression for highly sensitive detection of glyphosate. *Sensors and Actuators B: Chem.*, **2020**, 304, 127364.
 41. Gu, C., Wang, Q., Zhang, L., Yang, P., Xie, Y., Fei, J., Ultrasensitive non-enzymatic pesticide electrochemical sensor based on HKUST-1-derived copper oxide@ mesoporous carbon composite. *Sensors and Actuators B: Chem.*, **2020**, 305, 127478.
 42. Zhao, H., et al., Bioremediation potential of glyphosate-degrading *Pseudomonas* spp. strains isolated from contaminated soil. *J. Gen. Appl. Microbiol.*, **2015**, 61(5), 165-170.
 43. Yakasai, H. M. ., Manogaran, M. ., Halmi, M. I. E., Abubakar, A., Khayat, M. E., Characterization of a *Pseudomonas* sp. Isolated from Langkawi Capable of Degrading Glyphosate. *Bull. Environ. Sci. Sustain. Manag.*, **2023**, 7(2), 26-33.
 44. Yu, X.M., Yu, T., Yin, G.H., Dong, Q.L., An M., Wang, H.R., Ai C.X.: Glyphosate biodegradation and potential soil bioremediation by *Bacillus subtilis* strain Bs-15. *Genet. Mol. Res.*, **2015**, 14(4): p. 14717-14730.
 45. Eththiligoda, E., Aththanayake a.: *Isolation of Glyphosate-tolerant and Degrading Bacteria from Agricultural Fields for Future Soil Bioremediation Studies. 16th International Research Conference*, Sri Lanka, 2023.
 46. Herath, G.A.D., Poh, L.S. Ng, W.J., Statistical optimization of glyphosate adsorption by biochar and activated carbon with response surface methodology. *Chemosphere*, **2019**, 227, 533-540.
 47. da Silva, V.E.C., Tadayozzi, Y.S., Putti, F.F., Santos FA, Forti J.C.: Degradation of commercial glyphosate-based herbicide via advanced oxidative processes in aqueous media and phytotoxicity evaluation using maize seeds. *Sci. Total Environ.*, **2022**, 840, 156656.
 48. Manassero, A., Passalia, C., Negro, A.C., Cassano, A.E., Zalazar C.S.: Glyphosate degradation in water employing the H₂O₂/UVC process. *Water Res.*, **2010**, 44(13), 3875-3882.
 49. Liu Y, Hua J.F, Zhang M.D, Huang M., Glyphosate wastewater treatment by combined precipitation and advanced oxidation processes. *Adv. Mater. Res.*, **2013**, 746: p. 45-48.
 50. Chen, S., Liu, Y.: Study on the photocatalytic degradation of glyphosate by TiO₂ photocatalyst. *Chemosphere*, **2007**, 67(5), 1010-1017.
 51. Biswas, B., Goel, S.: Electrocoagulation and electrooxidation technologies for pesticide removal from water or wastewater: A review. *Chemosphere*, **2022**, 302: p. 134709.
 52. Pizzul, L., Castillo, M.d.P. Stenström, J. Degradation of glyphosate and other pesticides by ligninolytic enzymes. *Biodegradation*, **2009**, 20: p. 751-759.
 53. Gao, W., Zhang, Y., Lin, M., Mao, J., Xing, B., Li, Y., & Hou, R. Capability of phytoremediation of glyphosate in environment by *Vulpia myuros*. *Ecotoxicol. Environ. Safety*, **2023**, 265, 115511.
 54. Hena, S., Patil, K.S., Leinecker, N., Bhatelia, T., Shah, M. Effect of algal organic matter on adsorption of glyphosate using coconut

- shell-activated carbon. *Chem. Eng. J. Adv.*, **2025**: p. 100754.
55. Bezerra, W. F. da P., Dognani, G., Alencar, L. N. de., Parizi, M. P. S., Boina, R. F., Cabrera, F. C., & Job, A. E.: Chemical treatment of sugarcane bagasse and its influence on glyphosate adsorption. *Matéria (Rio de Janeiro)*, **2022**, 27: p. e13142.
 56. Mehta, J., Dhaka, R.K., Dilbaghi, N. et al. Recent advancements in adsorptive removal of organophosphate pesticides from aqueous phase using nanomaterials. *J Nanostruct Chem*, **2024**, 14(1): p. 53-70.
 57. Carneiro R.T., Taketa T.B., Gomes Neto R.J., Oliveira J.L., Campos E.V., de Moraes M.A., da Silva CM, Beppu MM, Fraceto L.F. Removal of glyphosate herbicide from water using biopolymer membranes. *J. Environ. Manag.*, **2015**, 151: p. 353-360.
 58. Wang, M., Rivenbark, K.J., Phillips, T.D.: Kinetics of glyphosate and aminomethylphosphonic acid sorption onto montmorillonite clays in soil and their translocation to genetically modified corn. *J. Environ. Sci.*, **2024**, 135, 669-680.
 59. Besghaier, S., Cecilia, J.A., Chouikhi, N. Vilarrasa-García, E., Rodríguez-Castellón, E., Chlendi, M., Bagane, M. Glyphosate adsorption onto porous clay heterostructure (PCH): kinetic and thermodynamic studies. *Braz. J. Chem. Eng.* **2022**, 39, 903–917.

BIBLIOGRAFÍA ESENCIAL

Carneiro, R.T., et al., Removal of glyphosate herbicide from water using biopolymer membranes. *Journal of environmental management*, 2015. **151**: p. 353-360.

Muñoz, J.P., T.C. Bleak, and G.M. Calaf, Glyphosate and the key characteristics of an endocrine disruptor: A review. *Chemosphere*, 2021. **270**: p. 128619.

Soares, D., et al., Glyphosate use, toxicity and occurrence in food. *Foods*, 2021. **10**(11): p. 2785.