



**Universidad de Concepción
Facultad de Ciencias Ambientales
Ingeniería Ambiental**

Abundancia, caracterización y distribución de microplásticos en sistema de canales riego en la región de Ñuble

Habilitación presentada para optar al título de
ingeniera ambiental

Alumna: Miriam Catalina Vega Leal

**Profesor guía:
Dr. Ricardo Barra Ríos**

CONCEPCIÓN (Chile), 2026

Abundancia, caracterización y distribución de microplásticos en sistema de canales riego en la región de Ñuble

Habilitación presentada para optar al título de
ingeniera ambiental

Alumna: Miriam Catalina Vega Leal

Profesor guía: Dr. Ricardo Barra Ríos

CONCEPCIÓN (Chile), 2026

Universidad de Concepción

**“ABUNDANCIA, CARACTERIZACIÓN Y DISTRIBUCIÓN DE MICROPLÁSTICOS EN
SISTEMA DE CANALES DE RIEGO EN LA REGIÓN DE ÑUBLE”**

Profesor Guía: Dr. Ricardo Barra Ríos



Profesor Comisión: Dra. Carolina Baeza Freer



Profesor Comisión: Ms. Jorge Féliz Bernal



CONCEPTO: APROBADO CON DISTINCIÓN MÁXIMA

Conceptos que se indica en el Título

- ✓ Aprobado por Unanimidad : (En Escala de 4,0 a 4,9)
- ✓ Aprobado con Distinción (En Escala de 5,0 a 5,6)
- ✓ Aprobado con Distinción Máxima (En Escala de 5,7 a 7,0)

Concepción, abril 2026

índice

Agradecimientos	6
Resumen	7
1. INTRODUCCIÓN	8
1.1.Pregunta de investigación	9
1.2.Objetivos	9
1.2.1.Objetivo general	9
1.2.2.Objetivos específicos	9
2. ANTECEDENTES	10
2.1. Evolución del plástico	10
2.2. Microplásticos (MPs)	10
2.3. Problemática	11
2.3.1. Área problema	12
2.4. Plástico en la agricultura	13
2.5. Posibles fuentes aportantes al suelo agrícola	14
2.5.1. Mantillo agrícola	14
2.5.2. Fertilizantes orgánicos	15
2.5.3. Agua de riego	15
3. METODOLOGÍA	16
3.1. Área de estudio	16
3.2. Muestreo	17
3.2.1. Extracción de microplásticos	20
3.2.2. Análisis microplásticos	20
3.3. Identificación fuentes portantes de microplásticos al agua de riego	22
3.3.1. Uso de plástico en agricultura	22
3.3.2. Carreteras	22
3.3.3. Microbasurales	23
3.3.4. Edificaciones	23
3.3.5. Datos previos de calidad de agua	23
3.4. Análisis de resultados	24
4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	25
4.1. Análisis estadístico	46
4.2. Aporte a los objetivos de desarrollo sostenible (ODS)	50
5. CONCLUSIONES	51
6. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	53
7. ANEXOS	61
7.1. Anexo 1	61

7.2. Anexo 2	62
7.3. Anexo 3	63

Índice figuras

Figura 1. Mapa ubicación de canales Junta de Vigilancia Río Ñuble.	15
Figura 2. Mapa área de estudio.	19
Figura 3. Mapa puntos de muestreo, canal Collico.	20
Figura 4. Mapa puntos de muestreo, canal San Carlos o Gaona Perales Ranchillo.	21
Figura 5. Mapa puntos de muestreo, canal Rinconada de Cato.	21
Figura 6. Estereomicroscopio binocular.	23
Figura 7. Espectrómetro FT-IR FTIR-4600 Jasco.	24
Figura 8. Concentración de partículas en puntos de muestreo de canal Collico.	27
Figura 9. Clasificación de partículas según su forma en canal Collico.	28
Figura 10. Clasificación de partículas según su color en canal Collico.	28
Figura 11. Polímeros presentes en canal Collico.	29
Figura 12. Concentración de partículas en puntos de muestreo de canal San Carlos.	31
Figura 13. Clasificación de partículas según su forma en canal San Carlos.	31
Figura 14. Clasificación de partículas según su color en canal San Carlos.	32
Figura 15. Polímeros presentes en canal San Carlos.	32
Figura 16. Concentración de partículas en puntos de muestreo de canal Rinconada de Cato.	34
Figura 17. Clasificación de partículas según su forma en canal Rinconada de Cato.	35
Figura 18. Clasificación de partículas según su color en canal Rinconada de Cato.	35
Figura 19. Polímeros presentes en canal Rinconada de Cato.	36
Figura 20. Ejemplos de espectros obtenidos de partículas presentes en canales de riego	38
Figura 21. Fuentes aportantes identificadas en canal Collico.	40
Figura 22. Fuentes aportantes identificadas en canal San Carlos.	42
Figura 23. Fuentes aportantes identificadas en canal Rinconada de Cato.	43
Figura 25. Interpolación concentraciones de MP, canal San Carlos.	47
Figura 26. Interpolación concentraciones de MP, canal Rinconada de Cato.	48
Figura 27. Gráfico de cajas basado en las concentraciones de MPs en cada canal de riego	49
Figura 28. Correlación entre concentraciones de MP/L y fuentes aportantes.	50
Figura 29. Regresión lineal entre concentraciones de MPs y fuentes aportantes.	51

Agradecimientos

Primero que todo me gustaría agradecer al Centro de Recursos Hídricos para la Agricultura y la Minería (CRHIAM), por su apoyo financiero en esta etapa, a la Junta de Vigilancia de Río Ñuble, por la gran disposición, entrega de datos y ayuda durante la campaña de muestreo, también al Dr. Ricardo Barra, a quien respeto y admiro mucho, por su apoyo, buena disposición y confianza en mí y mis habilidades para llevar a cabo este proceso, siempre dándose el tiempo de atender cada una de mis consultas y guiarme en este extenso camino. De igual forma, me gustaría agradecer a la Dra. Alessandra Perfetti, quien estuvo constantemente apoyándome, enseñándome y guiándome.

Además, agradecer a mis compañeros y amigos que tuve la suerte de conocer en esta hermosa carrera, que sin duda hicieron más lindo este proceso de aprendizaje, el cual estuvo lleno de momentos de frustración y cansancio pero también lleno de momentos felices.

Igualmente, agradecer a mis amigas de toda la vida Giuliana y Fernanda, que me han apoyado y estado conmigo siempre.

Por último y lo más importante, agradecer a mis papás quienes son un pilar fundamental en mi vida y quienes me han apoyado y brindado todo el amor del mundo en mi vida, siempre estando junto a mí en esta y todas las etapas de mi vida sin duda son las personas que más admiro y amo en el mundo.

Muchas gracias.

Resumen

La contaminación por microplásticos (MPs) es omnipresente y afecta a todas las matrices ambientales. Desde un principio su estudio se ha centrado principalmente en sistemas oceánicos pero actualmente el desarrollo de la investigación se ha empezado a enfocar a nivel continental, tanto en ríos, lagos y suelo siendo este último de gran relevancia ya que es donde se desarrollan gran parte de las actividades humanas, una importante actividad que se desarrolla en los suelos es la agricultura, si bien la contaminación por MPs en estos suelos ha sido cada vez más estudiada por los efectos que se generan en sus propiedades físicas, aún existen muchas preguntas sobre las fuentes que son una vía importante de MPs, las mayormente estudiadas corresponden a los lodos de aguas residuales y el uso de mantillo plástico en los cultivos mientras que una tercera fuente aportante al suelo agrícola escasamente estudiada es el agua de riego. En este estudio, se determinaron las concentraciones y características de MPs presentes en tres canales de riego pertenecientes al distrito de riego administrado por la Junta de Vigilancia del Río Ñuble, ubicado en la región de Ñuble, Chile, teniendo que las concentraciones de Mps fluctuaron entre 0,2 – 14,6 MPs/L donde las mayores concentraciones se registraron en el canal Rinconada de Cato, cuyo canal es el último que capta aguas del río Ñuble, en cuanto a las formas más frecuentes en todos los canales estudiados se encuentran las fibras particularmente de color negro y café y por ultimo de acuerdo a la composición polimérica se encontraron en mayor cantidad polímeros como resina de poliamida, uretano de poliéster, copolímero acetal, poliéster, fluoropolímero y algodón injertado con estireno. Teniendo esto presente y consultando con literatura se pudo establecer un posible origen de estas partículas.

Por otro lado, se realizó una exploración espacial en conjunto con información reunida de diversas fuentes, a partir de esto se elaboró cartografía, pudiendo así identificar posibles fuentes aportantes de plástico al agua de riego, pudiendo complementar esto con lo que se obtuvo de la composición polimérica pudiendo así sustentar de mejor forma lo que ocurre en el área de estudio asociándolo con los hallazgos.

Universidad de Concepción

Además, se realizó cartografía para analizar la distribución espacial que presentaban las concentraciones de MPs en los canales estudiados mediante interpolación, donde se observa que existen más factores asociados que pudiesen determinar en gran parte la distribución de estos contaminantes los cuales se complementan con las actividades antrópicas presentes en el área de influencia. Este estudio representa un primer reporte de la ocurrencia de MPs en aguas de riego en la región, destacando la importancia de seguir avanzando en la misma línea, aplicando medidas de prevención y mitigación a un problema de escala global.

1. INTRODUCCIÓN

La producción mundial de plástico en el año 2023 fue de más de 400 millones de toneladas y se espera que esta industria alcance una producción de 1480 millones de toneladas para el año 2050 (Plastics Europe, 2025; PSF, 2021). El plástico es considerado un producto de uso universal debido a su alta flexibilidad, asequibilidad, facilidad de fabricación y durabilidad. Sin embargo, esta última característica, junto con una gestión inadecuada y las bajas tasas de reciclaje, ha contribuido a que la contaminación plástica se distribuya a escala global. En la actualidad, los plásticos han sido detectados en prácticamente todos los hábitats del planeta, incluyendo ríos, océanos, aguas subterráneas, suelos e incluso regiones polares, siendo en los océanos donde surgieron las primeras preocupaciones y se estima que la superficie de los océanos del mundo está poblada por no menos de 5,25 billones de partículas de plástico, y los microplásticos de origen terrestre representan entre el 75% y 90% del total (Cusworh et al., 2023; Megha et al., 2024; Andrady, 2011, 2017).

Las piezas visibles de plástico (macroplásticos y mesoplásticos) representan solo una pequeña fracción, alrededor del 6% de la masa total encontrado en los océanos, siendo el mayor problema las partículas de plástico y fibras de tamaño pequeño, comúnmente conocido como microplásticos (MPs), estos contaminantes emergentes y xenobioticos se definen como partículas o fragmentos con un tamaño <5 mm y mayor a $1 \mu\text{m}$, se reconocen como una clase de contaminantes orgánicos altamente persistentes, potencialmente bioacumulativos y de alta movilidad que presentan una preocupación ambiental actual y apremiante, estos se clasifican de acuerdo a su origen, el cual puede ser primario o secundario, los MPs primarios han sido diseñados con un tamaño inferior a los 5 mm desde su origen. Chaves et al., 2024 explican que estos MPs son producidos intencionalmente para su uso en diversos productos comerciales, especialmente en la industria cosmética y de cuidado personal, en este contexto, es común encontrar pequeñas microesferas de plástico en artículos como exfoliantes, limpiadores faciales y geles de baño. Por otro lado, los MPs secundarios aparecen a partir de la fragmentación de objetos plásticos más grandes que, a medida que transcurre el tiempo, se degradan gracias a la acción física, química y biológica. De hecho, y en este contexto, Álvares et al., 2020 argumentan que elementos como la radiación solar, la acción del viento, el agua, la fricción y el paso del tiempo favorecen la descomposición de botellas, bolsas, envases, redes de pesca y otros

Universidad de Concepción

residuos plásticos en pequeñas partículas diseminadas en el medio ambiente, esto es un proceso que puede bien desarrollarse patentemente a nivel terrestre como en el acuático, de ahí que los MPs secundarios sean muy difíciles de controlar y rastrear. Los MPs se acumulan más en entornos terrestres que en entornos acuáticos debido a que los entornos terrestres tienen más fuentes de MPs y se ven afectados con mayor frecuencia por las actividades humanas (Wang et al., 2022). Además, los entornos terrestres son más complejos que los marinos, y los MPs son más difíciles de degradar o migrar en entornos terrestres (Wu et al., 2022). La transferencia, dispersión e impacto desde las actividades antropogénicas a los suelos y en particular a los agrosistemas es complejo de comprender y en gran parte está inexplorado, por ende, la presencia de estos contaminantes debe ser tratado como una amenaza futura para la seguridad alimentaria y la agricultura sostenible (Sarker et al., 2020).

Investigaciones indican que el mulch plástico y el agua de riego podrían contribuir sustancialmente a la acumulación de MPs en suelos cultivables (Kumar et al., 2020; Serrano-Ruiz et al., 2021). Zhou et al. (2020) demostraron que el suelo con mantillo en las áreas de cultivo contiene altos niveles de MPs, y los fragmentos de polipropileno y las fibras de poliéster probablemente entraron en los suelos a través del riego, esto indica, que el agua de riego puede desempeñar un papel importante en la fuente y distribución de MPs.

Por ende, la importancia de los sistemas de riego como una fuente de contaminación por Mps a los agrosistemas y a la matriz edáfica es considerable, ya que estos contaminantes pueden migrar potencialmente llegando a los humanos a través de la red alimentaria (Lu et al., 2019).

Por tanto, de una data de más de 35 canales de riego proporcionados por la Junta de Vigilancia del Río Ñuble, en la Región de Ñuble; fueron seleccionados 3 canales de riego como área de estudio, los cuales captan agua en diferentes puntos del río ya mencionado y donde además en sus cercanías se desarrollan actividades antrópicas locales de diferente magnitud.

1.1.Pregunta de investigación

Debido a la incorrecta gestión de residuos en el área rural, ¿la proximidad a las fuentes contaminantes determina la cantidad de microplásticos y sus características en los canales de riego?

1.2.Objetivos

1.2.1.Objetivo general

Evaluar la distribución espacial de microplásticos considerando su abundancia y tipología, en un sistema de canales de riego en el Valle Central de Riego de la Región de Ñuble.

1.2.2.Objetivos específicos

- Determinar concentraciones y características de microplásticos presentes en canales de riego
- Identificar posibles fuentes aportantes de microplásticos al sistema de riego
- Analizar distribución espacial de microplásticos identificando su asociación con las actividades antrópicas presentes en el área de estudio

2. ANTECEDENTES

2.1. Evolución del plástico

El plástico se define como cualquier polímero orgánico sintético que es una mezcla de petróleo y se deriva de combustibles fósiles. Está diseñado para ser barato, ligero, duradero, resistente a la corrosión y a los productos químicos con fuertes propiedades térmicas y eléctricas y alta resistencia a la tracción y elasticidad, lo que lo hace versátil en su utilización (Jadhav et al., 2022). La contaminación plástica es un problema ambiental generalizado a nivel mundial y un componente central de la “triple crisis planetaria” (Whitman et al., 2025).

Universidad de Concepción

El uso de plástico durante los últimos 70 años se ha intensificado de manera exponencial, iniciando durante la década de 1950 con una producción mundial aproximada de 2 millones de toneladas por año y alcanzando para 2024 más de 400 millones de toneladas, donde más del 90% es de origen fósil y cuya producción se encuentra liderada por países como Estados Unidos, China y Países Europeos (Ritchie y Roser, 2018; Plastics Europe, 2025). En cuanto al panorama nacional, Chile se ubica como uno de los mayores generadores de residuos plásticos en América Latina, observándose al plástico como un material transversal que se utiliza en todas las industrias, los sectores económicos que dominan el consumo de plástico se concentran en envases (48%) y construcción (21%) alcanzando para 2024 más de 1 millón de toneladas métricas de las cuales solo el 8,5% es reciclado, pese a que el reciclaje de los plásticos ha tenido un crecimiento sostenido en el país en los últimos cinco años gracias a la promulgación de políticas públicas que fomentan su reciclaje, estas no han sido del todo efectivas ya que sigue un elevado porcentaje del plástico terminando en rellenos sanitarios, vertederos o el ambiente (Asipla, 2024; Fundación Chile, 2024)

A diferencia de otros materiales, el plástico no se biodegrada. Puede tardar cientos de años en descomponerse, por lo que, cuando se desecha, se acumula en el medio ambiente hasta alcanzar un punto crítico (UNEP, 2023). A medida que los residuos plásticos se acumulan, se han convertido en un contaminante generalizado, que se infiltra en entornos naturales, incluidas incluso las regiones más remotas y prístinas, como los casquetes polares y los territorios deshabitados (Majnooni et al., 2024; Schwarz et al., 2019). Por tanto, esta distribución generalizada subraya la escala global de la crisis de contaminación plástica, que es más evidente en la acumulación de desechos plásticos más grandes, pero también está impulsada por la forma de partículas pequeñas conocidas como MPs (Ghanbari Tapeh et al., 2022).

2.2. Microplásticos (MPs)

El creciente volumen de literatura sobre MPs destaca la creciente preocupación mundial en torno a la contaminación plástica, teniendo en cuenta que la primera investigación fue realizada en el año 2004 por el autor Richard Thompson con su artículo *Lost at Sea: Where Is All the Plastic?* (Perdido en el mar: ¿Dónde está todo el plástico?), dando inicio, a la investigación de un problema hasta el momento ignorado, si bien la investigación se ha

Universidad de Concepción

centrado mayoritariamente en los MPs en el entorno marino, solo recientemente se ha intensificado la investigación sobre MPs en entornos terrestres y acuáticos continentales (Talbot y Chang, 2022). Desde el año 2015 el tema experimentó un aumento constante y la tendencia general destaca un interés sostenido en comprender el impacto ambiental de los MPs en diversos ecosistemas (Ibrahim et al., 2025).

Hoy en día, aún no se llega a un consenso completo por parte de la comunidad científica en lo que respecta al rango de tamaño considerado para un MPs, por ejemplo, la Administración Nacional Oceánica y Atmosférica (NOAA) define los MPs como partículas de plástico menores de 5 mm, mientras que la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (EPA) los define como partículas dentro del rango de tamaño de 5 mm a 1 nm, para efectos de este estudio se consideraron las partículas plásticas de acuerdo a la última definición, adicionalmente, además del tamaño se considerarán como microplásticos aquellas partículas compuestas principalmente por polímeros sintéticos, lo cual se determinará mediante el análisis de la composición de cada partícula.

2.3. Problemática

Los MPs han surgido como una preocupación ambiental significativa debido a su amplia distribución, naturaleza y su pequeño tamaño haciendo que sean fáciles de inhalar por los humanos y absorbidos por las plantas lo que puede provocar varias complicaciones (Ghosh et al., 2023; Lalrinfela et al., 2024). Uno de los entornos ambientales más afectados es el suelo, y dada su creciente acumulación de MPs, las consecuencias pueden ser en sus propiedades fisicoquímicas, afectando la estabilidad de los agregados del suelo, los cuales son componentes básicos de su estructura (Rillig et al., 2021). Dicha alteración inducida por MPs en la fertilidad del suelo impone efectos negativos indirectos en el crecimiento de las plantas y también en la fauna, donde en esta última los efectos pueden ir desde efectos en el crecimiento y reproducción hasta la mortalidad especialmente en altas concentraciones (Zhou et al., 2023; Büks et al., 2020). Respecto a la flora, los MPs pueden ser absorbidos o adsorbidos por sus raíces, cabe destacar que los MPs no pueden entrar en los tejidos de las plantas directamente como se espera porque sus partículas de gran tamaño les impiden entrar en las paredes celulares de la planta (Teuten et al., 2009) mientras que las

Universidad de Concepción

nanopartículas de plástico las cuales poseen un tamaño inferior a 1 μm (nanoplásticos) pueden entrar directamente en las paredes celulares, si bien la evidencia sobre el impacto de las partículas micro y nanométricas en las plantas agrícolas es relativamente escasa, recientemente algunos estudios han reportado sus efectos en plantas vasculares como la cebolleta (*Allium fistulosum*) reportándose cambios en su biomasa, composición de tejidos y características de las raíces, esto plantea que estas partículas entran en los organismos, incluidos los humanos principalmente a través de la cadena alimentaria, pudiendo ingresar al tejido pulmonar, tracto gastrointestinal y cardiaco causando toxicidad, estrés oxidativos y un aumento en el riesgo de neoplasia (Pang et al., 2021; de Souza Machado et al., 2019; Prata et al. 2020; Zhang et al., 2025).

Además, en el año 2023 la Asamblea de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA) y la Secretaria de los Convenios de Basilea, Rotterdam y Estocolmo, elaboraron un informe titulado “Sustancias químicas en los plásticos 2023”, el cual tuvo como objetivo informar a la comunidad internacional sobre los problemas de la contaminación por plásticos, a menudo ignorados, relacionados con las sustancias químicas, tales sustancias químicas hacen que los productos plásticos sean más resistentes, más coloridos o resistentes al fuego. Más recientemente en el año 2024, el proyecto PlastChem, público un proyecto titulado “Estado de la ciencia sobre los productos químicos del plástico”, donde se reporta que existen al menos 16.000 sustancias químicas conocidas que potencialmente se utilizan o están presentes en los plásticos, de los cuales más de 4200 productos químicos plásticos (25%) son peligrosos para la salud humana o el medio ambiente, también se indica que los plásticos son una fuente importante de exposición debido que más de 1800 sustancias químicas preocupantes tienen un alto potencial de exposición y cada tipo importante de plástico puede contener al menos 400 sustancias químicas preocupantes. Por último este informe destaca la carencia de transparencia es decir la poca información pública que existe sobre la identidad, estructura, funciones y peligros de los productos químicos plásticos utilizados en la industria (Wagner et al., 2024).

Universidad de Concepción

Finalmente, cabe destacar otra problemática adicional a la contaminación por MPs, es que estos también pueden actuar como portadores de contaminantes existentes en el medio ambiente como metales pesados, agroquímicos y contaminantes orgánicos, agravando aún más sus efectos (Rai et al., 2023). Todo esto pone en evidencia la complejidad de abordar este problema.

2.3.1. Área problema

La Región de Ñuble cuenta con una superficie aproximada de 13.178 km², equivalente al 1,7% del territorio nacional. La región cuenta con un 9,6% de la superficie nacional dedicada a cultivos de acuerdo con datos del Censo Agropecuario y Forestal 2007, Ciren y SAG, junto con las regiones del Maule, Biobío y Araucanía. Las principales actividades que se desarrollan son las plantaciones forestales seguida por cereales y plantas forrajeras, estas dos últimas con una menor participación. Teniendo presente que la agricultura constituye una importante actividad económica en la región, existen áreas donde se concentra en mayor medida, como el Valle Central de Riego el cual es una zona plana, con agua superficial obtenida, principalmente, desde los ríos y conducida a través de una extensa red de canales, por lo que concentra la mayor superficie de cultivos regados, dada sus bajas pendientes, permitiendo la existencia del riego gravitacional. El Río Ñuble corresponde al principal cuerpo de agua que abastece esta red de canales, ver figura N°1.

La principal red de canales presente en el Valle Central de Riego es la administrada por la Junta de Vigilancia del Río Ñuble, la cual conforma un distrito de canales de riego que abarca un área de riego de aproximadamente 60.000 ha y una longitud de 1.400 km en canales de riego, esta zona se ubica dentro de las comunas de San Nicolás, Ñiquén, San Carlos, Coihueco y Chillán y también cabe mencionar que la red de canales se encuentra dentro de dos importantes cuencas, las cuales son la Cuenca del Río Maule y la Cuenca del Río Itata, resaltando que las cuencas corresponden a la unidad natural del ciclo del agua y por ende la gestión de esta a este nivel permitirá proteger el recurso de una manera integral.

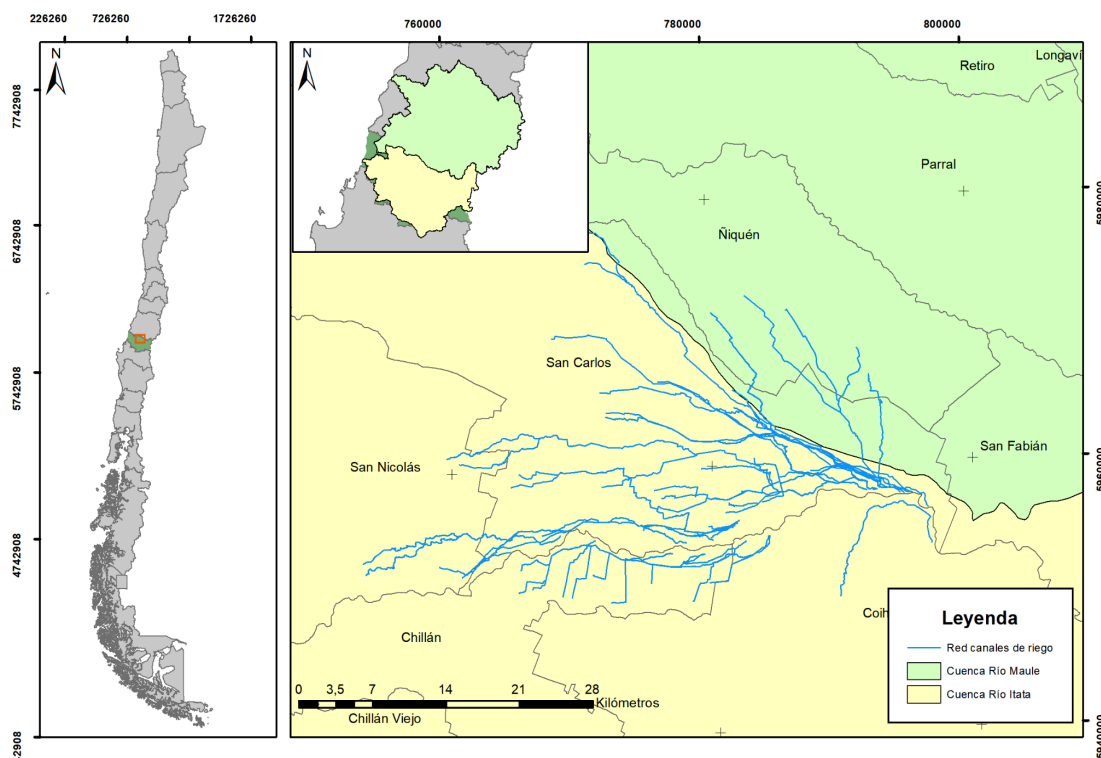


Figura 1. Mapa ubicación de canales Junta de Vigilancia Río Ñuble.

Nota: Elaboración en base a red de canales proporcionada por Junta de Vigilancia Río Ñuble.

2.4. Plástico en la agricultura

Los productos de plástico se han convertido en una herramienta muy útil en múltiples esferas de la vida y la agricultura no es la excepción, estos son utilizados para todo, desde las bandejas para semilleros y tuberías de riego hasta envases de plaguicidas y sacos de pienso para el ganado, una vez este plástico cumple su función solo una pequeña parte del plástico agrícola se recoge y recicla: mientras que la mayor parte se entierra o se deposita en vertederos, con los consiguientes efectos negativos. Estos plásticos abandonados tienden a degradarse y por ende se derivan los ya mencionados MPs (FAO, 2023).

Los suelos agrícolas se consideran el principal sumidero de contaminación de MPs y cuando estos ingresan en el suelo, pueden cambiar sus propiedades físicas y químicas, como la estructura, la porosidad el pH y la disponibilidad de nutrientes, llegando a destruir la comunidad microbiana del suelo (Yingjin et al., 2022; Wang et al., 2022; Liu et al., 2019).

Universidad de Concepción

También, la presencia de MPs puede inhibir la germinación de las semillas y ser transportados a los tallos y las hojas desde las raíces, interfiriendo así con el crecimiento de las plantas (de Souza Machado et al., 2019). Adicionalmente se informó que los nanoplasticos de un tamaño inferior a 50 nm pueden ingresar a las células vegetales, pasar a través de la cadena alimentaria y causar daño al cuerpo humano (Sun et al., 2022).

Los MPs son un contaminante físico del suelo y los datos iniciales sugieren que las microfibras pueden reducir la densidad aparente del suelo, la cantidad y características de los MPs en el suelo varía en función de su uso, pero se destaca que las fuentes principales de MPs en los suelos de uso agrícola son el mantillo o acolchado agrícola, los fertilizantes orgánicos, el agua de riego, la basura y la abrasión de neumáticos de automóviles y posiblemente otras fuentes contribuyen sustancialmente a la acumulación de MPs en suelos cultivables (de Souza Machado et al., 2018; Zhaorong et al., 2020; Zhang et al., 2022).

La entrada continua de MPs plantea importantes desafíos para la salud del ecosistema edáfico y la seguridad de los cultivos, especialmente en las cuencas hidrográficas agrícolas, como es el caso del área de estudio de esta investigación.

2.5. Posibles fuentes aportantes al suelo agrícola

Los suelos agrícolas poseen una fuerte entrada anual de MPs a los suelos de entre 4 a 23 veces mayor que en los océanos (Horton et al., 2017), es por esto que a continuación se describen potenciales fuentes que de acuerdo a diversos autores son una vía de entrada importante de MPs a los suelos agrícolas.

2.5.1. Mantillo agrícola

Los datos estadísticos muestran que aproximadamente 20 millones de hectáreas de tierras de cultivo en todo el mundo tienen acolchado plástico, y China representa la mayor proporción (~90 %) (Steinmetz et al., 2016). Además de tener en cuenta que el consumo mundial de película de acolchado fue de aproximadamente 8 millones de toneladas por año, el uso de acolchado plástico como invernaderos y mulching es una técnica importante

Universidad de Concepción

comúnmente utilizada para promover el rendimiento de los cultivos en regiones áridas y frías del mundo (Scarascia-Mugnozza et al., 2011; Liu et al., 2021). Aunque los inconvenientes de usar mantillo de plástico se esperaban incluso en tiempos anteriores, sus beneficios eran enormes. Por ejemplo, los mantillos de plástico aumentan en gran medida la eficiencia del uso del agua al reducir la transpiración y la evaporación de la planta y el suelo. El uso eficiente del agua también mejora la eficiencia de los recursos nutricionales de las plantas (Yu et al., 2018). Juega un papel crucial en las regiones frías donde se utiliza para el aislamiento térmico. Además, la plantación temprana y la cosecha de cultivos en áreas frías se vuelven posibles con el uso de mantillos en los campos de cultivo debido a su efecto invernadero (Liu et al., 2018). El control de las plagas de las plantas también es más efectivo con el uso de mantillo plástico, ya que ayuda a la retención de los pesticidas en el microclima creado por el mantillo (McIntosh et al., 2022). Además de reducir la erosión del suelo, la estructura del suelo dentro del mantillo también se ve afectada. El suelo debajo del mantillo permanece más suelto y aireado, lo que ayuda a la penetración de las raíces y mejora el crecimiento y las actividades de los microbios (Bandopadhyay et al., 2018). Los mantillos de color reducen la penetración de la luz en el suelo y las malas hierbas, generalmente no sobreviven en tales condiciones. Además, las malas hierbas solo crecerían entre franjas de películas de mantillo, lo que facilita mucho su extracción, ya sea por medios mecánicos o mediante el uso de herbicidas. Los fertilizantes tampoco se lixivian innecesariamente si hay una aplicación excesiva de agua (Khalid et al., 2023)

En los agroecosistemas, el uso de acolchado plástico es el principal factor que causa la acumulación de MPs en el suelo (Huang et al., 2020). Actualmente se considera que los ecosistemas terrestres contienen más plásticos que los océanos (Nizzetto et al., 2016, Van Sebille et al., 2015). Según un informe, se encontraron 306 partículas de MP por kg de suelo en tierras agrícolas (Corradini et al., 2021). Retirar todo el acolchado plástico del campo requiere mucho tiempo y mano de obra. Por lo tanto, al final de la temporada de cultivo (por ejemplo, el cultivo de fresas el cual utiliza el mulch y este debe ser renovado cada 18 meses) , quedan muchos fragmentos de plástico en el campo, generándose una acumulación inevitable, y por ende, convirtiéndose en pequeñas partículas de plástico (MP) tras la meteorización. En consecuencia, el problema de contaminación que generan los

mantillos de plástico tal vez supere los beneficios a corto plazo asociados a él (Khalid et al., 2023).

2.5.2. Fertilizantes orgánicos

La gestión de los residuos orgánicos por medio de técnicas como el compostaje, ha sido promovido por iniciativas tanto a nivel global y local, esta práctica trae una serie de beneficios mejorando la salud y estructura del suelo, además de combatir el cambio climático y reducir la basura (MMA, 2021). Lamentablemente el uso de fertilizantes orgánicos constituye una de las principales vías a través de las cuales los MPs ingresan al medio ambiente, en el compost el plástico proviene de sistemas inadecuados de gestión de residuos, donde se utilizan bolsas de plástico para la recolección y eliminación de residuos, además de envases de alimentos, películas, artículos recubiertos de plástico y otros tipos de plástico que se recogen con los biorresiduos. Durante el compostaje estos plásticos pueden desintegrarse debido al volteo mecánico y a las temperaturas termófilas alcanzadas, liberando macroplásticos, microplásticos y nanoplásticos que contaminan el compost terminado (Okori et al., 2025).

Además del compost, otro tipo de fertilizante orgánico ampliamente usado son los lodos de depuradora, estos contienen MPs transportados desde los hogares y las industrias a través de las aguas residuales, se estima que el 90% de los MPs de las aguas residuales se retienen en el tanque de sedimentación de las plantas de tratamiento de aguas residuales más eficientes y termina en la fracción de lodos (Vollertsen & Hansen, 2017). A menudo se trata de partículas más pequeñas, por ejemplo, fibras de ropa y paños de cocina/esponjas, residuos de caucho de neumáticos de automóviles, pintura y en menor medida, plástico añadido deliberadamente en productos cosméticos.

En Chile el manejo de lodos generados en plantas de tratamiento de aguas servidas se encuentra regulado por el D.S. N°4 del Ministerio secretaría general de la presidencia el cual establece los requisitos de aplicación de lodos a suelos cultivables el cual puede ser aplicado una sola vez. Existe evidencia que la aplicación de lodos en los suelos (fertilizantes) dieron como resultado un aumento de los recuentos de MPs en algunas muestras de suelo dentro del territorio chileno. Al evaluar campos agrícolas con diferentes

registros de aplicación de lodos, se evidencia la acumulación de MPs a lo largo del tiempo. Los datos revelaron una alta concentración de MPs en los suelos, lo que respalda el hecho de que los lodos son un factor determinante de la contaminación por MPs del suelo (Corradini et al., 2019).

2.5.3. Agua de riego

Los canales de riego corresponden a un conjunto de obras que permiten conducir las aguas, principalmente a nivel extra predial, desde el punto de captación (bocatomas) hasta el área de riego (Comisión Nacional de Riego, s.f.). Teniendo presente que la ganadería junto con la agricultura son las principales actividades económicas de las regiones del centro y del sur de Chile, el uso de estas aguas es cada vez más frecuente, y por ende un seguimiento de su calidad es altamente relevante. En nuestro país el agua de riego se encuentra regulada por la NCh 1333 la cual establece los criterios de calidad que el agua debe cumplir para no dañar los cultivos ni el suelo, además mediante la Ley N°18.450 (Ley de Riego) se fomenta y subsidia proyectos de riego y la mejora de la infraestructura hídrica, por ende las redes de riego son cruciales en nuestro país ya que son responsables de garantizar la producción agrícola al proporcionar agua de manera eficiente, especialmente en zonas con precipitaciones escasas de esta manera se optimiza el uso de los recursos hídricos.

Las investigaciones enfocadas en la presencia de MPs en agua de riego, son más bien escasas y recientes donde autores como Jiang et al., 2023 y Jiries et al 2024 (lo cual se logra observar en la tabla N°1) han realizado estudios en sistemas de riego, los cuales analizan y evalúan abundancia y características de las partículas plásticas encontradas en países como Taiwán y Jordania respectivamente.

Tabla 1.

Recopilación de estudios de análisis de MPs realizados en distintos canales de riego a nivel mundial.

País	Concentración	Características (Forma, color, tamaño y tipo de polímero)	Distribución	Fuentes aportantes
Taiwán	1,88 - 141 partículas/L	Fibras (64%), 333-1000 µm, blanco/transparente y PP y PE	Mayor abundancia en sitios cercanos a ciudades	Actividades locales, áreas urbanas densas y aguas residuales de lavado de ropa.
Jordania	6,6 - 12,9 partículas/L	Fibras, 100-300 µm y poliéster y polietileno	Correlación actividades humanas y concentraciones	Equipo de plantación, sistemas de riego, ropa de trabajo y mantillo agrícola.

Fuente: Jiang et al., 2023 y Jiries et al 2024.

Así como hacia el suelo agrícola existe una variada cantidad de fuentes que aportan MPs lo mismo ocurre para el agua de riego la cual tiene como destino final regar cultivos, a diferencia del suelo este es un sistema dinámico en constante movimiento, el cual pasa por suelos con diferentes usos y donde recorre zonas que son potencialmente fuentes contaminantes de estas aguas, de tales potenciales fuentes destacan edificaciones, microbasurales, el uso del plástico en la agricultura local y las carreteras.

3. METODOLOGÍA

3.1. Área de estudio

De la gran y extensa área que compromete la red de canales de riego, se seleccionaron 3 canales de riego, estos fueron Collico, Goana Perales Ranchillo (de ahora en adelante San Carlos) y Rinconada de Cato, los cuales se seleccionaron ya que sus puntos de captación se ubican a diferentes alturas a lo largo del Río Ñuble y también presentaron puntos sobre lo que establecen los límites de la normativa vigente en coliformes fecales tal punto se describirán en mayor detalle en el punto datos previos de calidad de agua.

Universidad de Concepción

Alrededor de los canales ya mencionados se estableció un área de estudio o zona de influencia, de 1 km de distancia alrededor del respectivo canal (ver figura N°2), tal distancia se seleccionó teniendo como referencia estudios previos en otros cuerpos de agua, como el estudio presentado por Ye et al., 2023, donde establece radios de amortiguación de 1 km alrededor de los puntos de muestreo en el Río Yangtze en China, para de esta manera poder identificar los diferentes usos de suelo, de ese modo en el presente estudio se llevó a cabo una metodología similar, al acotar el área de estudio a un área de influencia de 1 km alrededor de cada canal de riego para así de esta manera poder identificar las potenciales fuentes aportantes de contaminación plástica. Es importante destacar que pese a una acotación del área de estudio, en el ambiente ocurren una serie de mecanismos de transporte de MPs que se escapan de los límites del área de influencia, tales mecanismos pueden ser el viento, la escorrentía superficial, la deposición atmosférica, etc.

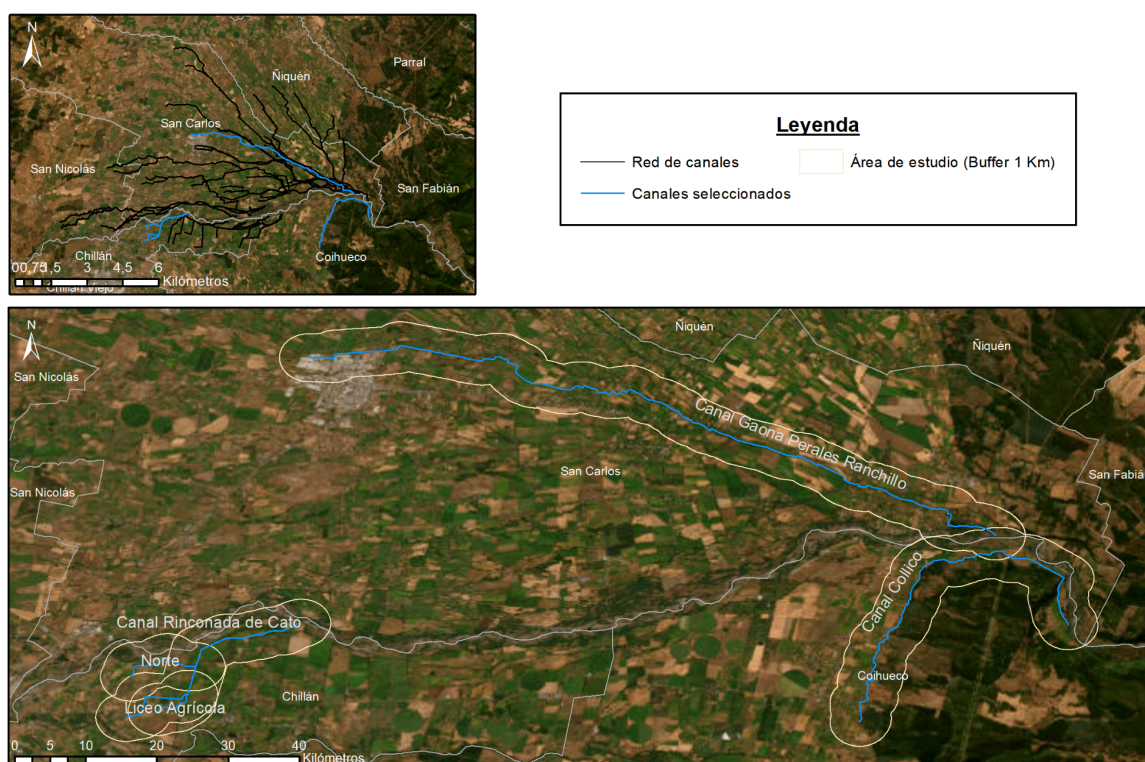


Figura 2. Mapa área de estudio.

Nota: Elaboración en base a red de canales proporcionada por Junta de Vigilancia Río Ñuble.

3.2. Muestreo

La campaña de muestreo se llevó a cabo desde el 6 al 8 de enero de 2025, se muestreó 1 canal por día por lo tanto en los 3 días se consiguió el muestreo completo, los recipientes utilizados fueron de materiales como vidrio y aluminio (revisar anexo 1 para mayor detalle) para de esta manera evitar contaminación cruzada. Se seleccionaron 9 puntos de muestreo por canal de riego, donde en cada punto se extrajeron un total de 5 L de agua, las muestras fueron almacenadas en botellas de vidrio y debidamente rotuladas para su transporte al laboratorio, una vez las muestras en laboratorio se almacenaron en un frigorífico para su posterior análisis.

Además, en cada punto de muestreo se realizó la medición de los parámetros físicos-químicos como parte de la caracterización del cuerpo de agua, tales parámetros son pH, Oxígeno disuelto, porcentaje de oxígeno disuelto, temperatura y conductividad, lo cual se realizó con un medidor multiparamétrico.

Por último, los puntos de muestreo en cada canal se clasificaron de acuerdo con su entorno inmediato, tal clasificación fue de acuerdo a los siguientes entornos, agrícola (A), carretera (C) y urbano (U).

Universidad de Concepción

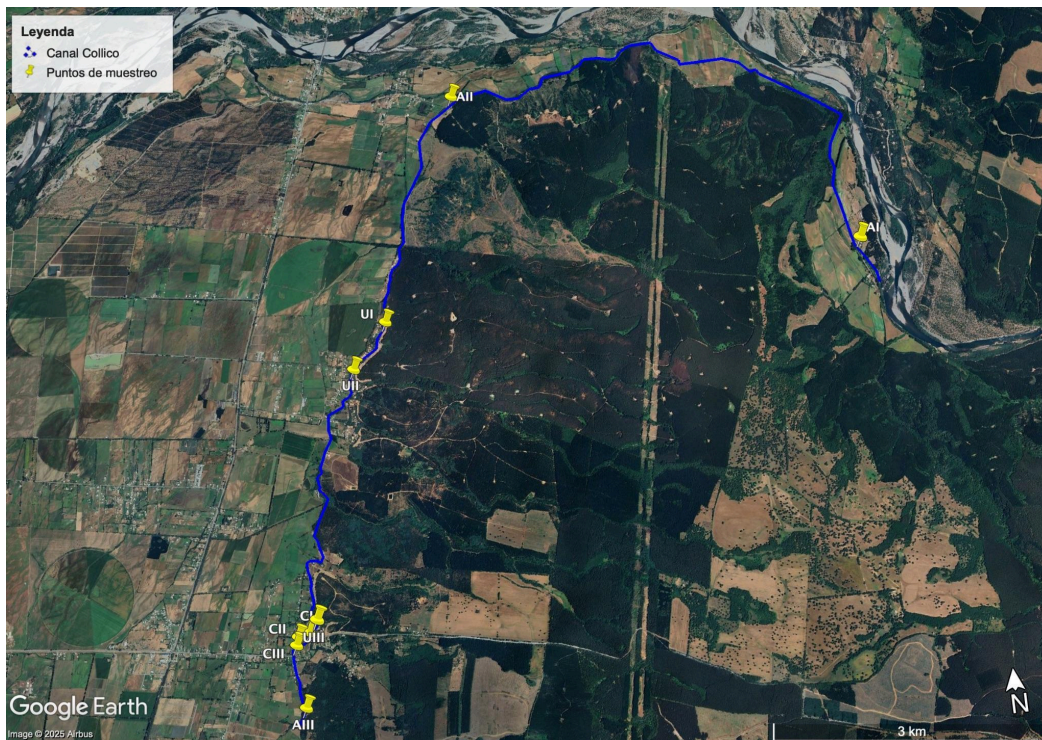


Figura 3. Mapa puntos de muestreo, canal Collico.

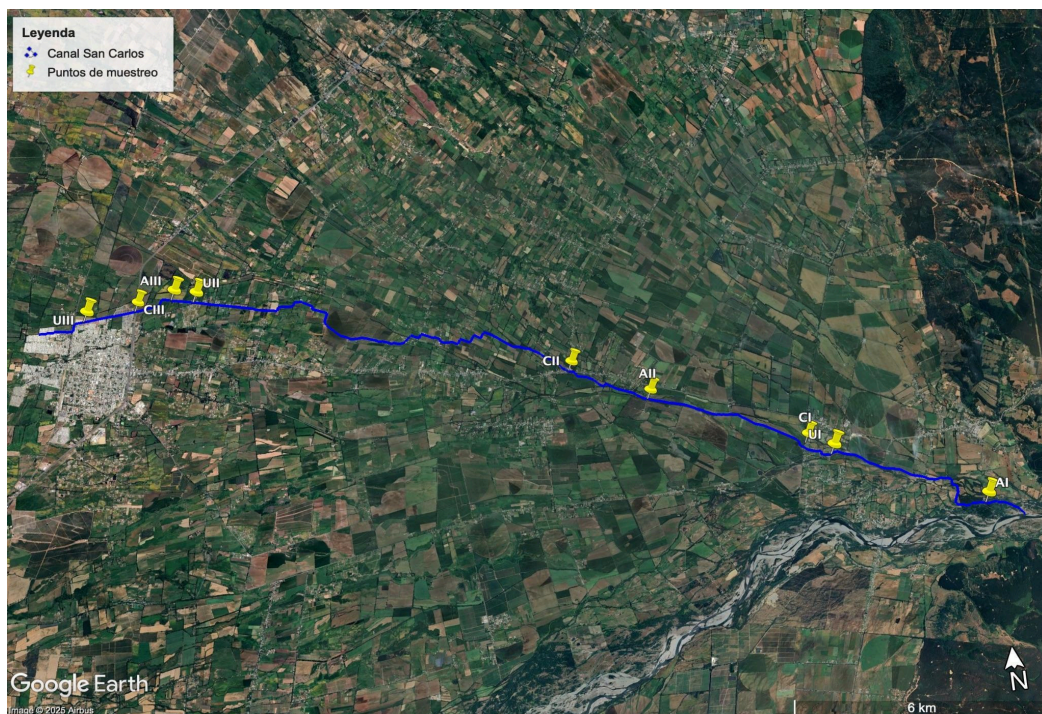


Figura 4. Mapa puntos de muestreo, canal San Carlos o Gaona Perales Ranchillo.

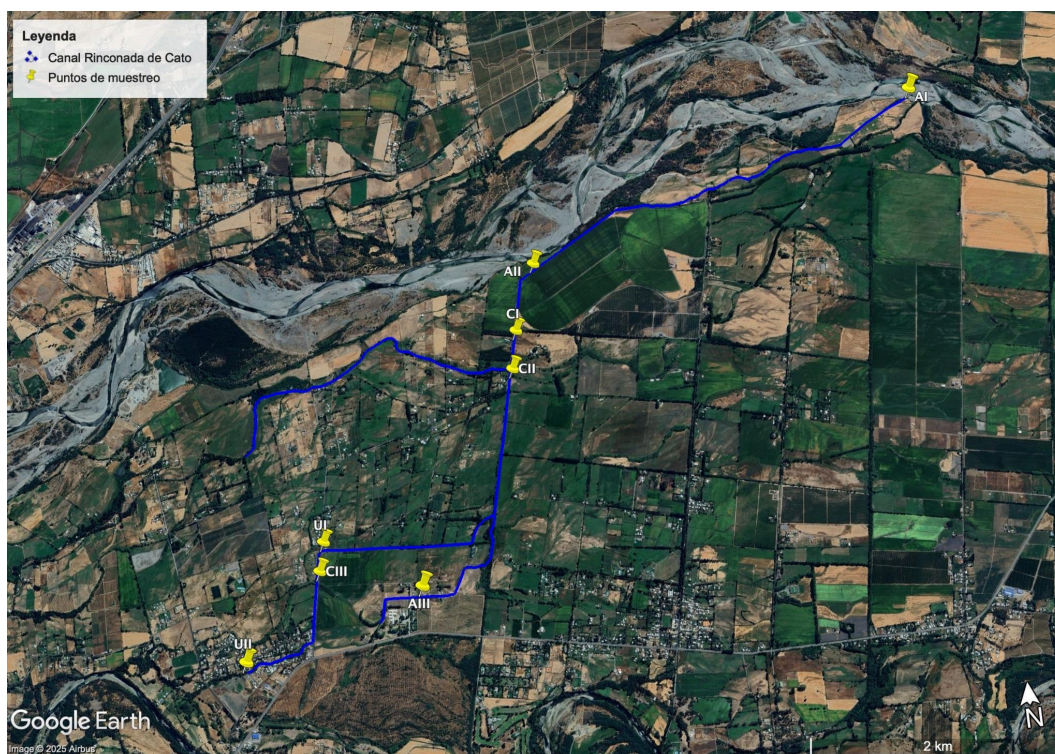


Figura 5. Mapa puntos de muestreo, canal Rinconada de Cato.

3.2.1. Extracción de microplásticos

Se filtraron los 5 L de agua utilizando un filtro de fibra de vidrio ($1.6\ \mu\text{m}$) empleando un sistema de bomba de vacío. Los filtros fueron almacenados en una placa de Petri a 4°C hasta su posterior análisis.

Todos los envases utilizados fueron de vidrio, y se mantuvieron cubiertos con papel aluminio hasta su uso. Los recipientes fueron lavados con agua Mili-q antes de ser utilizados nuevamente.

La extracción de microplásticos se basó en el método descrito por Botterell et al. 2022, Courtene-Jones et al. 2022 y La Daana et al. 2017.

3.2.2. Análisis microplásticos

Para llevar a cabo el análisis de las partículas, es necesario contar con dos equipos principalmente, estos corresponden a un estereomicroscopio y un espectrómetro FT/IR, los cuales se detallaran a continuación:

- **Microscopio de disección**

Un microscopio de disección, también conocido como estereomicroscopio, se define como un instrumento compuesto de baja potencia que se utiliza para examinar muestras tridimensionales. Proporciona una imagen vertical de alta calidad con una profundidad de campo considerable y una gran distancia de trabajo. Permite apreciar fácilmente las relaciones espaciales dentro de la muestra al observar con ambos ojos desde puntos de vista ligeramente diferentes (C. Hammond & P J Evennett, 2005). Para este estudio, se utilizó un estereomicroscopio modelo Olympus SZ61, el cual se logra observar en la figura N°6, este usa dos trayectorias ópticas separadas para producir una imagen diferente en cada ojo, lo que permite una visión tridimensional del objeto de interés, con acercamientos de 10 a 40 veces la distancia real y sin necesitar de algún tipo de medio especial (Pérez Hoyos, 2018). Por ende, este equipo fue utilizado para un análisis de las características físicas de las partículas es decir la cantidad de MPs, su color y forma/morfología de las partículas, las cuales se agrupan en, fibras, esponjas, fragmentos y film.



Figura 6. Estereomicroscopio binocular.

Fuente: University of Alberta, Department of Biological Sciences. (2018).

- **Espectrómetro infrarrojo FT/IR**

El Espectrómetro Infrarrojo con Transformada de Fourier (FT-IR), es una técnica de espectroscopia vibratoria que puede proporcionar información de enlaces químicos y grupos funcionales de muestras (Araujo et al.2018; L[^]der y Gerdt, 2014). Cuando se utiliza la espectroscopia infrarroja transformada de Fourier para identificar el componente químico de los MPs, los cambios del momento del dipolo del material producen espectros infrarrojos (Prata et al. 2019). Luego, estos espectros infrarrojos se comparan con espectros estándar de polímeros conocidos en bibliotecas espectrales para determinar la composición química de los MPs (L[^]der y Gerdt, 2014; Song et al. 2015). Esta técnica tiene como ventaja en el análisis de MPs, que no es un método de análisis invasivo además de poseer un alto rendimiento en la detección del polímero (Huang et al., 2023). El equipo utilizado fue un espectrómetro FT/IR-4600 Jasco, el cual se puede visualizar en la figura N°7. Además, en base al estudio de Jiang et al., 2023 el cual en su investigación sobre MPs en agua de riego considero que los grados de coincidencia aceptable fueron $\geq 70\%$, lo que indica que la verificación de los MPs era confiable, por lo tanto para efectos de esta investigación los grados de coincidencia fueron considerados los mismos que dicho autor.



Figura 7. Espectrómetro FT-IR FTIR-4600 Jasco.

Fuente: <https://www.directindustry.es/prod/jasco-europe/product-30625-1753443.html>

3.3. Identificación fuentes portantes de microplásticos al agua de riego

La identificación de posibles fuentes aportantes de contaminación plástica en el área de trabajo es de suma importancia, teniendo como base literatura que destaca a las fuentes seleccionadas por su potencialidad de aporte como fuente de MPs y además de que estas se desarrollen en el área de estudio, en esta investigación se identificaron 5 fuentes potenciales, las cuales se describirán a continuación:

3.3.1. Uso de plástico en agricultura

Como se ha mencionado con anterioridad, actualmente el uso de tecnologías basadas en plásticos como mulching, tuberías, invernaderos, etc. ha experimentado un aumento notable, es por esto que dentro del área de estudio se llevó a cabo una exploración espacial mediante el software Google Earth Pro y esto complementado con lo identificado durante la campaña de muestreo se reunieron los sitios, dentro del área de influencia de 1 km.

3.3.2. Carreteras

Diversos autores indican que el desgaste de los neumáticos de los vehículos en carreteras es una fuente importante de MPs en el ambiente (Giechaskiel et al., 2024). Es por esto que se obtuvieron datos del “Observatorio de ciudades UC” donde se descargó la Red Vial de Chile y posteriormente se trabajaron dichos datos en el software Arcgis, identificando las carreteras presentes dentro del área de influencia de 1 km.

3.3.3. Microbasurales

Los microbasurales corresponden a una acumulación no autorizada de residuos sólidos de menor escala, que se encuentran presentes principalmente en áreas urbanas y rurales (BCN, 2023), la limpieza de estos sitios suele estar en manos de los municipios correspondientes, es por esto que primeramente mediante llamada telefónica se contactó con los municipios para solicitar información al respecto, al no contar con respuesta de estos, se procedió a la solicitud de datos georreferenciados mediante el portal de transparencia activa del municipio. Además, cabe destacar que durante la campaña de muestreo también se identificaron estos sitios.

3.3.4. Edificaciones

Las viviendas, ubicadas en zonas rurales son un problema a la hora de la gestión de residuos y aguas servidas, debido a la falta de infraestructura adecuada, esto se debe principalmente a que estas áreas se encuentran alejadas y existe una menor densidad poblacional por tanto estos lugares no reciben la misma atención que las zonas urbanas.

Para llevar a cabo su identificación, se descargó una base de datos geoespaciales de Google Earth Engine, tales datos fueron recortados en un área de influencia de 100 m para cada canal, esta distancia fue considerada en base a lo que establece el D.S. 236, MINSAL (1926) el cual fija el reglamento general para alcantarillados particulares (fosas sépticas, etc.) en zonas sin redes de alcantarillado público, donde además se fija la distancia mínima de viviendas a diferentes fuentes de agua potable como pozos, norias o manantiales, en esta norma no se consideran canales de riego ya que no son un suministro de agua de bebida, pero se consideró esta distancia como referencia.

3.3.5. Datos previos de calidad de agua

La NCh 1333/1987 MOP, que establece los requisitos de calidad de agua para diferentes usos, entre ellos agua de riego, esta norma exige la medición de diferentes parámetros físico-químico-biológicos, entre ellos coliformes fecales para lo cual se exige un límite máximo de 1000 NMP/100 ml, este límite fue evaluado en los datos proporcionados para de esta manera identificar presencia de contaminación fecal por sobre lo que establece la normativa vigente.

Además, se evaluaron los datos proporcionados de mediciones de *Streptococos* fecales los cuales junto con Coliformes fecales se aplicó una relación donde es posible establecer el origen de la contaminación fecal en el agua, debido a que esta proporción varía entre heces animales y humanas, esta relación fue propuesta por Geldreich y Kenner en 1969 e indica que si $FC/FE > 4,0$ la contaminación es de origen humano, si la relación $FC/FE < 0,7$ indica que el origen de la contaminación es animal y en el intervalo $< 4,0$ y $> 0,7$ indica contaminación mixta (Rivera et al., 2010).

Universidad de Concepción

Los puntos resultantes se complementaron con los datos de edificaciones ya que es probable que en los puntos donde existe presencia de contaminación fecal también existen viviendas cercanas que pudieran estar aportando aguas residuales a los canales de riego.

Cabe destacar que estos datos fueron proporcionados de manera confidencial por parte de la Junta de Vigilancia del Río Ñuble, los cuales entregaron resultados de mediciones correspondientes al año 2024 y 2023 en más de 180 puntos dentro de la red de canales.

Todas las fuentes mencionadas, se trabajaron en ArcMap 10.4.1., donde las fuentes se agruparon en el área de influencia del respectivo canal de riego de manera independiente.

3.4. Análisis de resultados

- Análisis de datos

Los resultados obtenidos se trabajaron en el software Excel, para de esta manera poder elaborar gráficas correspondientes a la abundancia de partículas, formas, colores y tipo de polímeros presentes en cada punto de muestreo del respectivo canal estudiado.

- Análisis espacial

Para la elaboración de las cartografías, se empleó el software ArcMap 10.4.1, ya sea para los mapas de fuentes aportantes en cada canal de riego y también para la realización de interpolaciones de las concentraciones de MP obtenidas en cada canal de riego, se utilizó el método de distancia inversa ponderada (IDW). Este método es ampliamente usado para crear mapas de temperaturas o precipitaciones dada su simplicidad computacional, rapidez de procesamiento y su lógica intuitiva en comparación a otros métodos como Spline y Kriging.

- Análisis estadístico

Inicialmente, se procedió a realizar un boxplot o diagrama de caja y bigotes en Excel para las concentraciones de MPs esto se realizó para poder visualizar la distribución de los datos y así identificar por ejemplo valores atípicos (outliers). Seguidamente se procedió a analizar los datos en R versión 4.5.2. para determinar si presentaban distribución normal o no,

Universidad de Concepción

mediante la aplicación de la prueba Shapiro-Wilk. Posteriormente se aplicó el análisis Kruskal-Wallis si los datos no seguían una distribución normal y el análisis ANOVA en el caso contrario, para poder determinar diferencias significativas entre ubicaciones.

Por último, se realizó una correlación y también una regresión lineal entre las concentraciones de MP y la distancia entre las fuentes identificadas en el objetivo específico 2, exceptuando el caso de las edificaciones identificadas, con las cuales se trabajó de acuerdo con el número de estas presentes en un radio de 100 m alrededor de cada punto de muestreo.

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En base a los análisis realizados y los objetivos expuestos, se obtuvieron los siguientes resultados, los cuales se detallarán de acuerdo con cada objetivo específico (O.E.) del presente estudio.

O.E.1: Determinar concentraciones y características de microplásticos presentes en canales de riego

Se determinó que en el agua de los 3 canales analizados existía presencia de partículas plásticas, los resultados obtenidos de cada canal en cuanto a su abundancia, forma, color y composición se presentan a continuación, adicionalmente en el anexo 3 se agregaron fotografías capturadas de algunas de las muestras analizadas.

- **Canal Collico**

En el canal Collico, se contabilizaron un total de 80 partículas, teniéndose que la concentración de este varió entre 0,4 - 3,6 partículas/L, la concentración más alta fue en el inicio del canal y esta fue variando de manera desigual aguas abajo del canal, alcanzando una concentración de 2 partículas/L en el último punto de muestreo. En la figura N°8 se presentan las concentraciones de partículas en los diferentes puntos de muestreo (de acuerdo a la dirección del canal, de izquierda a derecha).

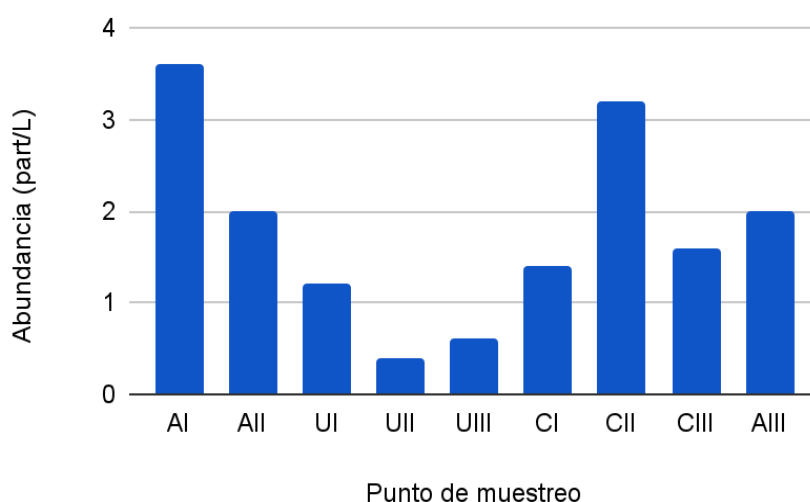


Figura 8. Concentración de partículas en puntos de muestreo de canal Collico.

Universidad de Concepción

Seguidamente, se prosiguió a la clasificación de las partículas según su forma, donde mediante un examen visual bajo un estereomicroscopio se lograron identificar fibras (82,5%) y fragmentos (17,5%), como se observa en la figura N°9. De igual manera también se realizó la clasificación de las partículas separadas según su color las cuales se clasificaron en partículas de color negro (70%), café (15%) y rojo (10%) mayoritariamente (figura N°10), esta última característica es sumamente importante ya que nos pueden dar un indicio del tiempo que llevan estas partículas en el ambiente (Lozada & Romero, 2021).

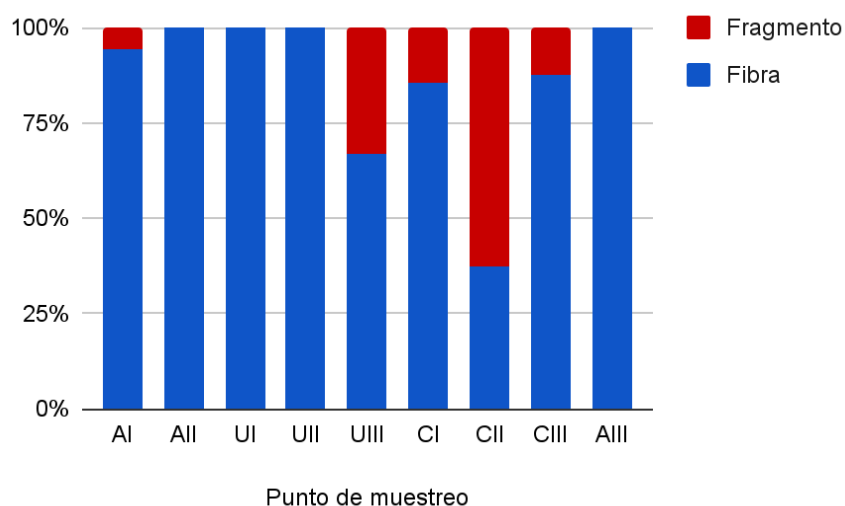


Figura 9. Clasificación de partículas según su forma en canal Collico.

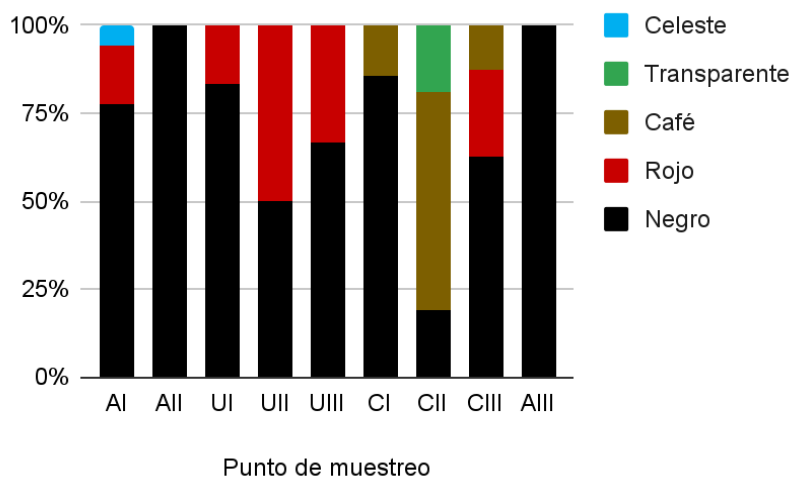


Figura 10. Clasificación de partículas según su color en canal Collico.

Universidad de Concepción

Además, mediante espectrometría infrarrojo (FT-IR) se analizaron las partículas separadas, teniéndose que 36 de las 80 partículas contabilizadas corresponden a MPs (47,5 %), tales resultados se obtuvieron de acuerdo con los compuestos identificados, y posteriormente estos compuestos se agruparon de acuerdo con el polímero que correspondían, tales resultados se presentan en la figura N°11.

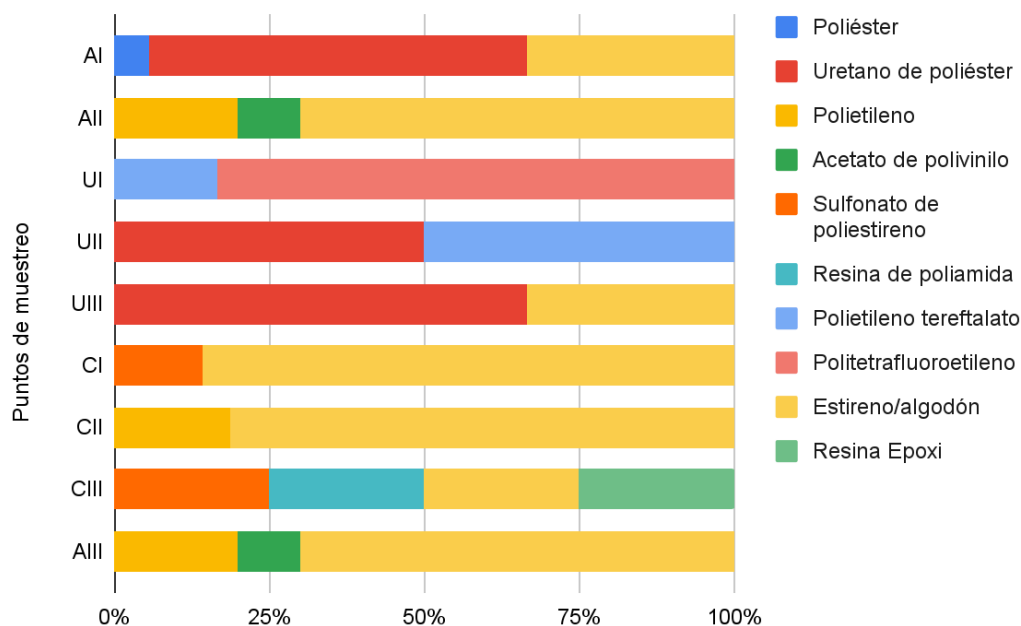


Figura 11. Polímeros presentes en canal Collico.

De los compuestos identificados, dos de ellos no corresponden a polímeros plásticos los cuales son resina epoxi y estireno/algodón, este último se destaca por encontrarse en grandes cantidades en 7 de los 9 puntos de muestreo, pese a que es un compuesto que no corresponde a un plástico de acuerdo a la definición de microplástico y también debido que el algodón es una fibra vegetal natural pero al estar injertado o recubierto con estireno esto indica un tratamiento químico detrás y por ende, no se puede considerar que las partículas encontradas (las cuales fueron mayoritariamente fibras) sean en su totalidad de origen natural, sino más bien de origen antropogénico, esto podría ser un indicio de conexión de aguas grises ya que autores como Luzi et al., 2025 indican que las microfibras representan una fracción dominante en el medio ambiente, en gran parte debido a su liberación de los textiles durante el lavado doméstico.

Universidad de Concepción

En cuanto a las partículas identificadas como MPs, las que mayor abundancia presentaron fueron poliéster uretano (PU), polietileno (PE), poliestireno (PS) y politetrafluoroetileno (PTFE) y las que se detectaron en menor cantidad fueron resina de poliamida (PA), polietileno tereftalato (PET), acetato de polivinilo (PVAc) y poliéster (PES).

Enfatizando en los polímeros encontrados en mayor proporción, el PU, es un polímero que se identificó en forma de fibras de color negro en 3 de los 9 puntos de muestreo, este suele encontrarse en productos como espumas de construcción, muebles, envases, pinturas, adhesivos y fibras elásticas (J. Lasky, 2024; Zanoni et al., 2025). Un segundo polímero identificado fue PE, se identificó en forma de fibra de color transparente y negro en 3 de los 9 puntos de muestreo, este se usa comúnmente en bolsas de plástico, botellas de plástico, película de embalaje de alimentos y película agrícola, todos los usos mencionados pueden estar vinculados a posibles orígenes como basura/microbasurales o el uso de plástico en la agricultura local (Jiang et al., 2023). Por otro parte, un tercer polímero presente en las partículas estudiadas fue PS, identificado en forma de fibra y fragmentos de color rojo y café en 2 de los 9 puntos de muestreo, este polímero es ampliamente utilizado y altamente tóxico y se emplea a menudo para fabricar productos transparentes como envases de alimentos y embalajes (Hwang et al., 2020). Por último el PTFE, identificado en forma de fibra de color azul en 1 de los 9 puntos de muestreo, es comúnmente conocido como teflón, este es ampliamente utilizado debido a sus propiedades antiadherentes, resistencia térmica y baja fricción en utensilios de cocina, dispositivos médicos, maquinaria industrial y aislamiento eléctrico este polímero corresponde a un compuesto fluorado (un tipo de PFAS conocidos como “químicos eternos”), teniendo en cuenta sus usos un origen probable de este polímero es una posible conexión de aguas cotidianas de aseo (aguas grises) de viviendas cercanas al canal de riego (Abass et al., 2025; Pu et al., 2025).

Con respecto a los polímeros presentes en menor cantidad, la PA, identificada en forma de fibras de color negro, detectada en 1 de los 9 puntos de muestreo, es ampliamente utilizada en textiles sintéticos, particularmente en ropa, el PET, es utilizado en textiles, materiales de embalaje (Jiang et al., 2023). El PVAc, detectado en forma de fibra de color negro, este actúa como ingrediente formador de película en látex a base de agua, pinturas y también se utiliza en adhesivos (Enciclopedia Británica, 2023). Y por último el PES, detectado en forma

de fragmento de color celeste, es utilizado principalmente en la producción de prendas de vestir, mezclada con algodón, y es la fibra sintética más común (J.Mccloughlin et al., 2013).

- **Canal San Carlos**

En el canal San Carlos, se contabilizaron un total de 78 partículas, donde las concentraciones variaron entre 1 - 2,6 partículas/L, en el transcurso del canal estas fueron aumentando significativamente a partir del segundo punto de muestreo, presentando una variación importante en el sexto punto de muestreo donde disminuye considerablemente la abundancia respecto al punto anterior, en todo el canal la máxima concentración se midió en el punto CII con 2,6 partículas/L, en la parte media del canal. En la figura N°12 se presentan las concentraciones de partículas en los diferentes puntos de muestreo (de acuerdo con la dirección del canal, de izquierda a derecha).

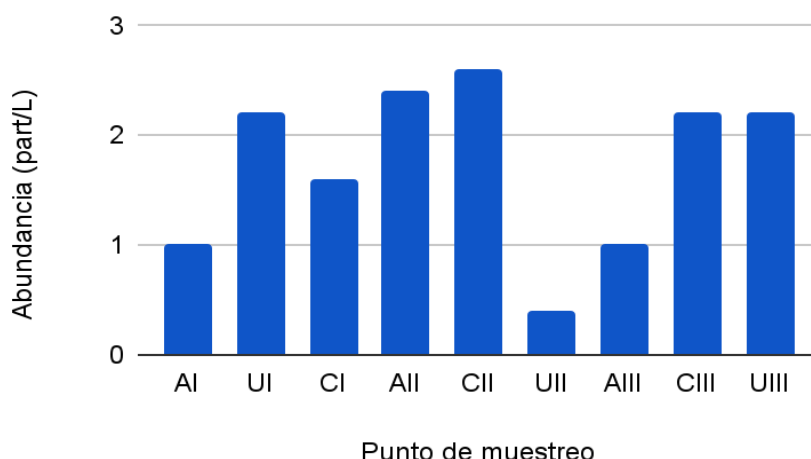


Figura 12. Concentración de partículas en puntos de muestreo de canal San Carlos.

En cuanto a las formas más frecuentemente identificadas, fueron las fibras (61,5%), esponjas (23,1%) y fragmentos (15,4%) (figura N°13). Por otro lado, los colores identificados fueron, negro (42,3%), café (24,4%), rojo (21,8%) y transparente (11,5%) (figura N°14).

Universidad de Concepción

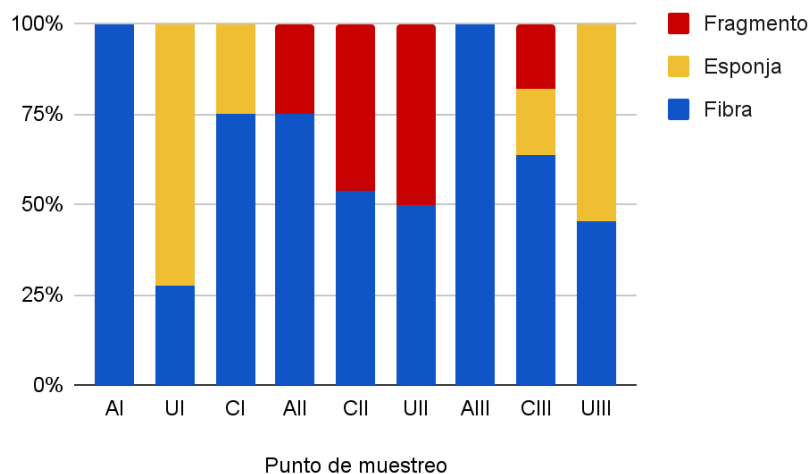


Figura 13. Clasificación de partículas según su forma en canal San Carlos.

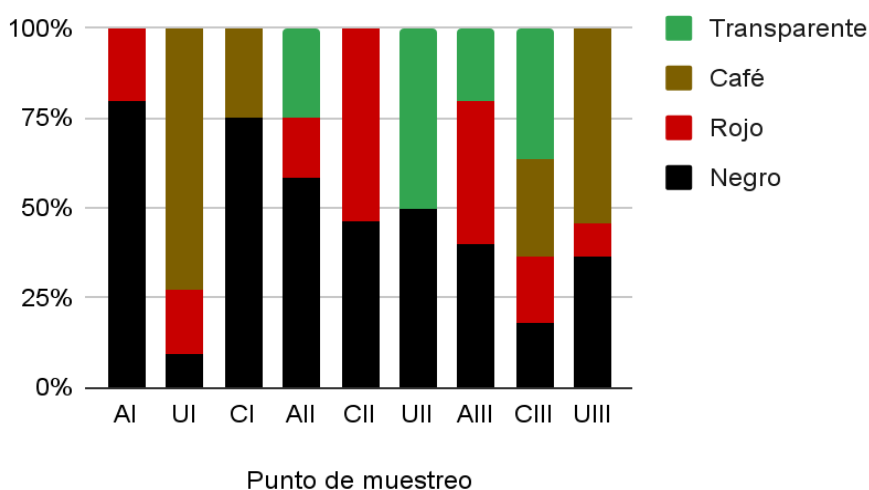


Figura 14. Clasificación de partículas según su color en canal San Carlos.

En cuanto a los espectros obtenidos mediante espectrometría infrarroja FT-IR, se analizaron las partículas separadas, donde 64 de las 78 partículas contabilizadas corresponden a MPs (91,4%), tales resultados se obtuvieron de acuerdo a los compuestos identificados y posterior clasificación de acuerdo a sus polímeros (figura N°15), teniéndose que el único compuesto identificado como no MPs fue, estireno/algodón, que como se explicó en el canal Collico estas no son partículas completamente naturales sino que detrás de su producción existe tratamiento químico, este polímero encontrado en su mayoría en forma de fibra estuvo presente en 4 de los 9 puntos de muestreo.

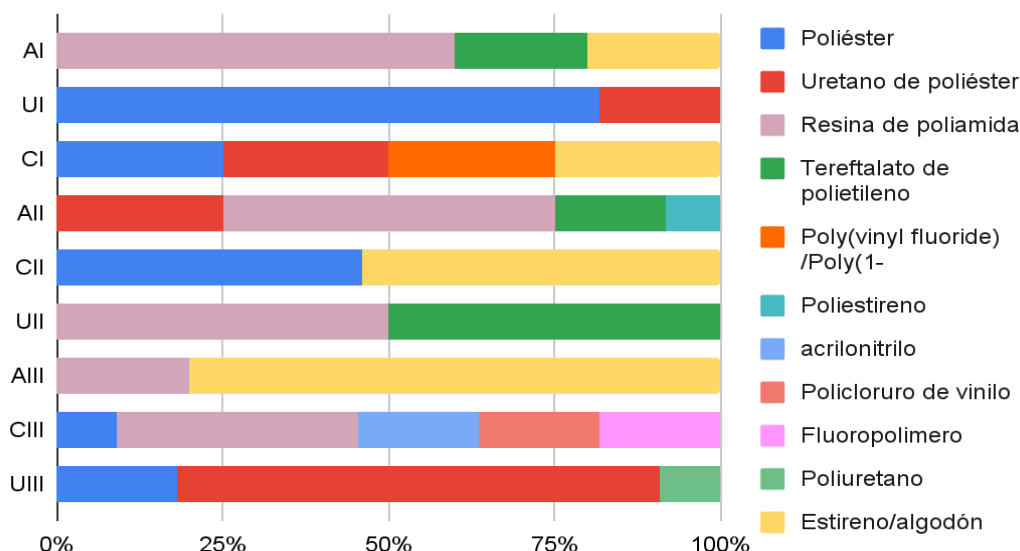


Figura 15. Polímeros presentes en canal San Carlos.

Los polímeros más abundantes correspondieron a poliéster (PES), uretano de poliéster (PUC), resina de poliamida (PA) y tereftalato de polietileno (PET), mientras que los polímeros detectados en menor cantidad fueron Poly(vinyl fluoride)/Poly(1-fluoroethylene) (PVDF o PVF), acrilonitrilo butadieno estireno (ABS), policloruro de vinilo (PVC), fluoropolímero, poliestireno (PS) y poliuretano (PU), respecto a este último polímero y el uretano de poliéster (PUC), es importante señalar que el poliéster uretano es un subtipo específico del poliuretano, este corresponde a una amplia familia de polímeros formados por la reacción de isocianatos con polioles, y abarca dos categorías principales: a base de poliéter y a base de poliéster los cuales tienen rendimientos y aplicaciones muy diferentes (PEPSEN, 2025).

Haciendo hincapié en los polímeros más abundantes se tiene que, el PES, se encontró presente mayoritariamente en forma de esponja y fibra de color negro y café en 5 de los 9 puntos de muestreo, este polímero se encuentra principalmente en textiles sintéticos, y de acuerdo a lo que indica Vassilenko et al., 2021 el lavado doméstico de textiles es una fuente notable de MPs y fibras naturales. En cuanto al PUC, el cual se encontró en fibras y espumas de color negro, rojo y café en 4 de los 9 puntos de muestreo, este suele tener múltiples aplicaciones en asientos y aislamiento de autos, en muebles y ropa de cama,

Universidad de Concepción

proporciona amortiguación y colchones y también a los textiles y prendas de vestir a través de recubrimientos y fibras sintéticas (Srivastava et al., 2025). Dada las amplias aplicaciones de este polímero los posibles orígenes de los MPs identificados podrían atribuirse a fuentes de basura ilegal donde se han eliminado colchones, almohadillas y asientos por ejemplo o fibras de ropa provenientes de aguas de lavado de esta. Por otra parte, PA, la cual se encontró en forma de fibra y fragmento de color transparente y negro, suele usarse como adhesivo de madera (Jin et al., 2023). Finalmente de los polímeros encontrados en mayor cantidad se encuentra el PET, el cual se encontró en fibras de color negro y rojo, este polímero termoplástico se utiliza ampliamente para envasado desechable y envases de alimentos o bebidas (Abubakar et al., 2025).

En cuanto a los polímeros detectados en menor cantidad se encuentran los PVDF o PVF los cuales se encontraron en forma de esponja de color café y fibras de color transparente y negro, dado a que estos compuestos corresponden polímeros fluorados aunque ambos son polímeros similares difieren en sus aplicaciones, para el caso de PVF este se emplea en construcción, transporte y energía fotovoltaica, como una película protectora y resistente (Dupont, 2014) en cuanto a PVDF este se emplea en piezas automotrices, industria química, de la aviación, tuberías y válvulas (Dallaev et al., 2022). Por otra parte, el ABS, detectado en forma de esponjas de color café, es un termoplástico que se utiliza en varias aplicaciones, incluyendo equipos electrónicos, piezas de automóviles, juguetes y varios bienes de consumo (Deshmukh et al., 2024). Otro polímero detectado fue el PVC, en forma de fragmento y color transparente, el cual se emplea ampliamente en automóviles (interiores y asientos), electrónica (aislamiento de cables), y en agricultura para sistemas de riego (KJ et al., 2024). En cuanto a los fluoropolímeros, detectados en forma de fibra de color negro y transparente, como se mencionó estos corresponden a un compuesto fluorado, comúnmente usado en utensilios de cocina (Pu et al., 2025). El PS, detectado en forma de fragmento y color transparente, que es ampliamente utilizado y también altamente tóxico y se utiliza a menudo para fabricar productos transparentes como envases de alimentos y embalajes (Hwang et al., 2020). Y por último PU, identificado en forma de fibras de color rojo, este suele encontrarse en productos incluidos espumas de construcción, muebles, envases, pinturas, adhesivos y fibras elásticas (J. Lasky, 2024; Zanoni et al., 2025).

- **Canal Rinconada de Cato**

Por último, el Canal Rinconada de Cato, es el canal que presentó las mayores concentraciones de partículas entre los tres canales, con un total de 245 partículas, las cuales fluctuaron entre 0,6 - 18,6 partículas/L, donde las concentraciones fueron aumentando en el transcurso del canal a partir del punto CI, disminuyendo en el punto UII, y luego aumentando nuevamente en el punto AIII, cabe destacar que este punto fue medido en una parte correspondiente a un “brazo” del canal por ende la medición lineal del canal es hasta el punto UII, de todas formas cabe destacar que la concentración medida en el punto AIII, es la segunda más alta en todo el canal. En la figura N°16 se presentan las concentraciones de partículas en los diferentes puntos de muestreo (de acuerdo con la dirección del canal, de izquierda a derecha).

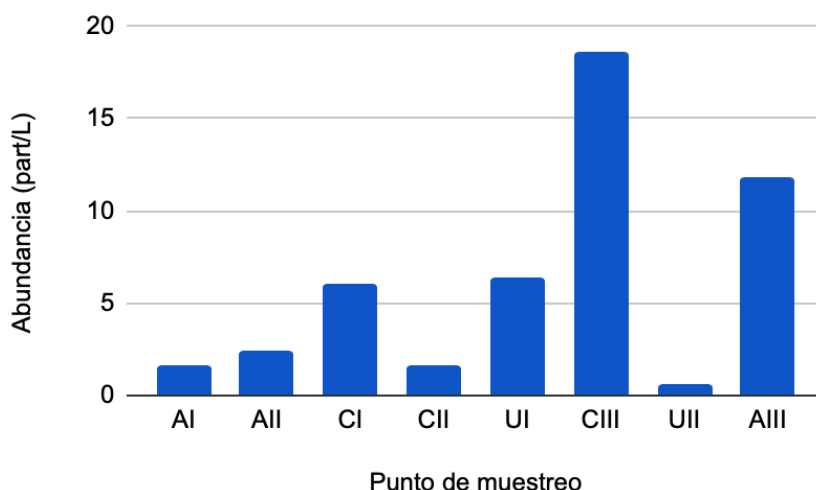


Figura 16. Concentración de partículas en puntos de muestreo de canal Rinconada de Cato.

Posteriormente, se prosiguió a la clasificación de las partículas según su forma, encontrándose fibras (39,2%), esponjas (37,6%) y fragmentos (23,3%) figura N°17, la alta presencia de esponjas de acuerdo a otros estudios realizados en canales de riego indican que estas podrían provenir de contenedores y materiales de embalaje de plástico (Jiang et al., 2023). Además, también se realizó la clasificación de las partículas según su color identificándose partículas de color café (37,6%), transparente (26,5%), negro (24,9%), rojo (9%) y celeste (2%) figura N°18. Especialmente en cuanto a las partículas de color café esta correspondieron mayoritariamente a esponjas.

Universidad de Concepción

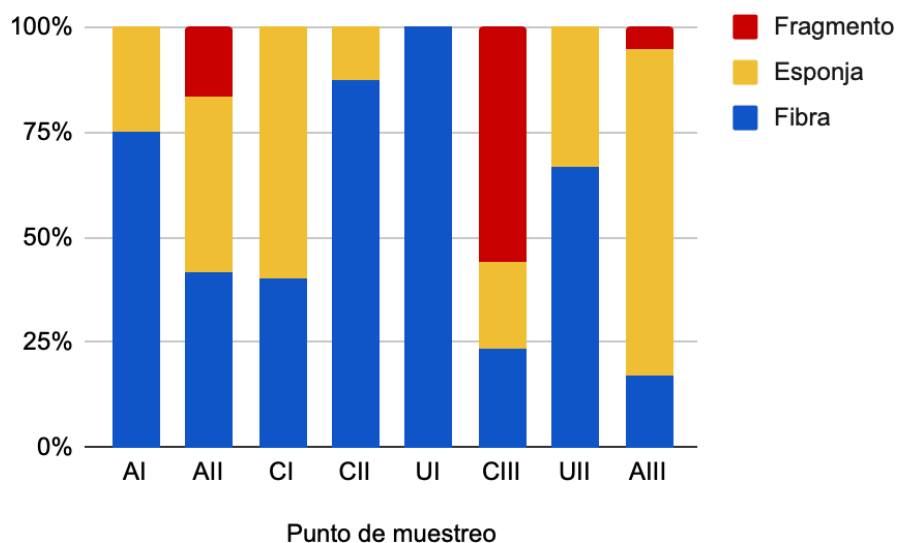


Figura 17. Clasificación de partículas según su forma en canal Rinconada de Cato.

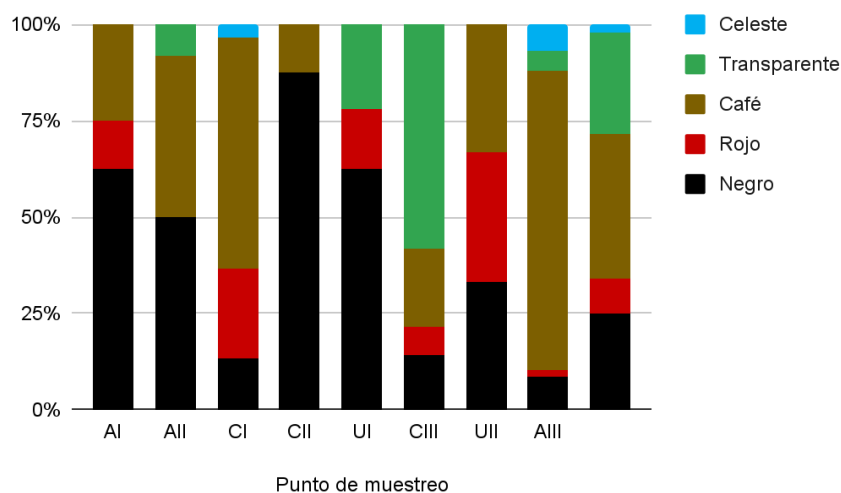


Figura 18. Clasificación de partículas según su color en canal Rinconada de Cato.

En cuanto a los espectros obtenidos mediante espectrometría infrarroja FT-IR, se analizaron las partículas separadas, donde 190 de las 245 partículas contabilizadas corresponden a MPs (77,5%), tales resultados se obtuvieron de acuerdo a los compuestos identificados y posterior clasificación de acuerdo a sus polímeros (figura N°19), teniéndose que el único compuesto identificado como no MPs fue, estireno/algodón, que como se explicó en el canal Collico estas no son partículas completamente naturales sino que detrás de su producción

Universidad de Concepción

existe tratamiento químico, este polímero encontrado en su mayoría en forma de fibra estuvo presente en 7 de los 8 puntos de muestreo, donde cabe destacar que en el punto de muestreo UII la totalidad de las partículas identificadas correspondieron a este polímero.

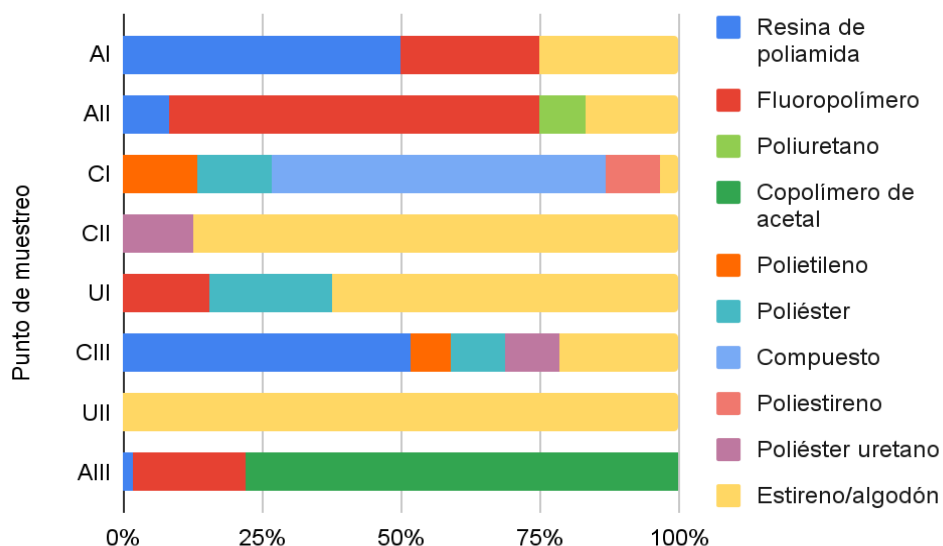


Figura 19. Polímeros presentes en canal Rinconada de Cato.

Los polímeros más abundantes correspondieron a resina de poliamida (PA), seguido de copolímero de acetal (POM-C), fluoropolímero, poliéster (PES) y compuesto protector impermeable polimérico. Mientras que los polímeros detectados en menores cantidades fueron polietileno tereftalato (PET), poliéster uretano (PUC) y poliestireno (PS), muchos de estos polímeros mencionados se encontraban presentes en los canales anteriores, por ende no serán descritos en profundidad.

Enfatizando en los polímeros encontrados en mayor proporción, se tiene que PA la cual se detectó principalmente en forma de fibras y fragmentos de color negro y transparente en 4 de los 8 puntos de muestreo. Un segundo polímero fue el (POM-C) detectado en forma de esponjas de color café, en 1 de los 8 puntos de muestreo este tipo de polímero suele emplearse en el sector automotriz e hidráulico (válvulas). Un tercer polímero identificado fue fluoropolímeros que se identificaron en forma de fibras negras en 4 de los 8 puntos de muestreo mayoritariamente, este polímero como ya se ha mencionado en los dos canales anteriores suelen emplearse comúnmente en utensilios de cocina (Pu et al., 2025). En cuanto al poliéster, este se identificó en forma de fibras de color rojo y transparente en 3 de

Universidad de Concepción

los 8 puntos de muestreo, este polímero como ya se ha mencionado es ampliamente en textiles sintéticos y por último el compuesto protector impermeable polimérico se identificó en forma de esponja de color café estos son un grupo de polímeros que son utilizados como impermeabilizantes para sellar y proteger estructuras de la humedad y el clima se utiliza ampliamente en neumáticos de larga duración, paneles solares y aislamiento de cables de alta tensión (Dobrotă et al., 2025).

En cuanto a los polímeros detectados en menor proporción, el PET, el cual se identificó en forma de fibra de color rojo y azul en 1 de los 8 puntos de muestreo, este polímero termoplástico se utiliza ampliamente para envasado desechable y envases de alimentos o bebidas (Abubakar et al., 2025). El PUC, el cual se detectó en forma de esponja de color café en 1 de los 8 puntos de muestreo, este suele tener múltiples aplicaciones en asientos y aislamiento de autos, en muebles y ropa de cama, proporciona amortiguación y colchones y en cuanto a los textiles y prendas de vestir a través de recubrimientos y fibras sintéticas (Srivastava et al., 2025). Y, por último, el PS, detectado en forma de fibras de color rojo en 1 de los 8 puntos de muestreo, el cual es ampliamente utilizado y también altamente tóxico y se utiliza a menudo para fabricar productos transparentes como envases de alimentos y embalajes (Hwang et al., 2020).

En consecuencia, las tendencias de abundancia de MPs varían entre canales con una presencia en 25 de los 26 puntos de muestreo, las variaciones especialmente entre los dos primeros canales (Collico y San Carlos) no es relevante, mientras que el último (Rinconada de Cato) presenta la mayor diferencia de abundancia respecto a los dos primeros, por otra parte la forma más común en todos los canales de riego fueron las fibras de color negro destacando que en el canal Rinconada de Cato las esponjas de color café también tuvieron una alta presencia, estos resultados concuerdan con el estudio realizado por Jiang et al., 2024 quienes encontraron que las fibras y fragmentos eran la forma más abundante, donde destacan que las fibras podrían atribuirse a la descomposición de equipos agrícolas o aguas residuales del lavado de ropa (Kumar et al., 2020 ; Zhou et al., 2020). Además, la deposición atmosférica se ha considerado una fuente potencial de fibras (Wright et al., 2020). Por su parte, los fragmentos procedentes de la descomposición de residuos plásticos, como herramientas agrícolas, bolsas de semillas, materiales de embalaje y bolsas de plástico tejidas, también podrían ser una fuente importante de MPs en el agua de riego.

Universidad de Concepción

Y por último, los polímeros que mayor abundancia presentaron fueron uretano de poliéster, fluoropolímeros, resina de poliamida y poliéster además de una alta presencia de algodón injertado con estireno (no MP) especialmente en el canal Collico, estos últimos tres polímeros destacan por tener un origen en común, que como se mencionó son los textiles sintéticos, teniendo presente que estudios han demostrado que, en promedio, lavar una sola prenda de vestir puede liberar entre 1900 y 1 millón de microfibras, mientras que lavar textiles hechos principalmente de poliéster puede resultar en la liberación de más de 6 millones de fibras. Estos hallazgos resaltan la importante contribución de las actividades de lavandería a la contaminación por MPs (Zhang et al., 2025). Teniendo presente, una de las posibles fuentes portantes a abordar en el objetivo específico 2 son las edificaciones, las cuales pudiesen estar aportando en la presencia de este tipo de polímeros por una posible conexión de aguas grises sin tratamiento proveniente de viviendas cercanas a los canales de riego.

Universidad de Concepción

A continuación se presentan algunos espectros obtenidos al realizar los análisis.

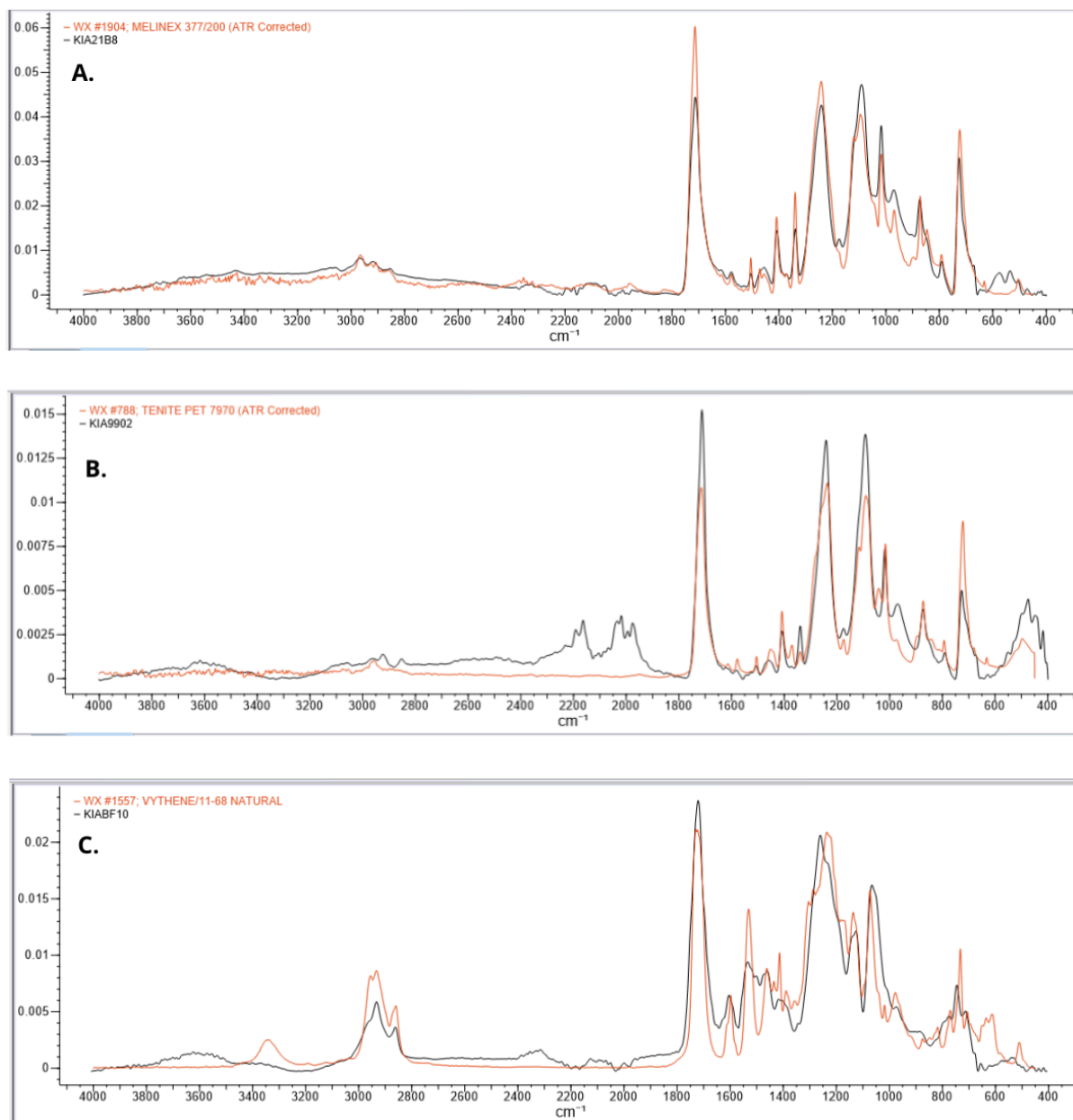


Figura 20. Ejemplos de espectros obtenidos de partículas presentes en canales de riego, donde A. Poliéster, B. Tereftalato de polietileno y C. Policloruro de vinilo.

O.E.2: Identificar fuentes aportantes de microplásticos al sistema de riego

Las fuentes aportantes más relevantes identificadas se agruparon en: uso de plástico en la agricultura local, carreteras, microbasurales, edificaciones y datos previos sobre calidad de agua. Dado que en el objetivo específico 1 se determinó la abundancia en cada canal y la composición polimérica de los Mps identificados, esto nos da indicios de las posibles fuentes originarias de estas partículas encontradas, es por esto la importancia en realizar una observación de las actividades que se llevan a cabo alrededor de cada canal estudiado para de esta manera sustentar de mejor forma la magnitud en la que se encuentran presentes fuentes relevantes de Mps y también poder enfocar los esfuerzos en su gestión.

- **Canal Collico**

En el canal Collico se identificó la presencia de todas las posibles fuentes portantes, tal como se observa en la figura N°21. Dentro del área de influencia de 1 km se identificaron seis invernaderos y dos cubiertas plásticas, distribuidos principalmente en la parte media baja del canal, lo cual coincide con las zonas donde se concentra una mayor cantidad de edificaciones. De acuerdo con la exploración realizada, los invernaderos identificados no presentan grandes dimensiones, lo que podría indicar que la agroplasticultura se desarrolla a pequeña escala, por ejemplo, para autoconsumo.

Asimismo, cabe destacar que el canal Collico se ubica administrativamente dentro de la comuna de Coihueco y que, de acuerdo con el catastro frutícola del año 2016, esta comuna fue una de las que mayor superficie plantada de frutales mayores y berries aportó a la región de Ñuble. Se sabe que los berries, especialmente frutillas y arándanos, emplean mulch plástico y túneles de plástico, respectivamente. En el caso de las frutillas, debido a las condiciones climáticas, este cultivo se desarrolla principalmente en las zonas costeras de la región, mientras que el cultivo de arándano se encuentra ampliamente distribuido en la comuna. Si bien durante la exploración realizada dentro del área de influencia no se identificaron cultivos de arándanos, es importante considerar este antecedente, dado que existen otros canales de riego cercanos a estas zonas que podrían actuar como receptores del plástico empleado en este tipo de cultivos.

En cuanto a las carreteras identificadas dentro del área de influencia, estas también se concentran en la parte baja del canal Collico. Si bien, como se ha mencionado, las carreteras son consideradas una fuente relevante de MPs debido a la fricción generada

Universidad de Concepción

entre los neumáticos y el pavimento, que libera partículas al ambiente y potencialmente al agua de riego, la magnitud de este aporte se encuentra determinada, en parte, por el flujo vehicular. En este caso particular, las carreteras identificadas no presentan altos flujos vehiculares, ya que se localizan en zonas rurales con baja densidad poblacional.

Una tercera fuente identificada, fueron los microbasurales, dentro del área de influencia, solo se identificó 1 microbasural el cual fue proporcionado por el municipio de Coihueco, este se ubica en la parte media alta del área de influencia, desconociéndose el tamaño que este posea.

Por otra parte, una cuarta fuente identificada fueron las edificaciones ubicadas dentro de un área de influencia de 100 m. En esta franja se identificaron un total de 569 edificaciones, concentradas principalmente en la parte media baja del canal Collico. La identificación de esta fuente resulta relevante, ya que estudios previos realizados en canales de riego indican la existencia de una correlación entre las concentraciones de MPs y el grado de urbanización (Jiries et al., 2024).

Finalmente, la quinta posible fuente de contaminación por MPs identificada en el canal Collico correspondió a los puntos con presencia de contaminación fecal, de acuerdo con la relación FC/FE y la superación de los límites establecidos por la normativa vigente. Se identificó un punto para cada criterio de selección. El primer punto se ubica en la parte media alta del canal y presentó un valor de $FC/FE = 4,3$, lo que indica un origen humano de la contaminación fecal, constituyendo un posible indicio de conexión ilegal de aguas residuales al canal de riego, lo cual se vincula con la presencia de edificaciones cercanas al punto de muestreo. Asimismo, se identificó un punto que supera la normativa vigente, localizado en la parte baja del canal, en una zona con mayor densidad de edificaciones. Esta situación pone en evidencia las deficiencias en saneamiento existentes en las zonas rurales del país, donde la cobertura de recolección de aguas servidas no alcanza el 45 %, en contraste con las áreas urbanas, que presentan una cobertura del 97,17 % (Mesa Nacional del Agua, 2022; SISS, 2019). En este contexto, resulta esperable que, debido a la falta de infraestructura, existan conexiones de aguas servidas desde edificaciones hacia los canales de riego.

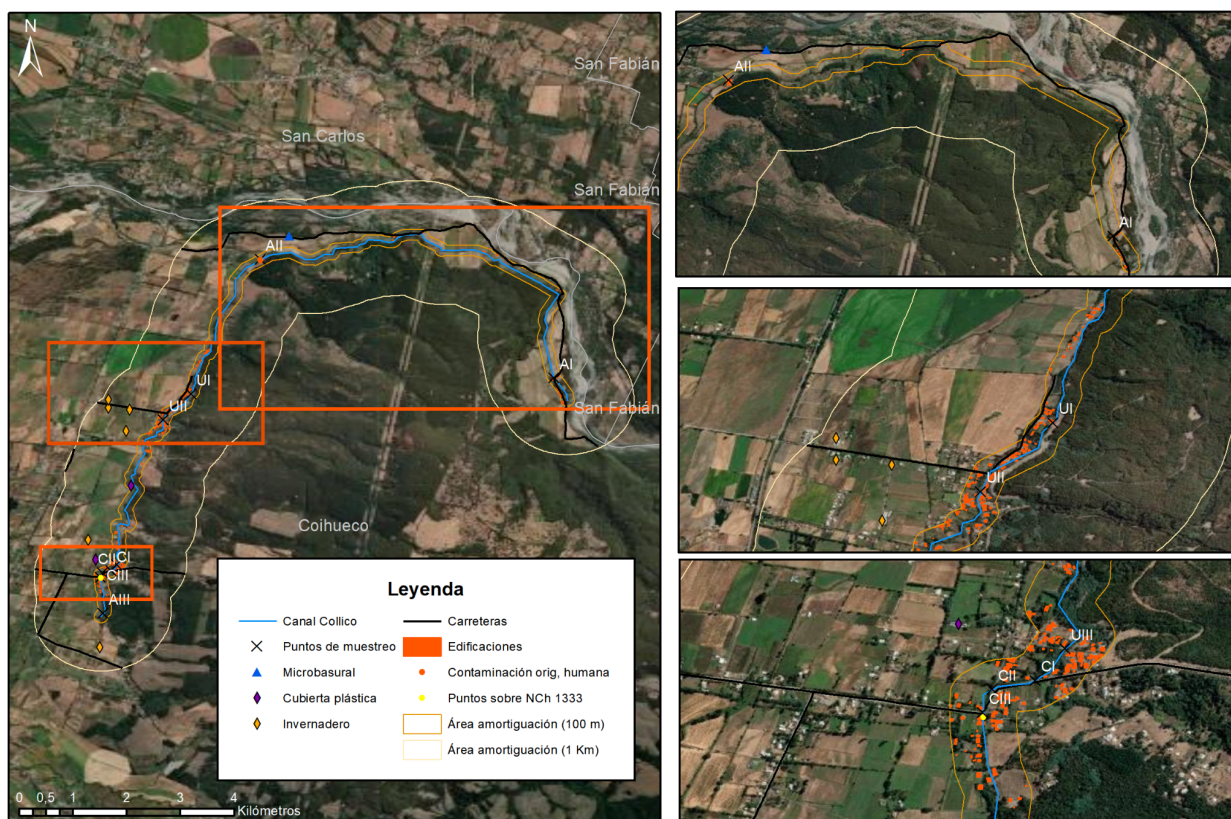


Figura 21. Fuentes aportantes identificadas en canal Collico.

● Canal San Carlos

En el canal San Carlos se identificó la presencia de todas las posibles fuentes portantes, tal como se observa en la figura N°22. Dentro del área de influencia de 1 km se identificaron un silo de plástico, cinco invernaderos y cuatro cubiertas plásticas. Estas fuentes de plástico agrícola se distribuyen de manera heterogénea en el área de influencia. En relación con los invernaderos presentes, al igual que en el canal Collico, estos presentan tamaños reducidos, lo que sugiere que podrían estar destinados a actividades de autoconsumo.

En cuanto a las cubiertas plásticas, a diferencia de los invernaderos, estas presentaron color negro durante la exploración realizada, en contraste con el plástico transparente utilizado en los invernaderos. Sin embargo, debido a su coloración, no se descarta que correspondan a malla Raschel, material ampliamente empleado en actividades agrícolas. Si bien ninguna de las fuentes de plástico agrícola fue identificada con alta intensidad, resulta relevante señalar que este canal se localiza dentro de los límites de la comuna de San

Universidad de Concepción

Carlos, la cual, al igual que la comuna de Coihueco, corresponde a una de las comunas de mayor importancia en la producción de frambuesa, mora y arándano (CIREN-ODEPA, 2016). Este último cultivo emplea cubiertas plásticas en su producción; no obstante, durante la exploración realizada no se logró identificar su presencia dentro del área de influencia.

Las carreteras presentes dentro del área de influencia se concentran principalmente en la parte media alta del canal y corresponden a vías interurbanas que conectan pequeñas localidades con ciudades de mayor tamaño, como San Carlos. Estas carreteras presentan un flujo vehicular relativamente bajo, en contraste con la Ruta 5, ubicada en la parte baja del área de influencia, la cual corresponde a la vía más importante del país y puede alcanzar flujos de entre 2,5 y 3,5 millones de vehículos mensuales, específicamente en el tramo Talca–Chillán de la Ruta 5 Sur (MOP, 2025).

Respecto a los microbasurales identificados, cuya información fue proporcionada por la Municipalidad de San Carlos, se contabilizaron un total de seis microbasurales dentro del área de influencia, concentrados principalmente en la parte final del canal, en proximidad al núcleo urbano de la ciudad de San Carlos. Esta situación indica que, pese a la existencia de un retiro regular de residuos domiciliarios por parte del municipio, dicho sistema resulta insuficiente o no considera la recolección de residuos de mayor tamaño, como electrodomésticos, lo que propicia que estos sean depositados en sectores periféricos de la ciudad. En este contexto, desde el municipio se señala que “muchos de estos microbasurales son de gran magnitud y han sido intervenidos en diversas ocasiones; sin embargo, el problema persiste”.

Por otra parte, una cuarta fuente identificada correspondió a las edificaciones. Dentro del área de influencia de 100 m se identificaron un total de 1.539 edificaciones, las cuales se concentran principalmente en la parte final del canal. Tal como señalan autores como Jiries et al. (2024), existe una correlación entre las concentraciones de MPs y el grado de urbanización. No obstante, en el caso de este canal de riego, además del proceso de urbanización, se identifican otras fuentes potencialmente relevantes de MPs, tales como carreteras y microbasurales, lo que evidencia una interacción compleja de factores que influyen y determinan los niveles de contaminación presentes.

Finalmente, la quinta posible fuente de contaminación por MPs identificada en el canal San Carlos correspondió a los puntos con presencia de contaminación fecal, de acuerdo con la relación FC/FE y la superación de los límites establecidos por la normativa vigente. Se identificaron únicamente dos puntos que superan la normativa, y en ambos casos se

Universidad de Concepción

constató la presencia de edificaciones a menos de 100 m, las cuales podrían estar incidiendo como fuente de contaminación. En este sentido, la literatura indica que las plantas de tratamiento de aguas residuales constituyen una de las principales fuentes de emisión de MPs hacia los ecosistemas acuáticos (Avilés et al., 2025). Considerando que, tal como se mencionó para el canal Collico, el tratamiento de aguas residuales en zonas rurales es deficiente, estos resultados podrían indicar la existencia de conexiones de aguas servidas desde viviendas hacia el canal de riego.

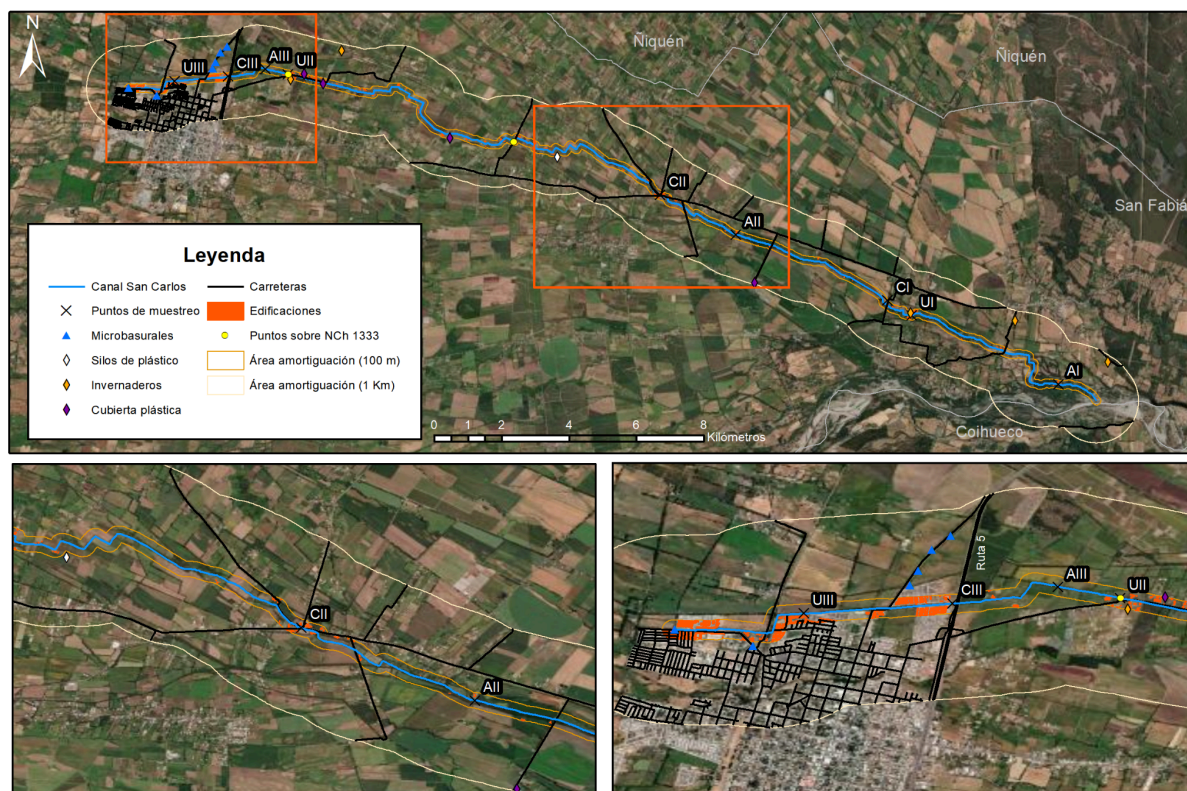


Figura 22. Fuentes aportantes identificadas en canal San Carlos.

● Canal Rinconada de Cato

En el canal Rinconada de Cato se identificó presencia de todas las posibles fuentes portantes, teniendo que dentro del área de influencia de 1 km se identificaron 1 invernadero y 3 silos de plástico. Estos son habitualmente usados para almacenar forraje (ensilaje), el cual es un plástico de polietileno de color blanco comúnmente. Suelen ser ensiladas principalmente gramíneas, como la avena, la cual es uno de los cultivos más producidos en el área del Valle Central de Riego de la región de Ñuble y, por ende, se emplea más este tipo de prácticas.

Universidad de Concepción

Las carreteras presentes en el área de influencia son considerablemente menores en comparación a los dos canales de riego anteriormente mencionados. La carretera presente se ubica en la parte final del canal de riego, siendo esta una vía interurbana, por ende, presenta un bajo flujo vehicular.

En cuanto a los microbasurales, se identificó sólo un punto durante la campaña de muestreo, ubicado igualmente en la parte final del canal, el cual presentaba una gran dimensión y, además, se ubicaba muy cercano al canal Rinconada de Cato.

Por otra parte, en cuanto a las edificaciones identificadas, se tiene que dentro del área de influencia de 100 m se identificaron un total de 363 edificaciones, las cuales se aglomeran principalmente en la parte final del canal.

Por último, los puntos con presencia de contaminación fecal, de acuerdo a la relación FC/FE y por sobre lo que establece la normativa vigente, se identificó un punto de acuerdo a cada filtro. En cuanto a la relación FC/FE, esta resultó en un valor de 766,7, lo cual indica que el origen de la contaminación es humana y, de acuerdo a lo que se logra observar en la figura N°23, la presencia de edificaciones alrededor de este punto es evidente y numerosa. Por otro lado, de acuerdo al límite de la normativa, se observa que el punto se encuentra en la parte final de otro brazo del canal.

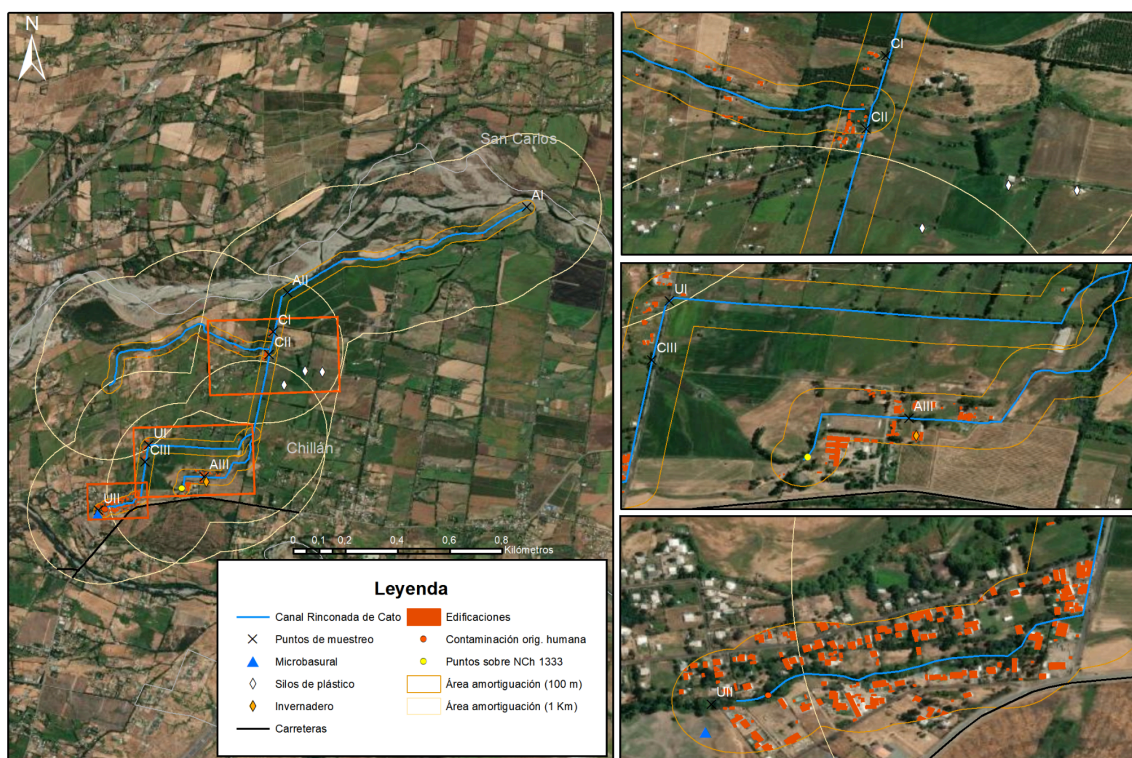


Figura 23. Fuentes aportantes identificadas en canal Rinconada de Cato.

Universidad de Concepción

En consecuencia, la presencia generalizada de posibles fuentes aportantes de MPs a menos de 1 km de los canales de riego resulta evidente. La distribución de estas fuentes suele seguir un patrón bastante marcado entre los tres canales de riego, el cual indica que, a medida que se avanza aguas abajo del canal, la cantidad de fuentes aumenta, especialmente las edificaciones. Estas presentan una gran cercanía al canal y podrían estar jugando un rol importante en la abundancia de MPs en las aguas de riego, en conjunto con el deficiente tratamiento de aguas residuales y aguas grises en el área rural.

Por otra parte cabe destacar que, fuentes como edificaciones, microbasurales el plástico empleado en la agricultura local, de acuerdo a la exploración realizada de estas dos últimas los resultados pudiesen estar por debajo de lo que es la realidad, dado que los datos proporcionados por Google Earth Pro pueden presentar una antigüedad de 1 a 3 años, por su parte las edificaciones identificadas pertenecen a datos del año 2023 por tanto la temporalidad se presenta como una limitación relevante, en vista de que en los últimos años se ha mostrado una tendencia de aumento de la población rural debido al parcelamiento de agrado dividiendo las tierras para fines habitacionales.

Por último, además de las limitaciones mencionadas, se detectó que en algunos sitios existe una superposición entre el trazado del canal de riego y las edificaciones. Al menos durante la campaña de muestreo no se observó la presencia de canales soterrados; por lo tanto, esta situación podría indicar que los datos georreferenciados de las edificaciones o de los canales de riego no se encuentran correctamente posicionados, lo que limita la realización de un análisis espacial adecuado.

O.E.3: Analizar distribución espacial de microplásticos identificando su asociación con las actividades antrópicas presentes en el área de estudio

Para un mayor entendimiento y visualización de los resultados, se realizó una interpolación de las concentraciones, para poder identificar las zonas en donde existió una mayor concentración de partículas de MPs. Para efectos de este estudio, el análisis se realizará de acuerdo al comportamiento en la distribución de cada canal estudiado.

Primeramente, es importante destacar y describir ciertos factores que pueden estar incidiendo en la distribución de MPs, los cuales son retención de las partículas en el sedimento, el tipo de flujo de las aguas (laminar/turbulento), tipo de revestimiento (canales de tierra o de concreto) y extracción de agua todo esto sin dejar de tener presente la relevancia de lo abordado en el objetivo específico 2, de tales factores sólo es verificable el tipo de revestimiento del canal de acuerdo a lo observado en la campaña de muestreo.

Dada la baja cantidad de estudios referentes a MPs en agua de riego, se utilizó como referencia las dinámicas que ocurren en ríos, como se mencionó, un factor importante en que exista una disminución en las concentraciones de MPs aguas abajo del canal de riego se ve influida por la retención de estos contaminantes en los sedimentos, debido a que estudios recientes encontraron una alta abundancia de MP en los sedimentos de diferentes sistemas fluviales en todo el mundo y mostraron que los sedimentos del lecho de los ríos pueden ser una zona de acumulación significativa en los ríos (Sarijan et al., 2021; Kumar et al., 2021), este factor se enlaza con el tipo de flujo que presenten las aguas, porque el tipo de flujo puede llegar a controlar si las partículas permanecen en suspensión, se depositan en el sedimento o se resuspenden, por ejemplo si existe un flujo laminar van a existir velocidades bajas y un movimiento ordenado de las capas del agua, estas condiciones generarán que exista una menor resuspensión de MPs desde el sedimento y también favorece la sedimentación por otro lado si existe un flujo turbulento el cual se caracteriza por mayores velocidades en el agua, remolinos y mezcla vertical, esto genera que las partículas se mantengan en suspensión en el agua, además de favorecer la resuspensión de las partículas previamente depositadas por tanto las condiciones de alto flujo pueden intensificar el movimiento vertical de los MPs (Yang et al., 2023).

Además, de los ya mencionados factores mencionados se agrega que el tipo de revestimiento también es clave en la determinación de una mayor o menor presencia de

Universidad de Concepción

sedimento en el agua y por tanto una menor o mayor acumulación de partículas plásticas en el sedimento (Yadav et al., 2025). Si existe un canal revestido es decir que posee una capa protectora comúnmente de hormigón va a existir menor cantidad de sedimento, mientras que un canal no revestido es decir de tierra, va a presentar mayor sedimento por el contacto directo con la tierra y por la erosión que se genera de esta.

- **Canal Collico**

Se puede observar la distribución espacial en el canal Collico en la figura N°24, la mayor concentración de MPs se midió en el inicio del canal, dado que la cantidad fuentes portantes alrededor de este punto son pocas, no se puede descartar al río Ñuble como una fuente aportante probable al sistema, teniendo en consideración que a 13 km aguas arriba del punto de captación se ubica la ciudad de San Fabián a partir de la cual el río pudiese traer contaminación desde allí. Además, de tener en consideración que de acuerdo con lo que informa Sridharan et al., 2021, la relevancia que tiene el transporte eólico de MPs de origen remoto favorece la aparición en áreas con baja intervención antropogénica.

Una vez ingresada el agua al canal Collico, aguas abajo esta comienza experimentar una disminución en las concentraciones de MPs, esto se puede deber a los factores ya mencionados con anterioridad destacando lo observado en la campaña de muestreo en el canal Collico se registró que este no presentó revestimiento desde el punto AI hasta el punto UIII, desde CI a CIII si era revestido y en AIII nuevamente no era revestido.

Por último, la continua extracción de agua del Canal, para su finalidad principal que es el riego de cultivos, juega un papel importante en la disminución de las concentraciones de MPs aguas abajo, debido a que existe una reducción del caudal y por ende una menor abundancia de MPs.

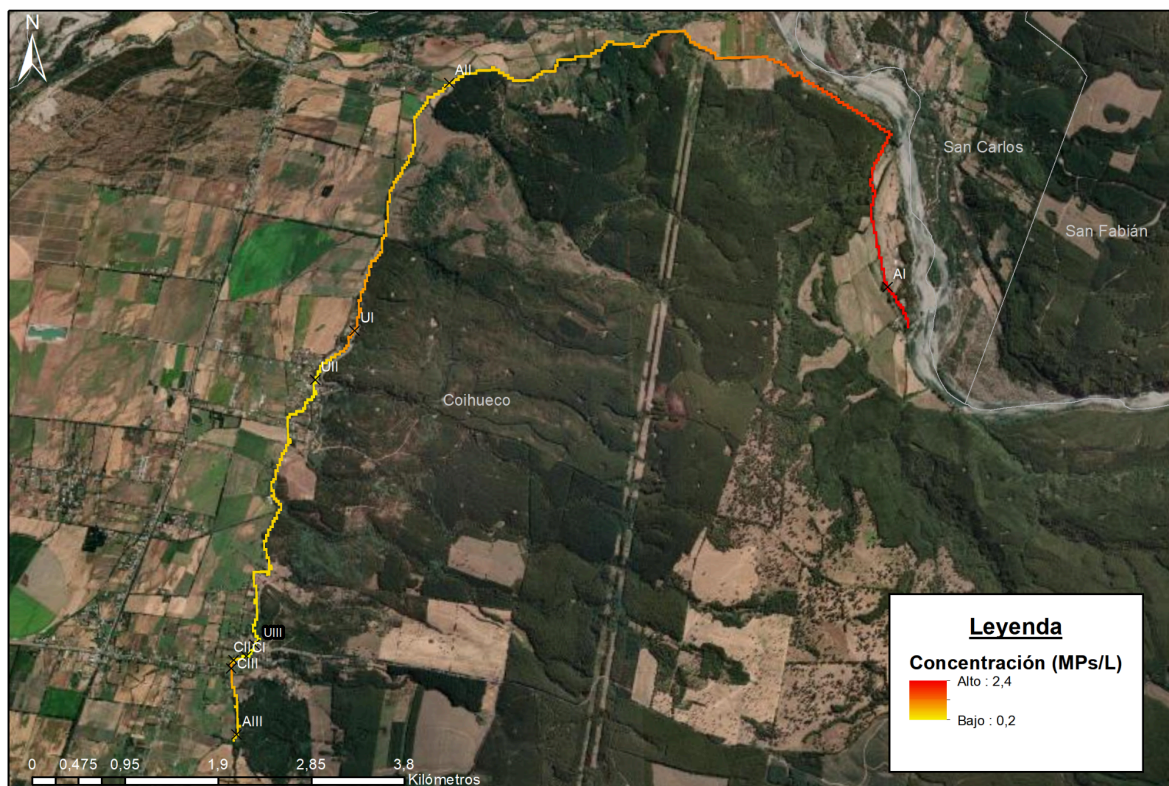


Figura 24. Interpolación concentraciones de MP, canal Collico.

- **Canal San Carlos**

En lo que respecta al canal San Carlos (ver figura N°25), y teniendo como base los factores que se mencionaron y describieron con anterioridad los cuales pudiesen influir en la distribución espacial de MPs, para este caso la distribución es heterogénea a lo largo del canal sugiriendo de esta forma una interacción compleja de factores que influyen en su transporte y acumulación, donde las mayores concentraciones se presentaron en la parte media alta y final del canal, de acuerdo a lo abordado en el objetivo específico 2, este canal presentó una mayor cantidad de posibles fuentes portantes respecto a los otros canales estudiados como edificaciones, carreteras y microbasurales por lo cual es un factor altamente relevante, que afecta a la dinámica de los MPs a lo largo del canal de riego. Especialmente en la parte final del canal donde el análisis morfológico de las partículas respalda la influencia que generan las diversas fuentes antropogénicas sobre el agua de riego, esto concuerda con lo informado por Jiang et al., 2023 el cual observó de manera

similar en un canal de riego en Taiwán donde la abundancia de MPs mostró una distribución desigual y fueron abundantes en sitios rodeados por una población densa alrededor del canal.

Además, de acuerdo con lo observado en la campaña de muestreo en todos los puntos del canal, éste era no revestido, lo cual puede ser un factor importante al observar lo que ocurre entre el punto de muestreo CII y AIII donde la sedimentación de las partículas puede jugar un papel importante, pero además como entre el punto CII y UII no se realizaron mediciones esto también puede sugerir que la interpolación realizada no representa en su totalidad la realidad en el canal de riego.

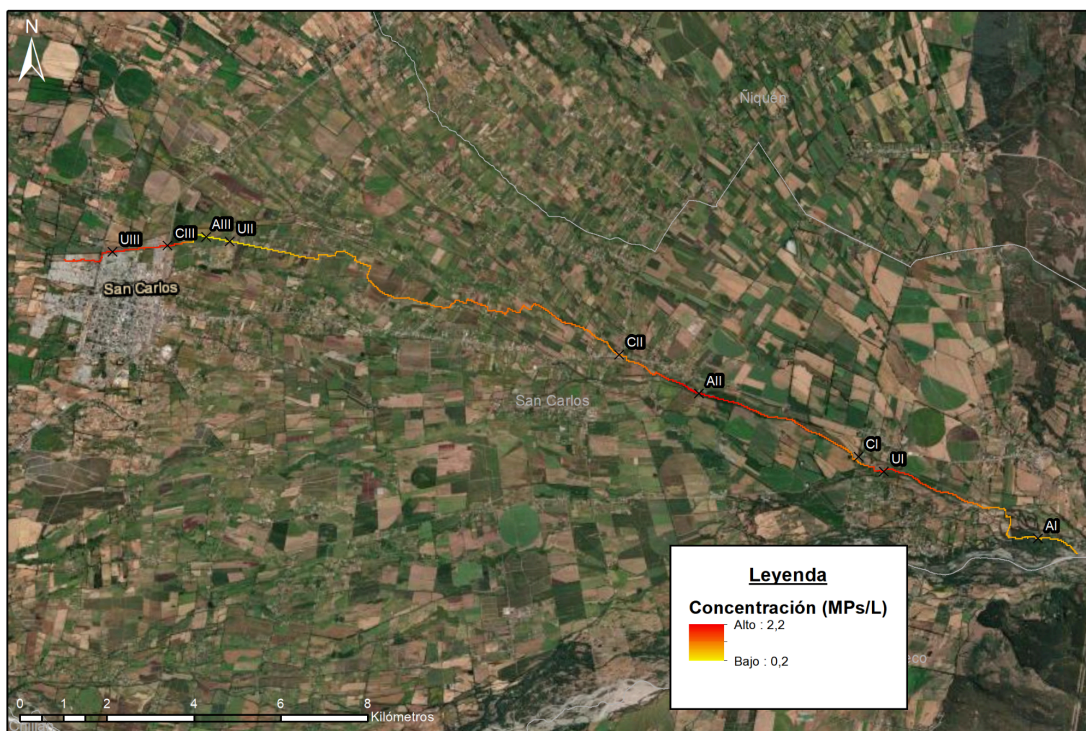


Figura 25. Interpolación concentraciones de MP, canal San Carlos.

- **Canal Rinconada de Cato**

Por último el canal Rinconada de Cato como se puede observar en la figura N°26, presentó una distribución de enriquecimiento aguas abajo del canal, el cual es el patrón esperado ya que esto refleja la entrada continua de plástico en el agua del canal a través de las actividades antropogénicas que se desarrollan alrededor de este. Jiries et al., 2024, informó una observación similar donde encontró que las cantidades de plástico en el canal de riego en Jordania mostraban una alta correlación con la densidad de población y la urbanización pese que en este canal fue donde esta fuente fue la que en menor medida se identificó, puede llegar a jugar un papel altamente relevante.

Además, cabe destacar que de acuerdo a lo observado en la campaña de muestreo desde el punto AI hasta CII el canal de riego era revestido y en los puntos de muestreo restante se observó que el canal de riesgo era no revestido, acorde a esto se podría destacar que este factor no es tan relevante en la retención de MPs en el sedimento ya que donde hay menor abundancia de MPs en el agua debiera existir mayor presencia de sedimento disponible donde este se pudiese retener y viceversa.

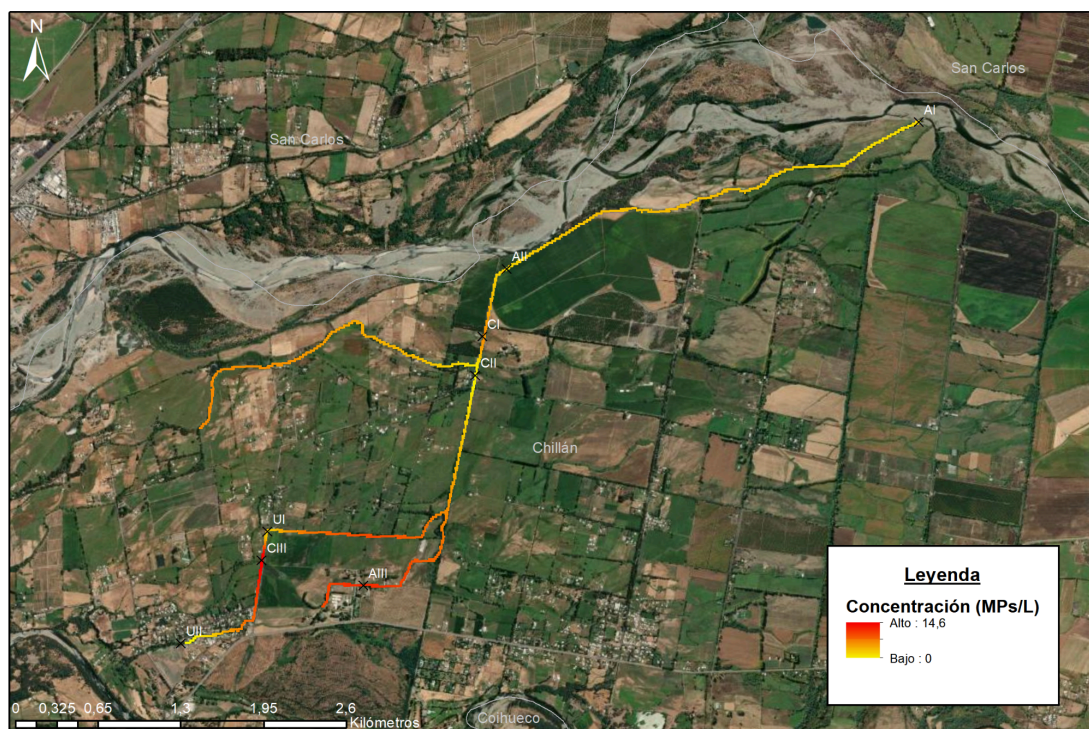


Figura 26. Interpolación concentraciones de MP, canal Rinconada de Cato.

Universidad de Concepción

De acuerdo a los resultados presentados, cabe agregar que es necesario abordar una red de muestreo más densa y temporalmente continua, para no generar datos mayormente confiables así evitando incertidumbres en los sectores donde no se realizaron mediciones.

Para poder establecer una posible asociación entre las concentraciones de MPs y las actividades antrópicas presentes en el área de estudio, se realizó un análisis estadístico del cual se presentan los siguientes resultados a continuación:

4.1. Análisis estadístico

Como se puede observar en la figura N°27, en este gráfico de cajas la línea al centro de cada caja indica el valor de la mediana de cada canal de riego igual a 0,6; 1,2 y 2,2 respectivamente, mientras que los extremos muestran valores mínimos y máximos. Cabe destacar que el canal Collico fue el único que presentó un valor atípico elevado correspondiente al punto de muestreo AI, este punto se encuentra significativamente alejado del resto del conjunto de datos. Por otra parte, también cabe destacar que el canal Rinconada de Cato presentó la mayor variabilidad debido a que sus datos se encuentran más dispersos respecto a los canales Collico y San Carlos.

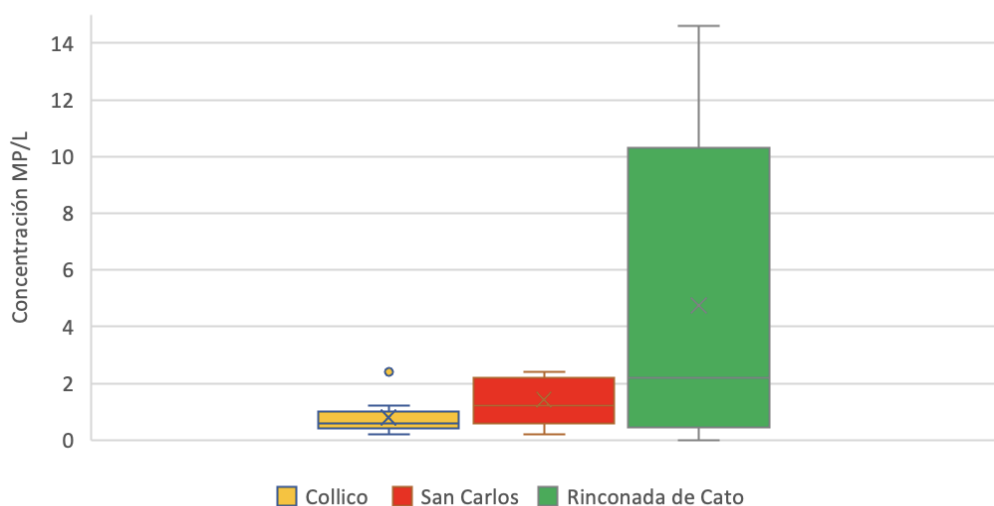


Figura 27. Gráfico de cajas basado en las concentraciones de MPs en cada canal de riego.

Universidad de Concepción

Seguidamente se realizó el test Shapiro-Wilk el cual arrojó un valor- $p=1.717e-07$, este valor indica que los datos no siguen una distribución normal por tanto debido a esto, se prosiguió a realizar el test Krustal-Wallis el cual arrojó un valor- $p=0.1925$, este valor indica que no existen diferencias estadísticamente significativas entre los datos, por tanto teniendo esto presente se prosiguió a la elaboración de una correlación la cual se puede observar en la figura N°28 entre los valores de concentraciones de MP de todos los puntos de muestreo de los 3 canales de riego y la distancia a las fuentes aportantes identificadas en el objetivo específico 2 (estos resultados se pueden observar a mayor detalle en el anexo 2).

En base a la figura N°28, se tiene que la correlación indica que no existió una tendencia que sea estadísticamente significativa entre las concentraciones de MP y las fuentes aportantes, teniendo en cuenta que para que una correlación sea significativa el valor debe ser cercano a 1, y como se puede observar los valores están indicando una correlación muy débil a nula.

En consecuencia, esta correlación sugiere que al realizar un análisis de todas las partículas plásticas sin diferenciar entre tipos de formas, color o tipo polímero por ejemplo, es una exploración muy general.

Universidad de Concepción

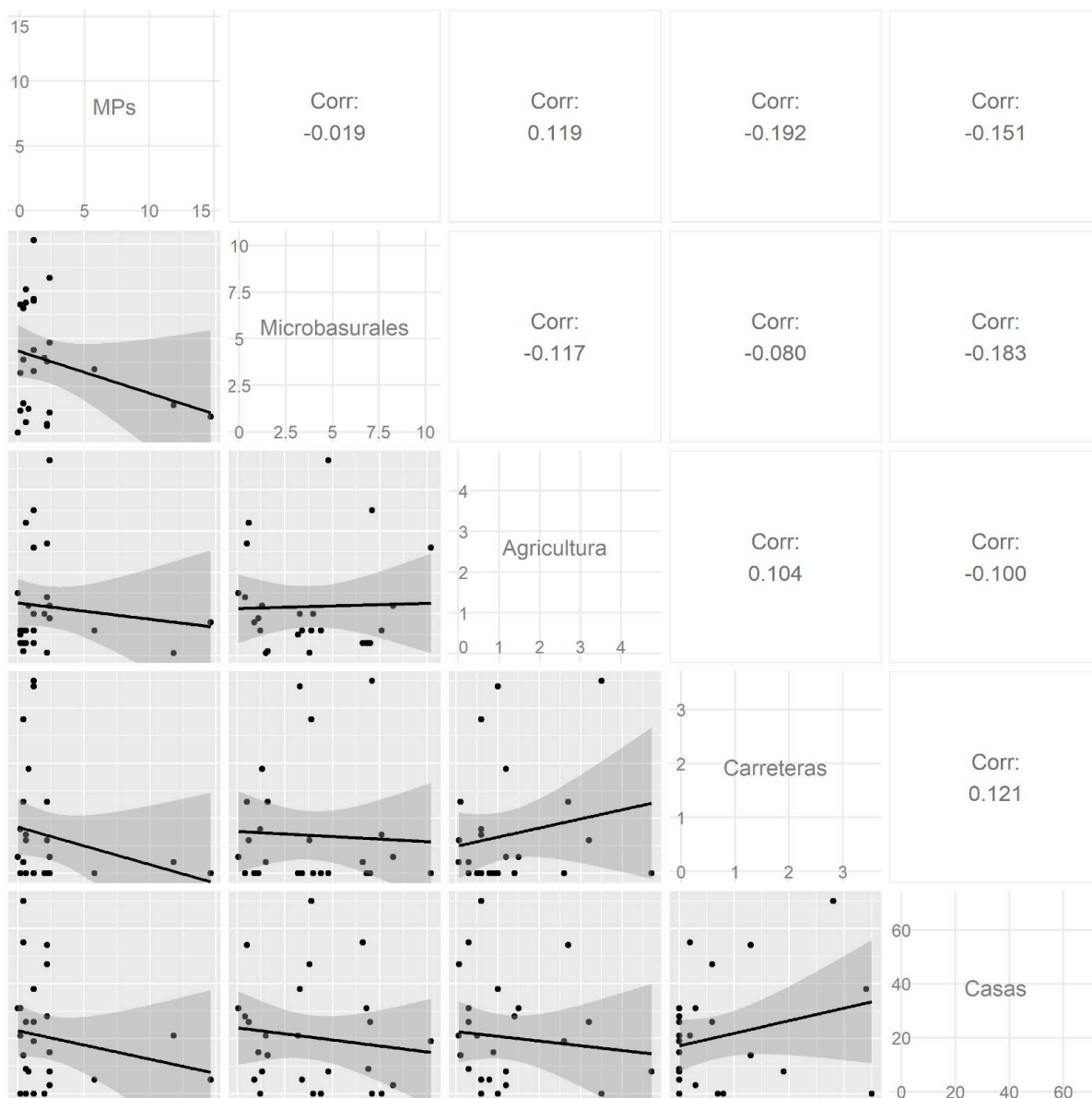


Figura 28. Correlación entre concentraciones de MP/L y fuentes aportantes.

Por último, las regresiones lineales se utilizan para modelar y evaluar relaciones predictivas entre variables, permitiendo cuantificar el efecto de una variable independiente sobre una variable dependiente. Sin embargo, al igual que la correlación, la regresión por sí sola no permite establecer relaciones causales. Por su parte, la correlación se emplea como una medida estadística de asociación, en la que una variable no necesariamente constituye la causa de la otra. De acuerdo con la figura N°29, en base a los estadísticos R^2 y p , específicamente para este último para un $p < 0.05$ las regresiones van a ser significativas y como se puede observar ninguna regresión presentó un valor p inferior a 0.05 por lo tanto

Universidad de Concepción

no son significativas y no existe una asociación entre concentración de MPs y fuentes aportantes identificadas en el área de estudio.

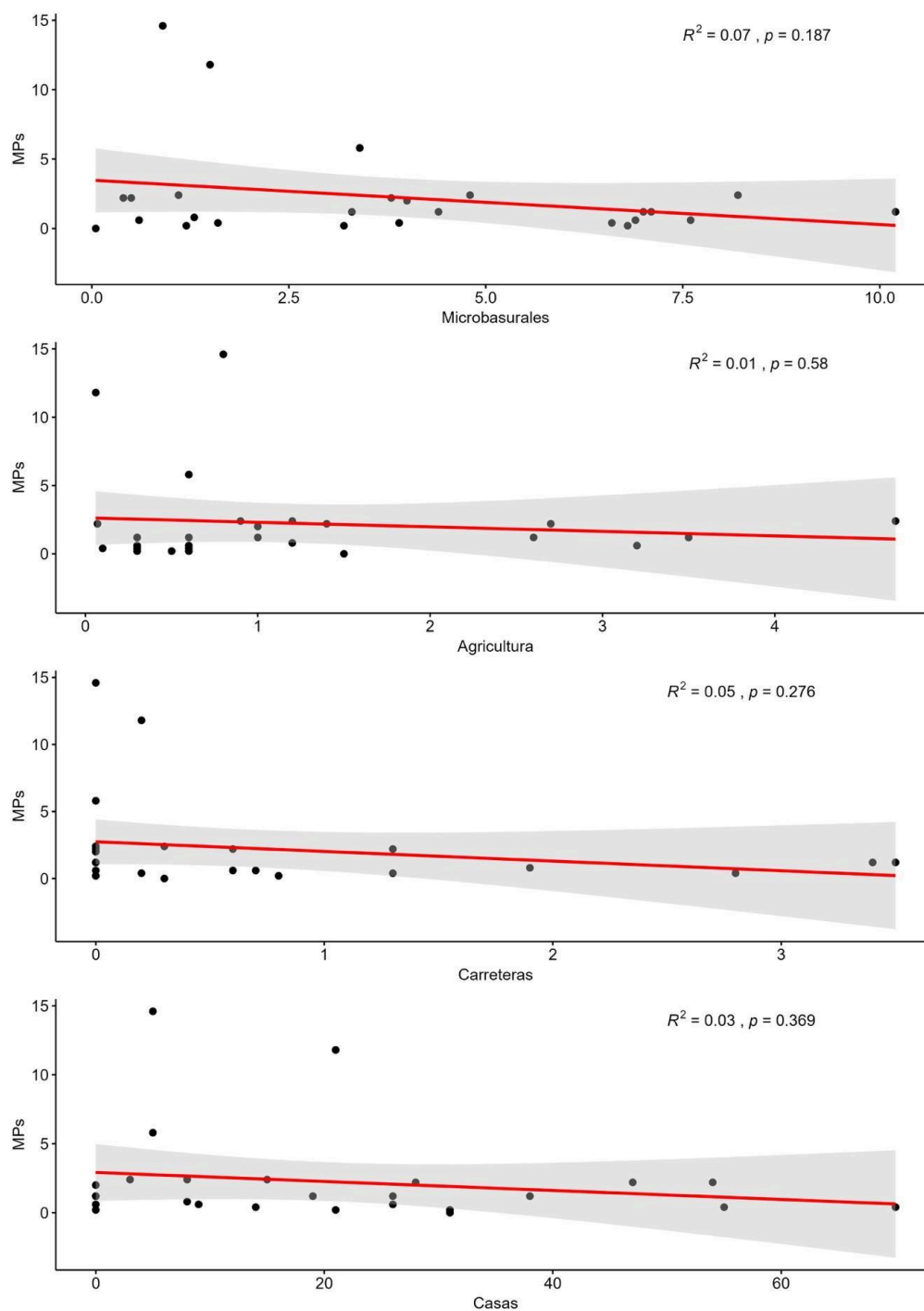


Figura 29. Regresión lineal entre concentraciones de MPs y fuentes aportantes.

4.2. Aporte a los objetivos de desarrollo sostenible (ODS)

Los objetivos de desarrollo sostenible fueron adoptados por las Naciones Unidas en el año 2015 como un llamamiento universal para poner fin a la pobreza, proteger el planeta y garantizar que para el 2030 todas las personas disfruten de paz y prosperidad (PNUD, 2015). Estos 17 objetivos están integrados y reconocen que la acción en un área afectará los resultados en otras áreas y que el desarrollo debe equilibrar la sostenibilidad social, económica y ambiental, los países se han comprometido y dentro de estos se encuentra Chile. Para efectos de este estudio son tres los ODS que se encuentran fuertemente vinculados:

- **Salud y bienestar**, este corresponde al tercer ODS el cual tiene como objetivo garantizar una vida sana y promover el bienestar de todos a todas las edades, de acuerdo a la evidencia presentada nos damos cuenta que la presencia de microplásticos en el agua de riego constituye un fuerte vector de estos contaminantes en nuestros alimentos, por ende nuestra seguridad alimentaria estaría siendo afectada, es por esto que la contribución al estudio de este tema aportaría a tomar medidas y decisiones para así minimizar los riesgos a la salud humana.
- **Agua limpia y saneamiento**, este corresponde al sexto ODS el cual tiene como objetivo garantizar la disponibilidad y la gestión sostenible del agua y el saneamiento para todos, la relación de este ODS con este estudio se vincula con la reducción de la contaminación lo cual puede comprometer la calidad del agua disponible para la agricultura y la presencia de microplásticos en el agua afecta la seguridad de esta.
- **Producción y consumo responsable**, correspondiente al décimo segundo ODS el cual posee como objetivo garantizar modalidades de consumo y producción sostenibles, un aspecto clave en este ODS es la reducción de la contaminación ambiental, por ende, la mejora en la gestión del plástico en la agricultura y ruralidad promoviendo su uso de manera eficiente, va a evitar la generación de problemáticas de este carácter.

5. CONCLUSIONES

La generalizada contaminación por MPs presente en varias matrices ambientales plantea la urgencia de actuar con acciones concretas en etapas previas que son claves, es por esto que en la presente investigación se realizó un estudio, que corrobora la presencia de contaminación por MPs así como también identificar el posible origen está en base a lo que está ocurriendo en el entorno.

Donde primeramente, se determinó una concentración promedio en los 3 canales de riego de 2,8 MP/L, donde las mayores concentraciones se midieron en el canal Rinconada de Cato, teniéndose que de los 26 puntos de muestreo sólo en 1 no se detectaron MPs, de acuerdo a los 2 estudios previos realizados en canales de riego la concentración promedio es baja en comparación a las mediciones realizadas tanto en Taiwán como en Jordania, teniéndose que tanto para las formas como la composición de las partículas, estos resultados coinciden con los presentados. Cabe destacar, que todo el procedimiento llevado a cabo, pese a la inexistente metodología estandarizada para poder medir MPs ya sea en agua u otra matriz ambiental, es esencial a la hora de una determinación más certera de las concentraciones de estos contaminantes, de lo contrario se podría generar una sobreestimación de su presencia en el ambiente y también los resultados serían más fácilmente comparables.

Posteriormente se identificó un total 5 fuentes aportantes las cuales todas se encontraron presentes en todos los canales de riego en diferentes magnitudes dentro del área de influencia de 1km, pese a una exhaustiva exploración espacial de ciertas fuentes como microbasurales e identificación de uso de plástico agrícola en el área no se descarta que los resultados obtenidos, están por debajo de lo que es la realidad y por ende tener una idea el origen de cómo los MPs llegan al medio ambiente es el primer paso en la planificación de estrategias para prevenir que este tipo de contaminación llegue al ambiente, es decir centrar los esfuerzos en la gestión de los residuos provenientes de las potenciales fuentes como por ejemplo los plásticos que se generan en la actividad agrícola los cuales muchas veces son subsidiados por entidades del estado como Prodesal o INDAP, las cuales debieran hacerse cargo de este plástico una vez finalizada su vida útil, para de esta manera eliminar el problema en una fase en la que se pueda evitar la agudización de este en el futuro.

Universidad de Concepción

Por otra parte, se analizó la distribución espacial de las partículas plásticas, teniéndose que estas presentaron patrones de distribución muy diferentes entre los 3 canales lo cual pudo estar vinculado a una serie de factores entre ellos la asociación con las posibles fuentes aportantes identificadas en el objetivo específico 2, lo cual se apoyó mediante correlaciones y regresiones lineales las cuales indicaron que no existieron tendencias que fuesen estadísticamente significativas entre las concentraciones de MP y las fuentes aportantes, por lo tanto esto sugiere la compleja interacción que existe entre los múltiples factores en el ambiente ya sean naturales o antropogénicos que influyen en la presencia y distribución de MPs. De acuerdo a esto la pregunta de investigación se rechaza parcialmente, debido a que de acuerdo a los análisis estadísticos realizados esta no se responde, pero sin duda también estos resultados son un gran aporte a la evidencia científica referente a contaminación microplástica en una materia escasamente estudiada la cual actúa como una importante fuente aportante de contaminación a los suelos agrícolas.

Adicionalmente, cabe destacar otros hallazgos relevantes, como la presencia de fluoropolímeros y politetrafluoroetileno, contaminantes altamente persistentes o también denominados “químicos eternos” que dado a sus aplicaciones en recubrimiento antiadherente en utensilios de cocina esto estaría indicando que su llegada al agua de riego es probable que llegue mediante aguas domiciliarias, de la mano con esto y de acuerdo a los resultados de Jiang et al., 2023 el cual indica que en las zonas donde se presentaba una mayor densidad poblacional las concentraciones de MPs eran mayores, este estudio sustenta mediante cartografía que, no necesariamente en los sitios de mayor densidad poblacional existen mayores concentraciones de MPs sino que la presencia de estos se ve influenciada en gran parte por la gestión de los residuos domiciliarios que se hace el cual es mucho más deficiente en las zonas rurales que en urbanas donde se presenta la mayor densidad poblacional, esto plantea grandes desafíos en la gestión de aguas residuales y grises en la ruralidad local, para poder prevenir este tipo de contaminación. Por tanto la complejidad de esta problemática abarca muchos más desafíos existentes en el territorio.

Finalmente, es importante destacar que la contaminación por MPs es prácticamente imposible de eliminar del ambiente, y dada su magnitud, amplia presencia en múltiples ambientes y su pequeño tamaño es altamente compleja su completa eliminación. Teniendo presente lo anterior y las elevadas cifras de producción de plástico en el mundo el escenario no es el más alentador, sin duda el plástico es un material ampliamente noble el cual forma

Universidad de Concepción

parte de nuestra vida y nos brinda una serie de beneficios, pero es importante diferenciar cuando es realmente esencial de cuando se vuelve un producto que puede ser reemplazado por otros, en nuestro país esto se ha visto reflejado mediante políticas que limitan la entrega de productos plásticos de un solo uso, responsabilidad extendida al productor y fomento en su reciclaje que sin duda son medidas que son un gran paso en la gestión de este producto pudiendo así actuar en una etapa clave de su ciclo de vida, lamentablemente este tipo de políticas solo aplican al territorio nacional, considerando la escala global del problema es fundamental un instrumento internacional para combatir la contaminación plástica, desafortunadamente llegar a un acuerdo es sumamente complejo dados los intereses económicos que se encuentran presentes, lo cual fue uno de los motivos por los cuales no se concluyó un acuerdo definitivo al Tratado Mundial de los Plásticos el pasado 2025.

6. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Abass, D., Alaraby, M., Elkady, E. F., Morataya-Reyes, M., Banaei, G., Martin-Perez, J., Rubio, L., Barguilla, I., Marcos, R., Hernandez, A., & Garcia-Rodriguez, A. (2025). Polytetrafluoroethylene (PTFE, Teflon) microplastics and nanoplastics induce oxidative stress, mitochondrial damage, and genotoxicity in human intestinal cells. *J Hazard Mater*, 499, 140255. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2025.140255>
2. Abubakar, L., Gatto, G., Bruggeman, J. E., & Bhattacharjee, A. (2025). Repurposing polyethylene terephthalate (PET) waste as an antibacterial packaging material. *MRS Communications*, 15(3), 500-505. <https://doi.org/10.1557/s43579-025-00723-y>
3. Andrady, A. L. (2011). Microplastics in the marine environment. *Mar Pollut Bull*, 62(8), 1596-1605. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2011.05.030>
4. Andrady, A. L. (2017). The plastic in microplastics: A review. *Mar Pollut Bull*, 119(1), 12-22. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2017.01.082>
5. ASIPLA. (2025). Estadísticas Industria del Plástico 2024. <https://asipla.cl/wp-content/uploads/2025/06/Informe-Estadistico-2024-resumen-ejecutivo.pdf>
6. Avilés, A. B. L., Méndez, G. M., & Velázquez, F. d. C. (2025). Evaluation of the Presence of Microplastics in Wastewater Treatment Plants: Development and Verification of Strategies for Their Quantification and Removal in Aqueous Streams. *Sustainability*, 17(21). <https://doi.org/10.3390/su17219470>
7. Bandyopadhyay, S., Martin-Closas, L., Pelacho, A. M., & DeBruyn, J. M. (2018). Biodegradable Plastic Mulch Films: Impacts on Soil Microbial Communities and Ecosystem Functions. *Front Microbiol*, 9, 819. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2018.00819>
8. Biblioteca del Congreso Nacional de Chile (BCN), (2023). Proyecto de Ley para eliminar y sancionar los microbasurales y vertederos clandestinos. https://www.bcn.cl/delibera/show_iniciativa?id_colegio=3775&idnac=2&patro=0&nro_torneo=2023
9. Botterell, Z. L., Bergmann, M., Hildebrandt, N., Krumpfen, T., Steinke, M., Thompson, R. C., & Lindeque, P. K. (2022). Microplastic ingestion in zooplankton from the Fram Strait in the Arctic. *Science of the Total Environment*, 831, 154886.
10. Britannica Editors (2023, September 29). polyvinyl acetate. *Encyclopedia Britannica*. <https://www.britannica.com/science/polyvinyl-acetate>
11. Büks, F., & Kaupenjohann, M. (2020). Global concentrations of microplastics in soils – a review. *Soil*, 6(2), 649-662. <https://doi.org/10.5194/soil-6-649-2020>
12. Chaves, J., Romero, R., Muñoz, D., & Arias, A. (2024). *Revisión sistemática de microplásticos: Métodos analíticos en suelo y agua*. *Revista Novedades Colombianas*, 19(1). <https://doi.org/10.47374/novcol.2024.v19.2406>
13. Comisión Nacional de Riego (CNR), Ministerio de Agricultura. <https://www.cnr.gob.cl/agricultores/infraestructura/infraestructura/distribucion/>
14. 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. *Sci Total Environ*, 752, 141917. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.141917>
15. Courteney-Jones, W., van Gennip, S., Penicaud, J., Penn, E., & Thompson, R. C. (2022). Synthetic microplastic abundance and composition along a longitudinal

16. gradient traversing the subtropical gyre in the North Atlantic Ocean. *Marine Pollution Bulletin*, 185, 114371.
17. Cusworth, S. J., Davies, W. J., McAinsh, M. R., & Stevens, C. J. (2023). A nationwide assessment of microplastic abundance in agricultural soils: The influence of plastic crop covers within the United Kingdom. *Plants, People, Planet*, 6(2), 304-314. <https://doi.org/10.1002/ppp3.10430>
18. Dallaev, R., Pisarenko, T., Sobola, D., Orudzhev, F., Ramazanov, S., & Trčka, T. (2022). Brief Review of PVDF Properties and Applications Potential. *Polymers*, 14(22), 4793. <https://doi.org/10.3390/polym14224793>
19. de Souza Machado, A. A., Kloas, W., Zarfl, C., Hempel, S., & Rillig, M. C. (2018). Microplastics as an emerging threat to terrestrial ecosystems. *Glob Chang Biol*, 24(4), 1405-1416. <https://doi.org/10.1111/gcb.14020>
20. de Souza Machado, A. A., Lau, C. W., Kloas, W., Bergmann, J., Bachelier, J. B., Faltin, E., Becker, R., Gorlich, A. S., & Rillig, M. C. (2019). Microplastics Can Change Soil Properties and Affect Plant Performance. *Environ Sci Technol*, 53(10), 6044-6052. <https://doi.org/10.1021/acs.est.9b01339>
21. Decreto 236, Reglamento General de Alcantarillados Particulares (Fosas Sépticas, Cámaras Filtrantes, Cámaras de Contacto, Cámaras Absorbentes y Letrinas Domiciliarias). Ministerio de Higiene; Asistencia, Previsión y Trabajo. Diario Oficial de la República de Chile, 30 de abril de 1926. <https://www.bcn.cl/leychile/navegar?i=171085&f=2004-07-26>
22. Deshmukh, D., Kulkarni, H., Srivats, D. S., Bhanushali, S., & More, A. P. (2024). Recycling of acrylonitrile butadiene styrene (ABS): a review. *Polymer Bulletin*, 81(13), 1-38. <https://doi.org/10.1007/s00289-024-05269-y>
23. Dobrota, D., Sava, G. A., Barbusiu, A. M., & Dobrescu, G. T. (2025). Sustainable Polymer Composites for Thermal Insulation in Automotive Applications: A Systematic Literature Review. *Polymers (Basel)*, 17(16). <https://doi.org/10.3390/polym17162200>
24. Dupont. (2014). General Properties of Tedlar PVF Films. <https://www.dupont.com/solar-photovoltaic-materials/technical-resources/dupont-tedlar-polyvinyl-fluoride-pvf-films-general-properties.html>
25. Efectos de los residuos plásticos y microplásticos en los ecosistemas del suelo: un metaanálisis global
26. Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). (2021). Assessment of agricultural plastics and their sustainability: A call for action. <https://doi.org/10.4060/cb7856en>
27. Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). (2023). Salir del círculo vicioso del plástico en la agricultura. <https://www.fao.org/newsroom/story/breaking-the-plastic-cycle-in-agriculture/es>
28. Fundación Chile (2024). Pacto Chileno de los plásticos: Economía Circular. <https://fch.cl/iniciativa/pacto-chileno-de-los-plasticos/>
29. Ghanbari Tapeh, N., Fataei, E., Naji, A., Akbar Imani, A., & Nasehi, F. (2022). Municipal Wastewater Effluent as a Source of Microplastic Pollution Crisis in the Qarasu River Water, Ardabil Province, Iran. *Health in Emergencies & Disasters Quarterly*, 7(3), 117-126. <https://doi.org/10.32598/hdq.7.3.406.2>
30. Ghosh, S., Sinha, J. K., Ghosh, S., Vashisth, K., Han, S., & Bhaskar, R. (2023). Microplastics as an Emerging Threat to the Global Environment and Human Health. *Sustainability*, 15(14), 10821. <https://doi.org/10.3390/su151410821>
31. Giechaskiel, B., Grigoratos, T., Mathissen, M., Quik, J., Tromp, P., Gustafsson, M., Franco, V., & Dilara, P. (2024). Contribution of Road Vehicle Tyre Wear to

- Microplastics and Ambient Air Pollution. *Sustainability*, 16(2), 522. <https://doi.org/10.3390/su16020522>
32. González, J. (2020). Agricultura de la nueva Región de Ñuble: una caracterización sectorial. <https://bibliotecadigital.ciren.cl/items/665badf2-56d9-40f5-aecf-bb620d426e35>
 33. Hammond, C., & Evennett, P. J. (2005). Light microscopy. En *Encyclopedia of Life Sciences*. Elsevier.
 34. Higuera, C. A. (2022). Microplásticos en aguas residuales y posibles medidas de control en el Gran Santiago (Tesis de magister, Universidad de Chile). Repositorio académico de la Universidad de Chile. <https://mgpa.forestaluchile.cl/Tesis/Higuera%20Camila.pdf>
 35. 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, 127-141. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.01.190>
 36. Huang, Y., Liu, Q., Jia, W., Yan, C., & Wang, J. (2020). Agricultural plastic mulching as a source of microplastics in the terrestrial environment. *Environ Pollut*, 260, 114096. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2020.114096>
 37. Huang, Z., Hu, B., & Wang, H. (2023). Analytical methods for microplastics in the environment: a review. *Environ Chem Lett*, 21(1), 383-401. <https://doi.org/10.1007/s10311-022-01525-7>
 38. Hwang, J., Choi, D., Han, S., Jung, S. Y., Choi, J., & Hong, J. (2020). Potential toxicity of polystyrene microplastic particles. *Sci Rep*, 10(1), 7391. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-64464-9>
 39. Ibrahim, N., Rahman, A. M. N. A. A., Shafiq, M. D., et al. (2025). Microplastic pollution: Sources, degradation mechanisms, analytical advances, and mitigation strategies for environmental sustainability. *Reviews of Environmental Contamination and Toxicology*, 263, Article 27. <https://doi.org/10.1007/s44169-025-00098-0>
 40. Jadhav, H. S., Fulke, A. B., & Giripunje, M. D. (2022). Recent global insight into mitigation of plastic pollutants, sustainable biodegradable alternatives, and recycling strategies. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 20(7), 8175-8198. <https://doi.org/10.1007/s13762-022-04363-w>
 41. Jiang, J. J., Hanun, J. N., Chen, K. Y., Hassan, F., Liu, K. T., Hung, Y. H., & Chang, T. W. (2023). Current levels and composition profiles of microplastics in irrigation water. *Environ Pollut*, 318, 120858. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2022.120858>
 42. Jiries, A., Al-Omari, A., Fraihat, S., & Hamra, M. A. (2024). Abundance and distribution of microplastics in irrigation canal water in Jordan. *Desalination and Water Treatment*, 318. <https://doi.org/10.1016/j.dwt.2024.100409>
 43. Khalid, N., Aqeel, M., Noman, A., & Fatima Rizvi, Z. (2023). Impact of plastic mulching as a major source of microplastics in agroecosystems. *J Hazard Mater*, 445, 130455. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2022.130455>
 44. KJ, A. y M, M. (2024). Aplicación del PVC: un material superior en los campos de la ciencia y la tecnología. *Tecnología y materiales de polímeros y plásticos*, 63 (15), 2089–2107. <https://doi.org/10.1080/25740881.2024.2365288>
 45. Kumar, M., Xiong, X., He, M., Tsang, D. C. W., Gupta, J., Khan, E., Harrad, S., Hou, D., Ok, Y. S., & Bolan, N. S. (2020). Microplastics as pollutants in agricultural soils. *Environ Pollut*, 265(Pt A), 114980. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2020.114980>
 46. Kumar, R., Sharma, P., Manna, C., & Jain, M. (2021). Abundance, interaction, ingestion, ecological concerns, and mitigation policies of microplastic pollution in
 - 47.

Universidad de Concepción

- riverine ecosystem: A review. *Science of The Total Environment*, 782. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.146695>
48. La Daana, K. K., Officer, R., Lyashevskaya, O., Thompson, R. C., & O'Connor, I. (2017). Microplastic abundance, distribution and composition along a latitudinal gradient in the Atlantic Ocean. *Marine pollution bulletin*, 115(1-2), 307-314.
49. Lalrinfela, P., Vanlalsangi, R., Lalrinzuali, K., & Babu, P. J. (2024). Microplastics: Their effects on the environment, human health, and plant ecosystems. *Environmental Pollution and Management*, 1, 248-259. <https://doi.org/10.1016/j.epm.2024.11.004>
50. Lasky, J. (2024). Polyurethane. *Salem Press Encyclopedia of Science*. Salem Press.
51. L'der M, Gerdt G (2014) Análisis FTIR para el monitoreo de microplásticos marinos. *Appl Mech Mater* 405–408:2644–2648. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.405-408.2644>
52. Ley N.º 18.450, Aprueba normas para el fomento de la inversión privada en obras de riego y drenaje. *Diario Oficial de la República de Chile*, 30 de octubre de 1985. <https://www.bcn.cl/leychile/navegar?idNorma=29828>
53. Lim X. (2021). Microplastics are everywhere - but are they harmful?. *Nature*, 593(7857), 22–25. <https://doi.org/10.1038/d41586-021-01143-3>
54. Liu, K., Wang, X., Fang, T., Xu, P., Zhu, L., & Li, D. (2019). Source and potential risk assessment of suspended atmospheric microplastics in Shanghai. *Sci Total Environ*, 675, 462-471. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.04.110>
55. Liu, M., Lu, S., Song, Y., Lei, L., Hu, J., Lv, W., Zhou, W., Cao, C., Shi, H., Yang, X., & He, D. (2018). Microplastic and mesoplastic pollution in farmland soils in suburbs of Shanghai, China. *Environ Pollut*, 242(Pt A), 855-862. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2018.07.051>
56. Liu, Y., Huang, Q., Hu, W., Qin, J., Zheng, Y., Wang, J., Wang, Q., Xu, Y., Guo, G., Hu, S., & Xu, L. (2021). Effects of plastic mulch film residues on soil-microbe-plant systems under different soil pH conditions. *Chemosphere*, 267, 128901. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.128901>
57. Los microplásticos están en todas partes, pero ¿son dañinos?
58. Lu, L., Luo, T., Zhao, Y., Cai, C., Fu, Z., & Jin, Y. (2019). Interaction between microplastics and microorganism as well as gut microbiota: A consideration on environmental animal and human health. *Sci Total Environ*, 667, 94-100. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.02.380>
59. Lozada, H. J., & Romero, A. D. (2021). Estudio de las características de los microplásticos en las playas de arena del Perú (Tesis de licenciatura, Universidad Privada del Norte). Repositorio de la Universidad Privada del Norte. <https://repositorio.upn.edu.pe/item/b08ae2e3-c551-4864-9a31-c1575b851e6e>
60. Luzi, B., Carnevale Miino, M., Rada, E. C., Zullo, R., Baltrocchi, A. P. D., Torretta, V., & Galafassi, S. (2025). Critical review of microfiber release from textiles: Results, comparative challenges, mitigation strategies, and legislative perspectives. *Chemosphere*, 378, 144394. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2025.144394>
61. Majnooni, S., Fooladi, M., Nikoo, M. R., Al-Rawas, G., Haghighi, A. T., Nazari, R., Al-Wardy, M., & Gandomi, A. H. (2024). Smarter water quality monitoring in reservoirs using interpretable deep learning models and feature importance analysis. *Journal of Water Process Engineering*, 60. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2024.105187>
62. McIntosh, H., Atucha, A., Townsend, P. A., Hills, W. B., & Guédot, C. (2021). Plastic mulches reduce adult and larval populations of *Drosophila suzukii* in fall-bearing

Universidad de Concepción

- raspberry. *Journal of Pest Science*, 95(1), 525-536. <https://doi.org/10.1007/s10340-021-01456-2>
63. McLoughlin, J., & Hayes, S. (2013). Types of fabric and their joining requirements. En I. Jones & G. K. Stylios (Eds.), *Joining textiles* (pp. 1–44). Woodhead Publishing. <https://doi.org/10.1533/9780857093967.1>
 64. Mesa Nacional del Agua. (2022). Informe Final. Mesa Nacional del Agua. <https://www.chileagenda2030.gob.cl/iniciativas/1986/documento/informeFinal2022MesaAgua.pdf>
 65. Ministerio de Obras Públicas (MOP). (2025). Concesión Ruta 5 Tramo Talca-Chillán. https://concesiones.mop.gob.cl/uploads/sites/4/2025/10/Informe-Ejecutivo_Ruta5_Talca-Chillan_agosto2025.pdf
 66. Ministerio del Medio Ambiente (MMA). (2021). Estrategia Nacional de Residuos Orgánicos, Chile 2040. <https://economiacircular.mma.gob.cl/wp-content/uploads/2021/03/Estrategia-Nacional-de-Residuos-Organicos-Chile-2040.pdf>
 67. Nizzetto, L., Langaas, S. & Futter, M. Pollution: Do microplastics spill on to farm soils?. *Nature* 537, 488 (2016). <https://doi.org/10.1038/537488b>
 68. Norma Chilena Oficial NCh 1333.Of.78 modificada en 1987 : requisitos de calidad del agua para diferentes usos /. (1998, June 4). Retrieved from https://www.bcn.cl/catalogo/detalle_libro?bib=100363
 69. Okori, F., Schwarzböck, T., Neuburg, S., Komakech, A. J., Lederer, J., & Fellner, J. (2025). Macro- and microplastics in composts from municipal solid waste industrial composting plants in Uganda. *Waste Management*, 204, Article 114942. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2025.114942>
 70. Pang, L.-J.; Adeel, M.; Shakoor, N.; Guo, K.-R.; Ma, D.-F.; Ahmad, MA; Lu, G.-Q.; Zhao, M.-H.; Li, S.-E.; Rui, Y.-K. Nanomateriales diseñados suprimen la enfermedad de la podredumbre blanda (*Rhizopus stolonifer*) y ralentizan la pérdida de nutrientes en la batata. *Nanomaterials* 2021 , 11 , 2572.
 71. PEPSSEN. (2025). Poliéter uretano frente a poliuretano. <https://pepsenpu.com/es/polieter-uretano-frente-a-poliuretano/>
 72. Pérez Hoyos, A. (2018). Manejo del estereomicroscopio. Sello Editorial Tecnológico de Antioquia. Disponible en: <https://dspace.tdea.edu.co/handle/tdea/1472>
 73. Plastic Soup Foundation. (2021). Annual Report 2021. https://www.plasticsoupfoundation.org/financial-reports/PSF_ANNUAL-REPORT_2021_EN.pdf
 74. PlasticsEurope. (2025). Plastics the Fast Facts 2025. https://plasticseurope.org/wp-content/uploads/2025/09/PE_TheFacts_25_digital-1pager-scrollable.pdf
 75. Programa de Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD). Informe sobre Desarrollo humano (2015). <https://hdr.undp.org/system/files/documents/hdr2015reportsp.pdf>
 76. Prata JC, da Costa JP, Duarte AC, Rocha-Santos T (2019) Métodos de muestreo y detección de microplásticos en agua y sedimentos: una revisión crítica. *TrAC Trends Anal Chem* 110:150–159. <https://doi.org/10.1016/j.trac.2018.10.029>
 77. 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. *Sci Total Environ*, 702, 134455. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.134455>

78. Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (UNEP), (2023). Todo lo que necesitas saber sobre la contaminación por microplásticos. <https://www.unep.org/es/noticias-y-reportajes/reportajes/todo-lo-que-necesitas-saber-sobre-la-contaminacion-por-plasticos>
79. Pu, R., Zhao, L., Deng, S., Naidu, R., Mantzavinos, D., Lin, L., Fang, C., & Lei, Y. (2025). Effect of high-frequency ultrasonication on degradation of polytetrafluoroethylene (PTFE) microplastics/nanoplastics. *Separation and Purification Technology*, 357. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2024.130229>
80. Rai, M., Pant, G., Pant, K., Aloo, B. N., Kumar, G., Singh, H. B., & Tripathi, V. (2023). Microplastic Pollution in Terrestrial Ecosystems and Its Interaction with Other Soil Pollutants: A Potential Threat to Soil Ecosystem Sustainability. *Resources*, 12(6), 67. <https://doi.org/10.3390/resources12060067>
81. Rillig, M. C., Leifheit, E., & Lehmann, J. (2021). Microplastic effects on carbon cycling processes in soils. *PLoS Biol*, 19(3), e3001130. <https://doi.org/10.1371/journal.pbio.3001130>
82. Ritchie, H., & Roser, M. (2018). Plastic pollution. Our World in Data. <https://ourworldindata.org/plastic-pollution>
83. Rivera, Reinaldo, de Los Ríos, Patricio, & Contreras, Ángel. (2010). Relations fecal coliforms/ fecal Streptococci as indicators of the origin of fecal pollution in urban and rural water bodies of Temuco, Chile. *Ciencia e investigación agraria*, 37(2), 141-149. <https://dx.doi.org/10.4067/S0718-16202010000200014>
84. Rochman, C., Browne, M., Halpern, B. et al. Classify plastic waste as hazardous. *Nature* 494, 169–171 (2013). <https://doi.org/10.1038/494169a>
85. Sarijan, S., Azman, S., Said, M.I.M. y otros. Microplásticos en ecosistemas de agua dulce: una revisión reciente de la ocurrencia, análisis, impactos potenciales y necesidades de investigación. *Environ Sci Pollut Res* 28, 1341–1356 (2021). <https://doi.org/10.1007/s11356-020-11171-7>
86. Sarker, A., Deepo, D. M., Nandi, R., Rana, J., Islam, S., Rahman, S., Hossain, M. N., Islam, M. S., Baroi, A., & Kim, J. E. (2020). A review of microplastics pollution in the soil and terrestrial ecosystems: A global and Bangladesh perspective. *Sci Total Environ*, 733, 139296. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.139296>
87. Scarascia-Mugnozza, G., Sica, C., & Russo, G. (2011). Plastic materials in European agriculture: actual use and perspectives. *Journal of Agricultural Engineering*, 42(3), 15-28.
88. Schwarz, A. E., Ligthart, T. N., Boukris, E., & van Harmelen, T. (2019). Sources, transport, and accumulation of different types of plastic litter in aquatic environments: A review study. *Mar Pollut Bull*, 143, 92-100. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2019.04.029>
89. SEGPRES (2009), Decreto supremo N°4, Reglamento para el manejo de lodos generados en plantas de tratamiento de aguas servidas. <https://www.bcn.cl/leychile/navegar?idNorma=1007456>
90. Serrano-Ruiz, H., Martin-Closas, L., & Pelacho, A. M. (2021). Biodegradable plastic mulches: Impact on the agricultural biotic environment. *Sci Total Environ*, 750, 141228. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.141228>
91. SISS. (2019). Informe de gestión del sector sanitario. <https://www.siss.gob.cl/586/w3-propertyvalue-6415.html>
92. Song YK, Hong SH, Jang M, Han GM, Rani M, Lee J, Shim WJ (2015) A comparison of microscopic and spectroscopic identification methods for analysis of microplastics in environmental samples. *Mar Pollut Bull* 93:202–209. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2015.01.015>

93. Sridharan, S., Kumar, M., Singh, L., Bolan, N. S., & Saha, M. (2021). Microplastics as an emerging source of particulate air pollution: A critical review. *J Hazard Mater*, 418, 126245. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2021.126245>
94. Srivastava, A., Maity, S., & Das, B. R. (2025). A review on multi-functional polyurethane (PU) coatings for fabric applications: Materials, processes and recent developments. *Progress in Organic Coatings*, 207. <https://doi.org/10.1016/j.porgcoat.2025.109377>
95. Steinmetz, Z., Wollmann, C., Schaefer, M., Buchmann, C., David, J., Troger, J., Munoz, K., Fror, O., & Schaumann, G. E. (2016). Plastic mulching in agriculture. Trading short-term agronomic benefits for long-term soil degradation? *Sci Total Environ*, 550, 690-705. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.01.153>
96. Sun, H., Lei, C., Yuan, Y., Xu, J., & Han, M. (2022). Nanoplastic impacts on the foliar uptake, metabolism and phytotoxicity of phthalate esters in corn (*Zea mays* L.) plants. *Chemosphere*, 304, 135309. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2022.135309>
97. Talbot, R., & Chang, H. (2022). Microplastics in freshwater: A global review of factors affecting spatial and temporal variations. *Environ Pollut*, 292(Pt B), 118393. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2021.118393>
98. Teuten, EL; Saquing, JM; Knappe, D.; Barlaz, MA; Jonsson, S.; Björn, A.; Rowland, SJ; Thompson, R.; Galloway, TS; Yamashita, R.; et al. Transporte y liberación de sustancias químicas de los plásticos al medio ambiente y a la fauna silvestre. *Philos. Trans. R. Soc. B. Biol. Sci.* 2009 , 364 , 2027–2045.
99. Thompson, R. C., Olsen, Y., Mitchell, R. P., Davis, A., Rowland, S. J., John, A. W., McGonigle, D., & Russell, A. E. (2004). Lost at sea: where is all the plastic?. *Science* (New York, N.Y.), 304(5672), 838. <https://doi.org/10.1126/science.1094559>
100. van Sebillie, E., Wilcox, C., Lebreton, L., Maximenko, N., Hardesty, B. D., van Franeker, J. A., Eriksen, M., Siegel, D., Galgani, F., & Law, K. L. (2015). A global inventory of small floating plastic debris. *Environmental Research Letters*, 10(12). <https://doi.org/10.1088/1748-9326/10/12/124006>
101. Vassilenko, E., Watkins, M., Chastain, S., Mertens, J., Posacka, A. M., Patankar, S., & Ross, P. S. (2021). Domestic laundry and microfiber pollution: Exploring fiber shedding from consumer apparel textiles. *PloS one*, 16(7), e0250346. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0250346>
102. Wagner, M., Monclús, L., Arp, H. P. H., Groh, K. J., Løseth, M. E., Muncke, J., Wang, Z., Wolf, R., & Zimmermann, L. (2024). *Estado de la ciencia sobre sustancias químicas plásticas: Identificación y tratamiento de sustancias químicas y polímeros preocupantes*. <https://doi.org/10.5281/zenodo.10701706>
103. Wang, C., Wang, L., Ok, Y. S., Tsang, D. C. W., & Hou, D. (2022). Soil plastisphere: Exploration methods, influencing factors, and ecological insights. *J Hazard Mater*, 430, 128503. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2022.128503>
104. Wang, S., Fan, T., Cheng, W., Wang, L., Zhao, G., Li, S., Dang, Y., & Zhang, J. (2022). Occurrence of macroplastic debris in the long-term plastic film-mulched agricultural soil: A case study of Northwest China. *Sci Total Environ*, 831, 154881. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.154881>
105. Whitman, K., Bowyer, C., Nieto-Garcia, M., Georgiou, G., Evans, T., & Fletcher, S. (2025). Plastic blindness: Lifting the blindfold through citizen science. *Environmental Science & Policy*, 173. <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2025.104218>
106. Wright, S. L., Ulke, J., Font, A., Chan, K. L. A., & Kelly, F. J. (2020). Atmospheric microplastic deposition in an urban environment and an evaluation of transport. *Environment International*, 136. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2019.105411>

107. Wu, C., Ma, Y., Wang, D., Shan, Y., Song, X., Hu, H., Ren, X., Ma, X., Cui, J., & Ma, Y. (2022). Integrated microbiology and metabolomics analysis reveal plastic mulch film residue affects soil microorganisms and their metabolic functions. *J Hazard Mater*, 423(Pt B), 127258. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2021.127258>
108. Yadav, A., Singh, A., Naresh, R., & Kumar, L. (2025). A comparative review of the performance of lined and unlined irrigation canals. *Current Agriculture Research Journal*, 13(2). <https://doi.org/10.12944/CARJ.13.2.6>
109. Yang, H., & Foroutan, H. (2023). Effects of near-bed turbulence on microplastics fate and transport in streams. *Sci Total Environ*, 905, 167173. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.167173>
110. Ye, S., & Pei, D. (2023). Relationships between microplastic pollution and land use in the Chongqing section of the Yangtze River. *Frontiers in Ecology and Evolution*, 11. <https://doi.org/10.3389/fevo.2023.1202562>
111. Yu, Y.-Y., Turner, N. C., Gong, Y.-H., Li, F.-M., Fang, C., Ge, L.-J., & Ye, J.-S. (2018). Benefits and limitations to straw- and plastic-film mulch on maize yield and water use efficiency: A meta-analysis across hydrothermal gradients. *European Journal of Agronomy*, 99, 138-147. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2018.07.005>
112. Zaroni, I., Briccolani, L., Faccani, L., Blosi, M., Ortelli, S., Crosera, M., Marussi, G., Albonetti, S., & Costa, A. L. (2025). Characterization of polyethylene and polyurethane microplastics and their adsorption behavior on Cu²⁺ and Fe³⁺ in environmental matrices. *Environmental Sciences Europe*, 37(1). <https://doi.org/10.1186/s12302-025-01061-5>
113. Zhang, X., Yu, C., Wang, P., & Yang, C. (2025). Microplastics and human health: unraveling the toxicological pathways and implications for public health. *Frontiers in public health*, 13, 1567200. <https://doi.org/10.3389/fpubh.2025.1567200>
114. Zhang, Z., Zhao, S., Chen, L., Duan, C., Zhang, X., & Fang, L. (2022). A review of microplastics in soil: Occurrence, analytical methods, combined contamination and risks. *Environ Pollut*, 306, 119374. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2022.119374>
115. Zhou, B., Wang, J., Zhang, H., Shi, H., Fei, Y., Huang, S., Tong, Y., Wen, D., Luo, Y., & Barcelo, D. (2020). Microplastics in agricultural soils on the coastal plain of Hangzhou Bay, east China: Multiple sources other than plastic mulching film. *J Hazard Mater*, 388, 121814. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2019.121814>
116. Zhou, J., Wen, Y., Marshall, M., Jie, Z., Gui, H., Yang, Y., Zeng, Z., Jones, D., & Zang, H. (2021). Microplastics as an emerging threat to plant and soil health in agroecosystems. *Science of The Total Environment*, 787, 147444. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.147444>
117. Zhou, W., Wang, Q., Wei, Z., Jiang, J., & Deng, J. (2023). Effects of microplastic type on growth and physiology of soil crops: Implications for farmland yield and food quality. *Environmental pollution (Barking, Essex : 1987)*, 326, 121512. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2023.121512>

7. ANEXOS

7.1. Anexo 1

Materiales

- Filtro de fibra de vidrio con tamaño de poro de 1.6 μm
- Placas de Petri
- Fórceps de disección de metal
- Porta objeto

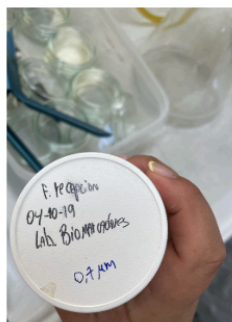
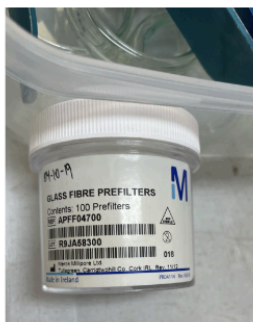
Equipos

- Bomba de vacío
- Estereomicroscopio
- Espectrómetro FT-IR

Imagen de materiales empleados para extracción de agua y mantenimiento de muestras



Imágenes de algunos materiales empleados durante el proceso de separación de muestra



Universidad de Concepción

7.2. Anexo 2

Distancias en metros a puntos de muestreo en metros y el número de edificaciones en un radio de 100 m alrededor de cada punto de muestreo

Canal Collico

Punto de muestreo	Microbasural	Plástico agrícola	Carretera	Número de edificaciones
AI	4797	4686	0	8
AII	625	3181	639	9
UI	3298	984	3400	26
UII	3890	577	2800	55
UIII	6600	338	98	70
CI	6800	317	0	31
CII	6900	262	0	26
CIII	7000	338	0	38
AIII	7600	636	674	0

Canal San Carlos

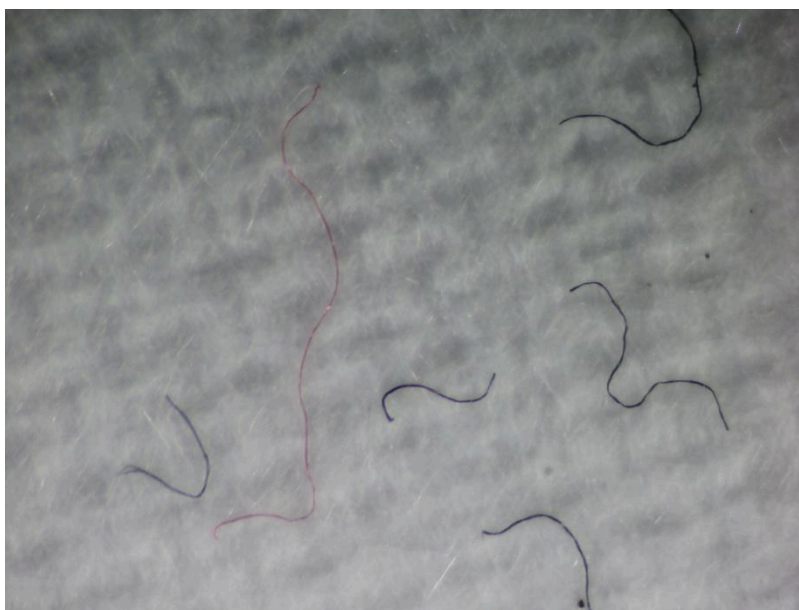
Punto de muestreo	Microbasural	Plástico agrícola	Carretera	Número de edificaciones
AI	1375	1288	1900	8
UI	3800	70	594	47
CI	4400	620	0	0
AII	8200	1236	340	3
CII	10200	2650	0	19
UII	1600	132	1370	14
AIII	1220	639	830	0
CIII	424	1490	0	28
UIII	562	2765	1308	54

Universidad de Concepción

Canal Rinconada de Cato

Punto de muestreo	Microbasural	Plástico agrícola	Carretera	Número de edificaciones
AI	7100	3500	4426	31
AII	4000	1000	2989	21
CI	3400	600	2433	0
CII	3200	500	2073	0
UI	1100	900	812	15
CIII	900	800	593	5
UII	50	1500	360	21
AIII	1500	60	275	5

7.3. Anexo 3



Partículas separadas correspondientes al punto UI, canal Collico.

Universidad de Concepción



Partículas separadas correspondientes al punto CIII, canal San Carlos.



Partículas separadas correspondientes al punto CI, canal Rinconada de Cato.