



CRHIAM

CENTRO DE RECURSOS HÍDRICOS PARA LA AGRICULTURA Y LA MINERÍA

ANID/FONDAP/15130015

ANID/FONDAP/1523A0001

CONTAMINACIÓN POR MICROPLÁSTICOS EN SUELOS AGRÍCOLAS

Alessandra Perfetti / Mauricio Schoebitz / Octavio Lagos / Ricardo Barra



Universidad de Concepción

SERIE COMUNICACIONAL CRHIAM

Versión impresa ISSN 0718-6460

Versión en línea ISSN 0719-3009

Directora:

Gladys Vidal Sáez

Comité editorial:

Sujey Hormazábal Méndez

María Belén Bascur Ruiz

Serie:

Contaminación por microplásticos en suelos agrícolas.

Alessandra Perfetti, Mauricio Schoebitz,

Octavio Lagos y Ricardo Barra.

Diciembre 2023.

Agradecimientos:

Centro de Recursos Hídricos
para la Agricultura y la Minería
(CRHIAM)

ANID/FONDAP/15130015

ANID/FONDAP/1523A0001

Victoria 1295, Barrio Universitario,

Concepción, Chile

Teléfono +56-41-2661570

www.crhiam.cl



Universidad de Concepción

CONTAMINACIÓN POR MICROPLÁSTICOS EN SUELOS AGRÍCOLAS

Alessandra Perfetti / Mauricio Schoebitz / Octavio Lagos / Ricardo Barra



SERIE COMUNICACIONAL CRHIAM

PRESENTACIÓN

El Centro de Recursos Hídricos para la Agricultura y la Minería -Centro Fondap CRHIAM- está trabajando en el tema de "Seguridad Hídrica", entendida como la "capacidad de una población para resguardar el acceso sostenible a cantidades adecuadas de agua de calidad aceptable para el sustento, bienestar y desarrollo socioeconómico sostenibles; para asegurar la protección contra la contaminación transmitida por el agua y los desastres relacionados con ella, y para preservar los ecosistemas, en un clima de paz y estabilidad política" (ONU- Agua, 2013).

La "Serie Comunicacional CRHIAM" tiene como objetivo potenciar temas desde una mirada interdisciplinaria, con la finalidad de difundirlos a los tomadores de decisiones públicos, privados y a la comunidad general. Estos textos surgen como un espacio de colaboración colectiva entre diversos investigadores ligados al CRHIAM como un medio para informar y transmitir las evidencias de la investigación relacionada a la gestión del recurso hídrico.

Con palabras sencillas, esta serie busca ser un relato entendible por todos y todas, en el que se exponen los estudios, conocimiento y experiencias más recientes para aportar a la seguridad hídrica de los ecosistemas, comunidades y sectores productivos. Agradecemos el esfuerzo realizado por nuestras y nuestros investigadores, quienes han trabajado de forma mancomunada y han puesto al servicio de la comunidad sus investigaciones para aportar de forma activa en la búsqueda de soluciones para contribuir a la generación de una política hídrica acorde a las necesidades del país.

Dra. Gladys Vidal
Directora de CRHIAM

DATOS DE INVESTIGADORES



Alessandra Perfetti

Bióloga.
Doctora en Ciencias Ambientales
con mención en Sistemas Acuáticos Continentales,
Universidad de Concepción.
Colaboradora CRHIAM.



Mauricio Schoebitz

Ingeniero agrónomo.
Doctor en Ingeniería de Suelos Agroalimentarios,
Universidad de Nantes, Francia.
Profesor asociado Departamento de Suelos
y Recursos Naturales,
Universidad de Concepción.



Octavio Lagos

Doctor of Philosophy Engineering,
University of Nebraska Lincoln, USA.
Profesor Asociado Facultad de Ingeniería Agrícola,
Universidad de Concepción.
Director Consorcio Tecnológico del Agua CoTH2O.
Investigador Asociado CRHIAM.



Ricardo Barra

Bioquímico.
Doctor en Ciencias Ambientales
Universidad de Concepción.
Profesor Titular Facultad de Ciencias Ambientales,
Universidad de Concepción.
Director Centro EULA Chile.
Investigador Principal CRHIAM.

RESUMEN

Las investigaciones en torno a la contaminación por microplásticos (MPs) surgieron del medio marino, pero se estima que el suelo recibe anualmente entre 4 y 23 veces más desechos plásticos. La preocupación por la contaminación de los suelos agrícolas por los MPs y los efectos sobre las propiedades del suelo y sobre el crecimiento de las plantas ha aumentado en los últimos años. En los agroecosistemas, los MPs pueden ingresar al medio ambiente del suelo directamente (lodos de alcantarillado, aguas residuales, deposición atmosférica) o indirectamente a través de la degradación *in situ* de fragmentos de plástico (cubiertas de plástico, tuberías, cubiertas de invernaderos, macetas de vivero y bolsas de ensilaje). En la agricultura, las cubiertas o "mulch" plásticos son una práctica mundial porque generan efectos supresores sobre las malezas, modifican la temperatura del suelo, la humedad y promueven un mayor rendimiento y calidad de la fruta.

Sin embargo, estas prácticas producen una gran contaminación del suelo que, en consecuencia, afecta el crecimiento de las plantas. De hecho, el uso excesivo de plásticos en la agricultura ha provocado que muchos suelos estén contaminados con grandes cantidades de residuos plásticos (63-430.000 toneladas en Europa y 44-300.000 toneladas en Norteamérica) e incluso, concentraciones tan altas como el 7% del peso de los MPs, se han reportado en suelos superficiales altamente contaminados. Al finalizar su uso, estos ingresan a los sistemas de aguas residuales o directamente a cauces naturales, los cuales no se encuentran habilitados para removerlos, de modo que sus subproductos como efluentes líquidos y lodos serán una fuente importante de MPs en el ambiente. Debido a la potencial utilización de estos efluentes como una alternativa sustentable de agua para riego, los MPs han sido descritos globalmente en suelos agrícolas. En Chile, estos efluentes serán utilizados masivamente de acuerdo a la recientemente promulgada ley de aguas grises, sin embargo, se desconoce si estos contaminantes serán regulados. Una vez en los suelos, los MPs pueden transportarse mediante escorrentía, infiltración y/o percolación profunda, además de alterar el crecimiento de las plantas cultivadas. En consecuencia, esto alterará la calidad y el rendimiento de los cultivos si no se toman las precauciones necesarias, y al mismo tiempo tendrán repercusiones en la salud humana y en el ecosistema del suelo.

INTRODUCCIÓN

La versatilidad del plástico en numerosas aplicaciones ha acrecentado su demanda con una producción global ascendente. Excepcionalmente, su elaboración se estancó durante el año 2020, no obstante, evidenció una rápida recuperación alcanzando los 390,7 millones de toneladas en 2021 (Plastics Europe, 2022). En la figura 1 se observan los principales mercados involucrados en la producción mundial para el año 2021, en el cual el mayor uso corresponde a embalaje, en contraste con la agricultura la cual alcanzó el 4% (Plastics Europe, 2022).

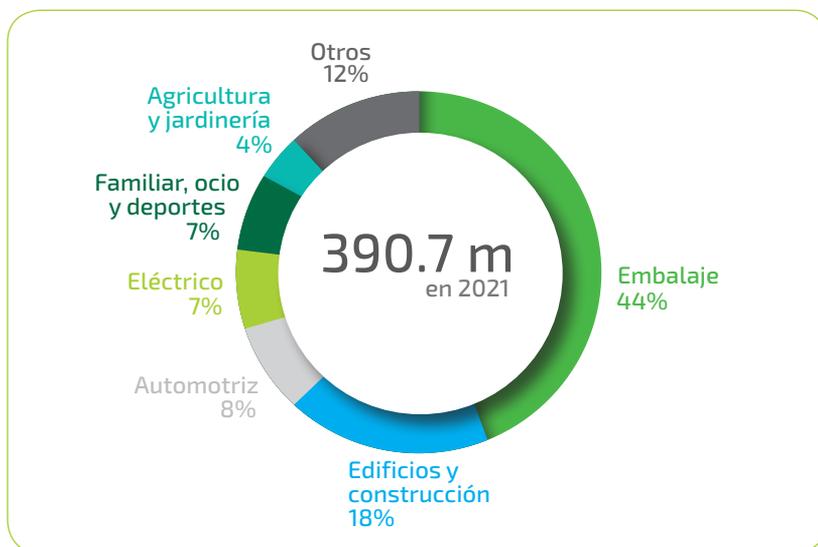


Figura 1.

Distribución del uso mundial de plásticos por aplicación.
Fuente: Plastics Europe, (2022).

El término microplásticos (MPs) fue acuñado por Thompson *et al.* (2004) para referirse a plásticos de tamaños microscópicos, haciendo alusión a tamaños menores a 1 mm, pero el año 2008 se hizo una propuesta para ampliar el término de microplástico a tamaños de hasta 5 mm (Arthur *et al.*, 2008). Si bien en la actualidad la mayoría de los autores aceptan esta clasificación, existen otros tantos que realizan una subdivisión más específica dentro de esta categoría de plásticos, dividiéndolos en MPs grandes (menores a 5 mm y mayores a 500 μm) y MPs pequeños (entre 500 μm y 100 nm) (Vermeiren *et al.*, 2020).

Los MPs no sólo son clasificados según su tamaño sino que también según su origen, de esta forma podemos distinguir los MPs primarios y MPs secundarios. Aquellos plásticos fabricados intencionalmente para ser de tamaño microscópico se definen como MPs primarios, los cuales pueden ser encontrados en productos de cuidado personal como pastas dentales, cosméticos, productos de limpieza, abrasivos industriales, entre otros. Por otro lado, están los MPs secundarios que corresponden a fibras o fragmentos provenientes de desechos de plásticos, coberturas plásticas en la agricultura, fibras textiles, materiales plásticos domiciliarios, etc., los que se generan a partir de la fragmentación de plásticos más grandes, ya sea por procesos fotolíticos, mecánicos y/o degradación biológica (GESAMP, 2016; Galloway et al., 2017; Rocha-Santos y Duarte, 2017; Figura 2).

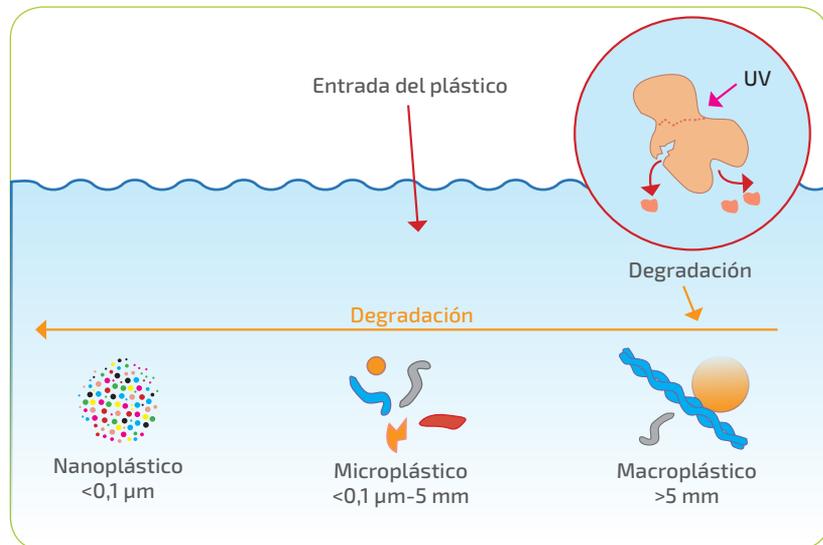


Figura 2.

Cambios dinámicos de los microplásticos. Fuente: modificado de Galloway et al., (2017).

Muchos de estos MPs ingresan a los sistemas de tratamientos de aguas residuales, pero una vez finalizado el proceso, estos siguen siendo detectados tanto en muestras de efluentes como en los cursos de aguas en los cuales son liberados. En parte, esto se debe a que las tecnologías utilizadas en estos sistemas de tratamiento originalmente fueron diseñadas para eliminar otro tipo de compuestos como materia flotante y suspendida, materia orgánica disuelta e impurezas (Gangula et al., 2023). A pesar de lo anterior,

los sistemas de tratamiento secundario y terciario alcanzan remociones importantes de MPs. Por ejemplo, al comparar las tasas de eliminación de MPs en aguas residuales obtenidas en Rusia, Suecia, Francia, Finlandia, EE. UU., Reino Unido, Países Bajos, Alemania, Canadá, Australia, Italia, Turquía, Dinamarca, Polonia, China y Corea del Sur, se demostró que las plantas de tratamiento con sistemas secundarios y terciarios eliminaron una media del 88% y el 94%, respectivamente (Iyare *et al.*, 2020).

Nuevas tecnologías aplicadas en los sistemas de tratamiento de aguas residuales están innovando en la eliminación de estos contaminantes y, a pesar de alcanzar altas tasas de remoción, los efluentes continúan liberando miles de partículas cada día. Este es un punto importante ante la escasez hídrica, ya que paulatinamente se han comenzado a utilizar las aguas residuales en prácticas de riego de cultivos. En este sentido, nuestro país enfrenta una realidad climática expresada en una de las sequías más prolongadas, extensas territorialmente y severas de las que se ha tenido registro, junto a la disminución de las precipitaciones, alzas de temperatura, aumento de olas de calor, disminución de caudales y derretimiento de los glaciares, lo que ha expuesto al sector silvoagropecuario a un déficit hídrico por más de 10 años (Ministerio de Agricultura, 2022a). El uso neto de agua disminuyó un 15,3% y el total de tierras agrícolas disminuyó un 13,5% entre 2010 y 2020, además, las tierras de secano y de regadío disminuyeron un 3,1% y un 15,7%, respectivamente, siendo probable que la sequía sea clave en la disminución de las tierras irrigadas (Fernández *et al.*, 2023). Se ha descrito que el cambio climático genera una disminución en los rendimientos de los cultivos (GBM, 2023). Paralelamente, la agricultura contribuye en el empeoramiento del escenario climático. De acuerdo a estimaciones, la agricultura, la silvicultura y otros usos de la tierra son una fuente neta importante de emisiones de gases de efecto invernadero y contribuyen a aproximadamente el 23% de las emisiones antropogénicas de dióxido de carbono (CO₂), metano (CH₄) y óxido nitroso (N₂O) combinados como equivalentes de CO₂ en 2007-2016 (IPCC, 2019).

En este escenario, es preocupante la falta de estudios de contaminación por MPs en los efluentes de aguas residuales liberadas en territorio nacional, principalmente debido a que estos efluentes serán utilizados en el mediano plazo como agua de riego. En Chile, la cobertura de tratamiento de aguas servidas en el sector urbano en el país es de un 99,98%. De acuerdo a la Figura 3 (SISS, 2022), el principal destino de las aguas servidas tratadas durante el año 2022 fue la descarga en cuerpos de agua superficial (73%) el cual contempla su uso en riego, y contrasta con el 6% con reuso directo, mayoritariamente en el sector agrícola.

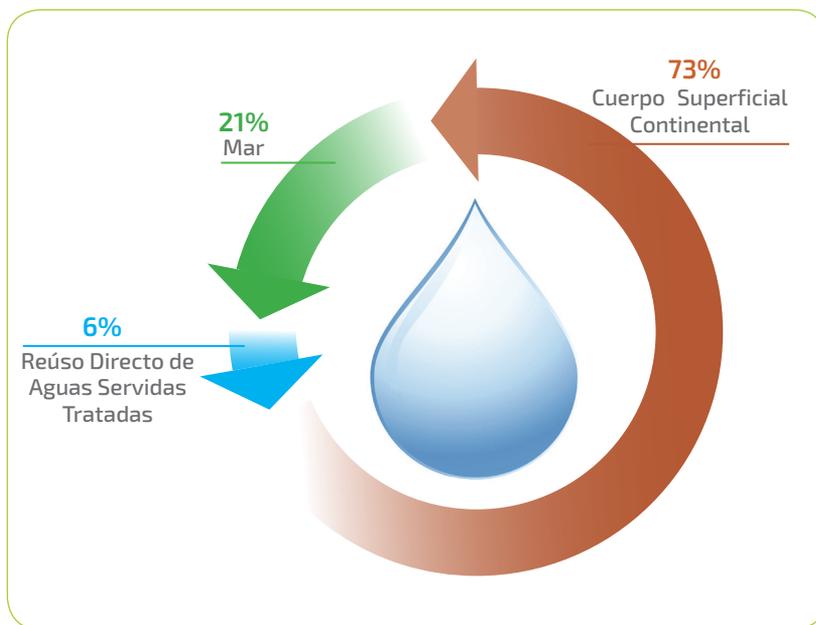


Figura 3.

Destino final de las aguas servidas tratadas 2022. Fuente: SISS, (2022).

En este sentido, la ley de aguas grises (Ley N° 21.075) (BCN, 2018), busca reutilizar estas aguas para diversos fines, entre ellos, la agricultura. Además, describe que será el Ministerio de Salud quién dictará un reglamento que contendrá las condiciones sanitarias que deberán cumplir los sistemas de reutilización de aguas grises (BCN, 2018). En la actualidad, existe la Norma Chilena 1.333, la que contiene requisitos para el agua de riego, detallándose los valores máximos permisibles para los elementos químicos, principalmente metales, en los cuales no se incluyen contaminantes emergentes como los MPs. En Chile, la planta de tratamiento de aguas servidas de Cerrillos de Tamaya en la provincia del Limarí, Región de Coquimbo, ha implementado mejoras en su instalación para la reutilización de estas aguas para el riego. Inicialmente se ha utilizado en la producción de alfalfa ya que esta especie es de rápido crecimiento y bajo costo, demostrando un aumento en el número de cosechas trimestrales que sirven de alimentación animal (Fundación Chile, 2018).

Tabla 1.

Usos y fuentes de plásticos en suelos agrícolas.

Usos y fuentes de microplásticos	Referencias
Lodos	Zhang & Liu 2018; van den Berg <i>et al.</i> , 2020
Abonos	Weithmann <i>et al.</i> , 2018
Invernaderos	Feng <i>et al.</i> , 2021; Choi <i>et al.</i> , 2021; Li <i>et al.</i> , 2021; Wang <i>et al.</i> , 2021
Películas de mantillo	Huang <i>et al.</i> , 2020; Zhou <i>et al.</i> , 2020, Choi <i>et al.</i> , 2021; Feng <i>et al.</i> , 2021
Ensilaje	Piehl <i>et al.</i> , 2018; Bhattacharjee <i>et al.</i> , 2023
Bolsas de fertilizantes	Zhou <i>et al.</i> , 2020; Ragoobur <i>et al.</i> , 2021
Botellas de PP de agroquímicos y fertilizantes	Zhou <i>et al.</i> , 2020
Degradación in situ de los desechos	Piehl <i>et al.</i> , 2018
Maquinaria agrícola	Choi <i>et al.</i> , 2021

Sin embargo, el agua de riego no es la única fuente de microplásticos que presiona a los suelos agrícolas, ya que los componentes de origen plástico están fuertemente ligados a la agricultura en la mayoría de sus etapas productivas (Figura 4, Tabla 1). Por ejemplo, parte de los MPs que ingresan a los sistemas de tratamiento de aguas residuales es concentrada en los lodos de depuradora, los que son utilizados como fertilizantes debido a las ventajas económicas y eficiencia en los rendimientos (Nizzetto *et al.*, 2016; van den Berg *et al.*, 2020; Zhang *et al.*, 2020). Análisis de muestras de fertilizantes provenientes de plantas de tratamientos han demostrado contener microplásticos, con diferencias en las cantidades según el tratamiento previo, la planta y los residuos, es decir, si son domiciliarios o industriales, etc. (Weithmann *et al.*, 2018). Además, se ha confirmado que la abundancia de microplásticos en suelos agrícolas está influenciada por la frecuencia de aplicación de estos lodos (van den Berg *et al.*, 2020; Zhang *et al.*, 2020). En nuestro país, Corradini *et al.* (2019) obtuvieron la misma conclusión al evaluar suelos de 31 campos agrícolas del valle central con diferentes registros de aplicación de lodos y condiciones edafoclimáticas similares para un período de diez años. Globalmente, los suelos agrícolas alcanzaron concentraciones tales como $78 \pm 12,91$ partículas kg^{-1} en Shanghai, China (Liu *et al.*, 2018); 3.440 partículas kg^{-1} en Yeosu, República de Corea (Choi *et al.*, 2021); $420\text{--}1290$ partículas kg^{-1} en Nanjing y Wuxi, China (Li *et al.*, 2019a); $2200\text{--}6875$ partículas kg^{-1} en Lahore, Pakistán (Rafique *et al.*, 2020), las que

en algunos casos alcanzan cifras incluso mayores que las reportadas en vertederos (2429 ± 1817 partículas kg^{-1}) en Lahore, Pakistán (Rafique *et al.*, 2020). Los suelos agrícolas han sido descritos por contener principalmente fibras provenientes tanto del lavado de ropa como del uso de productos como invernaderos, cobertizos, películas de mantillo, ensilaje, bolsas de fertilizantes, etc. (Browne *et al.* 2011; Dris *et al.* 2015, Napper & Thompson 2016, Mason *et al.* 2016; Liu *et al.* 2018, Li *et al.* 2019b, Huang *et al.*, 2020; Choi *et al.* 2021).

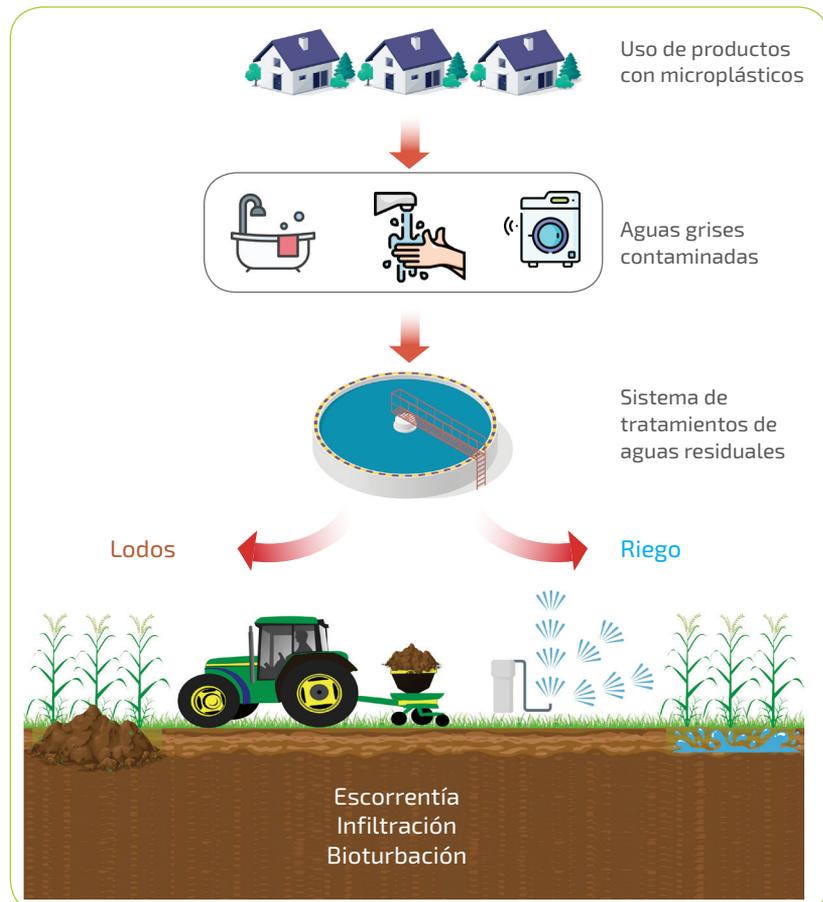


Figura 4.

Destino de los microplásticos durante la actividad agrícola debido al uso de efluentes y lodos de los sistemas de tratamiento de aguas residuales. Fuente: Elaboración propia.

CONSECUENCIAS DE LA CONTAMINACIÓN POR MICROPLÁSTICOS

La evidencia de los impactos ecológicos de los MPs ha aumentado en todo el mundo, pero el conocimiento de las consecuencias en los ecosistemas del suelo es aún escaso (Huang *et al.*, 2019). Debido a la inminente presencia de MPs en los suelos, es urgente que los conocimientos acerca de estos contaminantes en esta matriz se profundicen, ya que pueden persistir, acumularse y afectar el funcionamiento de los ecosistemas del suelo, tanto de forma directa como de forma indirecta mediante el transporte de otras sustancias eventualmente tóxicas como metales, bifenilos policlorados (PCB) e hidrocarburos aromáticos policíclicos (HAP) (Moore, 2008; Ashton *et al.*, 2010; Rillig, 2012; Rochman *et al.*, 2013; Nizzetto *et al.*, 2016). Paralelamente, la mezcla de monómeros y aditivos que componen a los plásticos pueden lixiviar, constituyendo una fuente de sustancias tóxicas persistentes y bioacumulativas, entre las que se encuentran los ftalatos de PVC, nonilfenol, retardantes de llama bromados y bisfenol A (Engler, 2012; GESAMP, 2016). Esto implica que la contaminación por MPs en el suelo puede tener consecuencias para el desempeño de las plantas (Pinto-Poblete *et al.* 2022; 2023) y en la acumulación de sus compuestos bioactivos (López *et al.*, 2022) y, por lo tanto, para los agroecosistemas y la biodiversidad terrestre (de Souza Machado *et al.*, 2019).

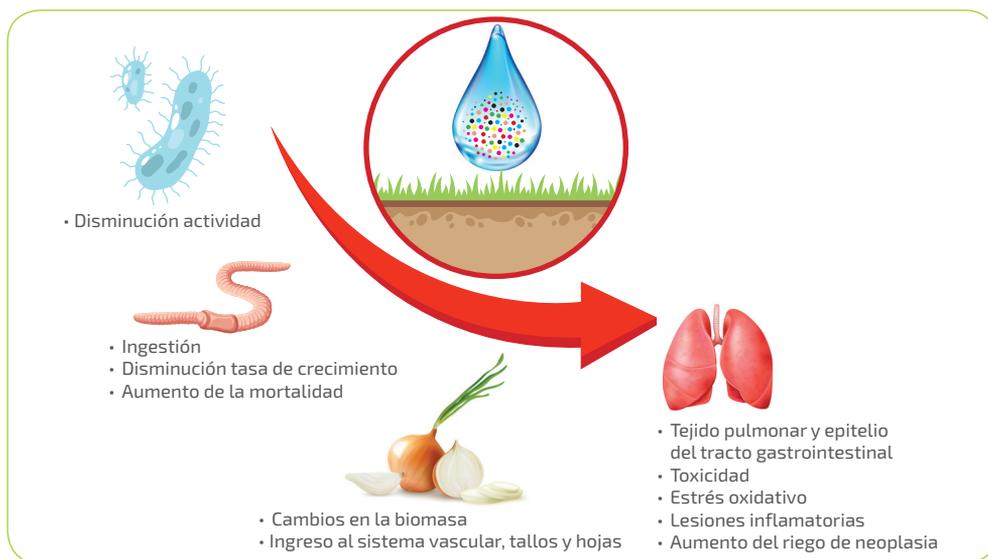


Figura 5.

Consecuencias del ingreso de microplásticos a los suelos y efectos en la salud humana. Fuente: Elaboración propia.

En los suelos, los efectos de los MPs sobre la actividad microbiana han demostrado depender de la forma, tipo de polímero y concentración (Figura 5). Por ejemplo, los fragmentos de composición polipropileno son capaces de afectar la actividad microbiana en suelos (Riveros *et al.*, 2022), al igual las películas de polietileno de baja densidad (Lozano *et al.* 2021). En general, la fauna del suelo tiene un aporte activo de MPs, con la consiguiente alteración de su microbioma intestinal y efectos adversos sobre la motilidad, el crecimiento, el metabolismo, la reproducción y la mortalidad en diversas combinaciones (Büks *et al.*, 2020), especialmente en altas concentraciones. Respecto a la distribución vertical, estas partículas han sido reportadas en capas del suelo de entre 30-100 cm, por lo que procesos como la bioturbación son importantes en la distribución de estos contaminantes (Weber & Opp, 2020). En invertebrados como las lombrices de tierra, se ha confirmado su ingestión, disminuyendo la tasa de crecimiento y aumentando la mortalidad, demostrando que el uso de lodos favorece el transporte de microplásticos en el suelo, y la consiguiente acumulación (Huerta Lwanga *et al.*, 2016; Zhang *et al.*, 2020).

En los cultivos se han reportado cambios en la biomasa, composición de tejidos y características de las raíces en la cebolleta (*Allium fistulosum*) expuesta a MPs (de Souza Machado *et al.*, 2019). Igualmente, se ha descrito que los MPs pueden ingresar a las especies cultivadas. Por ejemplo, partículas de poliestireno de tamaño de 0,2 μm ingresan al sistema vascular hasta los tallos y hojas en plantas comestibles como la lechuga (Li *et al.*, 2019b). El tamaño de las partículas parecer ser un factor determinante en la distribución de los MPs en las especies cultivadas. Poliestireno de 1 μm puede ingresar a las raíces de las zanahorias y acumularse en la capa intercelular, pero no pueden ingresar a las células, en contraste a tamaños de 0,2 μm que alcanzan las hojas (Dong *et al.*, 2021). Una vez que estos alimentos sean adquiridos y consumidos por humanos, pueden ingresar al tejido pulmonar e incluso llegar al epitelio del tracto gastrointestinal, causando toxicidad, estrés oxidativo, lesiones inflamatorias y aumento de la absorción o translocación, inflamación crónica y aumentar el riesgo de neoplasia (Wright & Kelly, 2017; Prata *et al.* 2020).

CONCLUSIÓN

En nuestro país, la investigación de la contaminación por MPs ha estado centrada principalmente en los ecosistemas marinos, con una menor cantidad de esfuerzos en los sistemas continentales. Esto conlleva un inconveniente al momento de abordar las directrices hacia una gestión adecuada de estos microcontaminantes, ya que conocemos parcialmente su dinámica en el ecosistema. Considerando que los efectos del cambio climático probablemente se acentuarán en las próximas décadas, la ley de aguas grises se plantea como una medida que a largo plazo permitirá disminuir los efectos adversos de la sequía empleando el riego basado en aguas residuales tratadas, de modo que iniciativas como la de Cerrillos de Tamaya en la Región de Coquimbo se extenderán por todo el país. Sin embargo, desconocemos las características de los MPs y las concentraciones en que están siendo liberados desde los efluentes de aguas residuales.

Frente a los antecedentes, si los MPs no son regulados, es esperable que sus concentraciones en suelos de cultivo aumenten debido a la irrigación con efluentes de aguas residuales tratadas tal como se ha descrito globalmente. Se sugiere implementar el mejoramiento de los sistemas de tratamiento de aguas residuales que serán utilizados para el riego cuando se reglamente la norma establecida, de modo que estos cuenten con tecnologías capaces de reducir la liberación de MPs al ambiente. Esto permitirá reducir la carga contaminante en los suelos agrícolas, ya que la evidencia ha demostrado que algunas especies cultivables son capaces de incorporar estos contaminantes a sus tejidos con consecuencias aún poco descritas para la salud humana. Esto será más necesario en un contexto donde la sequía se exacerbará en los próximos años y ante la coexistencia de otros contaminantes presentes en las aguas residuales, los cuales podrían incrementar la toxicidad al convertirse en mezclas contaminantes.

REFERENCIAS

- Arthur, C., Baker, J., & Bamford, H. 2008. International research workshop on the occurrence, effects, and fate of microplastic marine debris. In Conference Proceedings.
- Ashton K., Holmes L. & A. Turner. 2010. Association of metals with plastic production pellets in the marine environment. *Marine pollution bulletin* 60:2050-2055.
- Bhattacharjee, L., Jazaei, F., & Salehi, M. 2023. Insights into the mechanism of plastics' fragmentation under abrasive mechanical forces: An implication for agricultural soil health. *CLEAN-Soil, Air, Water*, 51(8), 2200395.
- Biblioteca del Congreso Nacional de Chile (BCN). 2018. Ley Núm. 21.075 Regula la recolección, reutilización y disposición de aguas grises. Disponible en: <https://www.bcn.cl/leychile/navegar?idNorma=1115066>
- Biblioteca del Congreso Nacional de Chile (BCN). 2021. Ley 21.368 la cual regula la entrega de plásticos de un solo uso y las botellas plásticas, y modifica los cuerpos legales que indica. Disponible en: <https://www.bcn.cl/leychile/navegar?idNorma=1163603>
- Browne, M. A., Crump, P., Niven, S. J., Teuten, E., Tonkin, A., Galloway, T., & Thompson, R. 2011. Accumulation of microplastic on shorelines worldwide: sources and sinks. *Environmental science & technology*, 45(21), 9175-9179.
- Büks, F., Loes, van Schaik, N., and Kaupenjohann, M. 2020. What do we know about how the terrestrial multicellular soil fauna reacts to microplastic? *Soil* 6, 245-267. doi: 10.5194/soil-6-245-2020
- Choi, Y. R., Kim, Y. N., Yoon, J. H., Dickinson, N., and Kim, K. H. 2021. Plastic contamination of forest, urban, and agricultural soils: a case study of Yeosu City in the Republic of Korea. *J. Soils Sediments* 21, 1962-1973. doi:10.1007/s11368-020-02759-0
- 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.

- Corradini, F., Casado, F., Leiva, V., Huerta-Lwanga, E., & Geissen, V. 2021. Microplastics occurrence and frequency in soils under different land uses on a regional scale. *Science of the Total Environment*, 752, 141917.
- De Souza Machado, A. A., Lau, C. W., Kloas, W., Bergmann, J., Bachelier, J. B., Faltin, E., ... & Rillig, M. C. 2019. Microplastics can change soil properties and affect plant performance. *Environmental science & technology*, 53(10), 6044-6052.
- Dong, Y., Gao, M., Qiu, W., & Song, Z. 2021. Uptake of microplastics by carrots in presence of As (III): Combined toxic effects. *Journal of Hazardous Materials*, 411, 125055.
- Dris, R., Gasperi, J., Rocher, V., Saad, M., Renault, N., & Tassin, B. 2015. Microplastic contamination in an urban area: a case study in Greater Paris. *Environmental Chemistry*, 12(5), 592-599.
- Engler, R. E. 2012. The complex interaction between marine debris and toxic chemicals in the ocean. *Environmental science & technology* 46(22), 12302-12315.
- Feng, S., Lu, H., & Liu, Y. 2021. The occurrence of microplastics in farmland and grassland soils in the Qinghai-Tibet plateau: Different land use and mulching time in facility agriculture. *Environmental Pollution*, 279, 116939.
- Fernández, F. J., Vásquez-Lavín, F., Ponce, R. D., Garreaud, R., Hernández, F., Link, O., ... & Hanemann, M. 2023. The economics impacts of long-run droughts: Challenges, gaps, and way forward. *Journal of Environmental Management*, 344, 118726.
- Fundación Chile. 2018. Claves para la gestión de aguas residuales rurales: Primera Planta de Reúso de Aguas Tratadas en la Región de Coquimbo, una experiencia replicable. Fuente: <https://fch.cl/wp-content/uploads/2019/12/claves-para-la-gestion-de-aguas-residuales.pdf>
- Gangula, A., Chhetri, T., Atty, M., Shanks, B., Kannan, R., Upendran, A., & Afrasiabi, Z. 2023. Unaccounted Microplastics in the Outlet of Wastewater Treatment Plants—Challenges and Opportunities. *Processes*, 11(3), 810.
- Galloway, T. S., Cole, M., & Lewis, C. 2017. Interactions of microplastic debris throughout the marine ecosystem. *Nature ecology & evolution*, 1(5), 0116.

- Grupo Banco Mundial (GBM). 2023. Alimentos y agricultura. Disponible en: <https://www.bancomundial.org/es/topic/agriculture/overview#1>
- Huang, Y., Zhao, Y., Wang, J., Zhang, M., Jia, W., and Qin, X. 2019. LDPE microplastic films alter microbial community composition and enzymatic activities in soil. *Environ. Pollut.* 254:112983. doi: 10.1016/j.envpol.2019.112983
- 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.
- Huerta Lwanga, E., Gertsen, H., Gooren, H., Peters, P., Salánki, T., Van Der Ploeg, M., ... & Geissen, V. 2016. Microplastics in the terrestrial ecosystem: implications for *Lumbricus terrestris* (Oligochaeta, Lumbricidae). *Environmental science & technology*, 50(5), 2685–2691.
- IPCC, 2019: Climate Change and Land: an IPCC special report on climate change, desertification, land degradation, sustainable land management, food security, and greenhouse gas fluxes in terrestrial ecosystems [P.R. Shukla, J. Skea, E. Calvo Buendia, V. Masson-Delmotte, H.-O. Pörtner, D. C. Roberts, P. Zhai, R. Slade, S. Connors, R. van Diemen, M. Ferrat, E. Haughey, S. Luz, S. Neogi, M. Pathak, J. Petzold, J. Portugal Pereira, P. Vyas, E. Huntley, K. Kissick, M. Belkacemi, J. Malley, (eds.)]. In press.
- Iyare, P. U., Ouki, S. K., & Bond, T. 2020. Microplastics removal in wastewater treatment plants: a critical review. *Environmental Science: Water Research & Technology*, 6(10), 2664–2675.
- Joint Group of Experts on the Scientific Aspects of Marine Environmental Protection (GESAMP). 2016. Sources, fate and effects of microplastics in the marine environment: part two of a global assessment" (Kershaw, P.J., and Rochman, C.M., eds). (IMO/FAO/UNESCO-IOC/UNIDO/WMO/IAEA/UN/UNEP/UNDP Joint Group of Experts on the Scientific Aspects of Marine Environmental Protection). GESAMP Reports and Studies 93, 220 pp.
- Li, Q., Wu, J., Zhao, X., Gu, X., and Ji, R. 2019a. Separation and identification of microplastics from soil and sewage sludge. *Environ. Pollut.* 254:113076. doi:10.1016/j.envpol.2019.113076
- Li, L., Zhou, Q., Yin, N., Tu, C., & Luo, Y. 2019b. Uptake and accumulation of microplastics in an edible plant. *Chinese Science Bulletin*, 64(9), 928–934.

- Liu, M., Lu, S., Song, Y., Lei, L., Hu, J., Lv, W., *et al.* 2018. Microplastic and mesoplastic pollution in farmland soils in suburbs of Shanghai, China. *Environ. Pollut.* 242, 855–862. doi: 10.1016/j.envpol.2018.07.051
- Li, Q., Zeng, A., Jiang, X., & Gu, X. 2021. Are microplastics correlated to phthalates in facility agriculture soil? *Journal of Hazardous Materials*, 412, 125164.
- Lopez, M. D., Toro, M. T., Riveros, G., Illanes, M., Noriega, F., Schoebitz, M., ... & Moreno, D. A. 2022. Brassica sprouts exposed to microplastics: Effects on phytochemical constituents. *Science of the Total Environment*, 823, 153796.
- Lozano, Y. M., Lehnert, T., Linck, L. T., Lehmann, A., & Rillig, M. C. 2021. Microplastic shape, polymer type, and concentration affect soil properties and plant biomass. *Frontiers in Plant Science*, 12, 616645.
- Mason, S. A., Garneau, D., Sutton, R., Chu, Y., Ehmann, K., Barnes, J., ... & Rogers, D. L. 2016. Microplastic pollution is widely detected in US municipal wastewater treatment plant effluent. *Environmental pollution*, 218, 1045-1054.
- Ministerio de Agricultura. 2022a. Agua y Recursos Hídricos: Agenda del Ministerio de Agricultura en el marco del desarrollo sustentable del sector silvoagropecuario – enero 2022. Disponible en: <https://www.odepa.gob.cl/sustentabilidad/agricultura-sustentable/agua>
- Ministerio de Agricultura. 2022b. Agua para la agricultura. Disponible en: <https://www.odepa.gob.cl/sustentabilidad/agricultura-sustentable/agua>
- Moore C. J. 2008. Synthetic polymers in the marine environment: a rapidly increasing, long-term threat. *Environmental Research* 108 (2), 131–139.
- Napper, I. E., & Thompson, R. C. 2016. Release of synthetic microplastic plastic fibres from domestic washing machines: Effects of fabric type and washing conditions. *Marine pollution bulletin*, 112(1-2), 39–45pp.
- Nizzetto, L., Futter, M., & Langaas, S. 2016. Are agricultural soils dumps for microplastics of urban origin?
- Piehl, S., Leibner, A., Löder, M. G., Dris, R., Bogner, C., & Laforsch, C. 2018. Identification and quantification of macro-and microplastics on an agricultural farmland. *Scientific reports*, 8(1), 17950.

- Pinto-Poblete, A., Retamal-Salgado, J., López, M. D., Zapata, N., Sierra-Almeida, A., & Schoebitz, M. 2022. Combined effect of microplastics and Cd alters the enzymatic activity of soil and the productivity of strawberry plants. *Plants*, 11(4), 536.
- Pinto-Poblete, A., Retamal-Salgado, J., Zapata, N., Sierra-Almeida, A., & Schoebitz, M. 2023. Impact of polyethylene microplastics and copper nanoparticles: Responses of soil microbiological properties and strawberry growth. *Applied Soil Ecology*, 184, 104773.
- Plastics Europe. 2022. Plastics - the Facts 2022. An analysis of European plastics production, demand, conversion and end-of-life management. Disponible en: https://plasticseurope.org/wp-content/uploads/2023/03/PE-PLASTICS-THE-FACTS_FINAL_DIGITAL-5.pdf
- Prata, J. C., da Costa, J. P., Lopes, I., Duarte, A. C., & Rocha-Santos, T. 2020. Environmental exposure to microplastics: An overview on possible human health effects. *Science of the Total Environment*, 702, 134455.
- Rafique, A., Irfan, M., Mumtaz, M., and Qadir, A. 2020. Spatial distribution of microplastics in soil with context to human activities: a case study from the urban center. *Environ. Monit. Assess.* 192, 1–13 pp. doi: 10.1007/s10661-020-08641-3
- Ragoobur, D., Huerta-Lwanga, E., & Somaroo, G. D. 2021. Microplastics in agricultural soils, wastewater effluents and sewage sludge in Mauritius. *Science of the Total Environment*, 798, 149326.
- Rillig, M. C. 2012. Microplastic in terrestrial ecosystems and the soil?. *Environ. Sci. Technol.* 46, 12, 6453–6454. doi: 10.1021/es302011r
- Riveros, G., Urrutia, H., Araya, J., Zagal, E., & Schoebitz, M. 2022. Microplastic pollution on the soil and its consequences on the nitrogen cycle: a review. *Environmental Science and Pollution Research*, 1–15 pp.
- Rocha-Santos, T. A., & Duarte, A. C. 2017. *Comprehensive Analytical Chemistry. Characterization and analysis of microplastics*. Vol. 75, 1st. Oxford: Elsevier
- Rochman C. M., Hoh E., Hentschel B. T. & S. Kaye. 2013. Long-term field measurement of sorption of organic contaminants to five types of plastic pellets: Implications for plastic marine debris. *Environmental Science & Technology* 47:1646-1654 pp.

- Superintendencia de Servicios Sanitarios (SISS). 2022. Informe de Gestión del Sector Sanitario 2022. Disponible en: https://www.siss.gob.cl/586/articles-22969_recurso_1.pdf
- Thompson, R. C., Olsen, Y., Mitchell, R. P., Davis, A., Rowland, S. J., John, A. W., ... & Russell, A. E. 2004. Lost at sea: where is all the plastic? *Science*, 304(5672), 838-838.
- Van den Berg, P., Huerta-Lwanga, E., Corradini, F., & Geissen, V. 2020. Sewage sludge application as a vehicle for microplastics in eastern Spanish agricultural soils. *Environmental Pollution*, 261, 114198.
- Vermeiren, P., Muñoz, C., & Ikejima, K. 2020. Microplastic identification and quantification from organic rich sediments: A validated laboratory protocol. *Environmental Pollution*, 114298.
- Wang, J., Li, J., Liu, S., Li, H., Chen, X., Peng, C., ... & Liu, X. 2021. Distinct microplastic distributions in soils of different land-use types: a case study of Chinese farmlands. *Environmental Pollution*, 269, 116199.
- Weber, C. J., & Opp, C. 2020. Spatial patterns of mesoplastics and coarse microplastics in floodplain soils as resulting from land use and fluvial processes. *Environmental Pollution*, 267, 115390.
- Weithmann, N., Möller, J. N., Löder, M. G., Piehl, S., Laforsch, C., & Freitag, R. 2018. Organic fertilizer as a vehicle for the entry of microplastic into the environment. *Science advances*, 4(4), eaap8060.
- Wright, S. L., & Kelly, F. J. 2017. Plastic and human health: a micro issue? *Environmental science & technology*, 51(12), 6634-6647.
- Zhang, G. S., & Liu, Y. F. 2018. The distribution of microplastics in soil aggregate fractions in southwestern China. *Science of the Total Environment*, 642, 12-20 pp.
- Zhang, L., Xie, Y., Liu, J., Zhong, S., Qian, Y., & Gao, P. 2020. An overlooked entry pathway of microplastics into agricultural soils from application of sludge-based fertilizers. *Environmental Science & Technology*, 54(7), 4248-4255 pp.
- Zhou, B., Wang, J., Zhang, H., Shi, H., Fei, Y., Huang, S., ... & Barceló, D. 2020. Microplastics in agricultural soils on the coastal plain of Hangzhou Bay, east China: Multiple sources other than plastic mulching film. *Journal of Hazardous Materials*, 388, 121814.



CRHIAM

CENTRO DE RECURSOS HÍDRICOS PARA LA AGRICULTURA Y LA MINERÍA

ANID/FONDAP/15130015

ANID/FONDAP/1523A0001

CONTAMINACIÓN POR MICROPLÁSTICOS EN SUELOS AGRÍCOLAS



Universidad de Concepción



UNIVERSIDAD
DE LA FRONTERA



Universidad del Desarrollo
Universidad de Excelencia



Serie Comunicacional CRHIAM