

Artículos atravesados por (o cuestionando) la idea del sujeto -y su género- como una construcción psicobiológica de la cultura.
Articles driven by (or questioning) the idea of the subject -and their gender- as a cultural psychobiological construction.
Vol. 11 (2026), enero-diciembre
ISSN 2469-0783

PLASTICULTURA EN MÉXICO: IMPACTOS AMBIENTALES Y DESAFÍOS PARA LA SOSTENIBILIDAD

PLASTICULTURE IN MEXICO: ENVIRONMENTAL IMPACTS AND CHALLENGES FOR SUSTAINABILITY

Arturo Rafael Armenta López aral-150494@hotmail.com

Instituto Politécnico Nacional, México.

Universidad Autónoma Indígena de México, México.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7417-3121>

Israel Osuna Flores iosuna@uaim.edu.mx

Universidad Autónoma Indígena de México, México.

ORCID: <https://orcid.org/0009-0001-0199-2983>

Cómo citar este artículo / Citation: Armenta López, A., R. & Osuna Flores, I. (2026). Plasticultura en México: Impactos Ambientales y Desafíos para la Sostenibilidad. *Revista Científica Arbitrada de la Fundación MenteClara*, Vol. 11 (425). DOI: <https://doi.org/10.32351/rca.v11.425>

Copyright: © 2026 RCAFMC. Este artículo de acceso abierto es distribuido bajo los términos de la licencia [Creative Commons Attribution 4.0 International License \(CC BY 4.0\)](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/). Recibido: 25/02/2026. Aceptado: 28/02/2026. Publicación online: 06/03/2026.

Conflicto de intereses: Ninguno que declarar.

Resumen

La plasticultura ha transformado la horticultura mexicana, con más de 45,000 hectáreas bajo agricultura protegida en estados del norte y centro del país. Sin embargo, la gestión inadecuada de residuos plásticos agrícolas —acolchados, cubiertas de invernadero y sistemas de riego— ha emergido como una problemática ambiental creciente por su contribución a la contaminación por microplásticos en suelos. El objetivo de este estudio fue analizar críticamente la evidencia científica sobre los efectos adversos de la plasticultura en México, con énfasis en la generación de microplásticos, sus impactos edáficos y los desafíos normativos para la sostenibilidad. Se realizó una revisión sistemática sobre aspectos de impacto ambiental y ecológico, así como de gestión de residuos plásticos generados en la

plasticultura en México. La evidencia internacional muestra que los microplásticos alteran propiedades del suelo, reducen hasta 12% la fotosíntesis en cultivos y se transfieren en cadenas tróficas. Para México, se identifican vacíos críticos: ausencia de inventario nacional de residuos plásticos agrícolas, nula regulación específica. La capacidad instalada de reciclaje cubre menos del 1% de la generación anual estimada. Se concluye que es urgente crear un sistema de monitoreo, desarrollar normativa basada en economía circular, fomentar alternativas biodegradables y establecer responsabilidad extendida del productor.

Abstract

Plasticulture has transformed Mexican horticulture, with over 45,000 hectares under protected agriculture in northern and central states. However, the inadequate management of agricultural plastic waste—mulches, greenhouse covers, and irrigation systems—has emerged as a growing environmental problem due to its contribution to microplastic pollution in soils. The objective of this study was to critically analyze the scientific evidence on the adverse effects of plasticulture in Mexico, with an emphasis on microplastic generation, its soil impacts, and the regulatory challenges to sustainability. A systematic review was conducted on environmental and ecological impact aspects, as well as the management of plastic waste generated by plasticulture in Mexico. International evidence shows that microplastics alter soil properties, reduce photosynthesis in crops by up to 12%, and are transferred through food chains. For Mexico, critical gaps have been identified: the absence of a national inventory of agricultural plastic waste and the lack of specific regulations. The installed recycling capacity covers less than 1% of the estimated annual waste generation. It is concluded that it is urgent to create a monitoring system, develop regulations based on a circular economy, promote biodegradable alternatives, and establish extended producer responsibility.

Palabras Claves: agricultura protegida; agroplásticos; contaminación del suelo; gestión de residuos; horticultura

Keywords: protected agriculture; agroplastics; soil pollution; waste management; horticulture

1. Introducción

La agricultura intensiva ha experimentado una profunda transformación tecnológica desde mediados del siglo XX, impulsada por la necesidad de aumentar la productividad para satisfacer la creciente demanda de alimentos (Tilman et al., 2011). Un componente central de esta modernización ha sido la incorporación masiva de polímeros sintéticos, dando lugar a lo que se conoce como plasticultura. Este término engloba el uso de una amplia gama de materiales plásticos en la producción agrícola, incluyendo películas para acolchado (mulch), cubiertas para invernaderos y macrotúneles, sistemas de riego por goteo, silos de forraje y envases de agroquímicos, entre otros (Espí et al., 2006) (Kasirajan & Ngouajio, 2012). La plasticultura ha permitido avances significativos en la eficiencia del uso del agua, el control de malezas y temperatura, la precocidad de las cosechas y la calidad de los productos, consolidándose como un pilar de la horticultura tecnificada a nivel global.

No obstante, esta "revolución blanca" de la agricultura (Liu et al., 2014) conlleva una externalidad negativa creciente y preocupante, como es la generación de residuos plásticos y su consecuente degradación en el ambiente. Se estima que el sector agrícola a nivel mundial consumió alrededor de 12.5 millones de toneladas de plástico en 2018, representando entre el 3% y el 5% de la producción plástica global (FAO, 2021). De estos, las películas de acolchado constituyen la fracción más significativa, superando el 50% del total de plásticos agrícolas utilizados en regiones como Asia (Gao et al., 2019). El problema se agrava por la corta vida útil de muchos de estos productos, especialmente los acolchados, que a menudo deben ser reemplazados cada ciclo de cultivo, generando un flujo continuo y voluminoso de residuos.

Los plásticos agrícolas están sujetos a procesos de intemperismo. La radiación ultravioleta (UV), las fluctuaciones térmicas, la abrasión mecánica por labranza y el contacto con agroquímicos provocan su fragilización y fragmentación (Steinmetz et al., 2016). Este proceso da lugar a partículas de menor tamaño, conocidas como microplásticos (MPs), definidas convencionalmente como aquellas inferiores a 5 mm de diámetro (Thompson et al., 2004). Son contaminantes persistentes con alta movilidad y capacidad de infiltrarse en la matriz del suelo. Nizzetto et al. (2016) estimaron que, solo en Europa y América del Norte, entre 110,000 y 730,000 toneladas de microplásticos podrían incorporarse anualmente a los suelos agrícolas a través de la aplicación de lodos de depuradora, y que este flujo anual de entrada a

suelos agrícolas podría ser entre 4 y 23 veces superior a las estimaciones de entrada de microplásticos a los océanos.

En México, la plasticultura ha sido un motor fundamental para el desarrollo de la horticultura de exportación. La Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural (SADER) reporta una expansión sostenida de la agricultura protegida en estados del norte y centro del país como Sinaloa, Baja California, Sonora y Guanajuato, donde se concentra una parte importante de la producción de hortalizas como tomate, chile y pepino (SADER, 2023). A pesar de ello, este crecimiento no ha ido acompañado de un desarrollo paralelo en la gestión de los residuos generados. Estudios recientes señalan que, a pesar de su alto volumen, los plásticos agrícolas carecen de una política de manejo específica en el país (Sánchez Ortiz et al., 2024). Mientras que la capacidad formal de reciclaje de una de las principales plantas procesadoras en México que se encuentra en Culiacán, Sinaloa, es de 3,000 toneladas anuales, se estima que la generación nacional de residuos plásticos agrícolas supera las 300,000 toneladas por año (Forbes México, 2022). Este enorme déficit de gestión deriva en prácticas inadecuadas como el almacenamiento a cielo abierto, la quema informal o la incorporación de residuos al terreno, con la consecuente liberación de contaminantes y formación de MPs (SEMARNAT, 2022).

La investigación sobre los efectos ambientales de la plasticultura en México es aún incipiente y fragmentada. Si bien existen reportes sobre el uso y manejo de agroplásticos (Sánchez Ortiz et al., 2024), los estudios que abordan la contaminación por MPs en suelos agrícolas mexicanos y sus impactos en la productividad de los cultivos son escasos. Un estudio pionero de Hernández-Sánchez et al. (2025) demuestra que la presencia de polímeros como el ácido poliláctico (PLA), el PVC y el PET puede inducir fitotoxicidad y alterar variables de rendimiento en el cultivo de tomate, uno de los productos insignia de la horticultura mexicana. Esta evidencia, sumada a las condiciones climáticas prevalentes en las regiones agrícolas del país, tales como, la alta radiación solar y temperaturas extremas que aceleran la fragmentación de los plásticos (Steinmetz et al., 2016).

Por lo tanto, el objetivo del presente estudio es analizar críticamente la evidencia científica y documental disponible sobre los efectos adversos de la plasticultura en México, bajo un enfoque de sostenibilidad ambiental. Además, busca identificar los principales vacíos de información, riesgos ecológicos y desafíos normativos para

delinear una hoja de ruta que permita armonizar la productividad agrícola con la integridad ambiental.

2. Materiales y Métodos

Se realizó una revisión sistemática de la literatura (RSL) enfocada en los aspectos de la plasticultura en México relacionados con el impacto ambiental, ecológico y la gestión de residuos plásticos.

Se llevó un análisis temático de contenido, clasificando la evidencia en categorías analíticas predefinidas:

- Fuentes de microplásticos en suelos agrícolas
- Procesos de formación y acumulación
- Impactos en propiedades fisico-químicas del suelo
- Efectos en organismos edáficos y plantas
- Transferencia trófica
- Gestión de residuos y marco normativo (con énfasis en México)
- Vacíos de conocimiento y desafíos de política

Los hallazgos se sintetizaron de manera narrativa, identificando patrones, tendencias y limitaciones en la literatura existente, con especial atención a la información disponible para México y su contraste con el contexto internacional.

3. Microplásticos en sistemas agrícolas: origen, caracterización y fuentes

3.1. Microplásticos: definición, clasificación y su relación con la plasticultura

El término microplásticos (MPs) fue acuñado formalmente en la literatura científica por el biólogo marino Richard Thompson y colaboradores en 2004, quienes describieron la acumulación de fragmentos microscópicos de debris plástico (aproximadamente 20 μm de diámetro) en sedimentos costeros y en muestras de agua del Reino Unido y la costa este de Estados Unidos (Thompson et al., 2004). Desde entonces, el concepto ha evolucionado y sido objeto de numerosos esfuerzos de estandarización. Actualmente, se definen convencionalmente como partículas plásticas de menos de 5 mm de diámetro en su dimensión más larga, aunque esta definición operativa ha sido objeto de debate y refinamiento en la última década (Frias & Nash, 2019) (Hartmann et al., 2019).

La definición de microplásticos no es meramente dimensional, sino que también considera aspectos morfológicos y de origen. Los MPs pueden presentar diversas formas, incluyendo:

- Fragmentos: Partículas irregulares derivadas de la fragmentación de objetos plásticos más grandes.
- Fibras: Filamentos delgados y alargados, comúnmente liberados por textiles sintéticos, cuerdas y redes de pesca.
- Films: Láminas delgadas y flexibles, típicas de bolsas plásticas y acolchados agrícolas.
- Microesferas: Partículas esféricas utilizadas en productos cosméticos, de cuidado personal y en aplicaciones industriales (Cole et al., 2011) (Anagnosti et al., 2021).

Los microplásticos se generan fundamentalmente por dos vías:

1. Microplásticos primarios: Fabricados intencionalmente con tamaños microscópicos para su uso en productos como exfoliantes cosméticos, abrasivos industriales (arenado) y vectores en medicamentos (GESAMP, 2016).
2. Microplásticos secundarios: Resultan de la degradación y fragmentación de objetos plásticos más grandes una vez liberados al ambiente. Este proceso ocurre por la acción combinada de radiación solar (fotooxidación), abrasión mecánica y, en menor medida, procesos químicos y biológicos (Andrady, 2011).

La plasticultura, definida como el uso de plásticos en la agricultura (Delgado et al., 2011), se implementó inicialmente en países desarrollados a mediados del siglo XX, mientras que en los países en vías de desarrollo esta tecnología fue adoptada hacia la década de los años noventa (Zener de Polanía y Peña-Baracaldo, 2013). El polietileno (PE) es el compuesto más utilizado en la plasticultura y agrupa a una familia numerosa de polímeros de distintas estructuras moleculares con diferentes características, como el polietileno de Alta Densidad (PEAD), Polietileno de Baja Densidad (PEBD) y Polietileno Lineal de Baja Densidad (PELBD) (Espí et al., 2006) (González-Viñas & Mancini, 2003) (Zener de Polanía y Peña-Baracaldo, 2013).

En el contexto agrícola, que es el foco de este trabajo, los microplásticos secundarios derivados de la plasticultura son la fuente predominante. La fragmentación de películas de acolchado, cubiertas de invernadero, cintas de riego y otros insumos plásticos expuestos a condiciones de campo genera una liberación continua y difusa de MPs al suelo (Steinmetz et al., 2016) (Huang et al., 2020).

Una vez en el suelo, estas partículas no son inertes. Pueden alterar la estructura del suelo, modificando propiedades físicas como la densidad aparente, la porosidad y la capacidad de retención de agua (de Souza Machado et al., 2018). Asimismo, pueden interferir con procesos biogeoquímicos, afectando el ciclado de nutrientes y la actividad microbiana (Rillig, 2012). A nivel de planta, se ha documentado que los MPs pueden afectar la germinación, el desarrollo radicular y la biomasa total, además de actuar como vectores de otros contaminantes (Bosker et al., 2019).

3.2 Fuentes de microplásticos en suelos agrícolas

Los microplásticos presentes en los suelos agrícolas provienen de un conjunto diverso de fuentes, tanto intencionales como accidentales. Identificar y cuantificar estas fuentes es un paso necesario para comprender la magnitud del problema y diseñar estrategias de mitigación efectivas. Las fuentes principales incluyen el uso directo de plásticos en las labores culturales, la aplicación de enmiendas orgánicas contaminadas, el riego con aguas que contienen MPs, y la deposición atmosférica (Mohasin et al., 2025) (My & Giao, 2025).

3.2.1. Películas de acolchado plástico (mulch)

Las películas de acolchado plástico, utilizadas para cubrir el suelo alrededor de las plantas, son uno de los insumos plásticos agrícolas más utilizados a nivel global, especialmente en cultivos hortícolas y de berries. Su función principal es conservar la humedad del suelo, suprimir el crecimiento de malezas, regular la temperatura y evitar el contacto directo de los frutos con el suelo, lo que mejora la calidad y sanidad del producto (Kasirajan & Ngouajio, 2012) (Penn State Extension, 2025).

La evidencia científica muestra que estos films, cuando se fragmentan por efecto de la radiación ultravioleta (UV), el pisoteo durante las labores culturales, la labranza y la exposición prolongada a la intemperie, liberan microplásticos al suelo de manera continua. En un estudio de Huang et al. (2020), se documentó que los suelos bajo cultivo con mulch plástico presentaron incrementos significativos de microplásticos en comparación con suelos sin este manejo. Además, los polímeros detectados en el suelo tenían una composición química compatible con los films originales, confirmando su origen (Huang et al., 2020).

Investigaciones recientes han aportado datos cuantitativos de gran relevancia. Por ejemplo, un estudio de campo en un pequeño valle agrícola en Francia encontró que

los suelos de invernaderos que utilizan acolchado plástico presentaban concentraciones de MPs de hasta 1.1×10^4 partículas por kilogramo, significativamente más altas que en otros usos del suelo como cultivos extensivos, riberas o bosques. El estudio también reveló que las concentraciones disminuían más de un 80% desde los primeros 20 cm de suelo hasta los 20-60 cm de profundidad, lo que indica una acumulación superficial pero también una incipiente movilidad vertical (Smyth et al., 2025).

Otros países, especialmente China, donde el uso de mulch se ha intensificado durante décadas, han documentado concentraciones extremadamente altas de residuos de film plástico en suelos agrícolas con uso prolongado (Zhang et al., 2016). Una revisión reciente señala que, en áreas sometidas a prácticas de acolchado prolongado, las concentraciones de MPs pueden superar las 80,000 partículas por kilogramo (Xu et al., 2025). A modo de comparación, revisiones globales indican que la abundancia de MPs en suelos puede ser de 4 a 23 veces superior a la de los océanos (Sahai et al., 2025).

La principal desventaja del uso del acolchado en la agricultura se relaciona con el manejo de los desechos plásticos y los impactos ambientales que conlleva su uso. La recuperación de las películas después de la cosecha es a menudo difícil e incompleta, y los residuos que quedan en el campo persisten y se fragmentan in situ (Kader et al., 2017) (Gao et al., 2019). Los polímeros más comúnmente detectados en suelos con acolchado son el polietileno (PE), en sus distintas variantes (PEBD, PEAD), y el polipropileno (PP) (Xu et al., 2025).

3.2.2. Plásticos de invernadero

Las estructuras plásticas de invernaderos y macrotúneles también representan una fuente significativa de microplásticos, aunque a menudo menos estudiada que el mulch. Los films utilizados en cubiertas están expuestos de manera permanente a altas dosis de radiación UV, fluctuaciones térmicas y tensión mecánica por viento y lluvia, lo que acelera su degradación y fragmentación (Penn State Extension, 2025).

Investigaciones han encontrado que, incluso cuando estos plásticos se retiran después de su vida útil, fragmentos y microplásticos permanecen en el suelo (Steinmetz et al., 2016). Estas partículas se distribuyen tanto en capas superficiales como en perfiles más profundos, lo que indica movilidad vertical y persistencia en el ambiente (Steinmetz et al., 2016).

Un estudio reciente en Turquía analizó suelos de invernaderos con 10 a 30 años de antigüedad y encontró concentraciones de MPs que oscilaban entre 47 y 315 partículas por cada 5 gramos de suelo, con un incremento progresivo directamente relacionado con la edad de los invernaderos. Los resultados mostraron alteraciones significativas en el pH del suelo (rango de 7.58 a 8.04), una disminución del carbono orgánico (de 0.68% a 0.59%) y del nitrógeno total (de 0.07% a 0.03%) a medida que aumentaban las concentraciones de MPs. Además, la biomasa microbiana de carbono y nitrógeno disminuyó en un 43.75% y 46.59%, respectivamente, y la actividad de enzimas clave como la β -glucosidasa se redujo hasta en un 51.17% (Sakin et al., 2025).

3.2.3. Sistemas de riego e insumos auxiliares

Los plásticos empleados en tuberías, cintas de riego por goteo, conectores, depósitos y otros insumos auxiliares (como macetas, tutores, clips y etiquetas) también pueden aportar microplásticos al sistema. La contribución se produce principalmente por desgaste mecánico durante su instalación, uso y retirada, así como por la exposición ambiental repetida que fragiliza los materiales.

Aunque la literatura se ha centrado más en mulch y coberturas, estos componentes contribuyen al inventario total de fuentes plásticas en el agroecosistema (Bläsing & Amelung, 2018). Un ejemplo ilustrativo es el condado de Monterey en California, donde se estima que los campos agrícolas utilizan colectivamente 10,000 toneladas de plástico al año, con especial énfasis en cintas de riego desechables y films plásticos (H2O IQ, 2024).

3.2.4. Vías de entrada adicionales de microplásticos al suelo agrícola

Además de las fuentes derivadas directamente de la plasticultura, existen otras vías de entrada de MPs a los suelos agrícolas que deben considerarse:

- Aplicación de lodos de depuradora (biosólidos): Los lodos de depuradora utilizados como fertilizantes orgánicos son una fuente importante de MPs, especialmente fibras. Estudios europeos estiman que la aplicación de lodos introduce entre 6.3×10^4 y 4.3×10^5 toneladas de MPs en suelos agrícolas cada año (Nizzetto et al., 2016). En suelos agrícolas de Francia se han detectado concentraciones que alcanzan las 1.1×10^4 partículas/kg en zonas con aplicación de biosólidos (Smyth et al., 2025).

- Fertilizantes de liberación controlada y semillas recubiertas: Los recubrimientos poliméricos de fertilizantes y semillas, diseñados para liberar gradualmente los nutrientes o proteger el embrión, se degradan con el tiempo y liberan MPs al suelo (Mohasin et al., 2025) (My & Giao, 2025).
- Riego con aguas contaminadas: El uso de aguas residuales tratadas o aguas superficiales que contienen MPs para riego introduce estas partículas directamente en los campos agrícolas (Bläsing & Amelung, 2018).
- Deposición atmosférica: Partículas de MPs, especialmente fibras y fragmentos de desgaste de neumáticos, pueden ser transportadas por el viento y depositadas en suelos agrícolas. En París, por ejemplo, se ha estimado una deposición anual de 3 a 10 toneladas de MPs (Dris et al., 2016).
- Estiércol y compost: Los residuos plásticos presentes en el alimento, la cama del ganado y los envases pueden terminar en el estiércol y el compost, que luego se aplican al suelo (Penn State Extension, 2025).

3.3. Distribución y características de microplásticos en suelos

Los estudios indican que los microplásticos en suelos agrícolas presentan, con frecuencia, tamaños inferiores a 1 mm y están compuestos principalmente por polietileno (PE) y polipropileno (PP), polímeros comunes en films de acolchado y cubiertas de invernadero (Corradini et al., 2019). La concentración de estas partículas puede variar considerablemente incluso dentro de una misma unidad productiva, en función de factores como la duración e intensidad del uso de plásticos y las prácticas de gestión de residuos (Zhang et al., 2016). Esta variabilidad es relevante porque el suelo constituye el principal reservorio de microplásticos en el medio terrestre; se estima que aproximadamente el 90% de los desechos plásticos en la tierra terminan ingresando al suelo, ya sea de forma directa o indirecta, con efectos diversos sobre los organismos edáficos (Laos y Pérez, 1998) (Tigrero-Zapata et al., 2023), lo que adquiere especial relevancia en contextos de agricultura intensiva como el mexicano.

4. Formación y acumulación de microplásticos en suelos agrícolas

La gestión deficiente de los residuos tiene una consecuencia ambiental directa y de largo plazo: la acumulación de plásticos en el suelo y su progresiva fragmentación. La radiación ultravioleta, las fluctuaciones de temperatura y la labranza mecánica actúan de manera combinada sobre los fragmentos de polietileno que permanecen en

el campo, generando una fragmentación progresiva que da lugar a microplásticos (Steinmetz et al., 2016). En este sentido, diversos autores advierten que los suelos agrícolas bajo manejo intensivo pueden convertirse en reservorios significativos de estas partículas (Rillig, 2012).

Una vez en el suelo, los microplásticos no son inertes. Pueden alterar su estructura física, modificando la porosidad y la dinámica hídrica, así como interferir con la microbiota edáfica, con consecuencias aún no del todo comprendidas para la fertilidad del suelo (de Souza Machado et al., 2018).

La acumulación de MPs en el suelo no es un fenómeno estéticamente neutro. Existe una creciente evidencia científica que documenta sus efectos adversos sobre la salud edáfica. Los MPs pueden alterar propiedades físicas fundamentales como la densidad aparente, la porosidad y la capacidad de retención de agua (de Souza Machado et al., 2018). Asimismo, interfieren con la actividad y diversidad de la biota del suelo, desde microorganismos hasta mesofauna como lombrices y colémbolos, con consecuencias potenciales para el ciclado de nutrientes (Rillig, 2012; Huerta Lwanga et al., 2017). A nivel de planta, se ha observado que los MPs pueden afectar la germinación, el desarrollo radicular y la biomasa total, además de actuar como vectores de otros contaminantes como metales pesados y compuestos orgánicos persistentes (Bosker et al., 2019) (Mohasin et al., 2025). Esta acumulación representa una amenaza directa para la productividad agrícola, los servicios ecosistémicos y la sostenibilidad de los agroecosistemas (Mohasin et al., 2025).

En el contexto mexicano, si bien la investigación es aún incipiente, estudios recientes confirman que el uso de agroplásticos ha tenido un incremento significativo, sobre todo en áreas de riego donde se emplean dos ciclos de cultivo al año (Sánchez Ortiz et al., 2024). Aunque, al término de su vida útil, el manejo y la disposición final de estos materiales distan de ser los más adecuados (Sánchez Ortiz et al., 2024).

5. Uso y expansión de la plasticultura en México

El uso de acolchados plásticos y sistemas de agricultura protegida ha aumentado de manera sostenida en México durante las últimas dos décadas (SADER, 2023). Esta adopción tecnológica, concentrada principalmente en los estados del norte y centro como Sinaloa, Baja California, Sonora y Guanajuato, ha demostrado incrementos en el rendimiento de los cultivos hortícolas que oscilan entre el 20% y el 60%, una reducción significativa en el consumo de agua y una mejora en la calidad de los

productos destinados a la exportación (Kasirajan & Ngouajio, 2012). Aun así, este crecimiento productivo contrasta con la corta vida útil de los materiales empleados, especialmente en el caso de las películas de acolchado, que generan un volumen creciente de residuos de gestión compleja.

6. Impactos ambientales y ecológicos

6.1. Alteraciones en las propiedades del suelo

La presencia de microplásticos en el suelo no es inocua. Diversos estudios han demostrado que estas partículas pueden modificar propiedades físicas fundamentales como la porosidad, la densidad aparente y la capacidad de retención de agua (de Souza Machado et al., 2018). Estas alteraciones físicas tienen consecuencias directas sobre procesos biológicos clave, incluyendo la actividad microbiana y la disponibilidad de nutrientes para las plantas (Rillig, 2012; Bläsing & Amelung, 2018).

Revisiones sistemáticas recientes han cuantificado estos efectos con mayor precisión. Un metaanálisis global encontró que, dependiendo de la concentración de plásticos, la densidad aparente y la porosidad del suelo disminuyen moderadamente (entre un 4% y un 6%) en presencia de microplásticos. Más relevante aún, los microplásticos reducen los agregados estables en agua (WSA) en un promedio del 20%, con un rango que varía desde una disminución del 40% hasta un aumento del 20% dependiendo de la forma y concentración de las partículas (Maqbool et al., 2023). La conductividad hidráulica saturada también se ve alterada, variando desde una reducción del 70% hasta un aumento del 40% según el tipo de polímero y la forma de los plásticos. Estos hallazgos confirman que los microplásticos no solo están presentes en los suelos, sino que están modificando activamente su estructura y funcionamiento hidrológico.

6.2. Efectos en la germinación, crecimiento vegetal y productividad

La evidencia sobre los efectos de los microplásticos en las plantas es creciente. Experimentos controlados han observado que la presencia de MPs en el suelo puede interferir con la germinación de semillas, reducir el peso de las raíces y disminuir la biomasa total de las plantas (Corradini et al., 2019). Un mecanismo propuesto es el bloqueo físico de los poros de la cubierta seminal por partículas de tamaño micrométrico, lo que retrasa o impide la germinación (Bosker et al., 2019).

Un metaanálisis reciente que analizó 180 estudios sobre los efectos de microplásticos en plantas terrestres reveló diferencias significativas entre plásticos no biodegradables y biodegradables. Ambos tipos inhiben la germinación de semillas, con reducciones del 1.34% y 4.69% respectivamente. Más importante aún, los microplásticos inducen un aumento promedio del 128.51% en las especies reactivas de oxígeno (ROS) en las plantas, lo que genera estrés oxidativo y daño celular (Zhang et al., 2025). Este estrés se manifiesta en un incremento de la peroxidación lipídica, con aumentos del 9.29% para plásticos no biodegradables y del 6.01% para biodegradables.

A escala global, las implicaciones para la seguridad alimentaria son preocupantes. Un estudio publicado en *Proceedings of the National Academy of Sciences* utilizó más de 3000 conjuntos de datos para modelar el impacto de los microplásticos en la fotosíntesis. Los resultados indican que los microplásticos reducen la tasa de fotosíntesis entre un 7.05% y un 12.12% en plantas terrestres y acuáticas, lo que se traduce en pérdidas anuales de cosechas estimadas entre 110 y 360 millones de toneladas métricas de cultivos básicos como arroz, trigo y maíz (Du et al., 2025).

En México, investigaciones recientes han comenzado a documentar estos efectos en cultivos de importancia comercial. Hernández-Sánchez et al. (2025) encontraron que concentraciones crecientes de microplásticos están correlacionadas con alteraciones en el crecimiento y desarrollo del tomate (*Solanum lycopersicum*). Específicamente, se reporta que el ácido poliláctico (PLA) provoca la muerte de las plántulas, mientras que el cloruro de polivinilo (PVC) y el tereftalato de polietileno (PET) afectan variables de rendimiento como el peso y el número de flores y frutos. Estos hallazgos son particularmente relevantes dado que el tomate es uno de los productos hortícolas de exportación más importantes para México.

6.3. Implicaciones ecológicas y transferencia trófica

Más allá de los efectos directos sobre el suelo y las plantas, los microplásticos pueden incorporarse a las redes tróficas terrestres. Estudios pioneros han demostrado la transferencia de estas partículas desde el suelo hacia organismos como lombrices y colémbolos, y de estos a niveles tróficos superiores como aves y pequeños mamíferos (Huerta Lwanga et al., 2017).

Investigaciones experimentales recientes han confirmado estos mecanismos de transferencia. Skawina et al. (2024) establecieron una cadena alimentaria

experimental que incluía detritívoros terrestres (*Eisenia* sp.), bivalvos filtradores de agua dulce (*Unio tumidus*) y crustáceos detritívoros (*Asellus aquaticus*). Los resultados mostraron partículas fluorescentes dañadas e intactas en las heces de los detritívoros terrestres y en los excrementos de los filtradores acuáticos. Más importante aún, las partículas estaban presentes en los intestinos de bivalvos y crustáceos que se alimentaron de los excrementos de bivalvos expuestos, demostrando una transferencia trófica efectiva a lo largo de la cadena alimentaria. Los bivalvos actúan como especies centinela, filtrando partículas de la suspensión y depositándolas en el fondo, donde quedan disponibles para gremios alimenticios más amplios.

Además, los microplásticos actúan como vectores de otros contaminantes hacia niveles tróficos superiores. Kataria et al. (2024) señalan que las interacciones entre microorganismos y microplásticos han llevado al transporte de otros contaminantes asociados a niveles tróficos superiores, donde los microplásticos eventualmente alcanzan plantas, animales y depredadores tope. Esta revisión sistemática, que analizó 206 publicaciones entre 2010 y 2022, confirma que los microplásticos pueden transportar contaminantes orgánicos persistentes y metales pesados, magnificando su impacto ecotoxicológico a lo largo de la cadena trófica.

A nivel global, la horticultura se ha convertido en uno de los mayores consumidores de plásticos en todas las fases del cultivo, con un consumo estimado de 2.25 millones de toneladas anuales (Betancourt, 2025). En el contexto mexicano, si bien la investigación sobre transferencia trófica es aún limitada, las condiciones climáticas prevalentes en regiones agrícolas del noroeste —alta radiación solar y temperaturas elevadas— pueden acelerar los procesos de fragmentación de los plásticos (Steinmetz et al., 2016), incrementando la biodisponibilidad de partículas y, con ello, los riesgos ecológicos asociados.

7. Gestión de residuos plásticos agrícolas

La gestión de los residuos plásticos agrícolas en México enfrenta limitaciones estructurales de diversa índole. Un primer obstáculo es la falta de información desagregada: el Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI, 2022) no reporta de manera específica la generación de residuos plásticos de origen agrícola, lo que dificulta cualquier intento de cuantificación y diagnóstico a escala nacional. A ello se suma la naturaleza misma de los residuos, que suelen estar altamente contaminados

con suelo y agroquímicos, un factor que, como señala la FAO (2021), complica y encarece los procesos de reciclaje.

En un informe reciente para la FAO, Nizzetto et al. (2025) documentaron que las concentraciones de plástico en suelos agrícolas pueden alcanzar hasta el 0.3% del peso del suelo en algunas áreas, y que incluso niveles inferiores al 0.05% ya pueden alterar propiedades físicas, químicas y microbiológicas del suelo. Ante este panorama, diversos autores coinciden en la necesidad de implementar estrategias de mitigación que incluyan la reducción del uso de plásticos, el desarrollo de alternativas biodegradables, el mejoramiento de los sistemas de gestión de residuos y la creación de tecnologías innovadoras para la remoción de microplásticos (Mohasin et al., 2025) (My & Giao, 2025).

En la práctica, esta falta de infraestructura y políticas se traduce en un manejo inadecuado. Prácticas como el almacenamiento a cielo abierto, la quema informal o la simple incorporación de los residuos al terreno son comunes, lo que incrementa los riesgos ambientales y de salud (Sánchez-Ortiz et al., 2024).

8. Síntesis: riesgos y vacíos de política

En conjunto, la evidencia presentada indica que la plasticultura en México constituye un sistema productivo eficiente en el corto plazo, pero ambientalmente vulnerable en el largo plazo. Los principales riesgos identificados incluyen: (i) la acumulación progresiva de residuos plásticos en el suelo; (ii) la generación de microplásticos persistentes con potencial para alterar los ecosistemas edáficos; (iii) las emisiones contaminantes derivadas de prácticas de quema informal; y (iv) la ausencia de políticas específicas para el manejo de estos residuos.

Actualmente, la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales regula los residuos sólidos urbanos y de manejo especial, pero no existe aún una política diferenciada para los plásticos de origen agrícola. La evidencia internacional sugiere que la adopción de esquemas de responsabilidad extendida del productor y el fomento de modelos de economía circular podrían reducir significativamente estos impactos ambientales (FAO, 2021), un camino que México está apenas comenzando a explorar.

9. Conclusiones

La evidencia científica confirma que las actividades agrícolas intensivas, en particular el uso continuo de filmes de acolchado, cubiertas de invernadero y

sistemas de riego plásticos, constituyen una fuente creciente y significativa de microplásticos en suelos. Estas partículas pueden alterar propiedades edáficas fundamentales, afectar procesos ecológicos clave y comprometer la seguridad alimentaria, lo que plantea retos urgentes para la sostenibilidad de los agroecosistemas.

Para abordar esta problemática, se requiere mejorar las prácticas de gestión de residuos plásticos agrícolas, desarrollar tecnologías de mulch biodegradable adaptadas a diferentes condiciones agroclimáticas, e implementar sistemas de monitoreo y cuantificación de microplásticos como parte de la gestión ambiental en la agricultura.

En el caso particular de México, la plasticultura ha fortalecido indudablemente la competitividad agrícola, especialmente en la horticultura de exportación. Sin embargo, este crecimiento no ha ido acompañado de políticas específicas para la gestión de los residuos generados, lo que ha derivado en impactos ambientales emergentes asociados a la acumulación de plásticos y la formación de microplásticos en suelos agrícolas. Se recomienda: (i) crear un inventario nacional de plásticos agrícolas que permita cuantificar la magnitud del problema; (ii) implementar normativas específicas basadas en principios de economía circular y responsabilidad extendida del productor; (iii) fomentar la investigación en alternativas biodegradables adaptadas a las condiciones climáticas mexicanas; y (iv) desarrollar sistemas regionales de reciclaje con infraestructura adecuada.

La sostenibilidad del modelo agrícola mexicano en el largo plazo dependerá de la capacidad para integrar la productividad con una gestión ambiental responsable, transformando los desafíos actuales en oportunidades para una transición hacia sistemas agrícolas más resilientes y ambientalmente coherentes.

Autoría y Contribución (CRediT)

Los autores de este artículo, **Israel Osuna Flores** y **Arturo Rafael Armenta López**, declaran que contribuyeron de manera equitativa (50 % cada uno) en las siguientes actividades de acuerdo con la Taxonomía de Roles de Colaboración Académica (CRediT):

- **Conceptualización:** Israel Osuna Flores (50 %), Arturo Rafael Armenta López (50 %)
- **Metodología:** Israel Osuna Flores (50 %), Arturo Rafael Armenta López (50 %)
- **Investigación / Recolección de datos:** Israel Osuna Flores (50 %), Arturo Rafael Armenta López (50 %)
- **Análisis y Validación de datos:** Israel Osuna Flores (50 %), Arturo Rafael Armenta López (50 %)
- **Redacción – Borrador original:** Israel Osuna Flores (50 %), Arturo Rafael Armenta López (50 %)
- **Redacción – Revisión y edición:** Israel Osuna Flores (50 %), Arturo Rafael Armenta López (50 %)
- **Visualización / Figuras:** Israel Osuna Flores (50 %), Arturo Rafael Armenta López (50 %)
- **Supervisión:** Israel Osuna Flores (50 %), Arturo Rafael Armenta López (50 %)
- **Financiamiento y recursos:** Israel Osuna Flores (50 %), Arturo Rafael Armenta López (50 %)

Ambos autores aprueban la versión final del manuscrito y se responsabilizan de la integridad de todo el trabajo presentado.

Referencias

- Anagnosti, L., Varvaresou, A., Pavlou, P., Protopapa, E., & Carayanni, V. (2021). Worldwide actions against plastic pollution from microbeads and microplastics in cosmetics focusing on European policies. Has the issue been handled effectively? *Marine Pollution Bulletin*, 162, 111883. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2020.111883>
- Andrady, A. L. (2011). Microplastics in the marine environment. *Marine Pollution Bulletin*, 62(8), 1596-1605. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2011.05.030>
- Betancourt, C. R. (2025). El plástico, características y principales impactos. Su uso en la agricultura, recomendaciones para su manejo. *Ciencia y Tecnología Agropecuaria*, 10(1), 49-59.
- Bläsing, M., & Amelung, W. (2018). Plastics in soil: Analytical methods and possible sources. *Science of the Total Environment*, 612, 422-435. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.08.086>
- Bosker, T., Bouwman, L. J., Brun, N. R., Behrens, P., & Vijver, M. G. (2019). Microplastics accumulate on pores in seed capsule and delay germination and root growth of the terrestrial vascular plant *Lepidium sativum*. *Chemosphere*, 226, 774-781. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2019.03.163>
- Cole, M., Lindeque, P., Halsband, C., & Galloway, T. S. (2011). Microplastics as contaminants in the marine environment: A review. *Marine Pollution Bulletin*, 62(12), 2588-2597. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2011.09.025>
- Corradini, F., Meza, P., Eguiluz, R., Casado, F., Huerta-Lwanga, E., & Geissen, V. (2019). Evidence of microplastic accumulation in agricultural soils from sewage sludge disposal. *Science of the Total Environment*, 671, 411-420. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.03.368>
- de Souza Machado, A. A., Lau, C. W., Till, J., Kloas, W., Lehmann, A., Becker, R., & Rillig, M. C. (2018). Impacts of microplastics on the soil biophysical environment. *Environmental Science & Technology*, 52(17), 9656-9665. <https://doi.org/10.1021/acs.est.8b02212>
- Delgado, A., da Rocha, A. M., Souza, C. F., & Matsuura, E. (2011). Plasticultura: Uso de plásticos na agricultura. *Revista Brasileira de Agropecuária Sustentável*, 1(1), 15-25.
- Dris, R., Gasperi, J., Saad, M., Mirande, C., & Tassin, B. (2016). Synthetic fibers in atmospheric fallout: A source of microplastics in the environment? *Marine Pollution Bulletin*, 104(1-2), 290-293. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2016.01.006>
- Du, S., Zhu, R., Cai, Y., Xu, N., Yap, P. S., Zhang, Y., He, Y., & Zhang, Y. (2025). Microplastic pollution inhibits crop photosynthesis and poses a threat to food security. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 122(15), e2420797122. <https://doi.org/10.1073/pnas.2420797122>
- Laos, E. V., & Pérez, O. (1998). Reciclaje de desechos plásticos en el Perú. *Revista de Química*, 12(2), 53-63.
- Espi, E., Salmerón, A., Fontecha, A., García, Y., & Real, A. I. (2006). Plastic films for agricultural applications. *Journal of Plastic Film & Sheeting*, 22(2), 85-102. <https://doi.org/10.1177/8756087906064220>
- FAO. (2021). Assessment of agricultural plastics and their sustainability: A call for action. Food and Agriculture Organization of the United Nations.
- Forbes México. (2022, 22 de octubre). Alistan en Culiacán la planta de reciclado plástico agrícola más grande del país. <https://www.forbes.com.mx/alistan-en-culiacan-la-planta-de-reciclado-plastico-agricola-mas-grande-del-pais/>

- Frias, J. P. G. L., & Nash, R. (2019). Microplastics: Finding a consensus on the definition. *Marine Pollution Bulletin*, 138, 145-147. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2018.11.022>
- Gao, H., Yan, C., Liu, Q., Ding, W., Chen, B., & Li, Z. (2019). Effects of plastic mulching and plastic residue on agricultural production: A meta-analysis. *Science of the Total Environment*, 651, 484-492. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.09.105>
- GESAMP. (2016). Sources, fate and effects of microplastics in the marine environment: A global assessment (Reports and Studies No. 93). International Maritime Organization. <http://www.gesamp.org/publications/report-of-the-43rd-session>
- González-Viñas, W., & Mancini, H. L. (2003). *Ciencia de los materiales*. Editorial Ariel Ciencia.
- H2O IQ. (2024). Are farm fields a hidden source of microplastics? Water Solutions Network. <https://www.h2oiq.org/are-farm-fields-hidden-source-of-microplastics>
- Hartmann, N. B., Hüffer, T., Thompson, R. C., Hassellöv, M., Verschoor, A., Daugaard, A. E., ... & Wagner, M. (2019). Are we speaking the same language? Recommendations for a definition and categorization framework for plastic debris. *Environmental Science & Technology*, 53(3), 1039-1047. <https://doi.org/10.1021/acs.est.8b05297>
- Hernández-Sánchez, L., Cruz-López, V., Román-Doval, R., & Cruz-Martínez, H. (2025). Microplásticos y nanoplásticos: una revisión sistemática de su impacto en el crecimiento de tomate (*Solanum lycopersicum*). *Ciencia e Innovación Agroalimentaria de la Universidad de Guanajuato*, 6 (Número Especial), 296-308.
- Huang, Y., Liu, Q., Jia, W., Yan, C., & Wang, J. (2020). Agricultural plastic mulching as a source of microplastics in the terrestrial environment. *Environmental Pollution*, 260, 114096. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2020.114096>
- Huerta Lwanga, E., Mendoza Vega, J., Ku Quej, V., Chi, J. de los A., Sanchez del Cid, L., Chi, C., Escalona Segura, G., Gertsen, H., Salánki, T., van der Ploeg, M., Koelmans, A. A., & Geissen, V. (2017). Field evidence for transfer of plastic debris along a terrestrial food chain. *Scientific Reports*, *7*, 14071. <https://doi.org/10.1038/s41598-017-14588-2>
- INEGI. (2022). *Censo Agropecuario 2022*. Instituto Nacional de Estadística y Geografía.
- Kader, M. A., Senge, M., Mojid, M. A., & Ito, K. (2017). Recent advances in mulching materials and methods for modifying soil environment. *Soil and Tillage Research*, 168, 155-166. <https://doi.org/10.1016/j.still.2017.01.001>
- Kasirajan, S., & Ngouajio, M. (2012). Polyethylene and biodegradable mulches for agricultural applications: A review. *Agronomy for Sustainable Development*, 32(2), 501-529. <https://doi.org/10.1007/s13593-011-0068-3>
- Kataria, N., Yadav, S., Garg, V. K., Rene, E. R., Jiang, J. J., Rose, P. K., Kumar, M., & Khoo, K. S. (2024). Occurrence, transport, and toxicity of microplastics in tropical food chains: perspectives view and way forward. *Environmental Geochemistry and Health*, 46(3), 98. <https://doi.org/10.1007/s10653-024-01862-2>
- Liu, E. K., He, W. Q., & Yan, C. R. (2014). "White revolution" to "white pollution"—Agricultural plastic film mulch in China. *Environmental Research Letters*, 9(9), 091001. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/9/9/091001>
- Maqbool, A., Soriano, M. A., & Gómez, J. A. (2023). Macro- and micro-plastics change soil physical properties: a systematic review. *Environmental Research Letters*, 18(12), 123002. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ad0a1a>
- Mohasin, M., Habib, K., Rao, P. S., & Kumar, A. (2025). Microplastics in agricultural soils: Sources, impacts, and mitigation strategies. *Environmental Monitoring and Assessment*, 197(6), 684. <https://doi.org/10.1007/s10661-025-14114-2>

- My, N. T. D., & Giao, N. T. (2025). A review of microplastic contamination in agriculture: Sources, impacts, and solutions. *Journal of Applied Sciences and Environmental Management*, 29(8), 2674–2686. <https://doi.org/10.4314/jasem.v29i8.34>
- Nizzetto, L., Futter, M., & Langaas, S. (2016). Are agricultural soils dumps for microplastics of urban origin? *Environmental Science & Technology*, 50(20), 10777-10779. <https://doi.org/10.1021/acs.est.6b04140>
- Nizzetto, L., Hurley, R., Collard, F., Thompson, R. H., & Carcasci, G. (2025). State of research on the impacts of plastic pollution on soil health and crops. Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). <https://doi.org/10.4060/cd6407en>
- Penn State Extension. (2025). Microplastics in agricultural lands. Pennsylvania State University. <https://extension.psu.edu/microplastics-in-agricultural-lands>
- Rillig, M. C. (2012). Microplastic in terrestrial ecosystems and the soil? *Environmental Science & Technology*, 46(12), 6453-6454. <https://doi.org/10.1021/es302011r>
- Sahai, A., Kumar, R., & Singh, S. (2025). Microplastic contamination in agricultural soils: A comprehensive review of sources, occurrence, and impacts. *Journal of Hazardous Materials*, 485, 137032. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2024.137032>
- Sakin, E., Dilekoglu, M. F., & Yanardağ, İ. H. (2025). Unseen threat: The devastating impact of microplastics on soil health in agricultural lands. *CATENA*, 253, 108904. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2025.108904>
- Sánchez Ortiz, R., Castruita Esparza, L. U., Sánchez Bernal, J. A., & Álvarez Valencia, C. L. (2024). El uso de agroplásticos en el siglo XXI. *Revista Spauach. Academia Vitalis*, *8*(9), 53-59. https://spauach.uach.mx/uploads/magazine_article/article_file/47/El_uso_de_agropla%CC%81sticos_en_el_siglo_XXI.pdf
- Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural (SADER). (2023). Panorama agroalimentario de México. Gobierno de México.
- Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT). (2022). Informe de la situación del medio ambiente en México. Gobierno de México.
- Skawina, A., Dąbrowska, A., Bonk, A., Paterczyk, B., & Nowakowska, J. (2024). Tracking the micro- and nanoplastics in the terrestrial-freshwater food webs. Bivalves as sentinel species. *Science of the Total Environment*, 917, 170468. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.170468>
- Smyth, K., Marchand, C., & Jaffrezic, A. (2025). Soil contamination by microplastics in a small French agricultural watershed: Levels, sources, and vertical distribution. *Environmental Pollution*, 365, 125412. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2024.125412>
- Steinmetz, Z., Wollmann, C., Schaefer, M., Buchmann, C., David, J., Tröger, J., Muñoz, K., Frör, O., & Schaumann, G. E. (2016). Plastic mulching in agriculture. Trading short-term agronomic benefits for long-term soil degradation? *Science of the Total Environment*, *550*, 690-705. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.01.153>
- Thompson, R. C., Olsen, Y., Mitchell, R. P., Davis, A., Rowland, S. J., John, A. W. G., McGonigle, D., & Russell, A. E. (2004). Lost at sea: Where is all the plastic? *Science*, 304(5672), 838. <https://doi.org/10.1126/science.1094559>
- Tigrero-Zapata, G. J., Sánchez-Iznaga, A. L., Verdesoto-Arguello, A. E., Saucedo-Aguilar, A. E., Camacho-Bustamante, L. C., & Soto-Montaño, C. L. (2023). Impacto del plástico de envases de pesticidas en suelos agrícolas: una problemática cultural del agro ecuatoriano. *Revista Ingeniería Química y Desarrollo*, 5(2), 1-15.

- Tilman, D., Balzer, C., Hill, J., & Befort, B. L. (2011). Global food demand and the sustainable intensification of agriculture. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 108(50), 20260–20264. <https://doi.org/10.1073/pnas.1116437108>
- Xu, L., Wang, Y., & Zhang, S. (2025). Microplastics derived from agricultural plastic mulch films: A growing environmental concern. *Current Opinion in Environmental Science & Health*, 43, 100589. <https://doi.org/10.1016/j.coesh.2024.100589>
- Zener de Polanía, I., & Peña-Baracaldo, F. (2013). Plásticos en la agricultura: beneficio y costo ambiental: una revisión. *Revista U.D.C.A Actualidad & Divulgación Científica*, 16(1), 139-150.
- Zhang, D., Liu, H., Hu, W., Qin, X., Ma, X., Yan, C., & Wang, H. (2016). The status and distribution characteristics of residual mulching film in soils of China. *Journal of Integrative Agriculture*, 15(11), 2639–2646. [https://doi.org/10.1016/S2095-3119\(15\)61240-0](https://doi.org/10.1016/S2095-3119(15)61240-0)
- Zhang, B., Liu, J., Li, Y., Zhou, L., Guo, J., Tao, X., & Chen, L. (2025). Effect of non-biodegradable and biodegradable microplastics on plants from physiological to individual levels: A meta-analysis. *Authorea Preprints*. <https://doi.org/10.22541/au.174901910.05447286/v1>