

**UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN**  
**FACULTAD DE AGRONOMÍA**



**EFFECTO DE LA EXPOSICIÓN A MICROPLÁSTICOS SOBRE LA SÍNTESIS DE  
AZÚCARES EN *BRASSICA OLERACEA* VAR. *ITALICA***

**POR**

**CAMILA FERNANDA ESCOBAR CID**

**MEMORIA PRESENTADA A LA  
FACULTAD DE AGRONOMÍA DE LA  
UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN  
PARA OPTAR AL TÍTULO DE  
INGENIERO AGRÓNOMO.**

**CONCEPCIÓN – CHILE  
2025**

**UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN  
FACULTAD DE AGRONOMÍA**

**EFFECTO DE LA EXPOSICIÓN A MICROPLÁSTICOS SOBRE LA SÍNTESIS DE  
AZÚCARES EN *BRASSICA OLERACEA* VAR. *ITALICA***

**POR**

**CAMILA FERNANDA ESCOBAR CID**

**MEMORIA PRESENTADA A LA  
FACULTAD DE AGRONOMÍA DE LA  
UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN  
PARA OPTAR AL TÍTULO DE  
INGENIERO AGRÓNOMO.**

**CONCEPCIÓN – CHILE  
2025**

Aprobada por:

Profesora Titular, María Dolores López B.  
Lic. Química, Dr. Cs. Químicas.

---

Guía

Profesor Asistente, Miguel Garriga C.  
Lic. Biología, Mg. Cs., Dr.Cs.

---

Asesor

Profesor Asociado, Mauricio Schoebitz C  
Ing. Agrónomo, MSc, PhD.

---

Asesor

Profesor Asociado, Guillermo Wells M.  
Ing. Agrónomo, Mg. Cs.

---

Decano

## RECONOCIMIENTOS

Proyecto FONDECYT REGULAR 1240947 (ANID): “Assessment of exposure of micro(nano)plastics on the physiology and metabolic profiling of Brassicas”

**TABLA DE CONTENIDOS**

	<b>Página</b>
Resumen.....	1
Summary.....	1
Introducción.....	2
Materiales y Métodos.....	5
Resultados y Discusión.....	8
Conclusiones.....	16
Referencias.....	16
Anexo.....	21

## ÍNDICE DE FIGURAS Y TABLAS

		<b>Página</b>
Figura 1	Esquema Diseño experimental completamente al azar.....	7
Figura 2	Resultados de espectroscopía infrarroja obtenida a través de Fourier (FTIR) de partículas de microplástico, específicamente de polietileno de baja densidad (LDPE).....	9
Figura 3	Resultados de microscopio electrónico de barrido (SEM) donde se observan los tamaños de partículas de microplástico de polietileno de baja densidad (LDPE).....	10
Tabla 1	Parámetros de fluorescencia de la clorofila en hojas de brócoli cultivado en un suelo artificialmente contaminado con polietileno de baja densidad (3 ppm de MP; 30ppm de MP; 30 ppm de MP; C es control).....	11
Tabla 2	Variables de crecimiento en plantas de brócoli cultivado en un suelo artificialmente contaminado con polietileno de baja densidad (3 ppm de MP; 30 ppm de MP; 30 ppm de MP; C es control).....	13
Tabla 3	Cuantificación de carbohidratos en hojas de brócoli cultivado en un suelo artificialmente contaminado con polietileno de baja densidad (3 ppm de MP; 30 ppm de MP; 30 ppm de MP; C es control).....	14
Tabla 4	Análisis del sustrato, fibra de coco con 3 ppm de MP, 30 ppm de MP y 300 ppm de MP.....	20

## **EFFECTO DE LA EXPOSICIÓN A MICROPLÁSTICOS SOBRE LA SÍNTESIS DE AZÚCARES EN *BRASSICA OLERACEA* VAR. *ITALICA***

### **EFFECT OF MICROPLASTIC EXPOSURE ON THE SYNTHESIS OF SUGARS IN *BRASSICA OLERACEA* VAR. *ITALICA***

**Palabras índices adicionales:** brócoli, metabolitos primarios, azúcares, contaminantes emergentes

#### **RESUMEN**

La presencia de microplásticos (MPs) se ha estudiado principalmente en ambientes acuáticos, sin embargo, estudios actuales declaran que las concentraciones en ambientes terrestres pueden ser mucho mayores. Por lo tanto, la contaminación por MPs representa una amenaza importante para los agroecosistemas, y en el contexto de la producción de plantas para la alimentación y salud, se necesita más investigación sobre los posibles efectos nocivos de los MPs en la producción agroalimentaria. En este sentido, la presente investigación evaluó la exposición de microplásticos de polietileno de baja densidad (LDPE) en plantas adultas de brócoli (*Brassica oleracea* var. *italica*) con un crecimiento de 3 meses, en un suelo artificialmente contaminado, con el objetivo de estudiar los posibles cambios en el contenido de metabolitos primarios, específicamente en azúcares, dentro de un marco de seguridad alimentaria. Los resultados obtenidos indicaron una diferencia significativa entre los parámetros de fluorescencia de la clorofila en presencia de MPs frente al control, además de un aumento del contenido de sacarosa y D-maltosa en presencia de 300 ppm de LDPE en el suelo. Por lo tanto, se puede concluir que la presencia de microplásticos impacta sobre el metabolismo primario de las plantas, representando un factor de estrés, así como una preocupación dentro de un marco de seguridad alimentaria.

#### **SUMMARY**

The presence of microplastics (MPs) has primarily been studied in aquatic environments; however, recent findings suggest that their concentrations in terrestrial ecosystems may be significantly higher. Consequently, MP pollution poses a serious threat to agroecosystems. In the context of plant production for food and health, further research is needed to understand the potential harmful effects of MPs on agri-food systems. This study evaluated the exposure of low-density polyethylene (LDPE) microplastics in three-month-old broccoli plants (*Brassica oleracea* var. *italica*) grown on artificially contaminated soil, aiming to assess possible changes in primary metabolite content—specifically sugars—within a food safety framework. The results showed significant differences in chlorophyll fluorescence parameters between MP-exposed plants and the control group, along with increased levels of sucrose and D-maltose under 300 ppm LDPE conditions. Hence, the presence of microplastics can be considered a stress factor for broccoli plants, as it induced alterations in primary metabolism and, therefore, a concern for food security.

## INTRODUCCIÓN

Las Brassicas son un grupo diverso de plantas pertenecientes a la familia Brassicaceae y son ampliamente reconocidas por sus propiedades promotoras de la salud. Entre las diversas brassicas, el brócoli (*Brassica oleracea* var. *italica*) se destaca como una hortaliza nutritiva que se consume en todo el mundo. El brócoli contiene propiedades benéficas para la dieta humana por su alto contenido de antioxidantes, propiedades antiinflamatorias, propiedades antimicrobianas y componentes anticancerígenos. Es un vegetal rico en muchos nutrientes y componentes bioactivos, como vitaminas, minerales, fibra y fitoquímicos (Li *et al.*, 2022). Entre ellos, se destacan los glucosinolatos, compuestos que contienen azufre que se hidrolizan para formar isotiocianatos, indoles y otros metabolitos bioactivos con potentes actividades antioxidantes y anticancerígenas y sólo pueden ser encontrados, casi de forma exclusiva, en la familia de las brassicas (Ishida *et al.*, 2014). También se ha descubierto que son responsables del sabor característico de esta familia de vegetales (Erb and Kliebenstein, 2020). Por otro lado, los compuestos fenólicos, como los flavonoides y los ácidos fenólicos, contribuyen a la

capacidad antioxidante de las brassicas, protegiendo las células del daño oxidativo. Las vitaminas, en particular la vitamina C, la vitamina K y el folato, también son abundantes en las brasicáceas y desempeñan funciones esenciales en diversos procesos fisiológicos (Ishida *et al.*, 2014).

Dentro del metabolismo de las plantas encontramos vías metabólicas primarias y secundarias, reguladas por genes y enzimas, que dan lugar a diferentes productos. De hecho, el metabolismo primario de una planta consiste en una serie de reacciones químicas y enzimáticas que actúan en la planta y dan paso a una síntesis de una amplia gama de moléculas como carbohidratos, aminoácidos, ácidos grasos, nucleótidos y polímeros y resultan esenciales para la supervivencia de la planta. Cabe reiterar que los metabolitos primarios (proteínas, carbohidratos, lípidos y ácidos nucleicos) desempeñan un rol fundamental en el desarrollo y el funcionamiento de la planta (Bocso, 2022). Sin embargo, la síntesis de azúcares o aminoácidos esenciales puede ser afectada por la presencia de contaminantes ambientales, como, por ejemplo, por la exposición a contaminantes emergentes como los microplásticos en el ambiente.

Los microplásticos (MPs) son definidos como pequeñas partículas de plástico con un tamaño menor a 5 milímetros y que se pueden romper transformándose en nanoplásticos, con un tamaño menor a 100 nanómetros (Matsson *et al.*, 2015). El estudio de los efectos de los microplásticos en el ambiente, específicamente en agroecosistemas, está generando una gran preocupación debido a su introducción en la cadena alimentaria (Bernhardt *et al.*, 2017). Los microplásticos entran a los ecosistemas de manera directa e indirecta por distintos procesos (Boyle and Örmeci, 2020), pudiéndose incorporar en la cadena alimentaria (Carrasco Silva *et al.*, 2021). La contaminación en los agroecosistemas puede ser debida a la absorción que realizan las plantas por medio del agua y de los nutrientes de fuentes con presencia de microplásticos o nanoplásticos (Somanathan *et al.*, 2022). Además, en un agroecosistema, estos se pueden originar por la degradación de residuos plásticos utilizados en los manejos agrícolas como el mulch, mallas, invernaderos y sistemas de irrigación. En la agricultura, los plásticos más utilizados son el polietileno (PE) y el polipropileno (PP) (López *et al.*, 2022). Este plástico, que

entra en contacto con el ambiente, se puede fragmentar por distintos mecanismos, los cuales son: por fotooxidación de la radiación UV, por hidrólisis, degradación biológica, desintegración y bioasimilación de los microorganismos (Enfrin *et al.*, 2019). Cuando los MPs logran ingresar a los ecosistemas, afectan la calidad del suelo y la salud de las plantas porque se mezclan con el suelo y modifican su estructura, provocando un cambio en sus funciones al cambiar la composición y alterar la relación de las plantas con los microorganismos (Cole *et al.*, 2011). En este sentido, existen varias investigaciones donde se estudia el efecto de la presencia de microplásticos en el estrés de los cultivos.

En esa misma línea, la contaminación por microplásticos puede tener consecuencias significativas sobre la fotosíntesis y la síntesis de metabolitos primarios, como azúcares y aminoácidos, en las plantas. La presencia de partículas de microplásticos puede interferir en el proceso de fotosíntesis al alterar la radiación solar y, por ende, comprometer la producción de energía necesaria para las reacciones biomoleculares, afectando las rutas de síntesis de carbohidratos (Yang and Ma, 2023). Este compromiso en la fotosíntesis también puede resultar en una disminución de la absorción de nutrientes, ya que la presencia de microplásticos tiende a modificar las comunidades microbianas del suelo, afectando así la disponibilidad de minerales que son absorbidos como iones por la planta, y de esta forma afecta la generación de aminoácidos (Li *et al.*, 2024) y azúcares primarios en el metabolismo primario de la planta (Sun *et al.*, 2025).

Además, estudios recientes sugieren que los microplásticos pueden disminuir la concentración de estos compuestos esenciales en los cultivos (Jiang *et al.*, 2022). Esta disminución de aminoácidos puede afectar negativamente la calidad del grano y, por ende, la producción de biomasa, lo que repercute en el crecimiento y la resiliencia de las plantas frente a condiciones adversas (Yang *et al.*, 2024). Como resultado, la exposición a microplásticos no solo interfiere directamente en las rutas metabólicas vinculadas a la fotosíntesis y la producción de metabolitos primarios, sino que también puede desencadenar ajustes fisiológicos y metabólicos que alteren la capacidad general de las plantas para responder a factores de estrés

ambiental, lo que enfatiza la necesidad de iniciativas de mitigación contra la contaminación por microplásticos (Shen *et al.*, 2022).

En 2018, los resultados de un experimento en trigo (*Triticum* spp.), donde las plantas fueron sujetas a una solución que contenía microplásticos, mostraron que la presencia de éstos en el cultivo afectó el crecimiento vegetativo y reproductivo de la planta (Qi *et al.*, 2018). Aunque la contaminación por MPs en el entorno terrestre ha recibido cada vez más atención, las investigaciones sobre el efecto de MPs en plantas aún son escasas (Rillig *et al.*, 2019).

Por lo tanto, en este trabajo se evaluó la exposición de plantas de brócoli en un suelo contaminado artificialmente de microplásticos de polietileno de baja densidad con el objetivo de evaluar el impacto de distintas concentraciones de polietileno de baja densidad (LDPE) en el contenido de metabolitos primarios, específicamente en azúcares, en *Brassica oleracea* var. *italica*, todo dentro de un marco de seguridad alimentaria.

## **MATERIALES Y MÉTODOS**

### **Material vegetal y germinación de semillas**

La investigación se llevó a cabo en cámaras de crecimiento en el laboratorio BIOINVE de la Universidad de Concepción. Las semillas de brócoli (*Brassica oleracea* var. *italica*) para la producción de brotes se obtuvieron de Semillería San Alfonso SL (Santiago, Chile). Se utilizaron bandejas de germinación (sin plástico) y las plantas se trasplantaron a las 5 semanas de crecimiento (con al menos 4 hojas). Los brotes crecieron en un suelo artificialmente contaminado con 3 ppm, 30 ppm y 300 ppm de suspensiones de polietileno de baja densidad, según tratamiento. Las semillas fueron sanitizadas y colocadas en una bandeja libre de plástico (5 g por bandeja libre de plástico) aplicando los diferentes tratamientos. Se regaron diariamente con agua Milli-Q. Después de 5 semanas, se trasplantaron las plántulas utilizando los mismos tratamientos. La fertilización se llevó a cabo aplicando solución de fertilizante una vez a la semana según las necesidades de la planta. Las plántulas en estado adulto, con tres meses de crecimiento, fueron evaluadas en esta investigación.

### **Preparación de suspensiones de microplásticos (MPs) en el suelo**

Las microesferas de polietileno de baja densidad se compraron a ThermoFisher Scientific (EE. UU.). El tamaño utilizado fue de 7  $\mu\text{m}$  y fue previamente caracterizado.

Las esferas de polietileno se prepararon siguiendo la metodología descrita por López *et al.* (2022). El control sin tratar se preparó siguiendo el mismo procedimiento que la solución de suspensión, pero sin la adición de microplásticos. Las suspensiones se mezclaron con suelo derivado de ceniza volcánica (Andisol) y fibra de coco, previamente caracterizado hasta alcanzar el contenido de contaminación de partículas plásticas según el tratamiento: 3 ppm, 30 ppm y 300 ppm.

La caracterización de los microplásticos se llevó a cabo mediante espectroscopía infrarroja por transformada de Fourier (FTIR) utilizando un equipo Spotlight 400 (Perkin Elmer), a partir de imágenes obtenidas para la identificación del tipo de polímero plástico. Las muestras se presionaron ligeramente y se analizaron con un cristal micro-ATR de germanio para adquirir imágenes de áreas de 500 x 500  $\mu\text{m}^2$ . Cada píxel de la imagen FTIR correspondía a 6,25 x 6,25  $\mu\text{m}^2$  de la muestra y contenía un espectro en el rango de 4.000–750  $\text{cm}^{-1}$ , con una resolución de 6  $\text{cm}^{-1}$  (intervalo de datos de 3  $\text{cm}^{-1}$ ), obtenido como promedio de 16 barridos. Para la recolección de datos se utilizó un arreglo lineal de 16 detectores independientes de telururo de mercurio y cadmio (MCT).

Los microplásticos también se evaluaron mediante microscopía electrónica de barrido (SEM) con un equipo Vega3 Easyprobe SBU (Tescan) para determinar su tamaño. Las muestras obtenidas, tanto en sus estructuras completas como en secciones transversales, se montaron sobre soportes de muestra con cinta adhesiva de doble cara, se recubrieron con oro y se examinaron a un voltaje de aceleración de 15 kV y una distancia de trabajo de 20 mm. Se capturaron imágenes topográficas con aumentos de 830x a 7370x para visualizar tamaños de 5  $\mu\text{m}$  a 50  $\mu\text{m}$  y con aumentos de 49x a 1350x para visualizar tamaños de 20  $\mu\text{m}$  a 1000  $\mu\text{m}$ .

### **Diseño experimental**

El diseño experimental de la investigación fue completamente al azar. Para minimizar el riesgo de contaminación plástica externa o residual, se utilizaron

macetas de greda para el crecimiento de las plantas. Se realizaron ocho réplicas por especie de cada tratamiento de MPs en una cámara de ambiente controlado. La cámara se mantuvo a una temperatura del aire de 20 °C, con un fotoperiodo de 16:8 h, una humedad relativa del 60 % y una radiación fotosintéticamente activa (PAR) de 350  $\mu\text{mol m}^2 \text{s}^{-1}$ . Después de 90 días (durante la mitad del período de luz), se evaluaron los sistemas fotosintéticos y se recolectaron muestras para análisis posteriores. Se midió la biomasa vegetal siguiendo los métodos descritos por Zhang *et al.* (2022). Todas las muestras se congelaron a -80 °C antes de analizarlas.

Todos los ensayos se realizaron según un diseño completamente al azar con 4 tratamientos (control y 3 concentraciones de partícula de MP) y 8 repeticiones en cada tratamiento (Fig 1).

Figura 1. Esquema de diseño experimental completamente al azar.

REP 1	REP 2	REP 3	REP 4	REP 5	REP 6	REP 7	REP 8
C	3 ppm MP	3 ppm MP	300 ppm MP	C	300 ppm MP	30 ppm MP	3 ppm MP
3 ppm MP	C	30 ppm MP	30 ppm MP	30 ppm MP	C	3 ppm MP	C
30 pp MP	30 ppm MP	C	3 ppm MP	300 ppm MP	3 ppm MP	C	300 ppm MP
300 ppm MP	300 ppm MP	300 ppm MP	C	3 ppm MP	30 ppm MP	300 ppm MP	30 ppm MP

Tratamiento: 3 ppm de MP; 30 ppm de MP; 300 ppm de MP; C es control.

### **Evaluación de las características fisiológicas del brócoli bajo exposición de microplásticos**

Las hojas del brócoli en estado adulto se utilizaron para determinar los parámetros cinéticos de fluorescencia de la clorofila. Las mediciones se realizaron en 3 hojas maduras por planta (24 lecturas por tratamiento, n = 93). Se determinó el rendimiento cuántico fotoquímico máximo de PSII ( $F_v'/F_m'$ ), el coeficiente de extinción no fotoquímica (NPQ), la tasa de transferencia de electrones (ETR), el rendimiento cuántico fotoquímico real ( $Y(II)$ ) y el coeficiente de extinción fotoquímica (qP) con un MultispeQ v2.0 (PhotosynQ, EE. UU.).

### **Evaluación del crecimiento del brócoli**

Cada planta de brócoli fue medida con una regla (Longitud del tallo) y pesada en fresco (Peso fresco) y posteriormente liofilizada (Peso seco), llevándose a cabo estas mediciones con una balanza de precisión.

### **Determinación de azúcares en plantas**

La extracción de azúcares se realizó a partir de muestras previamente trituradas; se pesaron 90 mg y se adicionaron 900  $\mu$ L de agua Milli-Q. La mezcla se incubó en baño a 55 °C con agitación y vortex durante 30 min. Posteriormente, las muestras se enfriaron y se añadieron 900  $\mu$ L de acetonitrilo. La solución resultante se centrifugó durante 30 min y el sobrenadante obtenido se filtró a través de membranas de 0,22  $\mu$ m. Finalmente, el extracto se diluyó en 500  $\mu$ L de una mezcla acetonitrilo:agua (65:35, v/v) y se transfirió a viales de cromatografía previamente rotulados para su posterior análisis.

Para la identificación y cuantificación de carbohidratos, se utilizó instrumentación HPLC-ELSD (YL9100, Corea). La separación se logró en una columna Phenomenex Luna 5u NH2 100A (250 mm 4,60 mm, 5 micrones) (Agilent, EE. UU.). La fase móvil fue acetonitrilo: agua (70:30, v/v) y se desgasificó mediante un baño de ultrasonidos antes de su uso. El caudal fue de 1 mL min<sup>-1</sup> y se inyectó una alícuota de 100  $\mu$ L de solución de muestra en el sistema HPLC-ELSD. Todas las muestras y estándares se filtraron a través de una membrana Millipore de 0,45  $\mu$ m antes de su uso. El método se utilizó para determinar la cantidad de mg/Kg de D-Fructosa, D-Glucosa, Sacarosa y D-Maltosa.

### **Análisis estadístico**

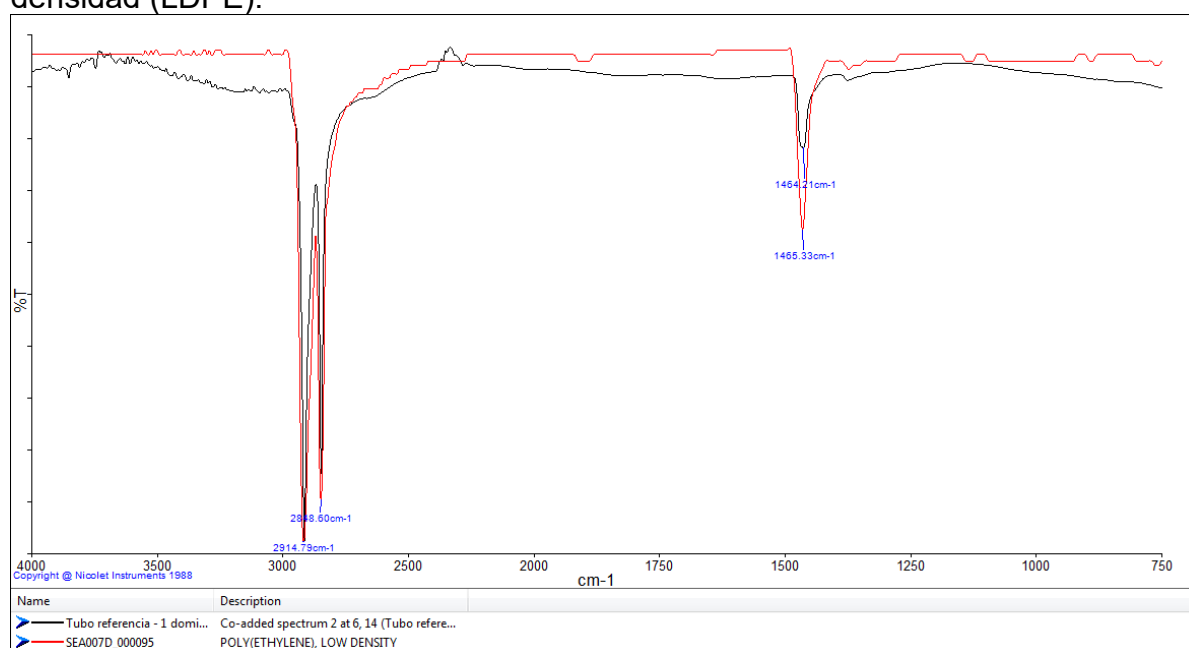
El efecto de la exposición a MPs se evaluó estadísticamente para cada tratamiento. Los resultados se analizaron en busca de diferencias significativas mediante el análisis de varianza (ANOVA), seguido de la prueba post hoc de Tukey. Todos los tratamientos se compararon con el control y se compararon los tratamientos de MPs entre ellos. Los resultados se consideraron significativos cuando  $P \leq 0,05$  utilizando el software Infostat.

## **RESULTADOS Y DISCUSIÓN**

### **Caracterización de los microplásticos utilizados**

Para asegurar el material utilizado, previamente los microplásticos fueron caracterizados. La figura 2 presenta dos espectros superpuestos obtenidos mediante un espectrómetro y microscopio de transformada de Fourier (FTIR). El espectro en color negro corresponde al tubo de referencia, mientras que el de color rojo corresponde a la muestra identificada como polietileno de baja densidad (LDPE). La coincidencia de las bandas en torno a 2914,79 y 2848,60  $\text{cm}^{-1}$ , asociadas a los estiramientos de  $\text{CH}_2$ , junto con las señales de deformación cercanas a 1460  $\text{cm}^{-1}$ , confirma que el material analizado corresponde efectivamente a polietileno de baja densidad (LDPE).

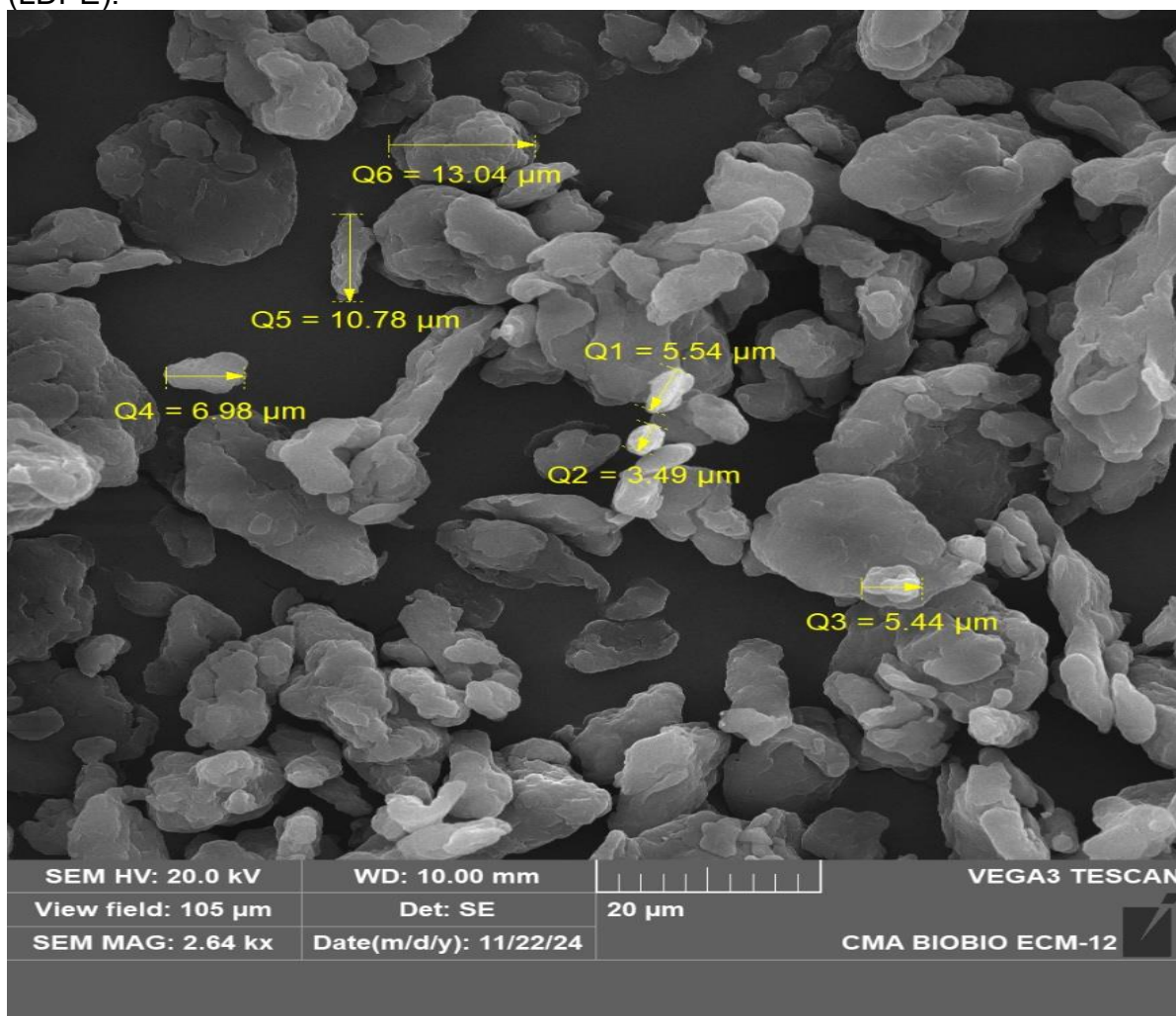
Figura 2. Resultados de espectroscopía infrarroja obtenida a través de Fourier (FTIR) de partículas de microplástico específicamente de polietileno de baja densidad (LDPE).



En la imagen obtenida del microscopio electrónico de barrido SEM (Figura 3) se observa una dispersión de las partículas de microplástico de polietileno de baja densidad (LDPE) con una morfología irregular y tamaños que oscilan aproximadamente entre 3,49 y 13,04  $\mu\text{m}$  de diámetro, demostrando que oscilaban en un tamaño de microplásticos. La amplitud en el rango de tamaño sugiere distintos grados de fragmentación mecánica o molienda de las partículas de microplástico.

La rugosidad indica una alta área superficial, lo cual influye en fenómenos de adsorción y reactividad química. Estos rasgos son esenciales para comprender su comportamiento en procesos ambientales.

Figura 3. Resultados del microscopio electrónico de barrido (SEM) donde se observan los tamaños de partículas de microplástico de polietileno de baja densidad (LDPE).



### Características fisiológicas del brócoli

Los parámetros cinéticos de fluorescencia de la clorofila se vieron afectados por la exposición a microplásticos. El rendimiento cuántico fotoquímico máximo de PSII ( $Fv'/Fm'$ ) (Tabla 1) no presentó diferencias significativas entre el control y 3 ppm; sin embargo, a partir de 30 ppm el  $Fv'/Fm'$  aumenta y junto a 300 ppm presenta

diferencias significativas en comparación con el control, donde sugiere una mayor capacidad máxima de PSII con la presencia de microplásticos.

Tabla 1. Parámetros de fluorescencia de la clorofila en hojas de brócoli cultivado en un suelo artificialmente contaminado con polietileno de baja densidad (3 ppm de MP; 30 ppm de MP; 300 ppm de MP; C es control).

Tratamiento	Fv'/Fm'	ETR	NPQ	Phi2	qP
<b>C</b>	0,68 ± 0,1 <sup>a</sup>	33,1 ± 0,6 <sup>a</sup>	1,35 ± 0,8 <sup>b</sup>	0,70 ± 0,1 <sup>a</sup>	1,13 ± 0,3 <sup>b</sup>
<b>3ppm</b>	0,71 ± 0,1 <sup>a</sup>	37,2 ± 0,5 <sup>a</sup>	1,02 ± 0,7 <sup>b</sup>	0,74 ± 0,0 <sup>b</sup>	1,15 ± 0,3 <sup>b</sup>
<b>30ppm</b>	0,76 ± 0,0 <sup>b</sup>	36,9 ± 0,5 <sup>a</sup>	0,56 ± 0,3 <sup>a</sup>	0,75 ± 0,0 <sup>b</sup>	0,97 ± 0,1 <sup>ab</sup>
<b>300ppm</b>	0,78 ± 0,0 <sup>b</sup>	35,2 ± 0,6 <sup>a</sup>	0,40 ± 0,4 <sup>a</sup>	0,76 ± 0,0 <sup>b</sup>	0,93 ± 0,1 <sup>a</sup>

<sup>1</sup>Fv/Fm: rendimiento cuántico fotoquímico máximo de PSII. ETR: Tasa de transferencia de electrones. NPQ: Coeficiente de extinción no fotoquímico. Phi2: Rendimiento cuántico fotoquímico real. Qp: Coeficiente de extinción fotoquímica. Resultados obtenidos a partir de MultispeQ v2.0 (PhotosynQ, EE. UU.). Letras distintas representan diferencias significativas entre tratamientos según prueba de Tukey (P ≤ 0,05).

En general, los MPs inhiben la actividad fotosintética de las plantas reduciendo el rendimiento cuántico (Wu *et al.*, 2019), sin embargo, en este estudio se demuestra que en las dosis más altas del tratamiento elevan el rendimiento cuántico, lo cual parece ser una respuesta adaptativa, donde las plantas como respuesta al posible estrés frente a la exposición de MPs estimulan su mecanismo de defensa al aumentar el Fv'/Fm' y podrían activar las rutas de protección del fotosistema II (PSII). Por lo cual, la tasa de transferencia de electrones (ETR) no presentó diferencias significativas frente al control. El coeficiente de extinción no fotoquímico (NPQ) mostró valores menores de NPQ en dosis de microplásticos a partir de 30 ppm que redujeron la disipación no fotoquímica en las plantas de brócoli, lo cual se podría correlacionar con el aumento de la Fv'/Fm' y la menor necesidad de las plantas de disipación térmica. Además, fue evidente que la presencia de MPs en el suelo aumentó el rendimiento cuántico fotoquímico real (Phi2) con respecto al control, presentando diferencias significativas en cada tratamiento. Esto indica que la eficiencia fotoquímica del PSII de las plantas de brócoli está siendo afectada por cada concentración de LDPE en el suelo, probablemente como respuesta adaptativa de la planta frente a la presencia de microplásticos en el suelo. El

coeficiente de extinción fotoquímica (qP) presentó el valor más bajo frente a la mayor exposición de MPs (300 ppm), lo cual difiere estadísticamente frente al control y a la dosis menor de MPs (3 ppm). El tratamiento de 30 ppm no se mostró estadísticamente diferente de 300 ppm ni frente al control y 3 ppm. En este sentido, la inhibición del qP frente a la exposición a microplásticos nos demuestra una menor proporción de centros de PSII abiertos en comparación con el control. Los cambios presentes en la actividad fotosintética son una estrategia de la planta frente a los MPs como factor estresante y una indicación de la toxicidad de los MPs en las plantas de brócoli de esta investigación, y esto concuerda con la literatura (Zhang *et al.*, 2022). No obstante, se deben considerar las condiciones de exposición a radiación fotosintéticamente activa (PAR) a las que fueron sometidas las plantas de brócoli en la cámara de crecimiento, las cuales fueron de  $350 \mu\text{mol m}^2 \text{s}^{-1}$ , lo cual es relativamente bajo en comparación con condiciones normales de exposición solar, que son usualmente superiores a  $2.000 \mu\text{mol m}^2 \text{s}^{-1}$ . Las plantas no presentan un estrés severo; por ende, el PSII no puede llegar a un punto de saturación. Lo cual pudo haber sido una de las causas de que no presentaran diferencias estrictamente severas entre los parámetros, los cuales se encuentran en rangos normales. Además, a pesar de las diferencias significativas presentes en la investigación en la mayor dosis de microplásticos en suelo, las variables de fluorescencia de la clorofila en las hojas de brócoli no presentaron un estrés severo evidente en los tratamientos estudiados.

### **Evaluaciones en el crecimiento del brócoli**

En esta investigación, la respuesta fisiológica de las plantas de brócoli a la exposición a MPs no presentó diferencias significativas (Tabla 2). En cuanto a la longitud de la planta, el análisis estadístico demuestra que las diferentes dosis de MPs no tuvieron efecto significativo en el brócoli ( $P > 0.05$ ). Por otro lado, los MPs en los tratamientos evaluados tampoco presentaron diferencias significativas en el peso fresco y seco aéreo de la planta. Esto se podría comparar según estudios, donde, en los tratamientos estudiados, los efectos en el crecimiento y la altura de la planta podrían aparecer en dosis distintas a las estudiadas en la presente

investigación, considerando otros factores de exposición, o con otro tipo de microplástico o, en su defecto, nanoplástico.

Tabla 2. Variables de crecimiento en plantas de brócoli cultivado en un suelo artificialmente contaminado con polietileno de baja densidad (3 ppm de MP; 30 ppm de MP; 30 ppm de MP; C es control).

Variable	Longitud de planta (cm)	Peso fresco aéreo (g)	Peso seco aéreo (g)
<b>C</b>	26,9 ± 3,2 <sup>a</sup>	121,3 ± 50,8 <sup>a</sup>	5,6 ± 2,6 <sup>a</sup>
<b>3 ppm</b>	30,4 ± 6,2 <sup>a</sup>	185,9 ± 86,4 <sup>a</sup>	6,3 ± 2,5 <sup>a</sup>
<b>30 ppm</b>	32,9 ± 6,5 <sup>a</sup>	160,6 ± 87,2 <sup>a</sup>	5,6 ± 1,7 <sup>a</sup>
<b>300 ppm</b>	30,4 ± 3,8 <sup>a</sup>	169,5 ± 68,6 <sup>a</sup>	6,4 ± 1,7 <sup>a</sup>

<sup>1</sup>Letras iguales representan que no existe diferencias significativas entre tratamientos según prueba de Tukey ( $P \leq 0,05$ ).

En la investigación de (Lian *et al.*, 2020) los PSNP no mostraron ningún efecto sobre la tasa de germinación de las semillas, pero los parámetros de crecimiento y el contenido de clorofila aumentaron de manera considerable. Estos hallazgos contrastantes de las investigaciones sobre un efecto negativo, neutro o positivo en el crecimiento indican que no todas las altas concentraciones de MP producen efectos negativos en las plantas, como en esta investigación, donde a 300 ppm no afecta de manera significativa el crecimiento. En este sentido, resalta la necesidad e importancia de considerar otros factores como las características de los MP, las condiciones de exposición y las especies de plantas al evaluar los impactos de los MPs en los sistemas suelo-planta (Chen *et al.*, 2025). Ma *et al.* (2022) mostró en plantas de arroz que los MPs afectaron negativamente el crecimiento y la altura. Sin embargo, en este trabajo no se observó tal efecto, lo que podría ser debido al tamaño de las plantas de brócoli.

### **Evaluación en el metabolismo primario**

**Azúcares.** La cantidad de azúcares en el brócoli de la presente investigación se vio afectada por la exposición a microplásticos en el suelo (Tabla 3). El contenido de D-fructosa y D-glucosa no presentó diferencias significativas entre tratamientos y frente al control. Sin embargo, el contenido de sacarosa presentó una gran

diferencia significativa sólo en el tratamiento de 300 ppm frente al control y a los demás tratamientos. Por otro lado, el contenido de D-maltosa también presentó una única diferencia significativa en el mismo tratamiento (300 ppm).

Tabla 3. Cuantificación de carbohidratos en hojas de brócoli cultivado en un suelo artificialmente contaminado con polietileno de baja densidad (3 ppm de MP; 30 ppm de MP; 300 ppm de MP; C es control).

<b>Carbohidratos<sup>1</sup></b>	<b>C</b>	<b>3ppm</b>	<b>30ppm</b>	<b>300ppm</b>
<b>D-Fruktosa</b> <b>(mg Kg<sup>-1</sup>)</b>	1.145,7 ± 645,3 <sup>a</sup>	998,5 ± 404,8 <sup>a</sup>	1.541,7 ± 638,1 <sup>a</sup>	1.174,7 ± 499,8 <sup>a</sup>
<b>D-Glucosa</b> <b>(mg Kg<sup>-1</sup>)</b>	2.832,7 ± 743,7 <sup>a</sup>	2.631,1 ± 691,7 <sup>a</sup>	3.632,3 ± 803,9 <sup>a</sup>	3.032,4 ± 860,2 <sup>a</sup>
<b>Sacarosa</b> <b>(mg Kg<sup>-1</sup>)</b>	642,1 ± 259,0 <sup>a</sup>	779,0 ± 273,5 <sup>a</sup>	679,6 ± 288,3 <sup>a</sup>	1.415,7 ± 409,9 <sup>b</sup>
<b>D-Maltosa</b> <b>(mg Kg<sup>-1</sup>)</b>	495,3 ± 133,2 <sup>a</sup>	571,0 ± 163,3 <sup>a</sup>	448,4 ± 118,2 <sup>a</sup>	1.244,8 ± 574,4 <sup>b</sup>

<sup>1</sup>Resultados obtenidos a partir de HPLC-ELSD (YL9100, Corea). Letras distintas representan diferencias significativas entre tratamientos según prueba de Tukey ( $P \leq 0,05$ ).

Los metabolitos primarios, como productos finales de las reacciones enzimáticas, pueden indicar de manera directa los cambios en la fisiología de la planta frente a la exposición a un agente estresor (Lu *et al.*, 2021), en este caso, microplásticos en el suelo. Se sabe que el metabolismo de carbohidratos juega un rol en la tolerancia de la planta al estrés ambiental, debido a sus efectos en la regulación del potencial osmótico y el suministro de energía (Li *et al.*, 2020). Además, el metabolismo de los carbohidratos es fundamental para el crecimiento y desarrollo de las plantas, porque producen la energía disponible, metabolitos que participan en la adaptación al estrés y esqueletos de carbono para asegurar las funciones de la vida del vegetal (Nunes-Nesi *et al.*, 2010). Como el azúcar es el sustrato del metabolismo y la molécula señal de varias vías metabólicas (Mishra *et al.*, 2009), la acumulación de azúcar, como en este caso, de sacarosa y maltosa nos dirige a la probabilidad de un metabolismo de carbono impedido y revela que los MPs de LDPE en el suelo pueden afectar el metabolismo primario de las hojas de

brócoli. Cabe reiterar que el azúcar junto con el almidón son los principales componentes del metabolismo del carbono; el almidón se utiliza como fuente de carbono y el azúcar como producto intermedio para transportar el carbono desde la fuente hasta el sumidero (Krahmer *et al.*, 2018). El contenido de sacarosa aumentó en el tratamiento de 300 ppm un 120,46 % aproximadamente en comparación al control en esta investigación, así como también se observa en la investigación de (Zhou *et al.*, 2021) donde el contenido de sacarosa en las raíces de arroz aumentó significativamente ( $P \leq 0,05$ ) tras la exposición a 50 ppm y 100 ppm de nanoplásticos de poliestireno (PSNP) y en la investigación de (Lian *et al.*, 2020) donde los perfiles metabólicos de las hojas de trigo fueron alterados profundamente por los PSNP. Se sabe que la maltosa se forma principalmente por la degradación del almidón dentro del plastidio en el cloroplasto por acción de amilasas, se exporta al citosol y allí se procesa por enzimas que la convierten en glucosa o la incorporan a rutas metabólicas centrales. El cambio presente de D-maltosa a 300 ppm, el cual cabe destacar que aumentó aproximadamente un 151,25 % frente al control y los demás tratamientos, en conjunto con el aumento de sacarosa, indica que posiblemente los polisacáridos presentes en las paredes celulares de las hojas de las plantas de brócoli se descompusieron para producir pequeñas moléculas de azúcar y de esta manera proteger las membranas celulares y las proteínas vegetales de un posible daño por estrés (Zhao *et al.*, 2021) inducido por la presencia de MPs en suelo. En general, la presencia de MPs en suelo, en este caso, de polietileno de baja densidad, puede inducir una posible reprogramación del metabolismo primario de la planta, lo cual dirige al desarrollo de estrategias metabólicas específicas en sus hojas debido a una posible disminución de la demanda metabólica para mitigar los efectos del estrés en el sistema suelo-planta. Los resultados presentados podrían sugerir que la adición de LDPE en el suelo podría afectar la fijación del carbono, porque el azúcar soluble (sacarosa) y el almidón (maltosa) son los principales productos del metabolismo del carbono (Krahmer *et al.*, 2018).

## **CONCLUSIONES**

Según lo expuesto en este trabajo se puede concluir que:

1. Los parámetros fotosintéticos en las plantas de brócoli se vieron afectados frente a un alto contenido de MPs en el suelo.
2. La respuesta fisiológica de crecimiento de las plantas de brócoli no presentó diferencias significativas frente a la exposición a MPs.
3. La cantidad de azúcares (sacarosa y D-maltosa) en el metabolismo primario del brócoli aumentó significativamente a la mayor concentración de MPs en el suelo (300 ppm) indicando una respuesta metabólica adaptativa.

## REFERENCIAS

1. Bernhardt, E. S., Rosi, E. J., & Gessner, M. O. (2017). Synthetic chemicals as agents of global change. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 15(2), 84–90. <https://doi.org/10.1002/FEE.1450>
2. Bocso, N.-S. (2022). The biological role of primary and secondary plants metabolites. *Nutrition and Food Processing*, 5(3). <https://doi.org/10.31579/2637-8914/094>
3. Boyle, K., and Örmeci, B. (2020). Microplastics and Nanoplastics in the Freshwater and Terrestrial Environment: A Review. *Water* 2020, Vol. 12, Page 2633, 12(9), 2633. <https://doi.org/10.3390/W12092633>
4. Carrasco Silva, G., Galleguillos Madrid, F. M., Hernández, D., Pincheira, G., Peralta, A. K., Urrestarazu Gavilán, M., Vergara-Carmona, V., & Fuentes-Peñailillo, F. (2021). Microplastics and their effect in horticultural crops: Food safety and plant stress. In *Agronomy* (Vol. 11, Issue 8). MDPI AG. <https://doi.org/10.3390/agronomy11081528>
5. Chen, Z., Carter, L. J., Banwart, S. A., & Kay, P. (2025). Microplastics in Soil–Plant Systems: Current Knowledge, Research Gaps, and Future Directions for Agricultural Sustainability. *Agronomy* 2025, Vol. 15, Page 1519, 15(7), 1519. <https://doi.org/10.3390/AGRONOMY15071519>
6. Cole, M., Lindeque, P., Halsband, C., & Galloway, T. S. (2011). Microplastics as contaminants in the marine environment: A review. *Marine Pollution Bulletin*, 62(12), 2588–2597. <https://doi.org/10.1016/J.MARPOLBUL.2011.09.025>

7. Enfrin, M., Dumée, L. F., & Lee, J. (2019). Nano/microplastics in water and wastewater treatment processes – Origin, impact and potential solutions. *Water Research*, 161, 621–638. <https://doi.org/10.1016/J.WATRES.2019.06.049>
8. Erb, M., and Kliebenstein, D. J. (2020). Topical Review Plant Secondary Metabolites as Defenses, Regulators, and Primary Metabolites: The Blurred Functional Trichotomy 1[OPEN]. *Plant Physiology*, 184, 39–52. <https://doi.org/10.1104/pp.20.00433>
9. Ishida, M., Hara, M., Fukino, N., Kakizaki, T., & Morimitsu, Y. (2014). Glucosinolate metabolism, functionality and breeding for the improvement of brassicaceae vegetables. *Breeding Science*, 64(1), 48–59. <https://doi.org/10.1270/JSBBS.64.48>,
10. Jiang, M., Wang, B., Ye, R., Yu, N., Xie, Z., Hua, Y., Zhou, R., Tian, B., & Dai, S. (2022). Evidence and Impacts of Nanoplastic Accumulation on Crop Grains. *Advanced Science*, 9(33), 2202336. <https://doi.org/10.1002/ADVS.202202336>;WGROUP:STRING:PUBLICATION
11. Krahmer, J., Ganpudi, A., Abbas, A., Romanowski, A., & Halliday, K. J. (2018). Phytochrome, Carbon Sensing, Metabolism, and Plant Growth Plasticity. *Plant Physiology*, 176(2), 1039–1048. <https://doi.org/10.1104/PP.17.01437>
12. Li, H., Xia, Y., Liu, H. Y., Guo, H., He, X. Q., Liu, Y., Wu, D. T., Mai, Y. H., Li, H. Bin, Zou, L., & Gan, R. Y. (2022). Nutritional values, beneficial effects, and food applications of broccoli (*Brassica oleracea* var. *italica* Plenck). *Trends in Food Science & Technology*, 119, 288–308. <https://doi.org/10.1016/J.TIFS.2021.12.015>
13. Li, K., Du, L., Qin, C., Bolan, N., Wang, H., & Wang, H. (2024). Microplastic pollution as an environmental risk exacerbating the greenhouse effect and climate change: a review. *Carbon Research* 2024 3:1, 3(1), 1–22. <https://doi.org/10.1007/S44246-023-00097-7>
14. Li, Z., Li, Q., Li, R., Zhao, Y., Geng, J., & Wang, G. (2020). Physiological responses of lettuce (*Lactuca sativa* L.) to microplastic pollution. *Environmental Science and Pollution Research*, 27(24), 30306–30314. <https://doi.org/10.1007/S11356-020-09349-0>

15. Lian, J., Wu, J., Xiong, H., Zeb, A., Yang, T., Su, X., Su, L., & Liu, W. (2020). Impact of polystyrene nanoplastics (PSNPs) on seed germination and seedling growth of wheat (*Triticum aestivum* L.). *Journal of Hazardous Materials*, 385, 121620. <https://doi.org/10.1016/J.JHAZMAT.2019.121620>
16. López, M. D., Toro, M. T., Riveros, G., Illanes, M., Noriega, F., Schoebitz, M., García-Viguera, C., & Moreno, D. A. (2022). Brassica sprouts exposed to microplastics: Effects on phytochemical constituents. *Science of the Total Environment*, 823. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.153796>
17. Lu, M., Yu, S., Lian, J., Wang, Q., He, Z., Feng, Y., & Yang, X. (2021). Physiological and metabolomics responses of two wheat (*Triticum aestivum* L.) genotypes differing in grain cadmium accumulation. *Science of The Total Environment*, 769, 145345. <https://doi.org/10.1016/J.SCITOTENV.2021.145345>
18. Ma, J., Aqeel, M., Khalid, N., Nazir, A., Alzuaibr, F. M., Al-Mushhin, A. A. M., Hakami, O., Iqbal, M. F., Chen, F., Alamri, S., Hashem, M., & Noman, A. (2022). Effects of microplastics on growth and metabolism of rice (*Oryza sativa* L.). *Chemosphere*, 307, 135749. <https://doi.org/10.1016/J.CHEMOSPHERE.2022.135749>
19. Mattsson, K., Hansson, L. A., & Cedervall, T. (2015). Nano-plastics in the aquatic environment. *Environmental Science: Processes & Impacts*, 17(10), 1712–1721. <https://doi.org/10.1039/C5EM00227C>
20. Mishra, B. S., Singh, M., Aggrawal, P., & Laxmi, A. (2009). Glucose and Auxin Signaling Interaction in Controlling *Arabidopsis thaliana* Seedlings Root Growth and Development. *PLOS ONE*, 4(2), e4502. <https://doi.org/10.1371/JOURNAL.PONE.0004502>
21. Nunes-Nesi, A., Fernie, A. R., & Stitt, M. (2010). Metabolic and Signaling Aspects Underpinning the Regulation of Plant Carbon Nitrogen Interactions. *Molecular Plant*, 3(6), 973–996. <https://doi.org/10.1093/MP/SSQ049>
22. Qi, Y., Yang, X., Mejia Pelaez, A., Huerta Lwanga, E., Beriot, N., Gertsen, H., Garbeva, P., & Geissen, V. (2018). Macro-and micro-plastics in soil-plant system: Effects of plastic mulch film residues on wheat (*Triticum aestivum*) growth ☆. *Science of the Total Environment*, 645, 1048–1056. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.07.229>

23. Rillig, M. C., Lehmann, A., de Souza Machado, A. A., & Yang, G. (2019). Microplastic effects on plants. *New Phytologist*, 223(3), 1066–1070. <https://doi.org/10.1111/NPH.15794>;WEBSITE:WEBSITE:NPH;REQUESTEDJOURNAL:JOURNAL:14698137;CTYPE:STRING:JOURNAL
24. Shen, J., Wang, S., Sun, L., Wang, Y., Fan, K., Li, C., Wang, H., Bi, C., Zhang, F., & Ding, Z. (2022). Dynamic changes in metabolic and lipidomic profiles of tea plants during drought stress and re-watering. *Frontiers in Plant Science*, 13, 978531. <https://doi.org/10.3389/FPLS.2022.978531/BIBTEX>
25. Somanathan, H., Sathasivam, R., Sivaram, S., Mariappan Kumaresan, S., Muthuraman, M. S., & Park, S. U. (2022). An update on polyethylene and biodegradable plastic mulch films and their impact on the environment. *Chemosphere*, 307, 135839. <https://doi.org/10.1016/J.CHEMOSPHERE.2022.135839>
26. Sun, Y., Zang, J., Xie, S., Wu, M., Tao, J., Tanveer, |, Adyel, M., Du, | Xinyu, Li, S., & Wang, J. (2025). Transcriptomic and metabolomic responses of maize under conventional and biodegradable microplastic stress. *IMetaOmics*, 2(1), e48. <https://doi.org/10.1002/IMO2.48>
27. Wu, Y., Guo, P., Zhang, X., Zhang, Y., Xie, S., & Deng, J. (2019). Effect of microplastics exposure on the photosynthesis system of freshwater algae. *Journal of Hazardous Materials*, 374, 219–227. <https://doi.org/10.1016/J.JHAZMAT.2019.04.039>
28. Yang, L., Liang, H., Wu, Q., & Shen, P. (2024). Biochar alleviated the toxic effects of microplastics-contaminated geocarposphere soil on peanut (*Arachis hypogaea* L.) pod development: roles of pod nutrient metabolism and geocarposphere microbial modulation. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 104(5), 2990–3001. <https://doi.org/10.1002/JSFA.13191>;WEBSITE:WEBSITE:SCIJOURNALS;PAGE:STRING:ARTICLE/CHAPTER
29. Yang, L., and Ma, C. (2023). Toward a better understanding of microalgal photosynthesis in medium polluted with microplastics: a study of the radiative properties of microplastic particles. *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology*, 11, 1193033. <https://doi.org/10.3389/FBIOE.2023.1193033/BIBTEX>
30. Zhang, Z., Cui, Q., Chen, L., Zhu, X., Zhao, S., Duan, C., Zhang, X., Song, D., & Fang, L. (2022). A critical review of microplastics in the soil-plant system: Distribution, uptake, phytotoxicity and prevention. *Journal of*

Hazardous Materials, 424, 127750.  
<https://doi.org/10.1016/J.JHAZMAT.2021.127750>

31. Zhao, Z. Y., Wang, P. Y., Wang, Y. B., Zhou, R., Koskei, K., Munyasya, A. N., Liu, S. T., Wang, W., Su, Y. Z., & Xiong, Y. C. (2021). Fate of plastic film residues in agro-ecosystem and its effects on aggregate-associated soil carbon and nitrogen stocks. *Journal of Hazardous Materials*, 416, 125954. <https://doi.org/10.1016/J.JHAZMAT.2021.125954>
32. Zhou, C. Q., Lu, C. H., Mai, L., Bao, L. J., Liu, L. Y., & Zeng, E. Y. (2021). Response of rice (*Oryza sativa* L.) roots to nanoplastic treatment at seedling stage. *Journal of Hazardous Materials*, 401, 123412. <https://doi.org/10.1016/J.JHAZMAT.2020.123412>

## ANEXO

Tabla 4. Análisis del sustrato, fibra de coco con 3 ppm de MP, 30 ppm de MP y 300 ppm de MP.

<b>Determinación</b>	<b>Unidad</b>	<b>3 ppm</b>	<b>30 ppm</b>	<b>300 ppm</b>	<b>Rango Referencial NCh2.880</b>
<b>pH (1:5)</b>	-	6,3	6,31	6	5,0 - 8,5
<b>Conductividad Eléctrica</b>	dS/m	0,38	0,33	0,58	< 3
<b>Materia Orgánica</b>	%	39,84	40,07	83,87	> 20
<b>Carbono Orgánico</b>	%	22,14	22,26	46,59	-
<b>Nitrógeno Total</b>	%	0,46	0,46	0,49	≥ 0,5
<b>Relación C/N</b>	-	48,1	48,4	95,1	≤ 30
<b>Amonio (N-NH<sub>4</sub>)</b>	mg/kg	18,2	17,9	50,1	< 500
<b>P<sub>2</sub>O<sub>5</sub></b>	%	0,3	0,3	0,1	-
<b>K<sub>2</sub>O</b>	%	0,25	0,21	1,17	-
<b>CaO</b>	%	1,01	0,86	0,69	-
<b>MgO</b>	%	0,68	0,76	0,29	-
<b>Fe</b>	mg/kg	30.800	27.250	4.040	-
<b>Mn</b>	mg/kg	715	760	70	-
<b>Zn</b>	mg/kg	47	48	12	< 200
<b>Cu</b>	mg/kg	25	25	7	< 100
<b>B</b>	mg/kg	62	64	28	< 200
<b>Humedad BH</b>	%	46,9	44,5	72,7	30 - 45
<b>Materia Seca</b>	%	53,1	55,5	27,3	-