

DAÑOS CAUSADOS AL AMBIENTE, PLANTAS Y HUMANOS, POR MICRO Y NANO PLÁSTICOS

Ricardo Hugo Lira-Saldivar

Centro de Investigación en Química Aplicada
(CIQA), Departamento de Biociencias y
Agrotecnología
Saltillo, Coah., México

Fernando Ramírez-Luna

Centro de Investigación en Química Aplicada
(CIQA), Departamento de Biociencias y
Agrotecnología
Saltillo, Coah., México

Antonio Cárdenas-Flores

Centro de Investigación en Química Aplicada
(CIQA), Departamento de Biociencias y
Agrotecnología
Saltillo, Coah., México

Eduardo Arón Flores-Hernández

Departamento de Suelos, Universidad
Autónoma Agraria Antonio Narro, Unidad
Laguna
Torreón, Coah., México

All content in this magazine is licensed under a Creative Commons Attribution License. Attribution-Non-Commercial-Non-Derivatives 4.0 International (CC BY-NC-ND 4.0).



CONTAMINACIÓN DE ECOSISTEMAS POR AGROPLÁSTICOS

Las actividades domésticas, el manejo inadecuado de los residuos sólidos municipales, los restos antropogénicos, los escurrimientos agrícolas, etc., son algunos de los varios aspectos responsables de la acumulación de MP y NP en el suelo o en las vías fluviales (lagos, ríos y finalmente el mar). La contaminación terrestre conduce a la contaminación de las aguas subterráneas con lixiviados, provocando un impacto ecotoxicológico nocivo sobre la rizósfera, la microbiota y las plantas.

Los microplásticos pueden incorporarse a la cadena trófica mediante la ingestión directa, como los animales marinos que han ingerido microplásticos en suspensión, o mediante transferencia trófica, es decir, la ingesta de otros animales que contienen a su vez microplásticos. En la fabricación de los plásticos se utilizan monómeros, como el estireno, el etileno y el propileno, que se pueden mezclar con diferentes aditivos como plastificantes, colorantes, antioxidantes, retardantes de flama, estabilizadores ultravioletas y lubricantes, que les permiten mejorar su rendimiento.

Los plásticos se encuentran ampliamente distribuidos en nuestros ecosistemas. El manejo inadecuado de los desechos plásticos ha llevado a una mayor contaminación de los ambientes de agua dulce, estuarios y marinos. Los MP se transfieren de un nivel trófico a otro en la cadena alimenticia y, en última instancia, pueden afectar la salud humana. Debido a la ineficacia en la recuperación de fragmentos de películas plásticas de los campos de cultivo, los investigadores ahora se centran en encontrar soluciones alternas a los AP convencionales, como es el uso de acolchados de plástico biodegradables (Figura 2).

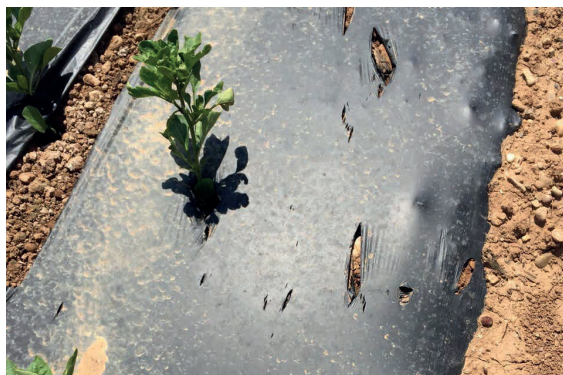


Figura 2. Desde hace años que los productores agrícolas que usan acolchados plásticos, esperan que el comercio tenga disponibles acolchados biodegradables, oxodegradables y fotodegradables, ya que representan una esperanza para que los productores obtengan los beneficios de este producto, pero cuidando el entorno de los agroecosistemas para así reducir el impacto ambiental (Tomado de: <https://agriplasticscommunity.com/es/preguntas-frecuentes-sobre-acolchados-biodegradables/>).

Los acolchados plásticos agrícolas tienen un efecto dual, ya que provocan muchos efectos negativos, pero también importantes efectos positivos (Figura 3). Asimismo, los MP interactúan y acumulan otros contaminantes ambientales y orgánicos, como patógenos microbianos, metales pesados y contaminantes persistentes en sus superficies, por lo que aumenta el riesgo de toxicidad en el ambiente.

Los suelos agrícolas en China contienen de 4.94 artículos/kg a 40,800 artículos/kg de MP, los cuales afectan los agregados estables al agua, los perfiles de nutrientes del suelo y la población microbiana. Los MP encontrados por Tang (2023) fueron menores a un ≤ 1 mm y estaban compuestos por fragmentos, películas y fibras. Estos autores consideran que el acolchado de paja, el de compost y el de aserrín son buenos sustitutos. Pero señalan que la fibra de yute y los bioplásticos son mejores materiales para usarse en invernaderos.

Los MP también afectan la biota del suelo al cambiar la riqueza y diversidad de la comunidad microbiana, al mismo tiempo que retrasan el crecimiento y alteran las funciones fisiológicas de la macrofauna del suelo. Los efectos de los MP en los cultivos varían y van desde la alteración de la biomasa, el metabolismo, las demandas de nutrientes y hasta la fotosíntesis.

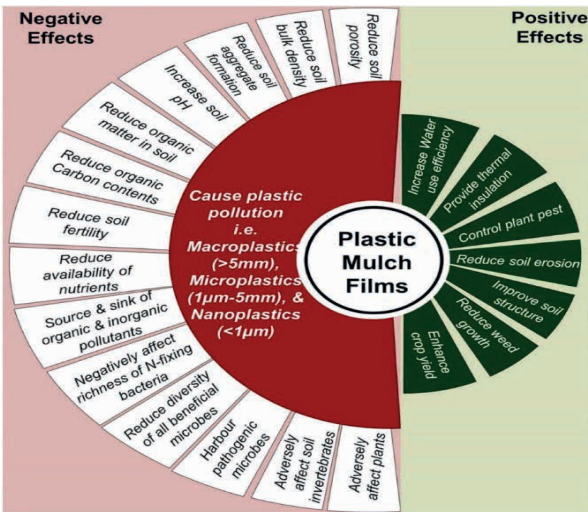


Figura 3. Esquema que ilustra la dualidad de los efectos del acolchado plástico, causando diversos efectos positivos de gran importancia agrícola, pero por el otro lado, causan contaminación de los suelos, las aguas superficiales y subterráneas, los agroecosistemas, los océanos y daños en la salud de los humanos (Tomado de: Khalid et al., 2023).

Las soluciones sustentables para lidiar con el problema de los MP incluyen el uso de mezcla de paja como acolchado orgánico, el uso de compost como enmienda del suelo junto con una mezcla de césped y paja y la incorporación de biomasa supresora de malezas en el compost, el uso de yute y plásticos biodegradables para invernaderos, así como el establecimiento de altos estándares para el contenido permitido de MP en los fertilizantes orgánicos y el agua de riego.

Las películas de AP son la fuente más

importante de MP en los suelos agrícolas, seguidas por las películas de los invernaderos abandonados y el uso de fertilizantes orgánicos que contienen MP dispersos o cuyas fuentes con frecuencia estaban contaminadas con MP (Figura 4). Se descubrió que los MP alteran las propiedades fisicoquímicas del suelo, el flujo de agua, los agregados estables, el pH del suelo, la densidad aparente y el contenido de nutrientes.

Pérez-Reverón et al. (2022) señalan que cada día se produce alrededor de un millón de toneladas de plástico en todo el mundo. La contaminación plástica se agrava cuando las partículas alcanzan tamaños entre 5 mm y 1 µm, dando lugar a los MP, que son omnipresentes en el ambiente, especialmente en los agroecosistemas. Destacan la interacción entre los MP y la microbiota del suelo, la fauna y la vegetación (efectos negativos reportados en el 83% de los casos), incluida la producción de cultivos (disminución de los parámetros de crecimiento en el 63%). Por lo tanto, los MP pueden alterar el entorno biofísico del suelo de las tierras de cultivo, lo que podría generar pérdidas económicas y su entrada en la cadena alimentaria trófica, afectando la alimentación y la salud humanas.

MICROPLÁSTICOS EN AMBIENTES TERRESTRES Y MARINOS

La presencia y los efectos de los desechos plásticos se investigan cada vez más. La mayoría de los estudios se centran en los MP, pero pocos informes sugieren que los fragmentos de plástico en el rango de tamaño <100 nm, denominados nanoplasticos, también pueden formarse en el ambiente acuático y terrestre, así como en los seres humanos, a los cuales podrían inducir daños físicos a través de las propias partículas y estrés biológico mediante los MP y NP solos, o por la lixiviación de aditivos inorgánicos y orgánicos (Revel et al.,

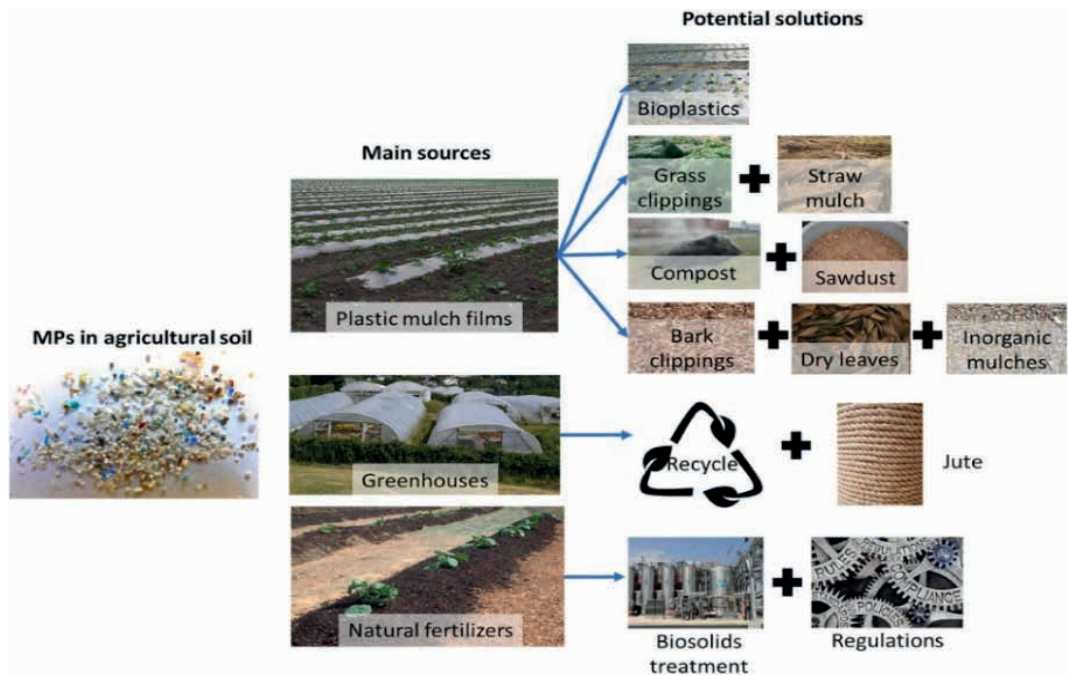


Figura 4. Los microplásticos en suelos agrícolas provienen de los acolchados plásticos, sistemas de fertiriego, y los residuos de cubiertas y paredes de invernaderos. Siendo las principales soluciones a este gran problema, el uso de residuos orgánicos que se pueden emplear como aditivos o acolchado de suelos, incluyendo aserrín de madera, hojarasca, así como paja de trigo y otras gramíneas (Tomado de: Tang et al., 2023).

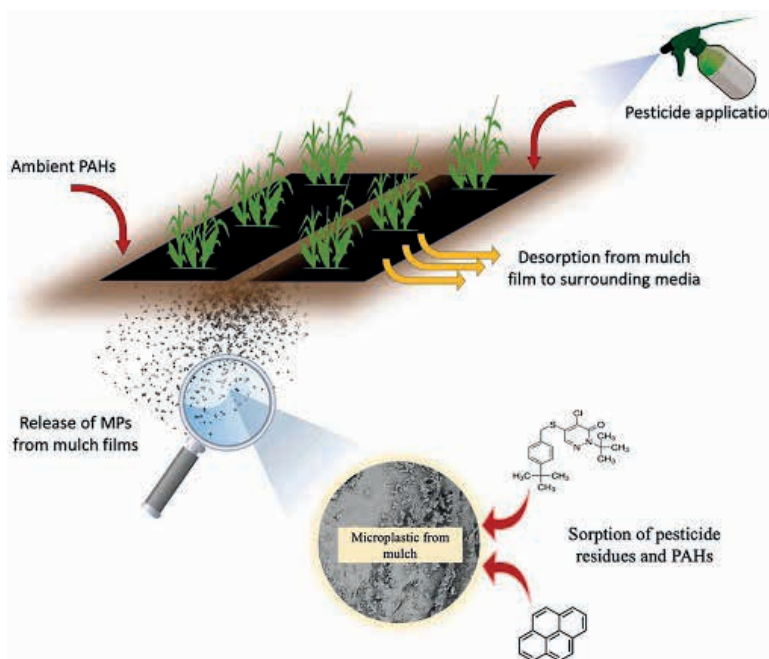


Figura 5. La sorción de plaguicidas y de hidrocarburos aromáticos policíclicos (HAP), en los microplásticos es hasta 90% mayor en el caso de los microplásticos derivados de películas plásticas comparado con microesferas de polietileno puro (Tomado de: Sahai et al., 2023).

2018).

La exposición de los humanos a los MP puede ocurrir por ingestión, inhalación y contacto dérmico debido a la presencia de microplásticos en productos, alimentos y el aire. En todos los sistemas biológicos, la exposición a MP puede causar toxicidad por las partículas, estrés oxidativo, lesiones inflamatorias y aumento de su absorción o translocación.

La incapacidad del sistema inmunitario para eliminar las partículas sintéticas puede provocar una inflamación crónica y aumentar el riesgo de neoplasia, que es la formación anormal en alguna parte del cuerpo de un tejido nuevo de carácter tumoral, benigno o maligno. Además, los MP pueden liberar sus componentes contaminantes adsorbidos y organismos patógenos afectando así a todos los animales, incluido el hombre (Prata, 2020).

El estudio realizado por Cao et al., (2023) señala que los macro plásticos se distribuyen principalmente entre el perfil de suelo de 0 a 10 cm, y los microplásticos (MP) entre los 10 y 20 cm. Mencionan que la exposición crónica a MP de poliestireno indujo negativamente lesiones pulmonares en ratones, ya que la exposición a estos MP de poliestireno activa la vía TLR2/NF- κ B, los que pueden desencadenar inflamación y estrés oxidativo en los pulmones. Además, los MP de poliestireno pueden agravar la apoptosis en el pulmón del ratón, induciendo fibrosis.

Los MP y NP pueden actuar como portadores de contaminantes orgánicos persistentes, lo que genera complicaciones ambientales y de salud humana. Las actividades domésticas, el manejo inadecuado de los residuos sólidos municipales, los residuos antropogénicos y las escorrentías agrícolas, etc., son algunos de los varios aspectos responsables de la acumulación de MP y NP en el suelo o en las vías fluviales como los lagos, ríos y océanos.

MICROPLÁSTICOS COMBINADOS CON PLAGUICIDAS

En el trabajo realizado por Sahai et al. (2023) se analizaron el efecto vector y de sorción (proceso físico-químico mediante el cual una sustancia se adhiere a otra) de los MP en la transferencia de plaguicidas e hidrocarburos aromáticos policíclicos (HAP), así como su impacto en la agricultura, el cual sigue estando inexplorado. Los autores encontraron que los MP derivados de las películas de acolchado mostraron hasta 90% más sorción que las MP de polietileno puro.

También se encontró que la sorción era hasta 90% mayor en el caso de los MP derivados de películas de acolchado de suelo en comparación con las microesferas de polietileno puro. Para MP de películas de acolchado, los porcentajes de sorción de pesticidas en medios que contienen CaCl_2 fueron: piridato (75.68 y 52.44%), fenazaquin (48.54 y 32.02%), piridabeno (45.04 y 56.70%), bifentrina (74.27 y 25.88%), etofenprox (82.16 y 54.16 %) y piridalilo (97.00 y 29.74%) a niveles de concentración de pesticida de 5 $\mu\text{g/L}$ y 200 $\mu\text{g/L}$ respectivamente. Este estudio destaca la acción de los MP provenientes de las películas de AP como vectores para el transporte de pesticidas en concentraciones ambientalmente realistas y los factores que influyen en ello (Figura 5).

Los resultados de Sahai et al. (2023) también mostraron que los MP se concentran a una profundidad del suelo de 0 a 10 cm, mientras que los NP se distribuyen mejor a una profundidad de 10 a 20 cm. Según estos hallazgos, estiman que las tierras de cultivo en el noroeste de China en el 2020 contenían 1.0×10^6 toneladas de NP y 2.7×10^5 ton de MP. Debido a eso, la grave contaminación por MP y NP en las tierras agrícolas de China requiere mejores prácticas de manejo y eficiencia de reciclaje de los AP para garantizar la seguridad alimentaria y el desarrollo agrícola sostenible.

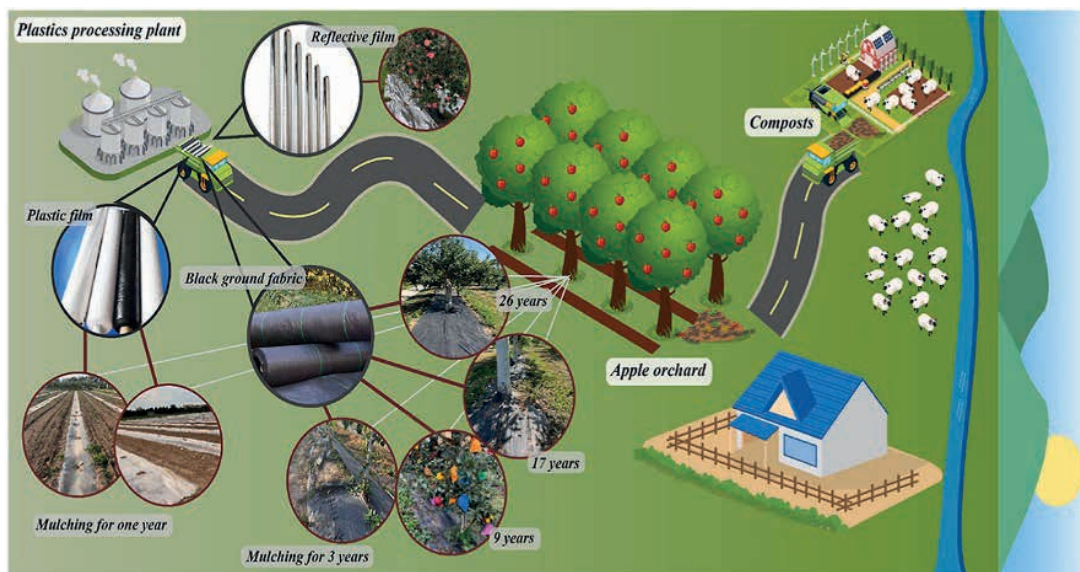


Figura 6. La variación temporal de los microplásticos del suelo como contaminantes emergentes apenas se ha venido ilustrando con resultados de investigación recientes, los cuales muestran que la mayor cantidad de microplásticos derivados del acolchado plástico usado se sitúan en la capa superior del suelo de 0 a 40 cm (Tomado de: Wang et al., 2023).

En el reciente reporte de (Peña et al., 2023) se señala que: 1) La contaminación del suelo por microplásticos ha crecido constantemente en los últimos años. 2) Los MP pueden interactuar con pesticidas que llegan al suelo durante el control de plagas. 3) Los MP aumentan la adsorción y reducen el transporte y la degradación de los plaguicidas. 4) No hay efectos importantes de las propiedades del suelo en las interacciones MP-plaguicida. 5) Los plaguicidas y MP mezclados exhiben efectos tóxicos variables en los organismos del suelo.

Debido a su gran área superficial específica e hidrofobicidad, los MP se consideran buenos adsorbentes para otros contaminantes orgánicos ambientales también presentes en los ecosistemas terrestres, como los productos farmacéuticos o plaguicidas con los que pueden interactuar y modificar así su destino ambiental. La producción industrial de plásticos se disparó a mediados del siglo XX. Desde entonces, los plásticos han influido directamente en la economía global y han sido

producidos en masa en un gran número de sectores industriales debido a su bajo costo, gran durabilidad y versatilidad.

Antes y durante la crisis del COVID, la producción de plástico aumentó a nivel mundial de 359 toneladas en 2018 a 369 toneladas en 2020, con la mayor producción en Asia (49%) y específicamente en China (32%). La demanda europea de plásticos, principalmente para envases (40%), representó un total de 49.1×10^6 toneladas en 2020, con Alemania (23.3%) e Italia (14.1%) a la cabeza, entre los distintos países europeos (Plastics Europe).

Por otro lado, en el ensayo de Wang et al. (2023) se estudió la variación espacio-temporal y la distribución de los MP del suelo (Figura 6). La abundancia de microplásticos en la capa superior aumentó con el tiempo de tratamiento. Se encontró que los tratamientos a largo plazo aumentaron los MP con tamaños de 0 a 500 μm y gránulos.

La contaminación por MP en los agroecosistemas ha despertado una gran

alarma y preocupación generalizada. Se investigó las características de acumulación y distribución vertical de MP después de aplicar el AP y compost orgánico en huertos de manzanos durante 3 años. En la capa de suelo de 0–20 cm, los MP aumentaron con el tiempo de tratamiento; la abundancia fue de 4,333 piezas kg^{-1} después de 26 años de tratamiento, disminuyendo gradualmente la cantidad de MP con la profundidad del suelo.

MACRO Y MICROPLÁSTICOS BIODEGRADABLES

El trabajo experimental realizado por Li et al. (2023) aplicando AP biodegradable (BDM) mostró que este material biodegradable se degradó en macro y microplásticos, pero no se pudieron detectar MP (>5 mm) después de 2.5 años de haber incorporado el BDM. Las cantidades de microplásticos de 0.1 a 5 mm alcanzaron su punto máximo a los 2.5 años y luego disminuyeron.

Esta disminución continua de las concentraciones de partículas plásticas visibles en el suelo sugiere que los fragmentos de BDM se degradan en partículas cada vez más pequeñas, que eventualmente pueden biodegradarse por completo. Los autores concluyen que si bien los BDM no se puede determinar si forman nanoplásticos persistentes e indetectables, los macro y microplásticos formados a partir de BDM sí desaparecen con el tiempo.

El BDM se ha convertido en una alternativa prometedora al AP convencional, ya que se puede arar o laborear el suelo después de la cosecha, incorporándolo y minimizando los problemas de su eliminación, habiéndose reportado que las películas de BDM se degradaron en macro y microplásticos.

En el experimento de Khan et al. (2023) se analizó la abundancia y distribución espacial de los MP en un suelo agrícola. La mayoría de los MP en el suelo de Hainan

eran fragmentos de tamaño < 500 μm (Figura 7). El polietileno (PE) fue el polímero más abundante observado en el área de estudio. La distribución de MP fue específica del sitio sin una fuerte relación con los cultivos. Quedó claro que el AP de PE fue la principal fuente de MP en el suelo, por lo que este estudio indica una contaminación grave con MP, lo que plantea una preocupación con respecto a la seguridad agroecológica y ambiental.

Por otro lado, el reporte de Calero et al. (2023) indica que el uso de plásticos en la agricultura se ha intensificado debido a los beneficios asociados en diversos aspectos como el mayor rendimiento de los cultivos, el ahorro de agua y la protección contra las malezas o plagas, sin embargo, su efecto detrimental en el ambiente ahora es criticado por todos.

Los acolchados de plástico representan un peligro debido a su íntimo contacto con el suelo. La eliminación completa del AP es laboriosa y costosa debido a su naturaleza de ser muy poco biodegradable, principalmente del polietileno de baja densidad, que tarda mucho tiempo en degradarse por completo. Sin embargo, la degradación y distribución parcial del AP conduce a la liberación de microplásticos que representan un peligro para el ambiente. Debido a eso, investigadores de todo el mundo exploran la factibilidad técnica y económica de usar papel como acolchado biodegradable del suelo en diversos cultivos agrícolas (Figura 8).

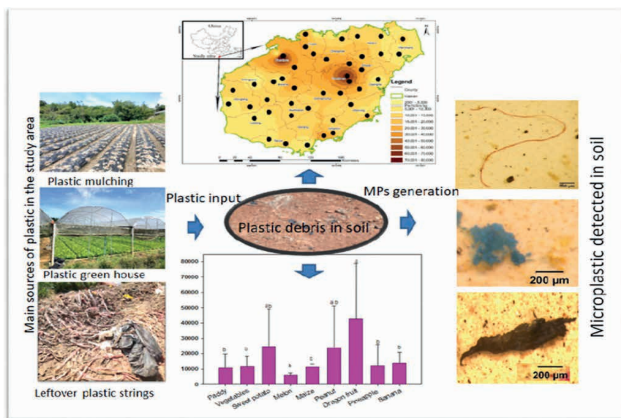


Figura 7. Esquema que ilustra la abundancia, distribución espacial y características de los microplásticos en suelos agrícolas, así como su relación con los factores que promueven esa generación de microplásticos contaminantes (Tomado de: Khan et al., 2023).



Figura 8. Una opción sustentable al acolchado plástico tradicional es el papel, aunque se usa en menor proporción que los plásticos biodegradables, puede ser una opción más económica dependiendo de su grosor, además, es inocua para el entorno suelo-planta-atmósfera, debido a que con el paso de un tiempo breve se desintegra y se incorpora al suelo donde servirá de alimento para los microorganismos (Tomado de: Calero et al., 2023).

Aunque existe una larga lista de elementos plásticos utilizados en la agricultura, su uso principal es para el mulching o acolchado de suelos y para cubrir invernaderos. Los acolchados representan un peligro debido al contacto íntimo con el suelo, siendo su

eliminación completa laboriosa y costosa debido a la naturaleza poco biodegradable, principalmente del polietileno de baja densidad, que tarda mucho tiempo en degradarse por completo.

Sin embargo, la degradación y distribución parcial del acolchado plástico conduce a la liberación de MP que representan un peligro para el ambiente. Por eso se requieren nuevas opciones emergentes más respetuosas con los ecosistemas, como los plásticos biodegradables o el uso de alternativas como el acolchado de papel, lana, etc.

Ramanayaka et al. (2023) mencionan que las películas plásticas para acolchado de suelos son muy usadas en la agricultura debido a sus múltiples beneficios; sin embargo, como resultado de la fotodegradación, la degradación química y los procesos microbianos, las películas de AP se descomponen en partículas más pequeñas, formando microplásticos. Los MP influyen en las propiedades del suelo y los aditivos químicos de las películas plásticas se filtran en los suelos agrícolas, provocando contaminación.

Li et al. (2023) reportan que la falta de homogeneidad de la platisfera (entorno del ecosistema donde se convive con los plásticos producidos por humanos) y el suelo, puede generar diferentes comunidades microbianas, lo que podría afectar las funciones del suelo.

Debido a eso, los plásticos biodegradables ofrecen una alternativa a los plásticos convencionales, sin embargo, los tratamientos inadecuados al final de la vida útil de los plásticos biodegradables pueden liberar más MP que afectan el entorno aéreo y terrestre de los agroecosistemas.

Como lo señalan Chen et al. (2023) no se pueden ignorar los MP y NP liberados por los envases de refrescos o aguas carbonatadas a baja temperatura. Las burbujas de CO₂ y la presión amplifican la lixiviación de MP y NP. Los ciclos repetidos de congelación y

descongelación aumentan mucho la liberación de MP y NP. Además, la presencia de azúcar conduce a una elevación en la liberación de MP en comparación con el agua carbonatada sin sacarosa, mientras que la adición de aditivos al agua carbonatada exhibe efectos insignificantes en la liberación de MP.

Plásticos inadecuados, el pretratamiento de las aguas carbonatadas y la congelación-descongelación incrementan los MP y NP. Las bebidas carbonatadas se caracterizan por bajas temperaturas, múltiples microburbujas, alta presión y un ambiente ácido, lo que crea las condiciones ideales para liberar contaminantes de las botellas de plástico.

Sin embargo, los patrones de liberación de micro y nanoplasticos son poco conocidos. La liberación de MP y NP aumenta con el incremento del volumen de llenado de CO₂, impulsado por el efecto sinérgico entre las burbujas producidas por el CO₂ y la presión ejercida.

Reddy et al. (2023) argumentan que los plásticos son materiales sintéticos compuestos por polímeros orgánicos y aditivos químicos como bisfenoles, ftalatos y retardantes de flama, que les otorgan sus propiedades únicas. Los plásticos se utilizan en una amplia gama de aplicaciones comerciales debido a su bajo costo, facilidad de fabricación, flexibilidad e hidrofobicidad.

Cada año, la cantidad de plástico producido aumenta; sin embargo, las soluciones de reutilización, reciclaje y reutilización no se adoptan con la suficiente rapidez, especialmente en los países pobres. Sin embargo, solo entre 21 y 26% de los desechos plásticos se reciclaron y quemaron adecuadamente. El resto se desecha en el ambiente o se quema a cielo abierto, lo que provoca la contaminación plástica del agua, el aire y el suelo, entre otros entornos.

Después de ingresar al ambiente, las interacciones entre los desechos plásticos

y los componentes ambientales pueden descomponer grandes piezas de plástico en partículas más pequeñas. Como resultado, se necesitan más estudios para establecer el destino y las implicaciones ambientales de los MP y NP. Debido a su amplia distribución, durabilidad ambiental y diversas interacciones con la biota, la contaminación por MP y NP constituye una amenaza creciente del cambio global para los ecosistemas terrestres y marinos.

EFFECTO DE MICROPLÁSTICOS EN CULTIVOS AGRÍCOLAS

El estudio de Shorobi et al. (2023) reporta que los MP de polipropileno no afectaron la germinación de tomate (*Solanum lycopersicum* L.) y tomate cherry (*Solanum lycopersicum* var. *cerasiforme*). Los MP de polipropileno aumentaron la elongación de la raíz en tomate cherry. La absorción de N disminuyó en ambos tipos de plantas, mientras que el P disminuyó en los brotes de tomate cherry, además, los MP de polipropileno redujeron la translocación de macronutrientes de la raíz al brote o tallo.

Los resultados mostraron que los MP no afectaron la germinación de las semillas de ambos genotipos de tomate, pero afectaron positivamente la elongación de brotes y raíces. En el caso del tomate cherry, la elongación de la raíz se incrementó significativamente en 34% (Figura 9).

Los MP también afectaron la absorción de nutrientes por parte de las plantas, sin embargo, el efecto varió según los elementos y las especies de plantas. La concentración de Cu aumentó sustancialmente en los brotes de las plantas de tomate, mientras que disminuyó en la raíz de tomate cherry. La absorción de nitrógeno disminuyó en las plantas tratadas con MP en comparación con el control y la absorción de fósforo disminuyó en los brotes de tomate cherry.

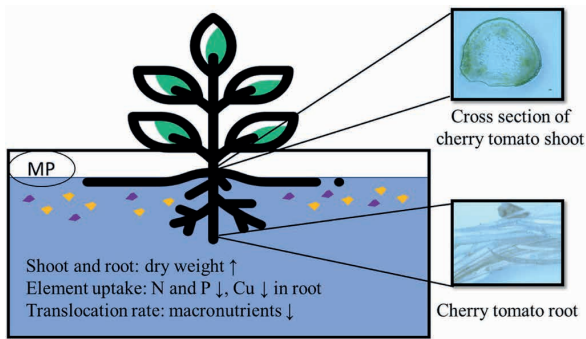


Figura 9. Efectos positivos de los microplásticos de polipropileno en la biomasa seca de la raíz y tallo en plantas de tomate y tomate cherry, así como los efectos negativos en la absorción de nutrientes como nitrógeno, fósforo y cobre por la raíz y la translocación de macronutrientes por el tejido del xilema (Tomado de: Shorobi et al., 2023).

Acorde con lo reportado por Liu et al. (2023) durante décadas (40 años) de estar usando el acolchado plástico causaron una importante contaminación por MP, degradación del suelo y reducción del rendimiento en el cultivo de algodón sembrado en China. Ellos señalan que el acolchado plástico empeora las funciones del suelo, como la resistencia a la penetración y la conductividad hidráulica.

El deterioro de la función física del suelo restringió el crecimiento de las raíces y, por lo tanto, redujo el rendimiento del algodón. Los resultados de esos autores mostraron que la abundancia promedio de MP en el suelo osciló entre 28.0 y 1426.6 piezas kg^{-1} y aumentó con el tiempo, mientras que el tamaño de los MP disminuyó con el tiempo.

Con respecto a las propiedades físicas del suelo, la densidad aparente y la resistencia a la penetración aumentaron significativamente con el tiempo, mientras que la conductividad hidráulica y el diámetro medio de los agregados en los campos de algodón disminuyeron con el tiempo, lo que indica que el acolchado plástico a largo plazo tiene un impacto adverso irreversible en el suelo (Figura 10).

El aumento significativo de la resistencia

a la penetración del suelo y la disminución de la conductividad hidráulica restringieron sustancialmente el crecimiento de las raíces y esto finalmente condujo a una notable reducción del rendimiento del algodón. Es urgente que los productores y órganos de gobierno que fomentan la agricultura a nivel mundial, tomen las medidas adecuadas para mitigar los efectos negativos cada vez mayores del acolchado plástico en las zonas áridas.

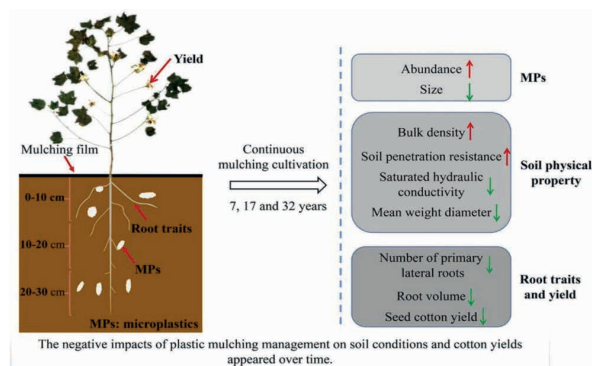


Figura 10. Esquema que ilustra el efecto persistente del acolchado plástico durante tres décadas el cual ha causado contaminación por microplásticos, degradación del suelo y la reducción del rendimiento en el cultivo de algodón en China (Tomado de: Liu et al., 2023).

CANTIDADES DE MICROPLÁSTICOS EN LOS SUELOS

En el reporte de Kedzierski et al. (2023) se señala que el término microplásticos apareció en el 2004, pero no fue hasta la década del 2010 que investigadores internacionales reportaron estudios sobre MP. Estos autores han estimado que, en todo el mundo, la cantidad de MP en suelos agrícolas podría ser de 1.5 a 6.6 millones de toneladas (Figura 11). Esto se considera que es más que la cantidad de MP presentes en la superficie de los océanos.

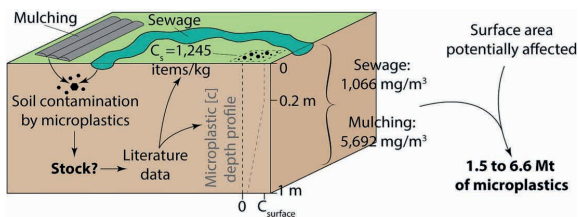


Figura 11. Esquema que ilustra las estimaciones de las cantidades de microplásticos en suelos contaminados por este dañino material polimérico, las cuales rondan entre 1.5 a 6.6 millones de toneladas (Tomado de: Kedzierski et al., 2023).

Existen muchas limitaciones para calcular con precisión esas existencias de MP. Por lo tanto, este trabajo debe considerarse como un primer paso para abordar el tema. A largo plazo, para evaluar mejor estas cantidades de MP, se deben obtener datos más diversificados, para representar mejor ciertos países, o ciertos usos de la tierra (Lofty et al., 2022). Sorprendentemente, si bien los suelos podrían estar entre los mayores reservorios de contaminación por MP del mundo hasta la fecha no se ha propuesto ninguna evaluación de existencias para la mayor parte del mundo.

Zhou et al. (2023) indican que debido a que las películas biodegradables son más susceptibles a la degradación rápida, es probable que se generen más MP que con las películas convencionales en el mismo período de tiempo, lo que conduce a una contaminación más grave por MP y los efectos asociados. Sin embargo, el efecto de los residuos de la película de acolchado biodegradable y la contaminación por MP asociada en la salud de las plantas y el suelo sigue siendo dudoso.

Estos autores consideran que es poco probable que los biomicroplásticos (Bio-MP) sean importantes para promover el almacenamiento de C en el suelo. Los Bio-MP actúan como fuentes frágiles de carbono para estimular el crecimiento microbiano y el ciclo de N y P del suelo. Con los Bio-MP es

mucho más fácil de formar nanoplásticos y generar productos tóxicos más dañinos para las plantas y el ambiente.

En comparación con los MP convencionales, la degradación de los Bio-MP es más pronunciada, lo que induce mayores alteraciones en la diversidad microbiana y la composición del ecosistema. Esto puede alterar aún más las emisiones de N_2O y CH_4 (Figura 12) y, en última instancia, tener consecuencias impredecibles para el calentamiento global del planeta Tierra.

Por su parte, Zhao et al. (2016) identificaron un contenido de plástico similar en 17 aves silvestres alrededor de Shanghai con un promedio de 22.8 ± 33.4 partículas por estómago de ave (incluidos el proventrículo y la molleja) y su esófago e intestinos. Además, se han encontrado MP en los sistemas digestivos de animales más grandes (Mekuanint et al., 2017).

Sin embargo, aún no se ha demostrado en estudios de laboratorio o de campo hasta qué punto esto puede ocurrir. Además, los Bio-MP tienen una gran posibilidad de formar nanoplásticos, lo que puede causar un efecto tóxico más fuerte en las plantas en comparación con los MP convencionales. En consecuencia, esto influiría en la salud de las plantas, la productividad de los cultivos y la seguridad alimentaria, lo que generaría riesgos potenciales para la salud.

Aún no está claro si la acción de los MP se trata de efectos directos en procesos clave de la planta (p. ej., señalización, expansión celular, etc.) o efectos indirectos (p. ej., deficiencia de nutrientes o acidificación). En general, la cuestión de si las películas de acolchado biodegradables ofrecen una alternativa prometedora para resolver el problema ocasionado por el plástico convencional a largo plazo en el suelo sigue sin estar adecuadamente clarificado.

En el estudio de Lwanga et al. (2023) la

cantidad de MP usados en la agricultura se evaluaron en el suelo, el agua, el aire y los sedimentos de las zanjas. Los suelos con acolchado plástico tuvieron el mayor contenido de MP. Se encontró que el contenido de MP de polipropileno en los sedimentos de las zanjas y el suelo están correlacionados. Las granjas donde se aplicó compost tuvieron el mayor contenido de MP en los sedimentos, pero todas las muestras obtenidas del suelo contenían un cóctel de MP.

La salud del suelo también se evaluó utilizando la abundancia y diversidad de macro invertebrados del suelo. Se evaluaron 16 campos, 6 de los cuales habían estado expuestos a más de 5 años de aplicación de compost, 5 estuvieron expuestos al menos durante 5 años al acolchado plástico y 5 no estuvieron expuestos a ningún manejo específico (controles) en los últimos 5 años.

También se evaluó la propagación de MP de las granjas a cuerpos de agua cercanos y polvo en el aire. Estos autores encontraron 11 tipos de MP en el suelo, entre los cuales el Polietileno de Baja Densidad (PEBD) y el PEBD recubierto con aditivos pro-oxidantes (PAC) fueron los más abundantes, los cuales resultan ser también los más tóxicos para los ecosistemas y humanos.

Las mayores concentraciones de plásticos se encontraron en los suelos expuestos al manejo con acolchado plástico (128.7 ± 320 MPs.g⁻¹ suelo y 224.84 ± 488 MPs.g⁻¹ suelo, respectivamente) y las partículas midieron de 50 a 150 μm . Se encontraron nueve tipos de microplásticos en el agua, y las concentraciones más altas se observaron en los sistemas expuestos al compost.

El reporte de Jacques y Prosser (2021) relata que la concentración de microplásticos en el suelo que no tuvo un efecto adverso sobre las especies del suelo (NOEC) o las concentraciones más bajas que tuvieron un efecto adverso sobre las especies del suelo

(LOEC), fueron de 95% de la distribución de exposición ambiental (8147 partículas de microplásticos por gramo de suelo) fue mayor que el 22 y el 28% de la distribución de sensibilidad de las especies utilizando NOEC y LOEC, respectivamente.

La evaluación concluyó que las concentraciones de MP relevantes para el ambiente reportadas en la literatura podrían representar un riesgo considerable para la biota del suelo. También es importante tener en cuenta que debido a la producción continua de grandes cantidades de plástico y la persistencia de microplásticos en el ambiente, es probable que las concentraciones de MP en el sigan aumentando.

Jia et al. (2022) indica que técnicas como el 8700 LDIR y ATR-FTIR para investigar los MP en el suelo es rápido y preciso. La abundancia de MP alcanzó 105 partículas/kg de suelo en la provincia de Xinjiang y se detectaron 26 tipos de MP (Figura 13), y la mayoría eran PP, PVC, PE y PA. Por lo tanto, el acolchado plástico tradicional y el riego son fuentes importantes de contaminación por MP en los suelos agrícolas.

Los resultados mostraron que la abundancia total de MP alcanzó $1.98 \pm 0.41 \times 10^5$, $1.57 \pm 0.28 \times 10^5$, $1.78 \pm 0.27 \times 10^5$ y $3.20 \pm 0.41 \times 10^5$ partículas/kg de suelo en campos de algodón con acolchado plástico de 5, 10, 20 y >30 años, respectivamente. Los resultados de LDIR indicaron que los MP que oscilaban entre 10 y 500 μm representaban entre el 96.5 y el 99.9% de las cantidades totales de MP en los suelos. Mediante el uso de enfoques cuantitativos e identificables automatizados, este estudio revela que el método de conteo visual comúnmente usado puede subestimar la contaminación por MP en los suelos.

Los productos de plástico como el acolchado de PE son favorables debido a su bajo costo, maleabilidad y durabilidad por eso, la producción mundial de plástico ha

aumentado de 1.7 millones de toneladas en 1950 a 368 millones de toneladas en 2019 (PlasticsEurope, 2020). Sin embargo, solo el 9% del plástico se recicló, el 12% se quemó y el 79% restante se liberó al ambiente (Geyer et al., 2017).

Debido a que los plásticos usados para acolchado del suelo son refractarios a la biodegradación, los plásticos pueden permanecer en el ambiente incluso durante siglos, donde se rompen constantemente y forman pequeñas partículas de plástico (MP) bajo acciones físicas, químicas o biológicas.

En comparación con el ecosistema oceánico, se ha estimado que las cantidades de MP que se liberan en los ecosistemas terrestres son entre 4 y 23 veces mayores que las que se liberan en el océano (Horton et al., 2017). Las tierras de cultivo son los principales repositorios de MP, ya que pueden ingresar al suelo por una amplia gama de rutas, incluyendo el acolchado plástico, la aplicación de fertilizantes orgánicos, el riego artificial y la deposición atmosférica. A nivel mundial, hay 20 millones de hectáreas cubiertas con acolchado plástico (Steinmetz et al., 2016), y el componente principal del acolchado es el polietileno.

Debido a lo señalado, la contaminación de suelos en agroecosistemas con microplásticos (MP) es una preocupación creciente (Shafea et al., 2023). La contaminación del ambiente y suelos agrícolas con MP (partículas de 1 µm a 5 mm de tamaño) y nanoplásticos (partículas de tamaño <1 µm), está causando numerosos efectos en las funciones ecológicas del suelo y la salud humana cuando se traslocan en las plantas (Figura 14).

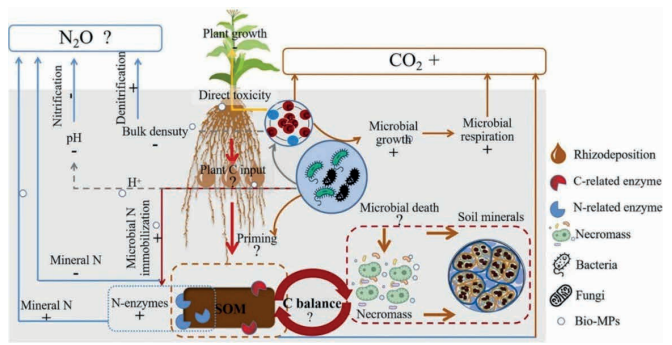


Figura 12. Los plásticos desempeñan una función vital dentro de casi todos los regímenes de manejo agronómico, sin embargo, su uso está recibiendo mayor atención y escrutinio debido a su potencial para contaminar la tierra y luego migrar a hábitats marinos y de agua dulce (Tomado de: Zhou et al., 2023).

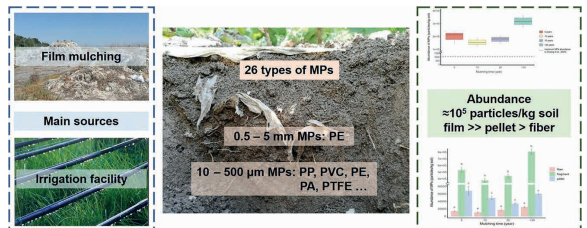


Figura 13. La identificación y cuantificación de microplásticos en el suelo de áreas agrícolas puede determinarse con mucha precisión haciendo uso de técnicas y herramientas de laser infrarrojo y el método infrarrojo transformado de Fourier (FTIR) (Tomado de: Jia et al., 2022).

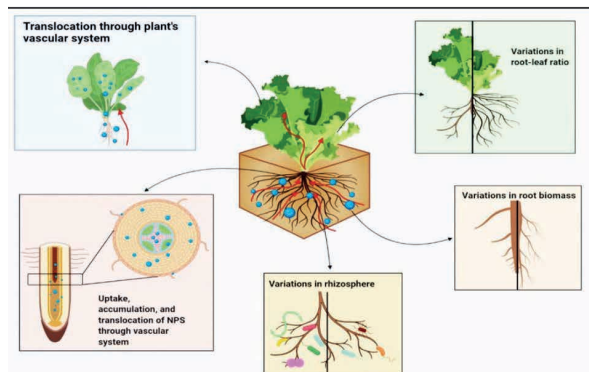


Figura 14. Representación esquemática de los posibles mecanismos de absorción y efectos sobre el crecimiento vegetal ocasionado por los micro y nanoplásticos al penetrar y translocarse por el sistema vascular de las plantas, causando variaciones en la relación raíz-tallo, así como en la acumulación de los micro y nano plásticos (Tomado de: Shafea et al., 2023).

TRANSFERENCIA TRÓFICA DE LOS MICROPLÁSTICOS

Los MP ingresan al suelo a través de varias fuentes, ya sea por el uso intencional de plástico (por ejemplo, acolchado plástico, invernaderos de plástico, productos recubiertos de plástico) o indirectamente por la entrada de lodos residuales, compost o agua de riego contaminada con plástico. Una vez en el suelo, los desechos plásticos pueden tener diversos impactos, como cambios en las funciones y propiedades fisicoquímicas del suelo, y afectan a los organismos del suelo debido a su toxicidad.

Los MP ingeridos por los organismos se acumulan en la cadena trófica pasando de plantas a comunidades de microorganismos y animales de granja (Figura 15). El estudio de la exposición de animales terrestres a MP mostró que muchos organismos ingieren plásticos. Por ejemplo, las concentraciones de MP se incrementaron del suelo (0.87 ± 1.9 partículas g^{-1}) a los excrementos de lombriz (14.8 ± 28.8 partículas g^{-1}) a las heces de pollo (129.8 ± 82.3 partículas g^{-1}) en huertos familiares en el sureste de México (Huerta-Lwanga et al., 2017).

Los MP y NP tienen efectos directos o indirectos al ser y transferidos de un nivel trófico al otro sobre los organismos de los ecosistemas, los cuales pueden afectar la salud y supervivencia humana. Tampoco los MP y NP biodegradables no parecen ser completamente seguros para las criaturas, debido a que raramente se desintegran por completo de los ecosistemas.

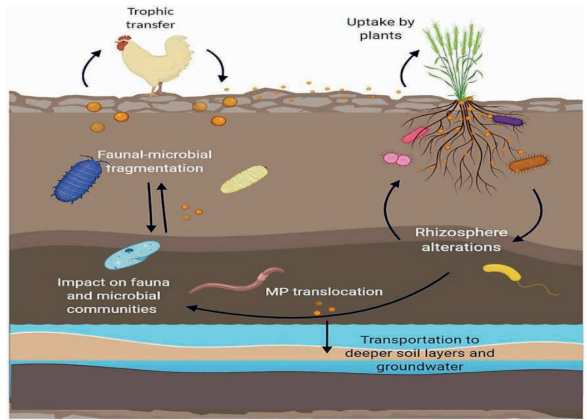


Figura 15. Esquema que ilustra la transferencia trófica de micropartículas en las plantas, el suelo, el agua de acuíferos subterráneos, microorganismos y animales de granja, las cuales finalmente llegan a los cuerpos de agua subterráneos (Tomado de: Shafea et al., 2023).

Además, su seguridad ecológica sigue siendo poco concluyente y necesita una evaluación más precisa. Por lo tanto, el artículo de revisión por Cui et al. (2023), brinda una perspectiva sobre los temas centrales de la investigación futura, incluidos los efectos compuestos o alternos y la separación de los NP, sentando una base fortalecida y robusta para la investigación futura.

Los efectos ecológicos de los MP y NP en el ambiente han atraído cada vez más la atención y la investigación de académicos de todo el mundo. Los estudios existentes indican que, aunque los MP y NP pueden tener efectos directos o indirectos en las plantas, los animales y los microorganismos, también generan inestabilidad en los ecosistemas y pueden afectar la salud y la supervivencia humana, sin embargo, estos efectos siguen siendo algo inciertos.

Por su parte, Ding et al. (2022) también señalan que los microplásticos tienen impactos negativos en los ecosistemas del suelo. Los MP, como contaminantes emergentes, han atraído la atención mundial, ya que investigaciones recientes se han centrado en su aparición, las fuentes de esos MP y su

toxicología en los ecosistemas terrestres y acuáticos. Simultáneamente, se evaluaron los efectos de los MP en las propiedades físicas y químicas del suelo, así como en los microbios y microorganismos del suelo.

Debido a su pequeño tamaño, los MP son propensos a ser transferidos por organismos, lo que representa una amenaza potencial para todos los organismos en el ambiente. Los MP son inherentemente tóxicos, lo que se debe a la adición de plastificantes, colorantes y monómeros no polimerizados y otras sustancias tóxicas. Estas sustancias se liberan al ambiente a medida que los plásticos se degradan, lo que amenaza el ecosistema y la salud humana debido a su transferencia en la cadena alimentaria (Figura 16).

Los microplásticos han sido una preocupación ambiental mundial debido a su contaminación generalizada, que puede presentar riesgos para la seguridad alimentaria y la salud humana una vez que ingresan a los suelos agrícolas y luego a toda la cadena trófica. En el artículo de Tian et al. (2022) se resumieron las principales fuentes de MP que ingresan a los suelos agrícolas con énfasis en las diferentes caracterizaciones y el destino ambiental de cada fuente.

Dentro de los sistemas de suelo agrícola, se

analizaron los procesos de transformación y transporte de MP, destacando los efectos de la radiación UV y la abrasión mecánica de la fauna del suelo y las prácticas agrícolas. Finalmente, sobre la base de las lagunas de investigación actuales, se propusieron direcciones de investigación futuras sobre tres aspectos, incluidos los métodos de estandarización de varios tipos de microplásticos, las interacciones de los MP y otros contaminantes, y los efectos del envejecimiento ambiental de los MP en los suelos agrícolas sobre los riesgos a largo plazo en la salud humana.

Las respuestas de plantas y suelos a la exposición a MP dependen del tipo de partícula, es decir, los microplásticos con una forma similar a otras partículas naturales del suelo provocaron diferencias más pequeñas con respecto al control. Los cambios en la estructura del suelo y la dinámica del agua pueden explicar los resultados observados en los que las fibras de poliéster y las perlas de poliamida desencadenaron los impactos más pronunciados en las características y funciones de las plantas. Los hallazgos informados aquí implican que la contaminación microplástica generalizada en el suelo puede tener consecuencias para el rendimiento de las plantas y, por lo tanto, para los agroecosistemas y la biodiversidad terrestre.

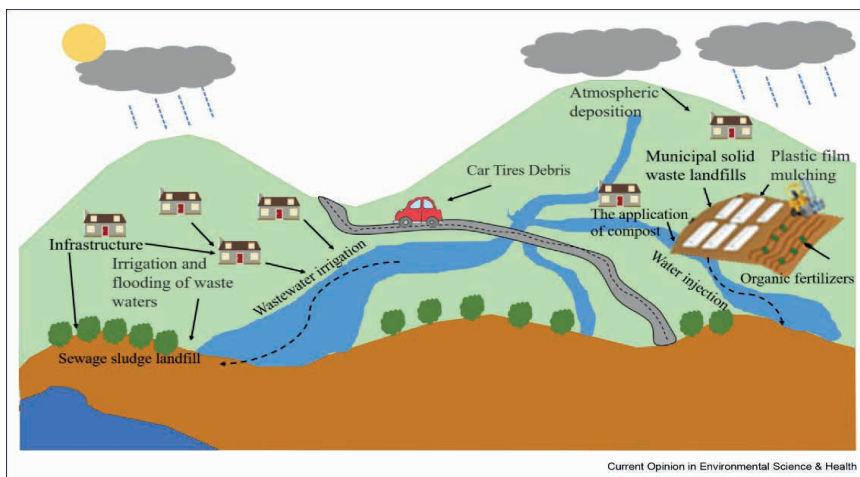


Figura 16. Los microplásticos y nanoplásticos encontrados en el suelo y los mantos acuíferos provienen de múltiples fuentes que contaminan el suelo, como los desechos de residuos sólidos municipales, así como los remanentes de películas de plástico usadas para acolchar el suelo y para cubrir las paredes y techos de los invernaderos (Tomado de: Ding et al., 2022).

EFECTO DE MICROPLÁSTICOS BIODEGRADABLES EN ECOSISTEMAS

Los productos plásticos se usan ampliamente en todo el mundo, pero los desechos plásticos no se manejan de manera razonable y causan una grave contaminación plástica. Los plásticos biodegradables (BP) ofrecen una alternativa a los plásticos convencionales, pero no todos los BP se pueden degradar por completo en condiciones naturales.

En cambio, los plásticos biodegradables

pueden descomponerse en MP más rápido que los plásticos convencionales, lo que representa una amenaza adicional para el ambiente del suelo. Fan et al. (2022) revisaron la definición, las aplicaciones y los comportamientos de degradación de los BP, incluidos los microplásticos biodegradables (BMP), y resumieron los efectos ecotoxicológicos de los BMP en los ecosistemas del suelo, en términos de propiedades físicas y químicas del suelo, el ciclo de nutrientes, las comunidades bacterianas y fúngicas del suelo, así como la flora y fauna del suelo (Figura 17).

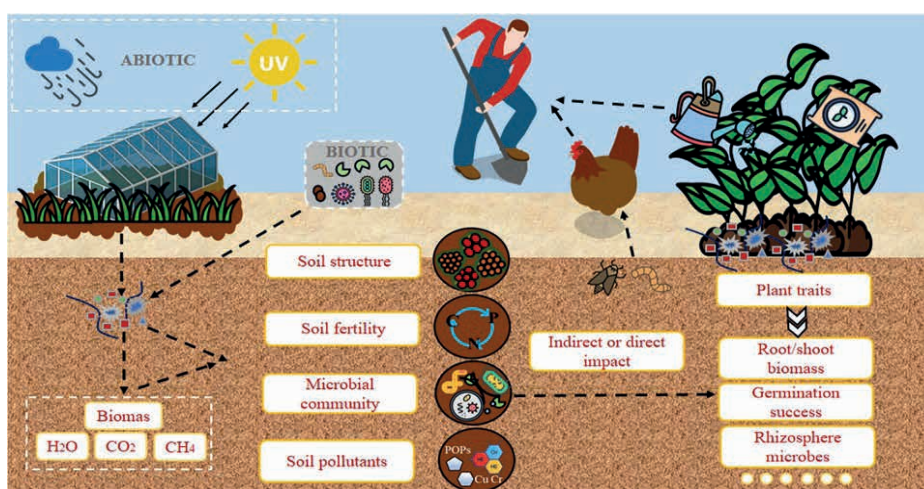


Figura 17. Impacto potencial de los plásticos biodegradables en los ecosistemas terrestres una vez que han sido afectados por los factores bióticos y abióticos que inciden sobre ellos y los degradan hasta que se producen los microplásticos (Tomado de: Fan et al., 2022).

Las propiedades del suelo se pueden utilizar para comprender los riesgos que los MP representan para los ecosistemas terrestres. La exposición de MP en los suelos puede cambiar las propiedades físicas y químicas del suelo como la estructura, la densidad aparente, la porosidad y el agua retenida en el suelo, ya que todos esos factores relacionados con el microambiente del suelo, cambian en presencia de los MP. Sin embargo, debido a las diferentes características entre los BMP y los MP no biodegradables, pueden causar cambios diferentes en las propiedades del

suelo.

Fan et al. (2022) abordaron los efectos combinados de los BMP y otros contaminantes. Los resultados revelaron que los BMP tienen efectos más severos en comparación con los MP convencionales. Señalan además que los BP no son un sustituto perfecto para resolver la contaminación plástica, por lo que una mayor exploración debe centrarse en su generación, comportamiento ambiental, impacto ecológico y si efectivamente los BMP causan más daño que los MP convencionales.

Los plásticos biodegradables atraen la

atención del público como un sustituto prometedor de los plásticos no degradables o tradicionales que provocan una grave contaminación plástica, y se afirma que son ambientalmente inofensivos y biodegradables por los microorganismos. Sin embargo, no todos los plásticos biodegradables son completamente degradables en condiciones de campo de cultivo.

Algunos de ellos pueden desintegrarse en microplásticos más rápidamente que los plásticos convencionales, emergiendo como otra amenaza para los entornos del suelo. Como parte de los microplásticos, los MP biodegradables pueden tener efectos negativos más fuertes en varias especies del suelo que los microplásticos a base de aceite en algunas condiciones.

Debido a lo antes señalado, Quin et al. (2021) deja en claro que la biodegradación incompleta de los plásticos biodegradables conduce a cuatro efectos en los ecosistemas: 1) Una mayor acumulación de BMP en el suelo. 2) Los BMP pueden generar una entrada excesiva de carbono y una emisión de gases de efecto invernadero no deseada. 3) Los BMP presentan efectos negativos más fuertes que las MP convencionales en algunas condiciones. 4) Los BMP pueden tener una mayor afinidad con los contaminantes ambientales que los MP convencionales.

Actualmente, la contaminación por MP es más grave de lo imaginado y complica los efectos tóxicos de otros contaminantes coexistentes en el ambiente. Sin embargo, el efecto y el mecanismo de los plásticos biodegradables sobre el crecimiento y el metabolismo de los probióticos siguen sin estar claros. El reciente trabajo de Li et al. (2023) seleccionó *Bacillus amyloliquefaciens* como bacteria modelo para un experimento de exposición de tres días para investigar los problemas de toxicidad.

Los resultados mostraron que 100 mg/L

de microplásticos de ácido poliláctico (PLA MP) (tamaño de 3–4 mm, en forma de copos) causaron daño oxidativo en las membranas celulares, alteraron la composición de la pared celular e inhibieron el crecimiento celular en el rango de 21.2–27.5%. La toxicidad no fue simplemente por efectos aditivos o sinérgicos cuando coexistieron los MP de PLA (100 mg/L) más los iones de cobre (10 mg/L). Se concluyó mencionando que los MP de PLA no aumentaron la toxicidad del cobre para las bacterias, sino que activaron algunos mecanismos para resistir la toxicidad del cobre.

La contaminación por MP se ha detectado en todo tipo de medios ambientales. Entre ellos, los sistemas del suelo están generando preocupaciones especiales en los últimos años, ya que los investigadores sugieren que el contenido de MP en los entornos del suelo puede ser de 4 a 23 veces mayor que el de los sistemas marinos (Horton et al., 2017).

Una vez diseminados los MP en los sistemas del suelo, interactúan con el ambiente. Como insumo exógeno, se ha validado que los MP ejercen influencias sobre los componentes bióticos y abióticos de los suelos, según las características de sus partículas y los factores ambientales. Algunos estudios ecotoxicológicos documentaron los efectos perjudiciales de los MP en las propiedades del suelo, las comunidades microbianas y la biota del suelo, y algunos de ellos incluso desencadenaron efectos letales (Guo et al., 2020).

Con la contaminación cada vez más grave ocasionada por los plásticos convencionales y los plásticos biodegradables (PBD) se está buscando un nuevo material que pueda reemplazar a los plásticos convencionales en la agricultura. La producción mundial de PBD también aumentó en los últimos años. Sin embargo, con la aplicación de los PBD, se exponen gradualmente algunos problemas.

La biodegradabilidad de los PBD necesita condiciones adecuadas, lo que dificulta que el medio natural alcance las condiciones necesarias y si no se cumplen las condiciones de degradación, los PBD y los convencionales son básicamente iguales en términos de longevidad (Wang et al., 2021).

Los microplásticos biodegradables (MPB) también pueden estar formados por PBD que ingresan al ambiente. Hasta ahora, la investigación sobre la degradación y aplicación de PBD es común. Pero los efectos ambientales y ecológicos de los MBP, la adsorción y liberación de sustancias tóxicas y la función de los PBM como vectores de microorganismos aún necesitan ser estudiados.

Por lo tanto, acorde con Sajjad et al. (2022) la contaminación por microplásticos se ha convertido en un tema público y científico importante. Los restos residuales del acolchado plástico en forma de MP provocan la contaminación del suelo, ya que los MP alteran las características de la flora y fauna del mismo actuando los MP como vector de contaminantes ambientales y en el ecosistema del suelo.

CONSECUENCIA DE LOS MICROPLÁSTICOS EN LA FAUNA Y HUMANOS

Los MP derivados de las películas de acolchado plástico disminuyen la producción de descendientes de la fauna del suelo. Las MP inducen un menor porcentaje de gestantes y número de embriones debido a la disminución de la capacidad ovárica y la calidad de los ovocitos (Yuan et al., 2022). Los MP causan toxicidad testicular y afectan la calidad del esperma con un nivel hormonal anormal (Figura 18). También se detectaron efectos transgeneracionales en la fauna del suelo y animales acuáticos inducidos por los MP. También los MP afectaron el sistema reproductivo animal al activar las vías de

señalización relacionadas con las especies reactivas de oxígeno (ROS).

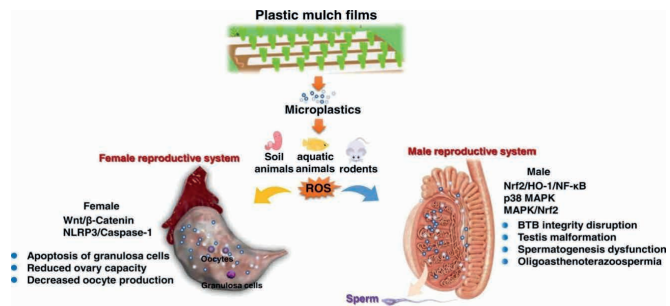


Figura 18. Esquema que ilustra el impacto adverso causado por los microplásticos derivados del acolchado plástico de suelos en el sistema reproductivo de animales (Tomado de: Yuan et al., 2022).

Los estudios en hembras demostraron que los MP disminuyen la cantidad y calidad de los ovocitos e inducen fibrosis ovárica, piroptosis y apoptosis de las células de la granulosa. Además, la integridad alterada de la barrera hematotesticular, la espermatogénesis dañada y la calidad del esperma se han demostrado en la mayoría de los estudios en animales machos. Los estudios sobre los mecanismos de estos efectos han proporcionado evidencia de que los MP actúan sobre el sistema reproductivo animal a través de mecanismos relacionados con especies reactivas de oxígeno. En conjunto, estos estudios revelan la toxicidad reproductiva causada por los MP originados por el acolchado plástico en animales y sirven como recordatorio para desechar adecuadamente los residuos del plástico

La prevalencia de los MP en las aguas mundiales genera preocupación sobre sus posibles efectos en la biota acuática. En el ambiente acuático, los MP están presentes de forma casi omnipresente en todos lados, desde las aguas superficiales hasta los sedimentos bentónicos, lo que los hace accesibles a una amplia gama de biota acuática que ocupa diferentes hábitats (Wang et al., 2019).

Por lo tanto, la exposición a MP puede

inducir consecuencias perjudiciales para la salud de los organismos acuáticos como las siguientes: Se mejora su biodisponibilidad para la biota acuática causando más daños. La absorción de los MP es común en la fauna acuática. La exposición a los MP tiene varios efectos tóxicos para el fitoplancton y la fauna acuática. Pero los efectos de los MP en la salud humana son menos conocidos.

La distribución y abundancia de MP en el mundo es tan extensa que muchos científicos los utilizan como indicadores clave del período reciente y contemporáneo que define una nueva época histórica: El Plastoceno, que ha seguido después del Antropoceno (Zalasiewicz et al., 2016). Sin embargo, las implicaciones de los MP aún no se comprenden completamente. Comprender su impacto implica una complejidad considerable debido a las diferentes propiedades físico-químicas que hacen que los MP sean factores estresantes multifacéticos.

Si, por un lado, los MP transportan sustancias químicas tóxicas en los ecosistemas, sirviendo así como vectores de transporte, son ellos mismos, por otro lado, un cóctel de sustancias químicas peligrosas que se agregan voluntariamente como aditivos durante su producción para aumentar las propiedades de los polímeros y prolongar su vida. Hasta la fecha, existe una falta considerable de conocimiento sobre los principales aditivos de interés que se utilizan en la industria del plástico, sobre su destino una vez que los MP se eliminan en el ambiente y sobre sus efectos en la salud humana cuando se asocian con micro y nanoplasticos (Campanale et al., 2020).

Un informe de la Organización Mundial de la Salud enfatizó la presencia universal de MP en el ambiente y despertó una gran preocupación con respecto a la exposición y los efectos de los nano y microplásticos en la salud humana (Revel et al., 2018). Uno de los

principales puntos de entrada de los nano y MP en el sistema humano está representado por la ingestión de alimentos contaminados (Waring et al., 2018).

En un estudio realizado por (Cox et al., 2018), se encontraron 0.44 MP/g de nano y MP en el azúcar; 0.11 MP/g en la sal; 0.03 MP/g en el alcohol y 0.09 MP/g en la botella de agua. Los seres humanos también podríamos asumir una ingesta estimada de 80 g por día de microplásticos a través de los productos obtenidos de plantas (frutas y vegetales), los cuales acumulan MP a través de la absorción del suelo contaminado (Enyoh et al., 2019).

En los últimos años, los residuos plásticos se han convertido en un problema ambiental universalmente significativo. La ingestión de alimentos y agua contaminados con MP es la principal vía de exposición humana. Los productos pesqueros son una fuente importante de MP en la dieta humana. Una vez ingeridos, los microplásticos y nanoplasticos llegan al tracto gastrointestinal y pueden absorberse causando estrés oxidativo, citotoxicidad y translocación a otros tejidos (Alberghini et al., 2022)

Además, los MP pueden liberar sustancias químicas (orgánicas e inorgánicas) presentes en su matriz o previamente absorbidas del ambiente y actuar como portadores de microorganismos. Los aditivos presentes en los MP como los éteres de difenilo polibromados, el bisfenol A, el nonilfenol, el octilfenol y los elementos tóxicos pueden ser dañinos para los humanos. Sin embargo, hasta la fecha, los datos que tenemos no son suficientes para realizar una evaluación confiable de los riesgos para la salud humana.

Recientemente, se ha descubierto que los MP están en el aire y pueden ser inhalados hacia los pulmones, causando enfermedades respiratorias. Por lo anterior, se debe mencionar que las aplicaciones de AP en los cultivos agrícolas pueden conducir a altas

concentraciones de macroplásticos y MP en los suelos, lo que afecta negativamente la salud del suelo, de los humanos y la producción de cultivos (Figura 19).

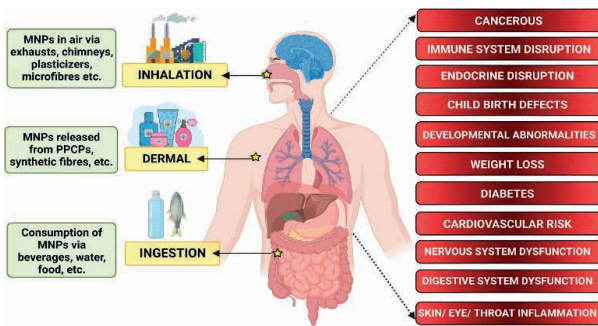


Figura 19. Los humanos estamos ambientalmente expuestos a los micro y nanoplásticos, los cuales penetran al cuerpo por ingestión, inhalación y contacto dérmico. La toxicidad puede deberse a la propia toxicidad de las partículas, al estrés oxidativo y la inflamación, lo que puede conducir a neoplasia y aumento de la translocación de partículas, además, los microplásticos pueden estar involucrados en la interrupción de la función inmune y la neurotoxicidad (Tomado de: Kumar et al., 2023).

Kumar et al. (2023) reportan que el uso excesivo de los plásticos en la industria del embalaje, agricultura y otros sectores ha causado graves daños ambientales, lo que genera serias preocupaciones entre investigadores y algunos gobiernos. La fragmentación de los plásticos primarios y secundarios resulta en la formación de MP y NP, los cuales una vez incorporados al ambiente, persisten allí mucho tiempo debido a su degradabilidad extremadamente baja.

Los microplásticos en los suelos de las tierras agrícolas tienen el potencial de causar riesgos ambientales y para la salud humana debido a su naturaleza ubicua y persistente.

Zhang et al. (2023) reportan que los MP degradables pueden alterar significativamente la descomposición del carbono orgánico del suelo por el llamado efecto de cebado (PE). Sin

embargo, la amplitud y la dirección de la PE inducida por MP degradables siguen siendo inciertas en los suelos agrícolas. Estos autores resumen su trabajo diciendo que: 1) Los MP degradables pueden alterar significativamente la descomposición del carbono orgánico del suelo. 2) El efecto de imprimación inducido por polihidroxialcanoatos oscila entre 552% y 1744%. 3) La amplitud del efecto de cebado depende de la degradabilidad de los MP y 4) La extracción de nitrógeno microbiano puede desempeñar una función importante en la conducción del cebado o imprimación(PE).

Finalmente debemos señalar que ahora se sabe que los MP y nanoplásticos se encuentran en el cielo, mar y tierra, ya que reciente el trabajo de Afrin et al. (2022) investigó la posible presencia de MP en cinco marcas de azúcar comercial y dos azúcares sin envasar, sin marca y sin etiquetar, obtenidos de diferentes supermercados en Dhaka (Bangladesh). Se identificaron MP en todas las muestras analizadas de azúcar (Figura 20) y, en conjunto, los datos mostraron variaciones similares en términos de número, tamaño, forma, color y composición del polímero. El número de partículas de plástico/kg de azúcar fue, en promedio, 343.7 ± 32.08 , observándose una tendencia a una mayor frecuencia de MPs $< 300 \mu\text{m}$.

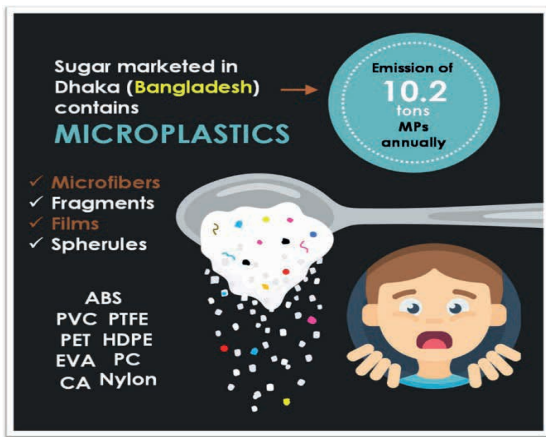


Figura 20. Los micro y nanoplásticos se encuentran en todos los lugares y productos que consumimos como es el caso del azúcar que es el mayor endulzante empleado globalmente. La emisión de MP a través del azúcar puede causar la generación de hasta 25.6 ton anuales de MP (Tomado de: Afrin et al., 2022).

CONCLUSIONES

Los micro y nanoplásticos son los principales contaminantes ambientales mundiales que se han detectado ampliamente en los agroecosistemas. Sin embargo, las investigaciones sobre su distribución y destino en las tierras de cultivo, así como sus impactos potenciales en los ecosistemas del suelo, son limitadas, especialmente los estudios sobre las influencias de los MP asociadas con el ciclo del carbono, el nitrógeno y el fósforo.

La contaminación del suelo con MP puede tener efectos nocivos en las funciones clave del suelo relacionadas con el metabolismo microbiano, el ciclo de nutrientes, etc. Los cambios en las propiedades y funciones del suelo pueden dañar el crecimiento y desarrollo de las plantas, lo que puede afectar aún más el rendimiento y la calidad de los cultivos.

Todos los animales incluidos nosotros estamos ambientalmente expuestos a los micro y nanoplásticos, los cuales penetran al cuerpo por ingestión, inhalación y contacto dérmico. La toxicidad puede deberse a la propia toxicidad de las partículas, al estrés oxidativo

y la inflamación, lo que puede conducir a neoplasia y aumento de la translocación de partículas, además, los microplásticos pueden estar involucrados en la interrupción de la función inmune y la neurotoxicidad.

Los MP son muy dañinos, ya que causan toxicidad testicular y afectan la calidad del esperma con un nivel hormonal anormal. También causan efectos transgeneracionales en la fauna del suelo y animales acuáticos inducidos por los MP, asimismo, los microplásticos y nanoplásticos afectan el sistema reproductivo animal al activar las vías de señalización relacionadas con las especies reactivas de oxígeno.

REFERENCES

- Afrin, S., Rahman, M.M., Hossain, M.N., Uddin, M.K. y Malafaia, G. (2022). Are there plastic particles in my sugar? A pioneering study on the characterization of microplastics in commercial sugars and risk assessment. *Science of The Total Environment*, 837, 155849.
- Alberghini, L., Truant, A., Santonicola, S., Colavita, G. y Giaccone, V. (2022). Microplastics in fish and fishery products and risks for human health: A review. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 20(1), 789.
- Calero, M., Muñoz, M.J., Solís, R.R., Lozano, E.J., Godoy, V. y Martín-Lara, M.Á. (2023). Agricultural plastic mulching as a source of microplastics in the terrestrial conditions. *Microplastic sources, fate and solution*, 37-70.
- Campanale, C., Massarelli, C., Savino, I., Locaputo, V. y Uricchio, V.F. (2020). A detailed review study on potential effects of microplastics and additives of concern on human health. *International journal of environmental research and public health*, 17(4), 1212.
- Cox, K.D., Covernton, G.A., Davies, H.L., Dower, J.F., Juanes, F., Dudas, S.E. (2019). Human Consumption of Microplastics. *Environ. Sci. Technol.* 53, 7068–7074.
- Cui, Q., Wang, F., Wang, X., Chen, T. y Guo, X. (2023). Environmental toxicity and ecological effects of micro (nano) plastics: A huge challenge posed by biodegradability. *TrAC Trends in Analytical Chemistry*, 117092.
- Chen, Y., Xu, H., Luo, Y., Ding, Y., Huang, J., Wu, H. y Yang, Z. (2023). Plastic bottles for chilled carbonated beverages as a source of microplastics and nanoplastics. *Water Research*, 120243.
- Ding, L., Huang, D., Ouyang, Z. y Guo, X. (2022). The effects of microplastics on soil ecosystem: A review. *Current Opinion in Environmental Science & Health*, 100344.
- Enyoh, C.E., Verla, A.W., Verla, E.N. (2019). Uptake of Microplastics by Plant: A Reason to Worry or to be Happy? *World Sci. News*. 131, 256–267.
- Fan, P., Yu, H., Xi, B. y Tan, W. (2022). A review on the occurrence and influence of biodegradable microplastics in soil ecosystems: Are biodegradable plastics substitute or threat?. *Environment International*, 107244.
- Geyer, R., Jambeckand, J.R., Law, K.L. (2017). Production, use, and fate of all plastics ever made *Sci. Adv.*, 3 (7).
- Guo, J.J., Huang, X.P., Xiang, L., Wang, Y.Z., Li, Y.W., Li, H., Cai, Q.Y., Mo, C.H., Wong, M.H. (2020). Source, migration and toxicology of microplastics in soil. *Environ. Int.*, 137
- Horton, A.A., Walton, A., Spurgeon, D.J., Lahive, E., Svendsen, C. (2017). Microplastics in freshwater and terrestrial environments: evaluating the current understanding to identify the knowledge gaps and future research priorities. *Sci. Total Environ.*, 586 pp. 127-141.
- Jia, W., Karapetrova, A., Zhang, M., Xu, L., Li, K., Huang, M. y Huang, Y. (2022). Automated identification and quantification of invisible microplastics in agricultural soils. *Science of The Total Environment*, 844, 156853.
- Kaur, P., Singh, K., Singh, B. (2022). Microplastics in soil: impacts and microbial diversity and degradation. *Pedosphere*, 32, 49-60.
- Khalid, N., Aqeel, M., Noman, A. y Rizvi, Z.F. (2023). Impact of plastic mulching as a major source of microplastics in agroecosystems. *Journal of Hazardous Materials*, 445, 130455.
- Khan, M.A., Huang, Q., Khan, S., Wang, Q., Huang, J., Fahad, S. y Song, X. (2023). Abundance, spatial distribution, and characteristics of microplastics in agricultural soils and their relationship with contributing factors. *Journal of Environmental Management*, 328, 117006.
- Kedzierski, M., Cirederf-Boulant, D., Palazot, M., Yvin, M. y Bruzaud, S. (2023). Continents of plastics: An estimate of the stock of microplastics in agricultural soils. *Science of The Total Environment*, 880, 163294.

Kumar, V., Singh, E., Singh, S., Pandey, A. y Bhargava, P.C. (2023). Micro-and nano-plastics (MNPs) as emerging pollutant in ground water: Environmental impact, potential risks, limitations and way forward towards sustainable management. *Chemical Engineering Journal*, 459, 141568.

Li, R., Tao, J., Huang, D., Zhou, W., Gao, L., Wang, X. y Huang, H. (2023). Investigating the effects of biodegradable microplastics and copper ions on probiotic (*Bacillus amyloliquefaciens*): Toxicity and application. *Journal of Hazardous Materials*, 443, 130081.

Li, K., Jia, W., Xu, L., Zhang, M. y Huang, Y. (2023). The plastsphere of biodegradable and conventional microplastics from residues exhibit distinct microbial structure, network and function in plastic-mulching farmland. *Journal of Hazardous Materials*, 442, 130011.

Liu, B., Li, W., Pan, X. y Zhang, D. (2022). The persistently breaking trade-offs of three-decade plastic film mulching: Microplastic pollution, soil degradation and reduced cotton yield. *Journal of Hazardous Materials*, 439, 129586.

Lofty, J., Muhawenimana, V., Wilson, C. A. y Ouro, P. (2022). Microplastics removal from a primary settler tank in a wastewater treatment plant and estimations of contamination onto European agricultural land via sewage sludge recycling. *Environmental Pollution*, 304, 119198.

Lwanga, E.H., Van Roshum, I., Munhoz, D.R., Meng, K., Rezaei, M., Goossens, D. y Ritsema, C. (2023). Microplastic appraisal of soil, water, ditch sediment and airborne dust: The case of agricultural systems. *Environmental Pollution*, 316, 120513.

Mekuanint, S., Alemneh, T. y Asredie, T. (2017). Indigestible rumen foreign bodies cause of rumen impaction in cattle, sheep and goats slaughtered at Addis Ababa Abattoir Enterprise, Ethiopia. *Journal of Veterinary Science and Medicine*, 5(1), 5.

Microplastics in Drinking-Water; World Health Organization: Geneva, Switzerland, 2019; <https://www.who.int/publications/item/9789241516198>.

Pérez-Reverón, R., Álvarez-Méndez, S. J., Kropp, R. M., Perdomo-González, A., Hernández-Borges, J. y Díaz-Peña, F. J. (2022). Microplastics in agricultural systems: analytical methodologies and effects on soil quality and crop yield. *Agriculture*, 12(8), 1162.

Peña, A., Rodríguez-Liebana, J.A. y Delgado-Moreno, L. (2023). Interactions of microplastics with pesticides in soils and their ecotoxicological implications. *Agronomy*, 13(3), 701.

Plastics – The Facts 2020. AF Plastics the Facts–WEB–2020–ING FINAL.pdf.

Plastics Europe. Plastics–The Facts. 2021. Available online: <https://plasticseurope.org/knowledge-hub/plastics-the-facts-2021/> (accessed on 24 June 2023).

Prata, J.C. (2023). Microplastics and human health: Integrating pharmacokinetics. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 53(16), 1489-1511.

Qin, M., Chen, C., Song, B., Shen, M., Cao, W., Yang, H. y Gong, J. (2021). A review of biodegradable plastics to biodegradable microplastics: another ecological threat to soil environments?. *Journal of Cleaner Production*, 312, 127816.

Ramanayaka, S., Zhang, H. y Semple, K.T. (2023). Plastic mulch derived microplastics in agricultural soil systems. *microplastics in the ecosphere: Air, Water, Soil, and Food*, 233-247.

Reddy, A.V.K., Shankaraiah, G. y Kumar, P.S. (2023). Toxicity effects of micro-and nanoplastics in terrestrial environment. In *micro and nanoplastics in soil: threats to plant-based food* (pp. 191-220). Cham: Springer International Publishing.

Revel, M., Châtel, A. y Mouneyrac, C. (2018). Micro (nano) plastics: A threat to human health?. *Current Opinion in Environmental Science & Health*, 1, 17-23.

Sahai, H., Valverde, M.G., Morales, M.M., Hernando, M.D., Del Real, A.M.A. y Fernández-Alba, A.R. (2023). Exploring sorption of pesticides and PAHs in microplastics derived from plastic mulch films used in modern agriculture. *Chemosphere*, 333, 138959.

Sajjad, M., Huang, Q., Khan, S., Khan, M.A., Liu, Y., Wang, J. y Guo, G. (2022). Microplastics in the soil environment: A critical review. *Environmental Technology & Innovation*, 27, 102408.

- Shafea, L., Yap, J., Beriot, N., Felde, V.J., Okoffo, E.D., Enyoh, C.E. y Peth, S. (2023). Microplastics in agroecosystems: A review of effects on soil biota and key soil functions. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 186(1), 5-22.
- Shorobi, F.M., Vyavahare, G.D., Seok, Y.J. y Park, J.H. (2023). Effect of polypropylene microplastics on seed germination and nutrient uptake of tomato and cherry tomato plants. *Chemosphere*, 329, 138679.
- Steinmetz, Z., Wollmann, C., Schaefer, M., Buchmann, C., David, J., Troger, J., Munoz, K., Fror, O. y Schaumann, G.E. (2016). Plastic mulching in agriculture. Trading short-term agronomic benefits for long-term soil degradation? *Sci. Total Environ.*, 550, pp. 690-705.
- Tang, K.H.D. (2023). Microplastics in agricultural soils in China: Sources, impacts and solutions. *Environmental Pollution*, 121235.
- Tian, L., Jinjin, C., Ji, R., Ma, Y. y Yu, X. (2022). Microplastics in agricultural soils: sources, effects, and their fate. *Current Opinion in Environmental Science & Health*, 25, 100311.
- Wang, C., Yu, J., Lu, Y., Hua, D., Wang, X. y Zou, X. (2021). Biodegradable microplastics (BMPs): a new cause for concern?. *Environmental Science and Pollution Research*, 28, 66511-66518.
- Wang, Y., Liu, L., Cao, S., Yu, J., Li, X., Su, Y. y Zhao, Z. (2023). Spatio-temporal variation of soil microplastics as emerging pollutant after long-term application of plastic mulching and organic compost in apple orchards. *Environmental Pollution*, 328, 121571.
- Wang, W., Gao, H., Jin, S., Li, R. y Na, G. (2019). The ecotoxicological effects of microplastics on aquatic food web, from primary producer to human: A review. *Ecotoxicology and environmental safety*, 173, 110-117.
- Waring, R.H.; Harrisa, R.M.; Mitchell, S.C. Plastic contamination of the food chain: A threat to human health? *Maturitas* 2018, 115, 64–68.
- Yuan, Y., Qin, Y., Wang, M., Xu, W., Chen, Y., Zheng, L. y Luo, T. (2022). Microplastics from agricultural plastic mulch films: A mini-review of their impacts on the animal reproductive system. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 244, 114030.
- Zalasiewicz, J., Waters, C.N., Do Sul, I.J.A., Corcoran, P.L., Barnosky, A.D., Cearreta, A., Edgeworth, M., Gałuszka, A., Jeandel, C. y Leinfelder, R. (2016). The geological cycle of plastics and their use as a stratigraphic indicator of the Anthropocene. *Anthropocene*, 13, 4–17.
- Zhang, G., Liu, D., Lin, J., Kumar, A., Jia, K., Tian, X. y Zhu, B. (2023). Priming effects induced by degradable microplastics in agricultural soils. *Soil Biology and Biochemistry*, 180, 109006.
- Zhao, S., Zhu, L. y Li, D. (2016). Microscopic anthropogenic litter in terrestrial birds from Shanghai, China: Not only plastics but also natural fibers. *Science of the Total Environment*, 550, 1110– 1115.
- Zhou, J., Jia, R., Brown, R.W., Yang, Y., Zeng, Z., Jones, D.L. y Zang, H. (2023). The long-term uncertainty of biodegradable mulch film residues and associated microplastics pollution on plant-soil health. *Journal of hazardous materials*, 442, 130055.