



CENTRO DE INVESTIGACIONES BIOLÓGICAS
DEL NOROESTE, S.C.

Programa de Estudios de Posgrado

**MICROPLÁSTICOS EN DOS PRADERAS DEL PASTO MARINO
Halophila decipiens EN LA ZONA COSTERA DE LA PAZ, BAJA
CALIFORNIA SUR.**

T E S I S

Que para obtener el grado de

Maestra en Ciencias

Uso, Manejo y Preservación de los Recursos Naturales
(Orientación en Biología Marina)

P r e s e n t a

Claudia Hernández Melo

La Paz, Baja California Sur, febrero de 2024.

ACTA DE LIBERACIÓN DE TESIS

En la Ciudad de La Paz, B. C. S., siendo las 11:20 horas del día 13 del Mes de febrero del 2024, se procedió por los abajo firmantes, miembros de la Comisión Revisora de Tesis avalada por la Dirección de Estudios de Posgrado y Formación de Recursos Humanos del Centro de Investigaciones Biológicas del Noroeste, S.C., a liberar la Tesis de Grado titulada:

MICROPLÁSTICOS EN DOS PRADERAS DEL PASTO MARINO *Halophila decipiens* EN LA ZONA COSTERA DE LA PAZ, BAJA CALIFORNIA SUR.

Presentada por el alumno:

Claudia Hernández Melo

Aspirante al Grado de MAESTRO EN CIENCIAS EN EL USO, MANEJO Y PRESERVACIÓN DE LOS RECURSOS NATURALES CON ORIENTACIÓN EN **Biología Marina**.

Después de intercambiar opiniones los miembros de la Comisión manifestaron su **APROBACIÓN DE LA TESIS**, en virtud de que satisface los requisitos señalados por las disposiciones reglamentarias vigentes.

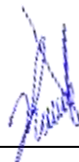
LA COMISIÓN REVISORA



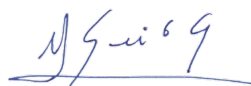
Dr. José Alfredo Arreola Lizárraga
Director de Tesis



Dra. Elisa Serviere Zaragoza
Co-Tutora de Tesis



Dra. Karla Verónica Pedraza Venegas
Co-Tutora de Tesis



Dra. Alejandra Nieto Garibay,
Directora de Estudios de Posgrado y
Formación de Recursos Humanos.



CONAHCYT
CONSEJO NACIONAL DE HUMANIDADES
CIENCIAS Y TECNOLOGÍAS

CI B Centro de
Investigaciones
Biológicas
del Noroeste

La Paz, Baja California Sur, a 13 de febrero de 2024

Los Miembros del Comité de la estudiante Claudia Hernández Melo del Programa de Maestría en Ciencias en el Uso, Manejo y Preservación de los Recursos Naturales, revisamos el contenido de la tesis y otorgamos el Vo.Bo. dado que la tesis no representa un plagio de otro documento como lo muestra el reporte de similitud realizado:

- Herramienta antiplagio:
iThenticate
- Filtros utilizados:
Excluir citas y bibliografía
- Porcentajes de similitud:
Máximo 20 % para tesis de Posgrado
Se muestra captura de pantalla

	Citas excluidas Bibliografía excluida	11% SIMILAR
Resumen de Coincidencias		
1	Internet 475 palabras Copiado el 24-Nov-2020 cibnor.repositorioinstitucional.mx	3%
2	Internet 130 palabras Copiado el 11-Nov-2020 doczz.net	1%
3	Internet 82 palabras Copiado el 21-Feb-2023 www.researchgate.net	1%
4	Internet 51 palabras Copiado el 06-Oct-2023 rodin.uca.es	<1%
5	Internet 40 palabras Copiado el 24-Mar-2014 www.linguee.com	<1%
6	Internet 39 palabras Copiado el 04-Mar-2018 biblio.uabcs.mx	<1%

Firmas del comité

Dr. José Alfredo Arreola Lizárraga

Director de Tesis

Dra. Elisa Serviere Zaragoza

Co-Tutora de Tesis

Dra. Karla Verónica Pedraza Venegas

Co-Tutora de Tesis

Conformación de Comités

Comité Tutorial

Dr. José Alfredo Arreola Lizárraga
Centro de Investigaciones Biológicas del Noroeste, S.C.
Director de Tesis

Dra. Elisa Serviere Zaragoza
Centro de Investigaciones Biológicas del Noroeste, S.C.
Co-Tutora de Tesis

Dra. Karla Verónica Pedraza Venegas
Centro de Investigaciones Biológicas del Noroeste, S.C.
Co-Tutora de Tesis

Comité Revisor de Tesis

Dr. José Alfredo Arreola Lizárraga
Dra. Elisa Serviere Zaragoza
Dra. Karla Verónica Pedraza Venegas

Jurado de Examen

Dr. José Alfredo Arreola Lizárraga
Dra. Elisa Serviere Zaragoza
Dra. Karla Verónica Pedraza Venegas

Suplente

Dr. Raúl Octavio Martínez Rincón

Resumen

En el medio marino, la contaminación por microplásticos (MPs) afecta la estructura y función de los ecosistemas, entre ellos los pastos marinos. El presente estudio tiene el objetivo de conocer la capacidad de retención de microplásticos en praderas del pasto remo *Halophila decipiens* en la zona costera de La Paz, B.C.S. En las localidades de Pichilingue y Los Aripes se estudiaron praderas de *H. decipiens* y zonas adyacentes sin vegetación acuática sumergida. En cada localidad se estimó la densidad y la biomasa de *H. decipiens*. Para conocer la retención de microplásticos se tomaron seis muestras de material vegetal, seis muestras de sedimentos dentro de las praderas y seis muestras en sedimentos de zonas sin vegetación adyacentes a las praderas. Además, se obtuvieron seis muestras para determinar la granulometría del sedimento. En Pichilingue la densidad promedio fue de 2650 ± 1926 haces m^{-2} y la biomasa promedio fue de 17.5 ± 17.4 g PS m^{-2} ; en Los Aripes, la densidad promedio fue de 1377 ± 1074 haces m^{-2} y la biomasa promedio fue de 21.7 ± 23.9 g PS m^{-2} . Los microplásticos en el material vegetal sólo se encontraron en la pradera de Pichilingue con una abundancia de 120 ítems, con una mayor proporción en las hojas (14 %) y con la menor proporción embebidos en las hojas, los rizomas y las raíces (1 %) y los MPs más abundantes fueron las películas negras. En los sedimentos presentes en la pradera de *H. decipiens* de Pichilingue los microplásticos presentaron una abundancia promedio de $2,153 \pm 2686$ ítems kg^{-1} PS y en Los Aripes fue de 19 ± 12 ítems kg^{-1} PS; en los sedimentos de las zonas sin vegetación de Pichilingue la cantidad media fue de 79 ± 40 ítems kg^{-1} PS y en Los Aripes fue de 31 ± 31 ítems kg^{-1} PS. En cuanto al tamaño de las partículas las más abundantes en los sedimentos de la pradera de pasto de Pichilingue fueron las de 0.1 – 0.9 mm (40 %) y en las zonas sin vegetación las de 1 – 1.8 mm (25 %). En Los Aripes en la pradera de pasto y en la zona sin vegetación se observaron con la misma proporción los microplásticos de 1 – 1.8 mm (24 %). En Pichilingue los microplásticos más abundantes fueron las películas negras (57 %) y en Los Aripes fueron las fibras azules (35 %). En Pichilingue, la pradera de pasto marino se caracterizó por sedimentos muy finos, indicando una zona de baja energía. Mientras que, en Los Aripes, la pradera de pasto se caracterizó por sedimentos gruesos, indicando una zona de mayor energía. En los sedimentos de las praderas de pasto remo y en los sitios adyacentes sin vegetación acuática sumergida, se observaron microplásticos en diferentes cantidades y de distintos tipos asociadas a las características del ambiente y a las fuentes potenciales de microplásticos. El pasto remo *Halophila decipiens*, no obstante, su escaso desarrollo foliar, tiene la capacidad de retener microplásticos en hojas, raíces, rizomas y sedimentos.

Palabras clave: microplásticos, pastos marinos, *Halophila decipiens*, sedimentos, contaminación.

ORCID: 0009-0000-5654-4574

Vo.Bo. Director de Tesis



Dr. José Alfredo Arreola Lizárraga

Summary

In the marine environment, microplastic contamination (MPs) affects the structure and function of ecosystems, including seagrasses. The present study aims to determine the microplastic retention capacity of seagrass meadows of the paddlegrass *Halophila decipiens* in the coastal zone of La Paz, B.C.S. In the localities of Pichilingue and Los Aripes, *H. decipiens* meadows and adjacent areas without submerged aquatic vegetation were studied. At each location, the density and biomass of *H. decipiens* were estimated. Six samples of vegetal material, six sediment samples within the meadows and six sediment samples from non-vegetated areas adjacent to the meadows were collected to determine microplastic retention. In addition, six samples were obtained to determine sediment grain size. In Pichilingue, the average density was 2650 ± 1926 leaf pair m^{-2} and the average biomass was 17.5 ± 17.4 g DW m^{-2} ; in Los Aripes, the average density was 1377 ± 1074 leaf pair m^{-2} and the average biomass was 21.7 ± 23.9 g DW m^{-2} . Microplastics in plant material were only found in the Pichilingue meadow with an abundance of 120 items, with a higher proportion in leaves (14 %) and with the lowest proportion embedded in leaves, rhizomes and roots (1 %) and the most abundant MPs were black films. In the sediments present in the *H. decipiens* meadow of Pichilingue the microplastics presented an average abundance of $2,153 \pm 2686$ items kg^{-1} DW and in Los Aripes it was 19 ± 12 items kg^{-1} DW; in the sediments of the unvegetated areas of Pichilingue the average amount was 79 ± 40 items kg^{-1} DW and in Los Aripes it was 31 ± 31 items kg^{-1} DW. In terms of particle size, the most abundant particles in the sediments of the grass meadow of Pichilingue were those of 0.1 - 0.9 mm (40 %) and in the unvegetated areas those of 1 - 1.8 mm (25 %). In Los Aripes in the grass meadow and in the unvegetated area microplastics of 1 - 1.8 mm (24 %) were observed with the same proportion. In Pichilingue the most abundant microplastics were black films (57 %) and in Los Aripes they were blue fibers (35 %). In Pichilingue, the seagrass meadow was characterized by very fine sediments, indicating a low energy zone. Whereas, at Los Aripes, the seagrass meadow was characterized by coarse sediments, indicating a higher energy zone. In the sediments of the paddlegrass meadows and adjacent sites without submerged aquatic vegetation, microplastics were observed in different amounts and of different types associated with the characteristics of the environment and potential sources of microplastics. Paddlegrass *Halophila decipiens*, despite its limited foliar development, has the capacity to retain microplastics in leaves, roots, rhizomes and sediments.

Keywords: microplastics, seagrasses, *Halophila decipiens*, sediments, contamination.

ORCID: 0009-0000-5654-4574

Vo.Bo. Director de Tesis



Dr. José Alfredo Arreola Lizárraga

Dedicatoria**A mis Titos †**

Por todo lo que hicieron por nosotros, porque sin eso, no estaría donde estoy.

A mi Mami

Por enseñarme lo que es la fortaleza y a nunca darme por vencida, por el amor, apoyo y comprensión que siempre me has demostrado. Por cuidarme, nunca soltar mi mano y guiarme a lo largo de mi vida.

A mis Hermanos

Por ser las personas que me sostienen, que intentan evitar mis caídas y me levantan cuando es imposible que sucedan, por cuidarme y defenderme cuando ha sido necesario. Por enseñarme este amor tan incondicional y ser mis mejores amigos y los muéganos que siempre hemos sido.

A mi Familia

Por estar siempre al pendiente de mí y alegrarse por todos mis triunfos, por cuidarme y respaldarme cuando más lo he necesitado, por nunca dejarnos solos.

A Marlene

Por todo. Por el amor y apoyo incondicional que siempre me das, por ser mi equipo, por nunca dejarme caer, por siempre confiar en mí, por ver lo mejor de mí y recordármelo cuando yo no puedo verlo.

Appita

Gracias por siempre darme una patita cuando la necesitaba, por ser mi compañera en los días y las noches de estudio.

Sin ustedes, nada de esto hubiera sido posible.

Agradecimientos

Al CONAHCyT por la beca 2021-000018 que me permitió cursar la Maestría en Ciencias en el Uso, Manejo y Preservación de Recursos Naturales.

Al Centro de Investigaciones Biológicas del Noroeste, S.C. y a la Dirección de Estudios de Posgrado y Formación de Recursos Humanos, por aceptarme y con esto, llevar a cabo mis estudios de Maestría.

A mi Comité Tutorial, el Dr. José Alfredo Arreola, la Dra. Elisa Serviere y la Dra. Karla Pedraza, por todo el apoyo y comprensión que me brindaron durante estos dos años, por confiar en mí y no darse por vencidos a pesar de las circunstancias. Por compartir sus conocimientos y experiencias conmigo.

A la Dra. Karla Pedraza, por sembrar en mí el amor por los pastos marinos a través del que ella les tiene.

Al Laboratorio de Macroalgas por dejarme procesar las muestras y principalmente, hacerme parte del equipo.

A la M. en C. Alejandra Mazariegos por el apoyo que me ha brindado siempre y por compartir sus conocimientos.

Al Geol. Mar. Gustavo Padilla, por apoyar en el procesamiento de datos de sedimentos.

Al M. en C. Manuel Salvador Trasviña Castro y a la IBQ. Myriam Lizzeth Hernández de Haro por el análisis de las muestras de sedimentos en el Laboratorio de Edafología del CIBNOR, S.C.

Al Ing. David Urías Laborín por la elaboración del mapa del área de estudio.

Al M. en C. “Chema”, por su amistad y toda la ayuda que me brindó para la realización de esta tesis.

A Diana por ser tan buena roomie y amiga 😊.

A mi familia, novia, amigas y amigos 💖.

Contenido

Resumen	i
Summary	ii
Dedicatoria.....	iii
Agradecimientos.....	iv
Contenido.....	v
Lista de figuras	vi
Lista de tablas	vii
1. INTRODUCCIÓN	1
1.1 Contaminación por microplásticos.....	1
1.2 Transporte de plásticos y su llegada al mar	1
1.3 Generalidades de los plásticos	2
1.4 Microplásticos	3
1.5 Clasificación de los microplásticos	4
1.6 Problemática ecológica de los microplásticos	6
1.7 Pastos marinos	8
1.8 <i>Halophila decipiens</i>	10
1.9 Servicios ecosistémicos	14
1.10 Amenazas	16
2. ANTECEDENTES	18
2.1 Microplásticos en pastos marinos.....	18
2.2 Microplásticos en México.....	20
3. JUSTIFICACIÓN	22
4. HIPÓTESIS	23
5. OBJETIVOS	24
5.1 Objetivo general.....	24
5.2 Objetivos particulares	24
6. MATERIAL Y MÉTODOS	25
6.1 Área de estudio	25
6.2 Trabajo de campo y análisis de muestras	25
6.3 Laboratorio	27
6.3.1 Identificación de microplásticos.....	28
6.3.2 Análisis granulométrico de sedimentos de las praderas de <i>H. decipiens</i> y sedimentos sin vegetación.....	28
6.4 Análisis estadísticos.....	30
7. RESULTADOS	31
7.1 Densidad y Biomasa de <i>Halophila decipiens</i>	31
7.2 Microplásticos en el material vegetal de <i>Halophila decipiens</i>	32
7.3 Microplásticos en sedimentos asociados a <i>H. decipiens</i> y sedimentos sin vegetación	34
7.4 Granulometría	38
8. DISCUSIÓN	40
9. CONCLUSIONES	48
10. LITERATURA CITADA	49

Lista de figuras

Figura 1. Categorías estandarizadas del tamaño de las partículas de plástico.	3
Figura 2. Tipos, tamaños, morfologías y colores de microplásticos.	4
Figura 3. Microplásticos primarios recuperados de ambientes acuáticos.	5
Figura 4. Microplásticos secundarios recuperados del ambiente marino.....	6
Figura 5. Estados de México en donde se ha registrado el pasto remo <i>H. decipiens</i> . 1) Baja California Sur; 2) Tamaulipas; 3) Veracruz; 4) Tabasco; 5) Campeche; 6) Yucatán; 7) Quintana Roo.	12
Figura 6. Estructura del pasto remo <i>Halophila decipiens</i> . A) Hoja de la especie; B) Detalle de la hoja aserrada; C) Planta; D) Rizomas y raíces.	13
Figura 7. A) Flor de <i>Halophila decipiens</i> (escala 1 mm); B) Fruto de <i>H. decipiens</i> (escala 2 mm).	14
Figura 8. Esquema de la fijación y la asimilación del CO ₂ en los pastos marinos. También se observan los almacenes aéreos y subterráneos del C _{org}	15
Figura 9. Área de estudio mostrando los sitios de muestreo en las localidades de Pichilingue y Los Aripes. Los triángulos indican los sitios de muestreo en las praderas de <i>Halophila decipiens</i> y los cuadrados los sitios de muestreo en las zonas sin vegetación.	27
Figura 10. Densidad (haces m ⁻²) de <i>Halophila decipiens</i> en las praderas de Pichilingue y Los Aripes.....	31
Figura 11. Biomasa en peso seco (g PS m ⁻²) de <i>H. decipiens</i> en las localidades de Pichilingue y Los Aripes.....	32
Figura 12. Porcentaje de microplásticos en las estructuras de <i>Halophila decipiens</i> en la localidad de Pichilingue.	33
Figura 13. Proporción de microplásticos por tamaño en estructuras de <i>Halophila decipiens</i> en Pichilingue, B.C.S. Los tamaños están dados en mm.	33
Figura 14. Proporción de los tipos de microplásticos observados en la pradera de pasto remo <i>Halophila decipiens</i> en la localidad de Pichilingue, B.C.S.	34
Figura 15. Ítems de microplástico kg ⁻¹ PS en sedimentos de praderas de pasto remo y de zonas de adyacentes sin vegetación acuática sumergida en Pichilingue y Los Aripes. Las líneas en las cajas del gráfico corresponden al valor de la mediana.....	35
Figura 16. Proporción de microplásticos por tamaño en sedimentos de las praderas de <i>Halophila decipiens</i> y en sedimentos de zonas sin vegetación acuática en Pichilingue y Los Aripes, B.C.S. Los tamaños están dados en mm. PM= Pastos marinos, SV= Sin Vegetación.....	36
Figura 17. Tipos y proporciones de microplásticos contenidos en los sedimentos de las praderas de <i>Halophila decipiens</i> y de las zonas sin vegetación en las localidades de Pichilingue y Los Aripes, B.C.S. PM= Pastos marinos, SV= Sin Vegetación.....	37
Figura 18. Proporción del color de microplásticos observados en los sedimentos de las localidades de Pichilingue y Los Aripes.	38
Figura 19. Grupos granulométricos asociados a las praderas de pasto marino y zonas sin vegetación en Pichilingue y Los Aripes. En el eje de las abscisas se muestra el diámetro medio en unidades (∅) y en la parte superior las abreviaciones de los intervalos de clase. El eje de las ordenadas corresponde a los intervalos de desviación estándar que establece límites del grado de selección de los sedimentos: BS = Bien seleccionados, MoS = Moderadamente seleccionados, MS = Mal seleccionados, MmS = Muy mal seleccionados, PM= Pastos marinos, SV= Sin Vegetación.....	39

Lista de tablas

Tabla 1. Especies de pastos marinos y su distribución en México.	9
Tabla 2. Microplásticos observados en las hojas de diversas especies de pastos marinos en distintas localidades.	18
Tabla 3. Microplásticos observados en los sedimentos de praderas de diversas especies de pastos marinos en distintas localidades.	19
Tabla 4. Estudios de microplásticos en sedimentos de las playas de México.	20
Tabla 5. Equivalencia de diámetro (\emptyset) a milímetros y su nomenclatura.	29
Tabla 6. Cantidad y tipos de microplásticos observados en sedimentos de praderas de pastos marinos y de zonas adyacentes sin vegetación en diferentes localidades alrededor del mundo.....	44

1. INTRODUCCIÓN

1.1 Contaminación por microplásticos

Las actividades humanas son responsables de un importante declive en la diversidad biológica global. Una forma particular del impacto humano que es considerada la principal amenaza para la vida marina corresponde a la contaminación por desechos plásticos que son utilizados con el propósito de satisfacer necesidades básicas como el refugio, la protección y la conservación de los alimentos (Derraik, 2002; Bank y Hansson, 2022).

Los materiales plásticos pueden terminar en los ambientes marinos por el desecho indiscriminado de desperdicios que pueden transferirse indirectamente por actividades terrestres, o directamente por actividades marinas. Una evaluación realizada por el Grupo Mixto de Expertos sobre los Aspectos Científicos de la Protección Ambiental Marina (GESAMP por sus siglas en inglés, Joint Group of Expert on the Scientific Aspects of Marine Environmental Protection) determinó que el 80% de la basura del ambiente marino, se origina en la tierra con actividades como la agricultura, el transporte, la producción de empaques, la construcción, los textiles, los productos de cuidado personal y farmacéutico y el turismo; mientras que sólo el 20% es resultado de las actividades que se realizan en el mar, como la pesquería, la acuicultura, la navegación y el turismo (Derraik, 2002; Crawford y Quinn, 2017; Abalansa *et al.*, 2020; Bank y Hansson, 2022).

Con toda esta basura plástica vertida, se estima que el 90% de la basura flotante que se encuentra en la superficie de los ambientes acuáticos se compone de plástico (Avio *et al.*, 2017; Besseling *et al.*, 2017; Crawford y Quinn, 2017).

1.2 Transporte de plásticos y su llegada al mar

Los desechos plásticos que provienen de actividades terrestres, en gran parte, entran al mar por vertederos, basureros o derrames no intencionales, debido al cauce de los ríos, escorrentías de agua pluvial, descargas de aguas de desecho, o transportados por el viento, además de la pérdida accidental de contenedores de envío de buques (Avio *et al.*, 2017; Besseling *et al.*, 2017; Crawford y Quinn, 2017).

El transporte de la basura proveniente de la tierra al mar puede aumentar con climas extremos, como inundaciones o huracanes, debido a que la movilidad y el transporte de los plásticos en los ambientes marinos dependen de las condiciones fisicoquímicas, los patrones de circulación oceánicos, la presión y las dinámicas de la columna de agua que rigen las fuentes, el destino y las dinámicas de transporte (Cole *et al.*, 2011; Avio *et al.*, 2017; Crawford y Quinn, 2017; Bank y Hansson, 2022).

Una vez que el plástico entra en los ambientes acuáticos, su transporte tiende a presentarse en tres formas:

- 1) Física – como acumulación, sedimentación o migración.
- 2) Química – en forma de adsorción o absorción de contaminantes.
- 3) Biológica – al ser ingerido por organismos, en la translocación y la transferencia trófica (Crawford y Quinn, 2017).

1.3 Generalidades de los plásticos

Todos los plásticos están conformados por moléculas llamadas monómeros y forman largas cadenas denominadas polímeros y estas cadenas pueden ser moldeadas para formar objetos sólidos (Crawford y Quinn, 2017).

Los plásticos han sustituido muchos de los materiales tradicionales, como la madera, el vidrio y el metal. Las propiedades que le dan a los plásticos dureza y durabilidad y que adicionalmente los hace ligeros y fuertes, son las mismas propiedades que impiden su degradación y los convierte en un serio daño para el ambiente acuático (Derraik, 2002; Crawford y Quinn, 2017).

Existen diferentes clasificaciones para los plásticos, por tipo, su capacidad de ser reciclados, aplicación, propiedades fisicoquímicas, entre otras. Una que es de especial interés para este trabajo es aquella que refiere al tamaño (Fig. 1) (Crawford y Quinn, 2017).

Al entrar a ambientes marinos, los plásticos comienzan a fragmentarse por distintos factores entre los que se encuentran la temperatura, los rayos UV, el oxígeno, enzimas microbianas y por la fuerza mecánica del oleaje. Esta segmentación provoca que los plásticos se vuelvan tan

débiles que se fragmentan en objetos de un micro tamaño, lo que los vuelve invisibles al ojo humano o de cualquier otro organismo y debido a este tamaño pequeño y a la capacidad que tienen para flotar, pueden encontrarse en la columna de agua y transportarse hacia sedimentos costeros, aguas profundas o casquetes polares. Entre los plásticos de este tamaño pequeño se encuentran los microplásticos (Avio *et al.*, 2017; Crawford y Quinn, 2017; Ortega-Borchardt *et al.*, 2023).

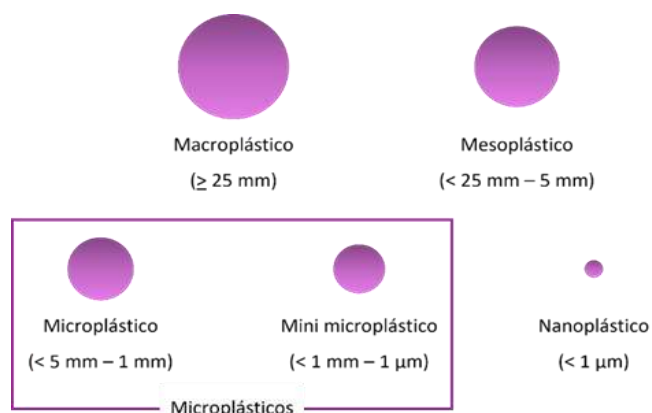


Figura 1. Categorías estandarizadas del tamaño de las partículas de plástico. Modificada de Crawford y Quinn (2017).

1.4 Microplásticos

Los microplásticos (MPs, de aquí en adelante) son partículas con una dimensión entre 5 mm y 1 μ m cuya presencia se ha reportado alrededor del mundo, desde regiones polares hasta el ecuador, desde una zona intermareal a sedimentos abisales, debido a esta proliferación han pasado de considerarse como contaminantes emergentes a ser reconocidos como una amenaza sobresaliente, con la necesidad urgente de evaluar su distribución en los océanos, así como la ecotoxicología y los riesgos ecológicos que estas partículas representan para los ecosistemas marinos (Avio *et al.*, 2017; Crawford y Quinn, 2017).

Existe una correlación directa entre la densidad urbana y la abundancia de MPs en los hábitats marinos, lo que representa una gran preocupación porque los polímeros antropogénicos han creado un nuevo hábitat pelágico para microorganismos e invertebrados, con implicaciones aún desconocidas (Avio *et al.*, 2017; Ortega-Borchardt *et al.*, 2023). Un asunto relevante es que cuando los MPs se incorporan al sedimento están sujetos a temperaturas más bajas, niveles de oxígeno más bajos y se encuentran protegidos por el daño de la luz UV y la degradación

mecánica, lo que facilita su persistencia en los ambientes acuáticos (Avio *et al.*, 2017; Crawford y Quinn, 2017; Ortega-Borchardt *et al.*, 2023).

1.5 Clasificación de los microplásticos

Los MPs son diversos, debido a que provienen de diferentes tipos de productos, además, se presentan en un amplio rango de tamaños, colores y morfologías, se componen de varios polímeros e incluyen una amplia colección de aditivos químicos. También acumulan químicos orgánicos y elementos traza del ambiente en el que se encuentran. Por su morfología se han dividido en siete categorías: fibra, madejas, fragmentos, esferas, pellet, películas y espumas. La diversidad de tipos, tamaños, formas y colores de los MPs, puede contribuir a conocer las fuentes de ingreso a los ecosistemas marinos y el destino que estos tendrán tanto en el agua, como en el sedimento y la biota (Fig. 2) (Avio *et al.*, 2017; Rochman *et al.*, 2019).

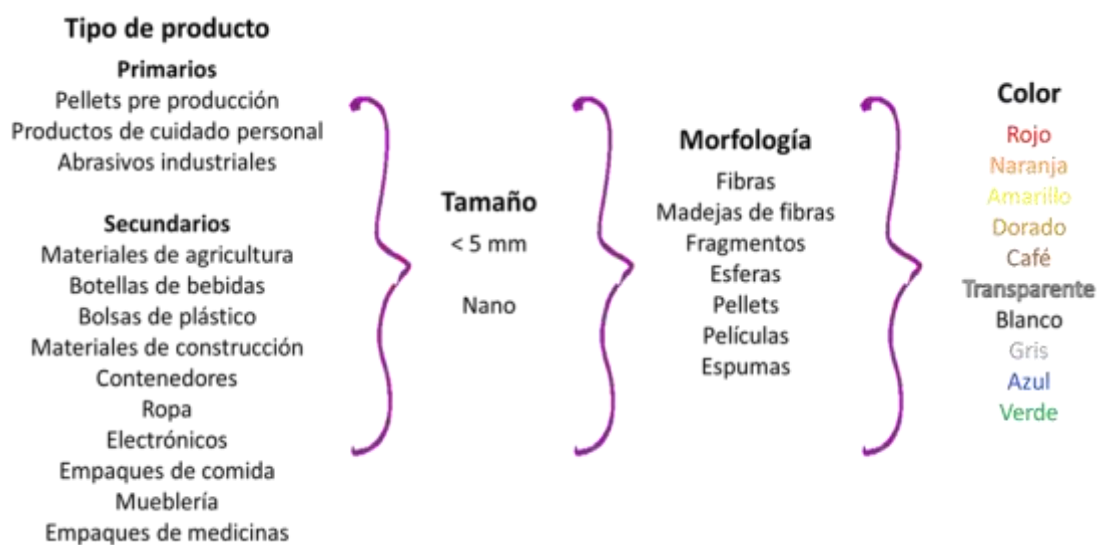


Figura 2. Tipos, tamaños, morfologías y colores de microplásticos. Modificada de Rochman *et al.*, (2019).

La cantidad y el tipo de químicos que un plástico acumula depende de las propiedades físicas y químicas del polímero, así como la difusividad, cristalinidad, hidrofobicidad y el área de superficie (Crawford y Quinn, 2017).

La acumulación de biomasa y de otros materiales en la superficie de los MPs aumenta la densidad de estos facilitando el hundimiento del material plástico flotante, los plásticos más densos, como el PET o el PVC, tienden a hundirse y por ende son más comunes en los

sedimentos que plásticos más ligeros como el polietileno o el polipropileno, que se espera floten (Rochman *et al.*, 2019).

Los ftalatos, usados como emolientes para suavizar los plásticos pueden constituir hasta el 50% del peso del polímero en algunos objetos hechos de PVC (Crawford y Quinn, 2017; Rochman *et al.*, 2019).

Otra división de MPs importante es aquella que establece la procedencia de estas partículas, clasificándolos en microplásticos primarios y microplásticos secundarios (Rochman *et al.*, 2019). Los MPs primarios son, típicamente, microesferas elaboradas intencionalmente por la industria para el uso en cosméticos, productos de cuidado personal, como pastas de dientes o desodorantes, exfoliantes dérmicos, agentes de limpieza y arenados. Todos estos MPs suelen tener un tamaño <5 mm y una apariencia fabricada, exhibiendo una forma esférica o de fibra y tienen consistencia, incluso en la superficie (Fig. 3) (Crawford y Quinn, 2017; Rochman *et al.*, 2019).



Figura 3. Microplásticos primarios recuperados de ambientes acuáticos. Tomada de Crawford y Quinn (2017).

Los MPs secundarios son piezas irregulares de plástico que se forman involuntariamente como resultado de la degradación o fragmentación de piezas más grandes de plástico por procesos

biológicos, físicos o químicos, lo que los hace tener una apariencia más aleatoria, son más difíciles de categorizar y son un subproducto de una gran cantidad de productos plásticos, incluyendo materiales de construcción, de agricultura, muebles, ropa, cajas, botellas o empaques de comida (Fig. 4) (Crawford y Quinn, 2017; Rochman *et al.*, 2019).

Se ha estimado que la mayoría de los microplásticos en los océanos son productos secundarios y el origen del 18% de los microplásticos se debe a la degradación de cuerdas y redes. Debido a que los microplásticos que están hechos a base de aceite, son excepcionalmente resistentes a la biodegradación, tienden a ser bastante persistentes y se distribuyen a través de las corrientes oceánicas a través del ambiente marino (Crawford y Quinn, 2017; Rochman *et al.*, 2019).

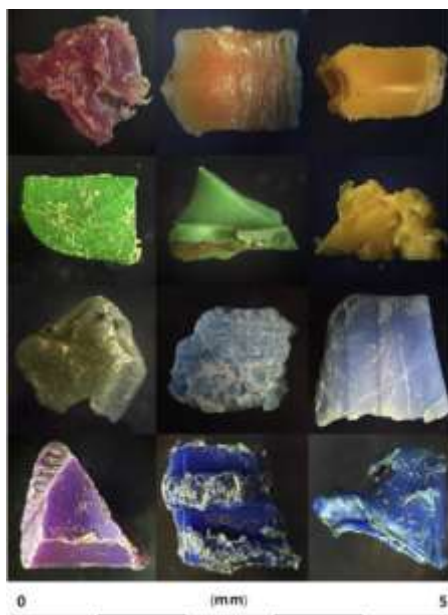


Figura 4. Microplásticos secundarios recuperados del ambiente marino. Tomada de Crawford y Quinn (2017).

1.6 Problemática ecológica de los microplásticos

La acumulación de plástico en el ambiente marino repercute negativamente desde el impacto estético, el valor ambiental, los costos que representa la limpieza de las playas, y las consecuencias económicas para el turismo y para las numerosas industrias relacionadas con el mar (navegación, pesca, producción de energía, acuicultura), hasta ser la causa de lesiones o muertes de aves marinas, tortugas, cetáceos, mamíferos, peces y reptiles (Avio *et al.*, 2017).

Debido a su tamaño, estos pueden ser ingeridos por animales, desde los niveles tróficos más bajos como el zooplancton, hasta los depredadores tope como tiburones o ballenas. El daño que provocan los MPs en los organismos que los ingieren depende del tipo de polímero, el tamaño, la forma y las mezclas químicas asociadas a estos (Thompson *et al.*, 2004; Avio *et al.*, 2017; Besseling *et al.*, 2017; Rochman *et al.*, 2019).

El tamaño puede afectar el tiempo de retención en la biota, además, los MPs <150 µm, pueden translocarse a los intestinos y entrar a células, órganos y otros tejidos de organismos vivos actuando como vectores de toxinas biológicas y químicas en la cadena alimenticia y mientras el tamaño del microplástico decrece facilita la bioacumulación o incluso la biomagnificación (Avio *et al.*, 2017; Rochman *et al.*, 2019; Bank y Hansson, 2022).

Por otro lado, el color puede afectar si el animal decide ingerirlo o no, ya que algunos organismos se inclinan por ingerir MPs con un color específico. En los colores existentes de microplásticos, se considera también la denominada nieve marina, mecanismo importante que consiste en transportar microplásticos de la capa superficial del océano a las zonas pelágica y mesopelágica lo que incrementa la biodisponibilidad en los hábitats bénticos (Avio *et al.*, 2017; Rochman *et al.*, 2019; Bank y Hansson, 2022; Ortega-Borchardt *et al.*, 2023).

Los organismos que ingieren accidentalmente los microplásticos incluyen especies de importancia comercial, lo que representa riesgos a la salud humana por efectos directos e indirectos (Avio *et al.*, 2017; Bank y Hansson, 2022).

Aunque la mayoría de los trabajos se han centrado en el efecto de los microplásticos en diferentes especies de importancia comercial y/o ecológica, se ha observado que las partículas de microplásticos se han encontrado en distintos ecosistemas marinos como macroalgas, arrecifes de coral, manglares (base de la cadena alimenticia) y en los últimos años se ha demostrado la retención y sedimentación de microplásticos en praderas de pastos marinos (de Smit *et al.*, 2021; Goss *et al.*, 2018; Datu *et al.*, 2019; Huang *et al.*, 2020; Kreitsberg *et al.*, 2021; Menicagli *et al.*, 2022; Huang *et al.*, 2023; Wright *et al.*, 2023).

1.7 Pastos marinos

Los pastos marinos pertenecen al orden de las Alismatales y son angiospermas acuáticas que a diferencia de otras plantas marinas se caracterizan por presentar hojas, rizomas, raíces, flores, frutos y semillas (den Hartog *et al.*, 2007; van Tussenbroek *et al.*, 2010).

Los pastos marinos tienen las características de: estar adaptados a una vida en un ambiente marino o altamente salino; ser capaces de lograr su ciclo vegetativo y reproductivo estando sumergidos completamente; tener un sistema de anclaje seguro y tener un mecanismo de polinización hidrófilo. Todas estas características tienen una importante influencia en su morfología y anatomía (Kuo y den Hartog, 2006; den Hartog *et al.*, 2007).

Las partes que se encuentran por debajo del sedimento consisten en raíces y rizomas para el anclaje y el soporte mecánico. Las partes por arriba del suelo constan de haces o peciolo que soportan múltiples hojas (Kuo y den Hartog, 2006).

Estos organismos tienen la capacidad de competir exitosamente con otros organismos del ambiente marino y pueden formar praderas extensas en las aguas someras (<10 m) de los sistemas arrecifales, los estuarios y las costas abiertas relativamente protegidas de oleaje; mientras que en las aguas más profundas (15-50 m) esta vegetación es más escasa (Kuo y den Hartog, 2006; van Tussenbroek *et al.*, 2010).

Durante el periodo reproductivo las plantas que producen flores, las producen para la polinización y fertilización y luego liberan semillas para completar sus ciclos de vida (Kuo y den Hartog, 2006; van Tussenbroek *et al.*, 2010).

Típicamente, los pastos marinos crecen sobre áreas dominadas por sustratos suaves, como fondos arenosos y lodosos, sin embargo, hay algunas especies que crecen en sustratos rocosos, en áreas costeras desde la zona intermareal hasta una profundidad mayor a 50 m (Short, 2003; van Tussenbroek *et al.*, 2010).

Se reconocen aproximadamente, 72 especies de pastos marinos, distribuidos de la siguiente manera: familia Zosteraceae con tres géneros y 17 especies; familia Posidoniaceae con un sólo género y nueve especies; familia Cymodoceaceae con cinco géneros y 17 especies; y por último, la familia Hydrocharitaceae con 3 géneros y 17 especies. Sin embargo y dependiendo del criterio taxonómico del especialista, pueden encontrarse también las familias Ruppiaceae, y Zannichelliaceae con una especie cada una (Kuo y den Hartog, 2001; den Hartog *et al.*, 2007; van Tussenbroek *et al.*, 2010; Short *et al.*, 2011).

En México se encuentran las familias Cymodoceaceae, Hydrocharitaceae, Zosteraceae y Ruppiaceae y se presentan en estuarios, marismas, lagunas costeras y en zonas someras de las plataformas continentales, o en los bajos arrecifales (Tabla 1) (Ramírez-García y Lot, 1994; López-Calderón *et al.*, 2013; den Hartog *et al.*, 2016; Ramírez-García *et al.*, 2019; Short, 2003; Ward *et al.*, 2004).

Tabla 1. Especies de pastos marinos y su distribución en México. Modificada de Ibarra-Obando y Ríos, (1993).

Localidades	Familia	Género	Especie
Golfo de México	Cymodocea	<i>Halodule</i>	<i>Halodule wrightii</i> (Ascherson)
		<i>Syringodium</i>	<i>Syringodium filiforme</i> (Kützinger)
	Hydrocharitaceae	<i>Halophila</i>	<i>Halophila decipiens</i> (Ostenfeld)
			<i>Halophila engelmanni</i> (Ascherson)
	Ruppiaceae	<i>Thalassia</i>	<i>Thalassia testudinum</i> (Banks)
			<i>Ruppia marítima</i> (Linnaeus)
Península de Yucatán	Cymodocea		<i>Ruppia mexicana</i> (den Hartog y Van Tussenbroek)
		<i>Halodule</i>	<i>Halodule beaudettei</i> (den Hartog)
	Hydrocharitaceae	<i>Syringodium</i>	<i>Halodule wrightii</i>
			<i>Syringodium filiforme</i>
	Ruppiaceae	<i>Halophila</i>	<i>Halophila decipiens</i>
			<i>Halophila engelmanni</i>
Océano Pacífico y Golfo de California	Ruppiaceae	<i>Thalassia</i>	<i>Thalassia testudinum</i>
			<i>Ruppia marítima</i>
	Cymodocea	<i>Ruppia</i>	<i>Ruppia mexicana</i>
			<i>Halodule wrightii</i>
	Hydrocharitaceae	<i>Halodule</i>	<i>Halophila decipiens</i>
			<i>Halophila engelmanni</i>
Zosteraceae	<i>Phyllospadix</i>	<i>Ruppia marítima</i>	
		<i>Phyllospadix scouleri</i> (Hooker)	
		<i>Phyllospadix torreyi</i> (Watson)	
		<i>Zostera marina</i> (Linnaeus)	

1.8 *Halophila decipiens*

La familia Hydrocharitaceae está representada por plantas acuáticas completamente sumergidas o flotantes, y comprende 17 géneros ampliamente distribuidos en regiones tropicales y subtropicales, con especies marinas y de agua dulce, los géneros *Enhalus*, *Thalassia* y *Halophila* son completamente marinos y están compuestos por una, dos y catorce especies, respectivamente y son una derivación tropical de otros géneros de esta familia que son principalmente de agua dulce (Waycott *et al.*, 2002; den Hartog *et al.*, 2007; van Tussenbroek *et al.*, 2010).

El género *Halophila* se distribuye alrededor del mundo, principalmente en los trópicos, pero también en el sudeste de África y el sur de Australia. Es uno de los géneros con un mayor número de especies, que son: *Halophila minor* (den Hartog), *Halophila ovata* (Gaudichaud), *Halophila australis* (Doty y Stone), *Halophila ovalis* (Hooker), *Halophila hawaiiana* (Doty y Stone), *Halophila johnsonii* (Eiseman), *Halophila stipulacea* (Forsskål), *Halophila decipiens* (Ostenfeld), *Halophila capricorni* (Larkum), *Halophila beccarii* (Ascherson), *Halophila spinulosa* (Ascherson), *Halophila tricostata* (Greenway), *Halophila engelmanni* y *Halophila baillonii* (Ascherson) (Kuo y den Hartog, 2001; Waycott *et al.*, 2002).

Las plantas pertenecientes a este género se caracterizan por ser monoicas o dioicas con brotes extremadamente cortos, erectos y laterales, con dos escamas en la base y un par de hojas pecioladas, estos peciolo son más largos o del mismo largo que las hojas. Las hojas presentan venas cruzadas, márgenes suaves o cerrados y la superficie puede o no ser pilosa. Tienen flores femeninas con tres o seis pistilos o masculinas, con diferentes brotes en una misma planta. Forman pequeñas semillas de 0.2 mm de diámetro y crecen anualmente en ambientes tropicales y estacionalmente en climas templados. Debido a su pequeño tamaño y flexibilidad pueden encontrarse en la superficie del sedimento, tienen un amplio rango de tolerancia a la temperatura, la salinidad y la profundidad del agua (Kuo y den Hartog, 2001; Waycott *et al.*, 2002).

El pasto marino *Halophila decipiens* y *Zostera marina*, son las únicas especies que se encuentran presentes en ambos hemisferios, a lo largo de las costas tropicales y subtropicales de la India y en los océanos Pacífico y Atlántico (Waycott *et al.*, 2002).

H. decipiens, también conocida como pasto remo, se ha reportado en México, Brasil, Panamá, Costa Rica, Florida y Australia y no se han encontrado diferencias en las secuencias de ADN entre estas escalas, lo que sugiere que los pastos marinos tienen la capacidad de sobrevivir una dispersión de largas distancias, como lo son los océanos (Waycott *et al.*, 2002; Short, 2003; Santamaría-Gallegos *et al.*, 2006; den Hartog *et al.*, 2007).

En México se ha reportado desde Tamaulipas hasta Quintana Roo y en Baja California Sur (Fig. 5). En el Golfo de California, en 2006 se registró por primera vez en una localidad subtropical en Costa Baja en La Paz, B.C.S., extendiendo así la distribución geográfica de la especie (Santamaría-Gallegos *et al.*, 2006; van Tussenbroek *et al.*, 2010).

Es una especie eurihalina y delicada que puede crecer desde el nivel del mar hasta 85 m de profundidad, dependiendo de la transparencia del agua, por lo tanto, la cobertura suele ser mayor cerca de la costa donde la radiación solar es mayor y decrece a lo largo del gradiente de profundidad donde la Radiación Fotosintéticamente Activa (PAR) es <10% de la incidencia de la luz en la superficie, debido a esto, se encuentran mayormente entre los 10 y 30 m de profundidad. Las semillas de esta especie son dependientes a esta radiación para poder germinar, la bioturbación puede jugar un rol importante en llevarlas a la superficie del sedimento, lo que explicaría la distribución en parches de la especie en aguas profundas. Puede encontrarse asociadas a arrecifes, en aguas de costas protegidas o estuarios y en fondos con sedimentos con sedimentos de arena fina y gruesa. Es una especie pionera y muchas veces crece sola, pero se puede encontrar con otras especies de pastos marinos (Phillips y Meñez, 1988; Fonseca, 1989; Dawes *et al.*, 1995; Hammerstrom *et al.*, 2006; van Tussenbroek *et al.*, 2010).



Figura 5. Estados de México en donde se ha registrado el pasto remo *H. decipiens*. 1) Baja California Sur; 2) Tamaulipas; 3) Veracruz; 4) Tabasco; 5) Campeche; 6) Yucatán; 7) Quintana Roo.

Es una planta rizomatosa, altamente ramificada y cada ramificación termina en un nuevo par de hojas. Los rizomas son delgados, blancos y frágiles, tienen estolones delgados (1 mm de grosor). Presenta una raíz en cada nodo, estas son blancas, transparentes y algunas presentan largos pelos unicelulares, delgados, hialinos cuando la planta es joven y grises-violáceos al envejecer. En cada nodo nacen dos hojas. Las hojas son ovaladas o elípticas, verdes brillantes, de 1-2.5 cm de largo y 3-6 mm de ancho, espatales, con pequeñas escamas en la base, son ligeramente pilosas con un margen finamente serrado, con un ápice obtuso y redondeado, la base es cuñada, el nervio central es prominente y se une en el extremo apical al nervio intramarginal, en el nervio central se encuentra una vena media con 6-9 pares de nervaduras laterales y ascendentes. Las hojas tienen un pecíolo de 0.3-1.5 cm de largo y 0.2-0.6 cm de ancho (Fig. 6) (Gil-Rodríguez y Cruz-Simó, 1981; Phillips y Meñez, 1988; Kuo y den Hartog, 2001; van Tussenbroek *et al.*, 2010).

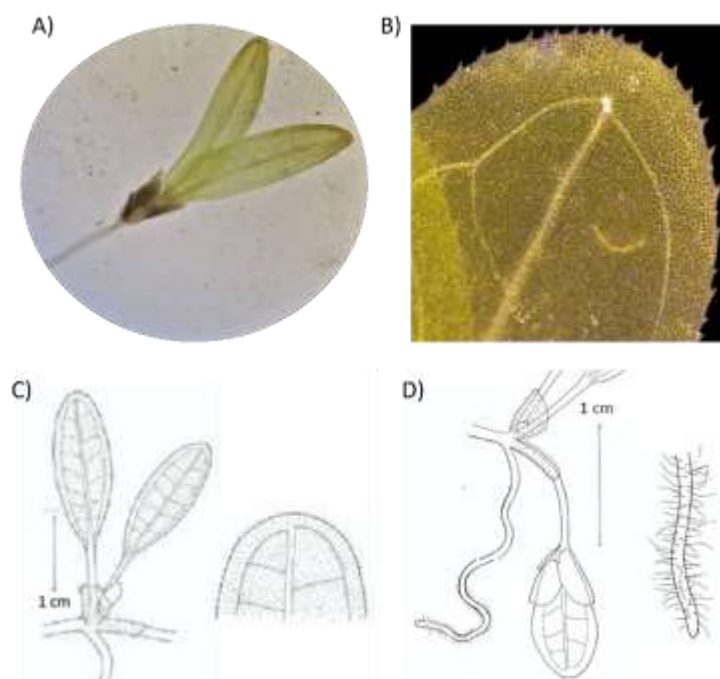


Figura 6. Estructura del pasto remo *Halophila decipiens*. A) Hoja de la especie; B) Detalle de la hoja aserrada; C) Planta; D) Rizomas y raíces. Fuente de las fotografías A) Karla Pedraza-Venegas; B) Claudia J. Pérez-Estrada; C) y D) tomadas de van Tussenbroek *et al.* (2010).

H. decipiens es la única especie monoica del género y forma flores y frutos en la base del par de hojas, en o debajo de la superficie del sedimento (Fig. 7). Las flores masculinas y femeninas se encuentran juntas en la base de las hojas. La flor masculina presenta tres tépalos oblongos de 1-1.5 mm de longitud, tres estambres de filamentos cortos, anteras de 1 x 0.3 mm, el grano de polen elipsoidal. Después del período de florescencia sale la flor masculina fuera de la espata, alcanzando hasta 3 cm de longitud. Las flores femeninas tienen un ovario ínfero de 1 mm de largo, tres pistilos de 1-2.5 mm de longitud. Es altamente reproductiva con abundantes flores y frutos, cada fruto contiene de 25 a 30 semillas. Como estrategia a las condiciones ambientales fluctuantes, las semillas son retenidas y enterradas en el sedimento. Los frutos son generalmente elipsoidales de 2-3 mm de largo y 1-1.5 mm de ancho, con un pico muy prominente de 1.5 a 2 mm de largo y un pericarpo más o menos escarioso. Las semillas son ovoides y miden 0.2-0.5 mm de diámetro, con una testa tuberculada. El florecimiento y la fructificación de la especie varía intra e inter anualmente, así como espacialmente, en escalas de metros a kilómetros (Gil Rodríguez y Cruz-Simó, 1981; Phillips y Meñez, 1988; Kenworthy, 1999; Kuo y den Hartog, 2001; Hammerstrom *et al.*, 2006; Santamaría-Gallegos *et al.*, 2006; van Tussenbroek *et al.*, 2010).

Es probable que las pequeñas semillas de la especie queden atrapadas en macroalgas o algún otro tipo de vegetación y estos cumplen la función de vector para poder recolocar a las semillas (Waycott *et al.*, 2002; Short, 2003; Santamaría-Gallegos *et al.*, 2006; den Hartog *et al.*, 2007).

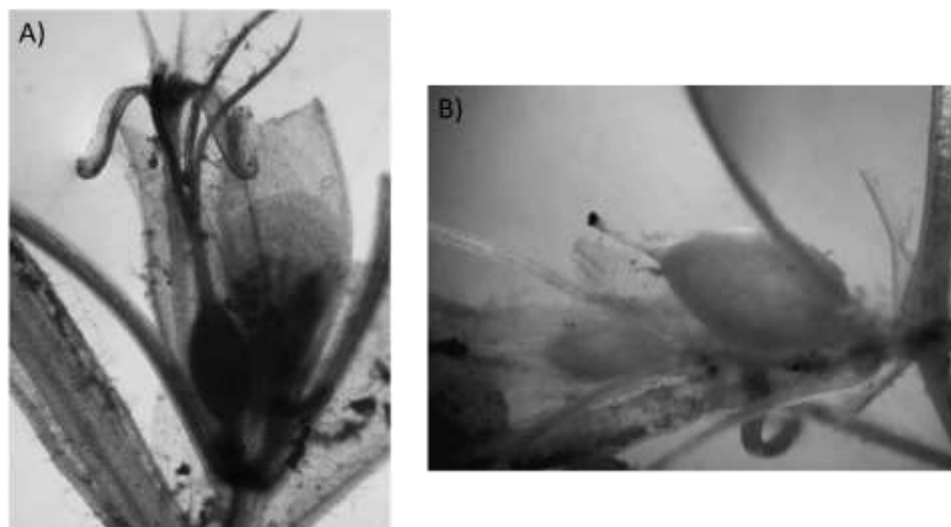


Figura 7. A) Flor de *Halophila decipiens* (escala 1 mm); B) Fruto de *H. decipiens* (escala 2 mm). Tomada de Santamaría-Gallegos *et al.* (2006).

1.9 Servicios ecosistémicos

Las praderas de pastos marinos se consideran como hábitats críticos, debido a los diferentes servicios ecosistémicos que proveen, entre ellos los servicios de provisión, de regulación, de soporte y culturales (Silveira *et al.*, 2019).

Son relevantes tanto ecológica como económicamente, ya que muchos organismos dependen directa o indirectamente de ellos, al ser zonas de alimento, reproducción y áreas de crianza para las etapas juveniles de peces, langostas, camarones, entre otras especies, algunas de estas son de importancia comercial para las pesquerías (Short, 2003; van Tussenbroek *et al.*, 2010; Silveira *et al.*, 2018; Silveira *et al.*, 2019).

Tienen un papel fundamental en el mantenimiento de la biodiversidad, al preservar especies amenazadas, como dugones y manatíes, tortugas marinas y caballitos de mar, además de mantener la variabilidad genética (Short *et al.*, 2011).

Los pastos marinos son productores primarios de una gran cantidad de materia orgánica y parte de esta producción es destinada, por medio del detritus, para organismos como poliquetos, langostas, cangrejos, etcétera. Las hojas de los pastos marinos sirven también como sustrato para plantas y animales sésiles y ciertos organismos las utilizan para ocultarse de depredadores (Short, 2003; Tussenbroek *et al.*, 2010); Silveira *et al.*, 2018; Silveira *et al.*, 2019).

Los pastos marinos atenúan los efectos de huracanes y tormentas, el dosel disminuye el oleaje y disipan la energía de las corrientes, esto facilita la sedimentación de arena, lodo y material orgánico que posteriormente, es retenido en los rizomas y las raíces y así, este material no es resuspendido a la columna de agua (Short, 2003; van Tussenbroek *et al.*, 2010; Silveira *et al.*, 2018; Silveira *et al.*, 2019).

En la mitigación del cambio climático global tienen un papel fundamental, ya que es uno de los ecosistemas con los mayores almacenes de carbono, que se debe principalmente a sus características morfológicas, fisiológicas y estructurales. La retención de carbono orgánico se divide en aérea, que se almacena en las hojas y tallos y, subterránea, que se da en los rizomas del primer metro de sedimento. Esta capacidad de almacenamiento se relaciona con la alta productividad que tienen las fanerógamas marinas (Fig. 8) (Short, 2003; van Tussenbroek *et al.*, 2010; Silveira *et al.*, 2018; Silveira *et al.*, 2019).



Figura 8. Esquema de la fijación y la asimilación del CO₂ en los pastos marinos. También se observan los almacenes aéreos y subterráneos del C_{org}. Tomada de Sánchez-Mejía y Galdamez-Meneses (2019).

Dentro de los servicios culturales, algunas culturas utilizan los pastos marinos como recursos medicinales, espirituales y religiosos. Además, están ligados al turismo, por la diversidad que albergan, que incluye, entre otras, las especies amenazadas previamente mencionadas, principalmente aquellas que son carismáticas, como las tortugas marinas, los dugones, los manatíes, entre otras (Short, 2003; Silveira *et al.*, 2019).

En cuanto a *H. decipiens*, a pesar de ser un pasto pequeño y en algunas zonas sólo está presente algunos meses del año, la especie provee una importante estabilización del sedimento y actúa como un enlace crítico en la red alimentaria de los ecosistemas costeros. Como la mayoría de las especies de pastos marinos, desempeñan un papel importante como hábitat de peces e invertebrados; disipan la energía de las corrientes, favorecen la sedimentación a lo largo de la columna de agua y evitan la resuspensión posterior del material depositado (Fonseca *et al.*, 2008; INECC-PNUD, 2017).

1.10 Amenazas

A lo largo del mundo, los pastos marinos experimentan cuatro de las amenazas más serias hacia la biodiversidad marina, estas son la sobreexplotación, modificación física, contaminación con nutrientes y sedimentos. Entre los impactos más importantes para el ecosistema están la pérdida de claridad y calidad del agua debido a la eutrofización por el incremento de nutrientes y la descarga de sedimentos. En aguas templadas, la reducción de luz por la eutrofización es la causa más común de la pérdida de pastos marinos y en océanos tropicales, la descarga de sedimento por escorrentías es, probablemente, el mayor impacto para la claridad del agua (Waycott *et al.*, 2009; Short *et al.*, 2011).

Las praderas de pastos marinos también son afectadas por las actividades antropogénicas y estos impactos pueden ser sobre la distribución, diversidad y salud del ecosistema y se producen a diferentes escalas espaciales y temporales. Los efectos pueden ser agudos, que son eventos de corta duración, pero de alto impacto; o crónicos, eventos de bajo impacto, pero temporalmente recurrentes. Entre estas actividades humanas se encuentran las construcciones costeras, el endurecimiento de la línea costera y el dragado; las prácticas dañinas de la

pesquería como el arrastre, la acuicultura, los botes, amarres y muelles (Short *et al.*, 2011; Silveira *et al.*, 2019).

Los efectos del cambio climático global sobre los pastos marinos apenas están siendo evaluados, sin embargo, los impactos que se conocen pueden disminuir la capacidad de supervivencia de los pastos de cara a las amenazas globales (Short *et al.*, 2011).

En 2011, por primera vez se habló de la probabilidad de extinción de las 72 especies de pastos marinos que existen y se agregaron a la lista de especies amenazadas de la IUCN. En México están bajo la protección de la NOM-059 desde el 2019 y son mencionados en la NOM-022-SEMARNAT-2003 como parte de los humedales costeros en las zonas de manglar, sin hacer referencia a la protección o la restauración de los ecosistemas (Short *et al.*, 2011; López-Calderón *et al.*, 2013; DOF, 2019).

Las plantas de la especie *H. decipiens* son flexibles, sin embargo, son vulnerables a disturbios físicos, por lo tanto, si las condiciones ambientales no son favorables, las poblaciones pueden disminuir rápidamente, principalmente por quedar enterradas por la resuspensión de sedimentos y bioturbación (Waycott *et al.*, 2002; Hammerstrom *et al.*, 2006).

2. ANTECEDENTES

2.1 Microplásticos en pastos marinos

Los sedimentos de los ambientes acuáticos son sumideros de microplásticos y su presencia se ha ido incrementando; además, la ingesta de MPs depende del hábitat en el que se encuentran los organismos y puede iniciar en niveles tróficos primarios (Huang *et al.*, 2020; Tahir *et al.*, 2019).

Por otro lado, los pastos marinos tienen una gran capacidad de sedimentación y esto sugiere que podría incrementar las tasas de sedimentación de los microplásticos (Huang *et al.*, 2020; Jones *et al.*, 2020). Por esto, se han realizado estudios alrededor del mundo para conocer la presencia de microplásticos, tanto en las hojas de los pastos (Tabla 2), como en los sedimentos (Tabla 3).

Tabla 2. Microplásticos observados en las hojas de diversas especies de pastos marinos en distintas localidades.

Especie	Lugar	Microplásticos	Color	Referencia
<i>Thalassia testudinum</i>	Belice	Fibras Esferas Fragmentos	Negro Blanco Rojo	(Goss <i>et al.</i> , 2018)
<i>Cymodocea rotundata</i> (Ehrenberg)	Indonesia	Fibras Fragmentos	Azul Transparente Rojo	(Datu <i>et al.</i> , 2019)
<i>Cymodocea rotundata</i>	Indonesia	Fibras Películas Fragmentos	-	(Priscilla <i>et al.</i> , 2019)
<i>Cymodocea nodosa</i> (Ascherson) <i>Zostera noltii</i> (Hornemann) <i>Zostera marina</i>	Portugal	Fibras	Azul Negro Violeta Transparente Rojo	(Cozzolino <i>et al.</i> , 2020)
<i>Zostera marina</i>	Escocia	Fibras Películas Fragmentos	Azul	(Jones <i>et al.</i> , 2020)
<i>Cymodocea rotundata</i> <i>Cymodocea serrulata</i> (Ascherson) <i>Thalassia hemprichii</i> (Ehrenberg) <i>Padina</i> sp. <i>Sargassum ilicifolium</i> (Turner)	Singapur	Fibras Fragmentos	Azul Negro	(Seng <i>et al.</i> , 2020)
<i>Zostera marina</i>	China	Biopelículas	Blanco	(Zhao <i>et al.</i> , 2022)
<i>Halophila ovalis</i>	Australia	Fibras	Negro	(Wright <i>et al.</i> , 2023)

Tabla 3. Microplásticos observados en los sedimentos de praderas de diversas especies de pastos marinos en distintas localidades.

Especie	Lugar	Microplásticos	Color	Referencia
<i>Halophila, Cymodocea, Ehalus, Thalassia, Syringodium, Halodule</i>	Indonesia	Filamentos	Azul Negro	(Tahir <i>et al.</i> , 2019)
<i>Cymodocea nodosa</i> <i>Zostera noltii</i> <i>Zostera marina</i>	Portugal	Fibras Fragmentos Películas	Azul Negro Blanco Transparente Rojo	(Cozzolino <i>et al.</i> , 2020)
<i>Enhalus acoroides</i> (Linnaeus)	China	Fibras Fragmentos Películas Pellets Espumas	Azul Transparente Negro Rojo Blanco	(Huang <i>et al.</i> , 2020)
<i>Zostera marina</i>	Escocia	Fibras Fragmentos	Azul	(Jones <i>et al.</i> , 2020)
-	Indonesia	Fibras Fragmentos	Transparente Azul Rojo Negro	(Tahir <i>et al.</i> , 2020)
<i>Posidonia oceánica</i> (Linnaeus)	España	Películas Fibras Fragmentos	Transparente Blanco Verde	(Dahl <i>et al.</i> , 2021)
<i>Zostera japonica</i> (Ascherson) <i>Halophila ovalis</i> <i>Halophila beccarii</i>	China	Fibras Espuma	Azul Negro Transparente	(Huang <i>et al.</i> , 2021)
<i>Zostera marina</i>	Mar Báltico	Fibras Películas	Azul Transparente Negro Rojo	(Kreitsberg <i>et al.</i> , 2021)
<i>Zostera marina</i> <i>Zostera noltii</i>	Inglaterra	Fibras Madejas Películas	Azul	(Unsworth <i>et al.</i> , 2021)
<i>Zostera marina</i>	China	Biopelículas	Blanco	(Zhao <i>et al.</i> , 2022)
<i>Zostera capensis</i> (Setchell)	Sudáfrica	Fibras Películas Fragmentos Pellets	-	(Boshoff <i>et al.</i> , 2023)
<i>Halophila ovalis</i>	Australia	Películas Fragmentos Esfera	Negro Transparente Azul Gris	(Wright <i>et al.</i> , 2023)

Existen un mayor número de investigaciones de microplásticos presentes en los sedimentos de las praderas que en las hojas de los pastos. De estos, las especies más estudiadas en cuanto a la retención de microplásticos que presentan, pertenecen a los géneros *Zostera* y *Thalassia*. En estos, las fibras son la forma de microplástico más abundante, especialmente las fibras azules (Tahir *et al.*, 2019; Cozzolino *et al.*, 2020; Huang *et al.*, 2020; Jones *et al.*, 2020; Huang *et al.*,

2021; Kreitsberg *et al.*, 2021; Unsworth *et al.*, 2021 Wright *et al.*, 2023). En sedimentos y praderas de *Halophila decipiens* no se han realizado estudios de retención de microplásticos.

2.2 Microplásticos en México

En México, los estudios de microplásticos se han centrado principalmente en sedimentos y arena de playas de las costas del Pacífico, del Golfo de California, del Golfo de México y del Mar Caribe (Tabla 4) y en animales marinos como los realizados por Ortega-Borchardt *et al.*, (2023) en lobos marinos, Fossi *et al.*, (2017) en tiburón ballena, Salazar-Pérez *et al.*, (2021), entre otros. Para las macrófitas marinas como macroalgas, pastos marinos y manglares, así como sus sedimentos, no se cuenta con estudios.

Tabla 4. Estudios de microplásticos en sedimentos de las playas de México.

Estado	Microplásticos (morfología)	Color	Referencia
Baja California Baja California Sur	Fibras Pellets Esferas Películas	Negro Azul Morado Rojo Verde	(Piñon-Colin <i>et al.</i> , 2018)
Oaxaca	Fragmentos Fibra Espumas	Amarillo Azul Verde	(Cruz-Salas <i>et al.</i> , 2020)
Baja California Baja California Sur Sonora Sinaloa Nayarit Jalisco Michoacán Guerrero Oaxaca Veracruz Tabasco Campeche Yucatán Quintana Roo	Espumas Fibras Películas Pellets Pedazos de juguetes	Blanco Verde Azul Amarillo Transparente Rojo	(Alvarez-Zeferino <i>et al.</i> , 2020)
Jalisco Colima	Fragmentos Fibras Pellets Películas Espumas	Azul Gris Negro Transparente Rojo Amarillo	(Torrez-Pérez <i>et al.</i> , 2021)
Quintana Roo	Fragmentos Fibras Espumas	Transparente Azul	(Rigoberto-Rosas <i>et al.</i> , 2022)

En los sedimentos de las playas de México de igual manera que alrededor del mundo, las fibras de color azul fueron las más abundantes. De acuerdo con Álvarez-Zeferino y colaboradores (2020), las playas con mayor abundancia de MPs fueron las del estado de Sinaloa y las de menor abundancia fueron las playas que se encuentran frente a La Paz, Baja California Sur.

Se carece de estudios acerca de la presencia de microplásticos en sedimentos, raíces y hojas de *Halophila decipiens*. La presente tesis contribuirá al conocimiento de la potencial retención de microplásticos en praderas de *H. decipiens* en la zona costera de La Paz, B.C.S.

3. JUSTIFICACIÓN

Los pastos marinos son reconocidos por su importancia ecológica y por sus múltiples servicios ecosistémicos, uno de los principales es la capacidad de sedimentación que tienen, lo que podría permitir que las partículas de microplásticos sean sedimentadas y retenidas.

Asimismo, los pastos marinos, a través de la trama trófica, pueden actuar como potenciales vectores de microplásticos a lo largo de la trama trófica, para invertebrados, peces, tortugas, manatíes e incluso los humanos.

Esta tesis aporta conocimiento de los microplásticos presentes en praderas y sedimentos del pasto remo *Halophila decipiens* en la zona costera de la ciudad de La Paz, B.C.S.

4. HIPÓTESIS

Existe evidencia de microplásticos retenidos en praderas de pastos marinos con buen desarrollo foliar, pero considerando el tamaño de los microplásticos y el tamaño de las hojas de *Halophila decipiens*, se ha planteado que praderas del pasto remo *H. decipiens*, caracterizado por su escaso desarrollo foliar, también presentarán retención de microplásticos en sus diferentes estructuras.

Las dos praderas de pasto remo bajo estudio se localizan en zonas con diferente influencia antropogénica, de tal forma que se observará mayor cantidad de microplásticos en las praderas sujetas a mayor influencia de actividades humanas; mientras que sedimentos sin vegetación acuática presentarán una menor cantidad de microplásticos.

El tamaño del grano de los sedimentos asociados a las praderas de pasto remo, influirá en la magnitud de retención de los microplásticos, por lo que mayor cantidad de microplásticos estará asociada a sedimentos de grano más fino.

5. OBJETIVOS

5.1 Objetivo general

Caracterizar los microplásticos presentes en praderas del pasto remo *Halophila decipiens* y en zonas adyacentes sin vegetación en la zona costera de La Paz, B.C.S.

5.2 Objetivos particulares

- Determinar la estructura (densidad y biomasa) de las praderas de *Halophila decipiens*.
- Definir la abundancia y el tipo de microplásticos en las estructuras (hojas, rizomas y raíces) del pasto remo.
- Determinar la abundancia y el tipo de microplásticos presentes en los sedimentos de las praderas de *H. decipiens* y los sitios adyacentes sin vegetación.
- Contrastar la presencia de los microplásticos presentes en los sedimentos de las praderas del pasto remo y los sitios sin vegetación entre las dos localidades de estudio
- Determinar la granulometría de los sedimentos de praderas de pastos marinos y sedimentos en zonas sin vegetación.

6. MATERIAL Y MÉTODOS

6.1 Área de estudio

El área de estudio se localiza en la zona costera de La Paz, Baja California Sur, México. El clima de la región es seco, semidesértico, con una temperatura media anual entre 22°C y 24°C, con régimen de lluvias en verano, y una precipitación media anual menor de 200 mm (Jiménez-Illescas *et al.*, 1997).

El estudio se realizó en praderas del pasto marino *Halophila decipiens* y en sitios adyacentes sin vegetación en las localidades de Pichilingue y Los Aripes, ambas ubicadas en la zona costera del municipio de La Paz, B.C.S. (Fig. 9).

Pichilingue se ubica a 17 km de la ciudad de La Paz. La influencia antropogénica está dada por una zona de transbordadores y una zona comercial. Es un puerto al que arriban embarcaciones que transportan carga general, cemento a granel y gas L.P., además de que llegan embarcaciones tipo Ferris en sus rutas regulares La Paz-Mazatlán y La Paz-Topolobampo del Estado de Sinaloa y también arriban mega cruceros que trasladan pasaje a sitios turísticos del Puerto de La Paz (API-BCS, 2020).

La Ensenada de La Paz o también llamada Ensenada de Los Aripes, se encuentra a 19 km al norte de la ciudad de La Paz. Esta ensenada es propiamente una laguna costera que se localiza en el sureste de la Bahía de La Paz, tiene una profundidad de 3 a 10 m en el canal y de 1 a 3 m al interior, consta de un área de 52.1 km² y una marea de hasta 1.6 m. En la entrada al canal hay un área somera de aproximadamente 1.5 m de profundidad que queda al descubierto durante la marea baja (Walter-Gauger, 2021). La laguna se ve amenazada por descargas de desechos sólidos, arribo de embarcaciones pesqueras, derrames ocasionales de gasolina y lubricantes, y la amenaza principal es el crecimiento de la mancha urbana, que genera nuevas construcciones y con esto, pérdida de hábitats y especies residentes (WHSRN, 2023).

6.2 Trabajo de campo y análisis de muestras

En Pichilingue los muestreos para recolectar microplásticos se efectuaron en febrero de 2022 y

en Los Aripes en marzo de 2022. En cada localidad se ubicaron 12 sitios de muestreo: seis sitios en praderas de *H. decipiens* y seis sitios en zonas sin vegetación adyacentes a la pradera. En cada pradera y en cada zona sin vegetación, se colocaron dos transectos de 30 m de largo separados entre sí a una distancia de 50 m, en cada transecto se ubicaron tres sitios de muestreo equidistantes (Fig. 9). Las muestras se recolectaron con equipo de buceo autónomo (SCUBA). Las muestras de sedimentos para determinar microplásticos se recolectaron con un núcleo de PVC de 15 cm de diámetro y 12 cm de largo y para determinar granulometría con un núcleo de 5 x 15 cm.

Las muestras de sedimento y material vegetal se almacenaron en bolsas de plástico con cierre hermético previamente etiquetadas y se colocaron en una hielera con hielo para su traslado al laboratorio. En cada localidad se determinaron MPs en seis muestras de material vegetal (hojas, rizomas), seis muestras en sedimentos de la pradera de pasto remo y seis muestras de sedimentos en zonas sin vegetación acuática sumergida.

Adicionalmente, se obtuvieron seis muestras de sedimentos en la pradera y seis muestras de sedimento en zonas sin vegetación acuática sumergida para el análisis granulométrico.

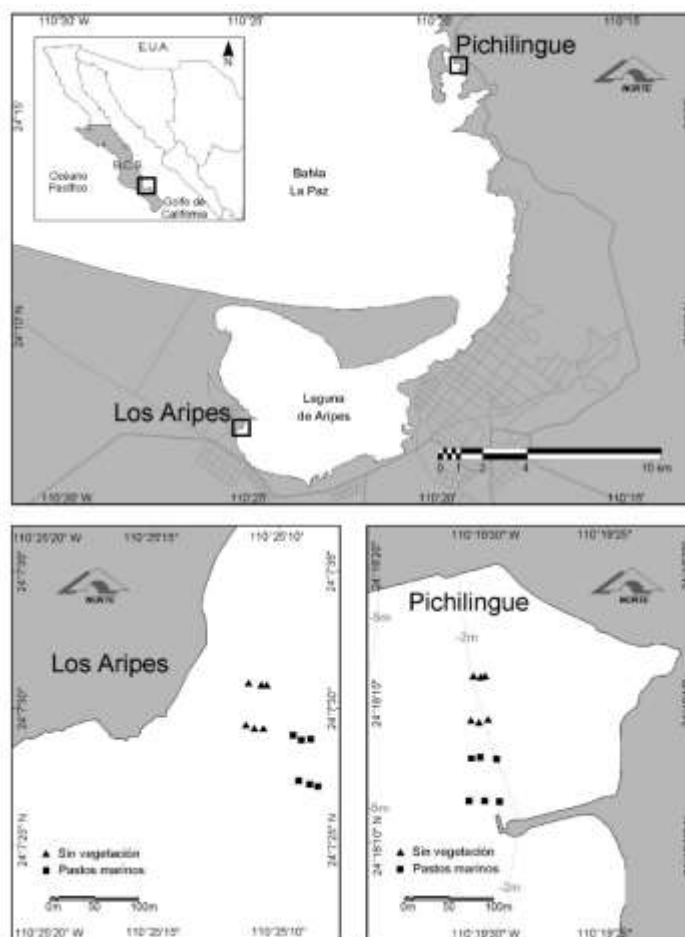


Figura 9. Área de estudio mostrando los sitios de muestreo en las localidades de Pichilingue y Los Aripes. Los triángulos indican los sitios de muestreo en las praderas de *Halophila decipiens* y los cuadrados los sitios de muestreo en las zonas sin vegetación.

6.3 Laboratorio

Las muestras de material vegetal (pastos marinos) fueron secadas a 60°C por 24 horas o hasta obtener peso constante. En cada muestra se obtuvo la densidad de haces de *H. decipiens* (# haces m⁻²) y la biomasa en gramos de peso seco (g PS m⁻²).

Las muestras de sedimento se secaron y posteriormente se tamizaron a través de seis tamices con diferente luz de malla (4.75 mm, 2 mm, 1 mm, 0.5 mm, 0.25 mm y 0.15 mm), cada fracción fue pesada y almacenada en aluminio dentro de sobres de papel. La totalidad de las fracciones de sedimento fue revisada, excepto en las que excedían los 50 g en peso seco donde se tomó una submuestra de 50 g. Las muestras de sedimentos para revisar microplásticos, resultaron en 156 fracciones.

6.3.1 Identificación de microplásticos

La identificación y cuantificación de microplásticos en hojas, rizomas y raíces de *H. decipiens*, así como en las muestras de sedimento, se realizaron con un estereoscopio Zeiss Stemi DV4.

Al observar una potencial partícula de microplástico, se midió y se realizaron las siguientes pruebas dependiendo de la característica de la partícula:

1. Azul de metileno o cloro: los fragmentos orgánicos se tiñen con el azul y el cloro despinta el material orgánico.
2. Ácido clorhídrico (HCl) para comprobar que no fuera un fragmento de concha o algún otro fragmento de carbonato de calcio.
3. Prueba de fuego para discernir si correspondía a una partícula plástica.

Una vez detectados los microplásticos, se midieron y clasificaron por forma (esfera, esponja, espuma, fibra, fragmento, madeja o película) y por color (amarillo, ámbar, negro, blanco, azul, verde, transparente, etc).

6.3.2 Análisis granulométrico de sedimentos de las praderas de *H. decipiens* y sedimentos sin vegetación

Las muestras de sedimentos se procesaron para determinar la granulometría con un analizador de partículas marca Horiba que utiliza tecnología de difracción de rayo láser.

El análisis de las muestras permitió obtener una distribución de tamaño de partículas a intervalos de $\frac{1}{2}$ de unidades (\emptyset), que es una resolución que detalla muy bien la distribución. Por convección, un diámetro de partícula en unidades (\emptyset) se obtiene con la siguiente relación:

$$Diam (\emptyset) = \frac{1}{-Log_2(Diam.en\ mm)} \quad (1)$$

Con esta fórmula, los diámetros de las partículas fueron transformados a una escala logarítmica adecuada para su representación gráfica. En la tabla 5 se muestra la relación de tamaños de partícula, su equivalencia en milímetros y su nomenclatura.

Tabla 5. Equivalencia de diámetro (\emptyset) a milímetros y su nomenclatura.

Diam. (mm)	Diam. \emptyset	Nomenclatura
4	-2	Gránulos (G)
2.83	-1.5	
2	-1	
1.41	-0.5	Arena muy gruesa (Amg)
1	0	
0.71	0.5	Arena gruesa (Ag)
0.50	1	
0.35	1.5	Arena Media (Am)
0.25	2	
0.18	2.5	Arena fina (Af)
0.13	3	
0.09	3.5	Arena muy fina (Amf)
0.06	4	
0.04	4.5	Limo grueso (Lg)
0.03	5	
0.0221	6.5	Limo fino (Lf)
0.0039	8	

El análisis con tecnología láser proporciona los porcentajes de cada intervalo de tamaño de partículas con relación al peso total de la muestra analizada. Con estos valores se obtuvo un gráfico de barras con la distribución de tamaños y también un gráfico de los porcentajes acumulativos. Este último gráfico permite obtener por interpolación cuál es el tamaño de partículas menores al 5%, luego el tamaño de partículas menor a 16% y así sucesivamente hasta completar los percentiles 25%, 50%, 75%, 84% y 95%. Cada percentil es denominado como $\emptyset 5$, $\emptyset 16$, $\emptyset 25$, $\emptyset 50$, $\emptyset 75$, $\emptyset 84$ y $\emptyset 95$ respectivamente.

Una vez obtenidos los percentiles, el promedio gráfico (M_z) se calculó con la fórmula:

$$M_z = \frac{\emptyset 16 + \emptyset 50 + \emptyset 84}{3} \quad (2)$$

La desviación estándar D_s se calculó como:

$$D_s = \frac{\emptyset 84 - \emptyset 16}{3} + \frac{\emptyset 95 - \emptyset 5}{6.6} \quad (3)$$

Los datos de granulometría de sedimentos se mostraron en un gráfico utilizando los parámetros diámetro medio (Unidades \emptyset) y la desviación estándar (adimensional) en representación binaria para diferenciar grupos afines.

6.4 Análisis estadísticos

Los datos de la abundancia de microplásticos en ítems kg^{-1} PS se compararon entre localidades (Pichiligue y Los Aripes) y entre sustratos (praderas de pastos y zonas sin vegetación). Los datos se sometieron a una prueba de normalidad y homogeneidad de varianzas (Conover, 1980).

Para saber si existen diferencias en la densidad y la biomasa, además del número de microplásticos entre localidades y entre los sedimentos asociados a *H. decipiens* y sin vegetación, se realizaron pruebas de Shapiro-Wilk y Fligner-Killeen para normalidad y homogeneidad de varianzas. Para la densidad, se realizó una prueba paramétrica de T de student y para la biomasa, se utilizó una prueba no paramétrica de Mann-Whitney. Para las muestras de microplásticos, se utilizó una prueba no paramétrica de Kruskal-Wallis con su respectiva prueba *a posteriori* de Wilcoxon con un nivel de significancia del 95% (Zar, 1984). El análisis estadístico se llevó a cabo utilizando el paquete de software R 4.2.2 (R Core Team, 2018). Los datos se presentan como promedio \pm desviación estándar.

7. RESULTADOS

7.1 Densidad y Biomasa de *Halophila decipiens*

La especie que se encontró en ambas localidades fue *Halophila decipiens* (> 90 %). Sin embargo, en Los Aripes, en uno de los núcleos se observaron individuos de *Ruppia marítima* y en otro se observaron individuos de *Halodule wrightii*, los cuales no fueron considerados en el estudio.

La densidad promedio en Pichilingue fue de 2650 ± 1926 haces m^{-2} , con un máximo de 5885 haces m^{-2} y un mínimo de 566 haces m^{-2} . En los Aripes el promedio fue de 1377 ± 1074 haces m^{-2} , con un máximo de 2263 haces m^{-2} de y un mínimo de 1867 haces m^{-2} (Fig. 10). No se presentaron diferencias estadísticas significativas entre las dos localidades ($p < 0.05$).

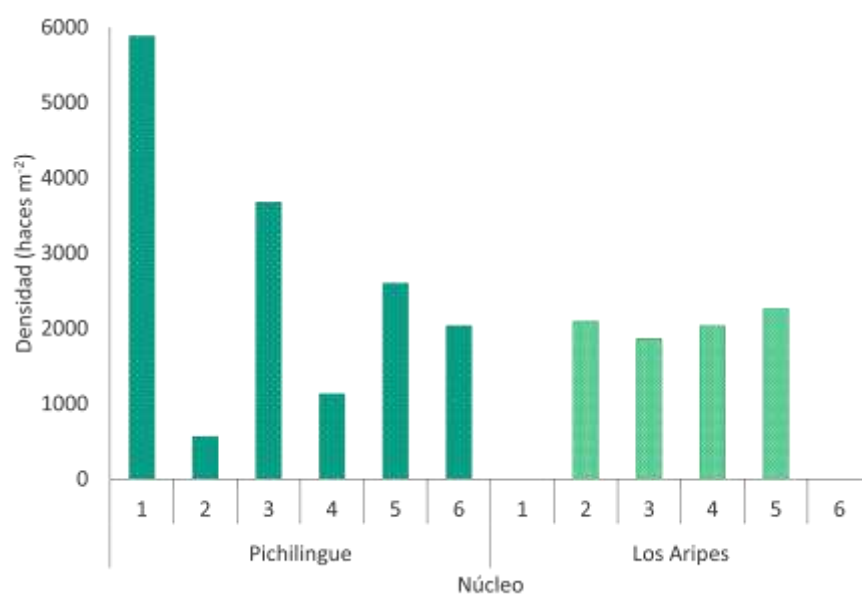


Figura 10. Densidad (haces m^{-2}) de *Halophila decipiens* en las praderas de Pichilingue y Los Aripes.

La biomasa promedio de *Halophila decipiens* en Pichilingue fue de 17.5 ± 17.4 g PS m^{-2} (PS = peso seco), con un valor máximo de 50.9 g PS m^{-2} y un mínimo de 1.7 g PS m^{-2} . En Los Aripes el promedio fue de 21.7 ± 23.9 g PS m^{-2} , con máximos de 50.9 g PS m^{-2} y 50.4 g PS m^{-2} y un mínimo de 6.5 g PS m^{-2} (Fig. 11). No se encontraron diferencias estadísticas significativas entre las dos localidades ($p < 0.05$).

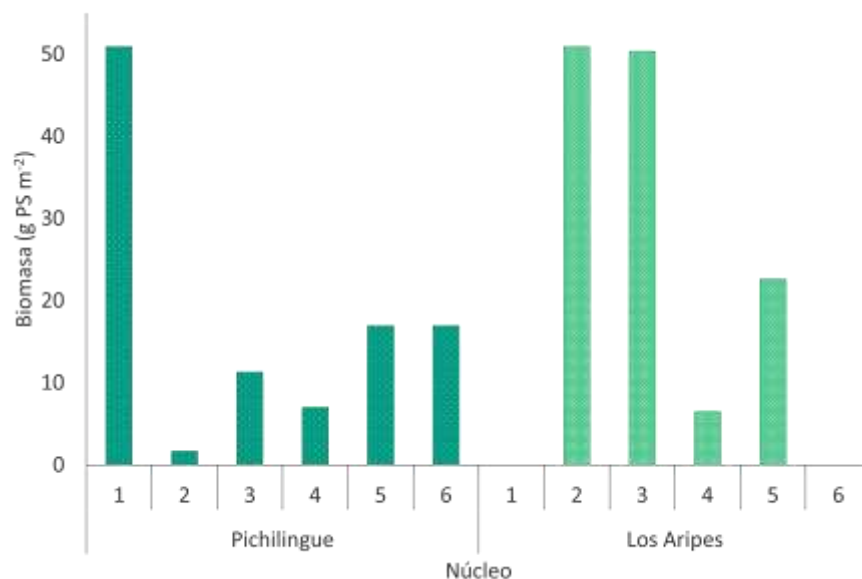


Figura 11. Biomasa en peso seco (g PS m⁻²) de *H. decipiens* en las localidades de Pichilingue y Los Aripes.

7.2 Microplásticos en el material vegetal de *Halophila decipiens*

En las muestras de material vegetal, se observaron microplásticos exclusivamente en aquellas recolectadas en la pradera de Pichilingue. La abundancia de microplásticos en el material vegetal de *H. decipiens* fue de 120 ítems. La mayor proporción de microplásticos se encontró en las hojas (32 %) y la menor entrelazados entre las hojas, los rizomas y las raíces (2 %). Un porcentaje de microplásticos (11 %) se encontró en el material vegetal, sin embargo, las partículas se perdieron con la manipulación o se quemaron (Fig. 12).

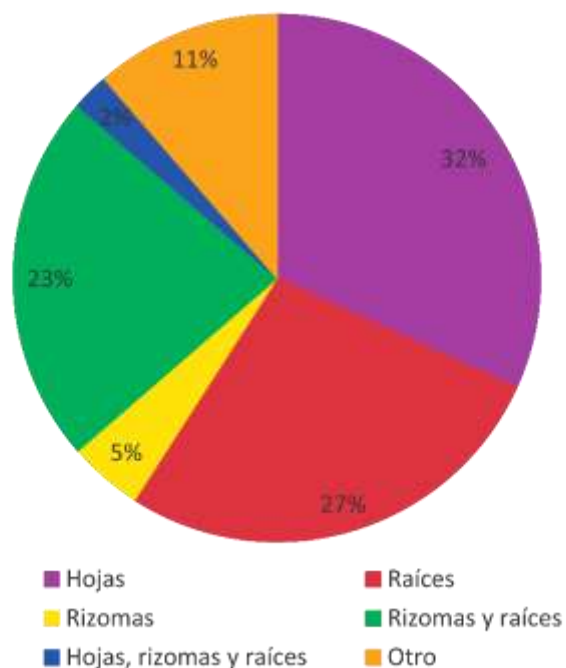


Figura 12. Porcentaje de microplásticos en las estructuras de *Halophila decipiens* en la localidad de Pichilingue.

En cuanto a los tamaños, los más abundantes fueron los de 0.2 – 0.8 mm (30 %) y los menos abundantes fueron los de 16.1 – 20.5 (4 %) (Fig. 13).

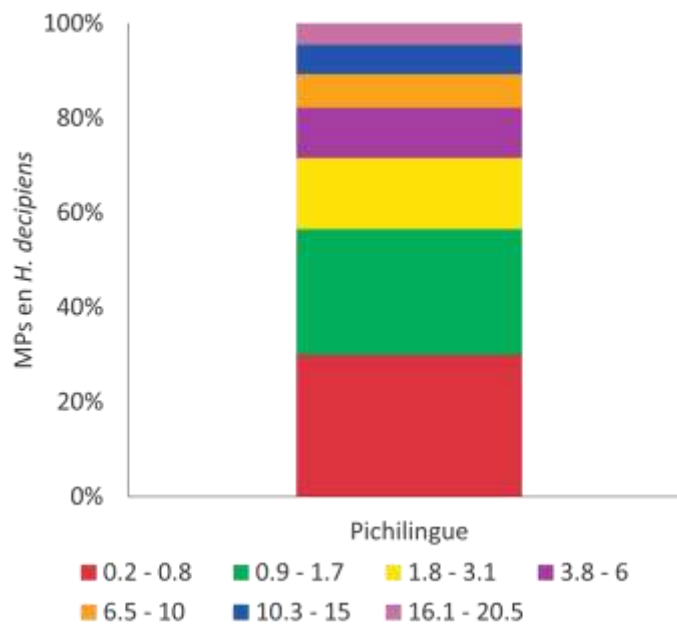


Figura 13. Proporción de microplásticos por tamaño en estructuras de *Halophila decipiens* en Pichilingue, B.C.S. Los tamaños están dados en mm.

Los tipos de microplásticos presentes fueron películas, fibras, fragmentos y madejas, destacando por su abundancia las películas y los colores de los microplásticos observados fueron: azul, bicolor, blanco, negro, rojo y transparente.

La mayor proporción se observó en las películas negras (52 %) y la mínima en fibras rojas (< 1 %), fragmentos blancos (< 1 %), madejas transparentes (< 1 %) y madejas rojas (< 1 %) (Fig. 14).

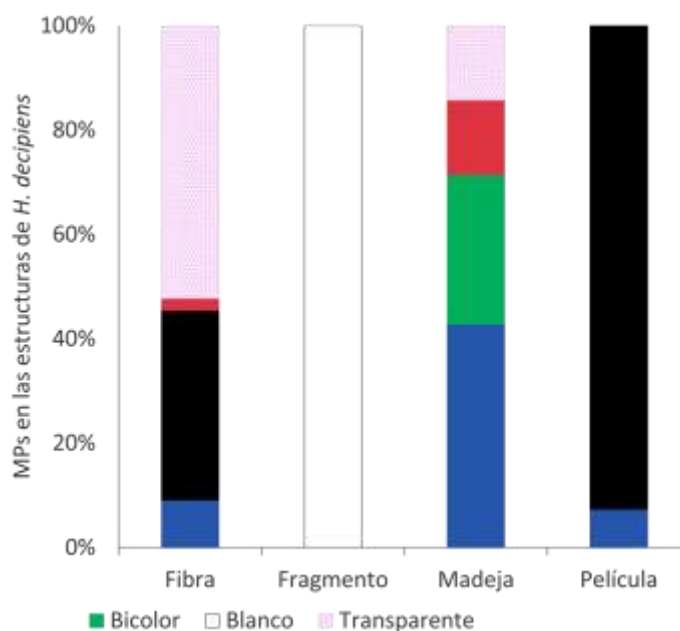


Figura 14. Proporción de los tipos de microplásticos observados en la pradera de pasto remo *Halophila decipiens* en la localidad de Pichilingue, B.C.S.

7.3 Microplásticos en sedimentos asociados a *H. decipiens* y sedimentos sin vegetación

Considerando ambas localidades, se observaron microplásticos en el 88 % de las muestras de sedimentos. La cantidad media de microplásticos observada en los sedimentos fue de 571 ± 1562 ítems kg^{-1} PS.

En Pichilingue el número promedio de microplásticos fue de 1116 ± 1871 y en Los Aripes fue de 25 ± 13 , se encontraron diferencias estadísticas significativas entre estos datos ($p = 2.015 \times 10^{-8}$). En los sedimentos de la pradera de *H. decipiens* la abundancia promedio de microplásticos fue significativamente mayor (2153 ± 2686 ítems kg^{-1} PS) que en Los Aripes (19 ± 12 ítems kg^{-1} PS) ($p = 0.001$). Asimismo, en Pichilingue la concentración de microplásticos en los sedimentos sin vegetación, fue significativamente mayor (79 ± 40 ítems kg^{-1} PS) que en Los Aripes (31 ± 31

ítems kg^{-1} PS) ($p = 0.014$). La comparación entre pares mostró diferencias significativas entre las localidades, pero también entre los cuatro conjuntos de datos de microplásticos ($p = 0.014$) (Fig. 15).

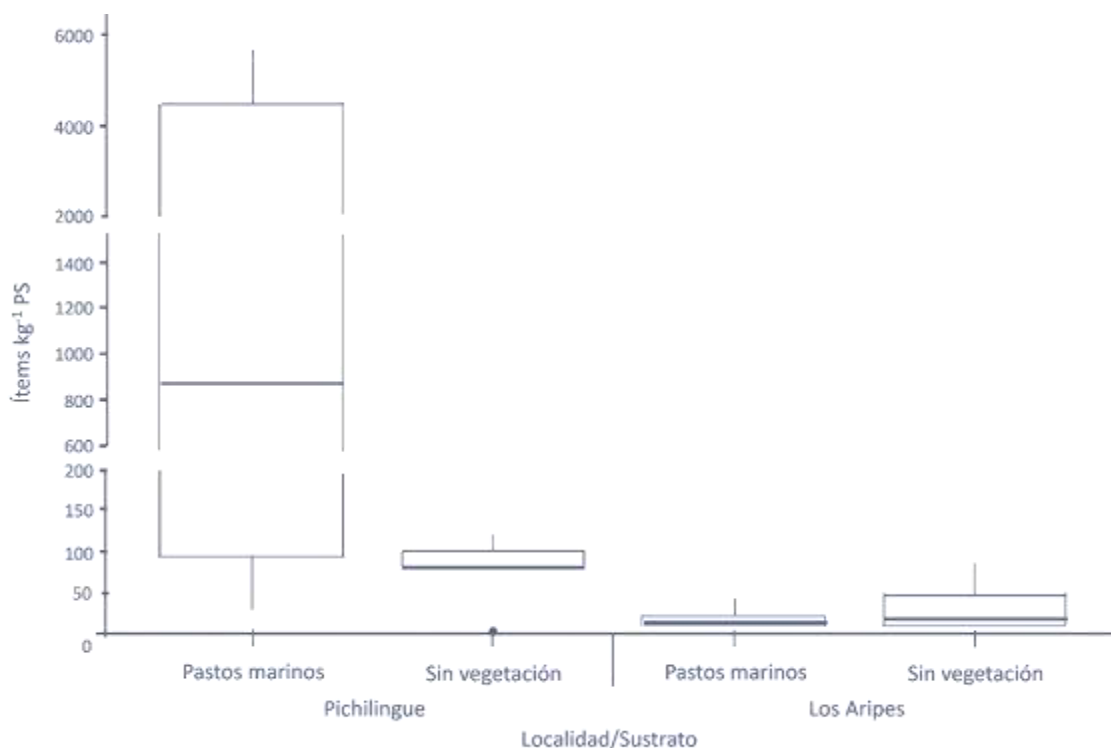


Figura 15. Ítems de microplástico kg^{-1} PS en sedimentos de praderas de pasto remo y de zonas de adyacentes sin vegetación acuática sumergida en Pichilingue y Los Aripes. Las líneas en las cajas del gráfico corresponden al valor de la mediana.

En Pichilingue en los sedimentos de las praderas de pastos marinos predominaron microplásticos de 0.1 – 0.9 mm (43 %) y los menos abundantes fueron los de 17 – 36 mm (< 1 %). En los sedimentos sin vegetación, predominaron microplásticos de 1 – 1.8 mm (25 %) y los que se encontraron en menor proporción fueron los de 17 – 36 mm (≈ 1 %) (Fig. 16).

En Los Aripes en los sedimentos de las praderas de *H. decipiens* predominaron microplásticos de 1 – 1.8 mm (23 %) y los de menor proporción fueron los de 5.3 – 6.3 (3 %) mm, 14 – 16.5 mm (3 %) y de 17 – 36 mm (3 %). En los sedimentos sin vegetación, predominaron microplásticos de 1 – 1.8 mm (27 %), siendo los menos abundantes los de 17 – 36 mm (3 %) (Fig. 16).

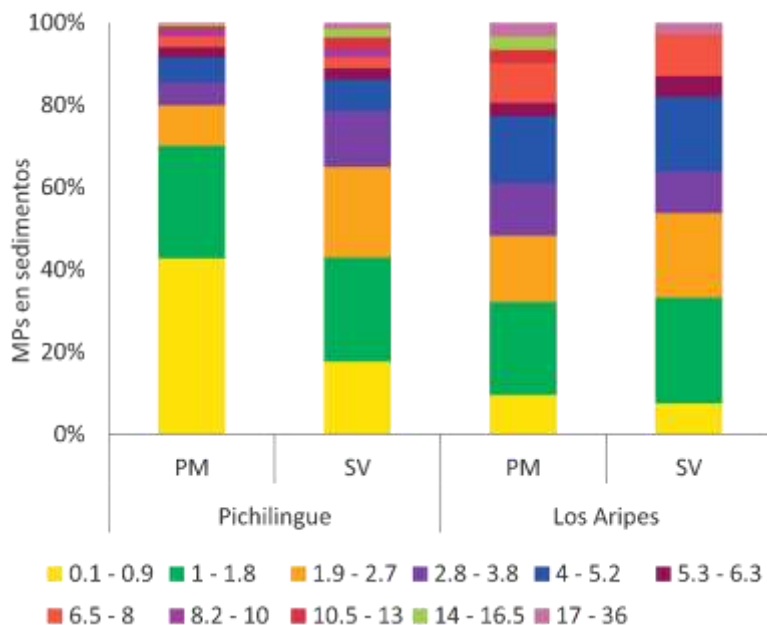


Figura 16. Proporción de microplásticos por tamaño en sedimentos de las praderas de *Halophila decipiens* y en sedimentos de zonas sin vegetación acuática en Pichilingue y Los Aripes, B.C.S. Los tamaños están dados en mm. PM= Pastos marinos, SV= Sin Vegetación.

En Pichilingue, en los sedimentos de las praderas de *Halophila decipiens* predominaron las películas (66 %) y las esferas y las espumas fueron las menos abundantes (< 1 %). En los sedimentos de las zonas sin vegetación los tipos de microplásticos más abundante fueron las fibras (64 %) y los menos abundantes fueron las madejas (\approx 1 %) (Fig. 17).

En Los Aripes, en los sedimentos de las zonas con vegetación los tipos de microplásticos más abundantes fueron las fibras (77 %), las madejas, los fragmentos y las esferas se presentaron en la misma proporción (3 %) siendo los menos abundantes. En los sedimentos sin vegetación, los tipos más abundantes fueron las fibras (92 %), y los menos abundantes, con la misma proporción, se presentaron las madejas, los fragmentos y las películas (2 %), no se observaron esferas en este sustrato (Fig. 17).

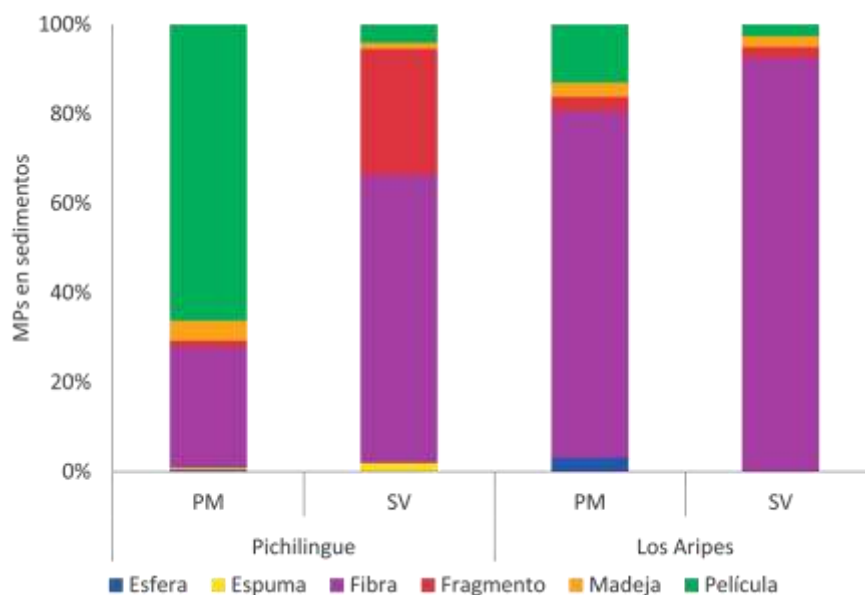


Figura 17. Tipos y proporciones de microplásticos contenidos en los sedimentos de las praderas de *Halophila decipiens* y de las zonas sin vegetación en las localidades de Pichilingue y Los Aripes, B.C.S. PM= Pastos marinos, SV= Sin Vegetación.

En Pichilingue el color de microplásticos con mayor abundancia fue el negro (61 %) y con la menor abundancia, se observaron el bicolor (< 1 %), el multicolor (< 1 %) y el naranja (< 1 %). Los microplásticos con mayor proporción fueron las películas negras (57 %) y las fibras transparentes (8 %) (Fig. 18).

En los Aripes, el color más abundante fue el azul (37 %) y los menos abundantes fueron el amarillo (< 1%), el bicolor (< 1 %), el café (< 1 %), el rosa (< 1 %) y el verde (< 1 %). Los microplásticos con mayor proporción fueron las fibras azules (35%), las fibras transparentes (20 %) y las fibras negras (17 %) (Fig. 18).

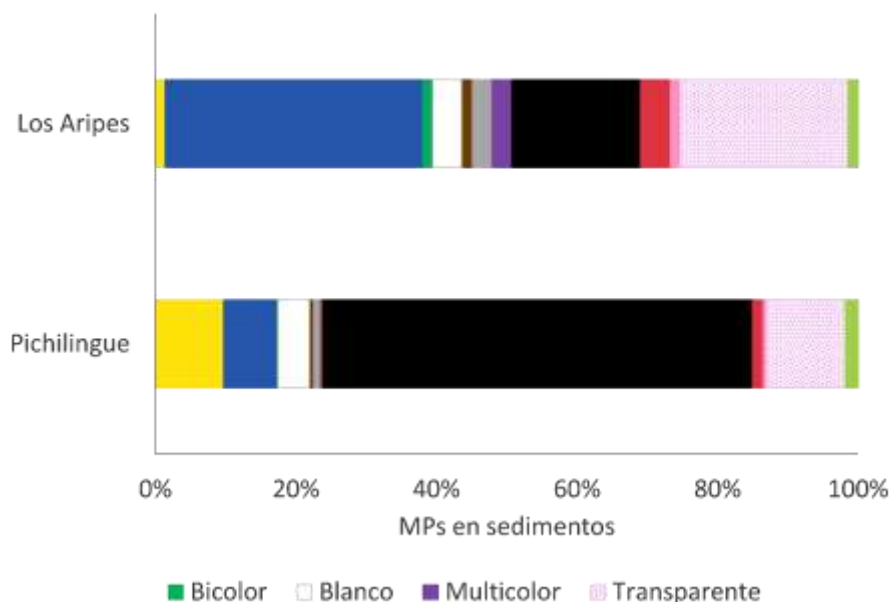


Figura 18. Proporción del color de microplásticos observados en los sedimentos de las localidades de Pichilingue y Los Aripes.

7.4 Granulometría

En Pichilingue, las praderas de pastos marinos se caracterizan por sedimentos de arenas finas y muy finas. En Los Aripes, las praderas de pastos marinos estuvieron asociadas con sedimentos de arena gruesa y muy gruesa. En ambas localidades, las zonas sin vegetación acuática sumergida se caracterizaron por sedimentos de arena muy fina y limo grueso (Fig. 19).

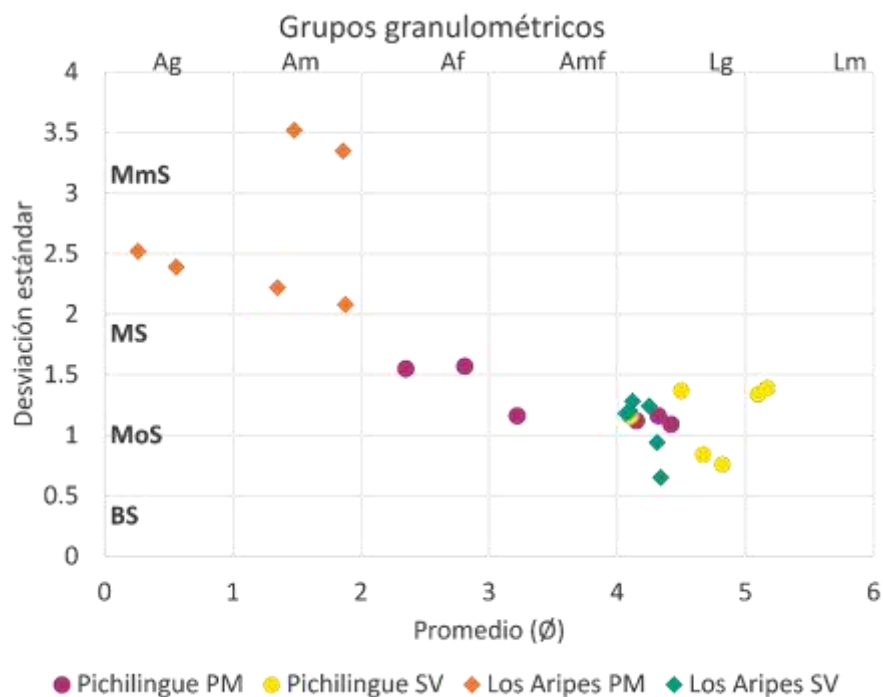


Figura 19. Grupos granulométricos asociados a las praderas de pasto marino y zonas sin vegetación en Pichilingue y Los Aripes. En el eje de las abscisas se muestra el diámetro medio en unidades (ϕ) y en la parte superior las abreviaciones de los intervalos de clase. El eje de las ordenadas corresponde a los intervalos de desviación estándar que establece límites del grado de selección de los sedimentos: BS = Bien seleccionados, MoS = Moderadamente seleccionados, MS = Mal seleccionados, MmS = Muy mal seleccionados, PM= Pastos marinos, SV= Sin Vegetación.

8. DISCUSIÓN

En este estudio se aporta evidencia de que las praderas del pasto remo *Halophila decipiens*, no obstante, su escaso desarrollo foliar, tienen la capacidad de retener microplásticos adhiriéndolos a sus hojas, raíces y rizomas.

Se ha reportado que *H. decipiens* tiene altas tasas de biomasa y es una fuente importante de producción primaria (Kenworthy *et al.*, 1989). En el presente estudio el valor promedio de densidad (2014 haces m⁻²) se encuentra dentro de lo reportado anteriormente en Estados Unidos, con densidades que van desde 523 a 4180 haces m⁻² (Fonseca, 1989; Hammerstrom *et al.*, 2006; Kenworthy, 1999). El valor promedio de biomasa (19.6 g PS m⁻²) se encuentra de igual manera entre lo reportado en otros estudios, con valores entre 0.4 y 92.8 g PS m⁻² (Fonseca, 1989; Hammerstrom *et al.*, 2006; Kuo y Kirkman, 1995).

Con respecto a la presencia de MPs en los sedimentos de las praderas de *H. decipiens* y en las zonas adyacentes sin vegetación acuática sumergida, se observaron microplásticos en diferentes cantidades asociadas a las características del ambiente y a las fuentes potenciales de microplásticos (Cole *et al.*, 2011; Avio *et al.*, 2017; Marti *et al.*, 2020).

En el presente estudio se observaron 120 partículas de MPs en el material vegetal, dato que puede ser comparable con lo registrado en hojas de distintas especies de pasto marino, en la especie *Cymodocea rotundata* se han reportado de 23 – 185 ítems (Datu *et al.*, 2019; Priscilla *et al.*, 2019), en hojas de *Thalassia testudinum* se han reportado 73 partículas (Goss *et al.*, 2018), Cozzolino *et al.*, (2020), reportaron en *Zostera marina* 12 ítems, en *Zostera noltei* 2 ítems y en *Cymodocea nodosa* 7 ítems.

En Pichilingue, la cantidad de microplásticos en sedimentos de la pradera (2153 ± 2686 ítems kg⁻¹ PS) fue mayor que la observada en sedimentos de la zona sin vegetación acuática (79 ± 40 ítems). El hecho de que los microplásticos estén presentes en los sedimentos de la pradera, implica potenciales efectos adversos a las comunidades de sedimentos de las praderas, como poliquetos y crustáceos, a través de la alteración de las características de los sedimentos y las

complicaciones asociadas a su ingestión por los organismos; además, los microplásticos pueden alterar el ciclo de nutrientes al inhibir la fijación del nitrógeno por los diazótrofos, impedir los procesos microbianos y reducir la absorción de nutrientes por las raíces (Gerstenbacher *et al.*, 2022).

Se ha observado que el dosel de los pastos marinos disminuye la velocidad de la circulación del agua y con ello el flujo de las partículas transportadas, incluyendo microplásticos, las cuales chocan y se adhieren a las hojas y también se acumulan en los sedimentos de las praderas (Goss *et al.*, 2018; Huang *et al.*, 2020; Jones *et al.*, 2020; Wright *et al.*, 2023). Los resultados del presente estudio en las dos localidades estudiadas mostraron la existencia de microplásticos en el material vegetal y en los sedimentos de las praderas de *H. decipiens* y las zonas sin vegetación, pero con diferencias en sus abundancias, formas y colores.

En los sedimentos de las praderas de *H. decipiens*, se encontró mayor abundancia de microplásticos en la pradera de Pichilingue (97%) que en la de Los Aripes (3%). Al respecto, Wright *et al.* (2023) observaron que las hojas de *H. ovalis*, que son pequeñas al igual que las de *H. decipiens*, no tienen la suficiente fuerza como para disminuir la velocidad del agua y por lo tanto, no son capaces de retener las partículas de microplásticos, sin embargo, los resultados observados en Pichilingue no coinciden con lo planteado en el estudio referido; aunque el argumento es razonable y aplicable para la pradera de Los Aripes. En realidad otros factores como las características de profundidad, tamaño de grano de los sedimentos y velocidades de corrientes también inciden en la capacidad de retención de partículas (Wright *et al.*, 2023).

En nuestro estudio, en los sedimentos de las praderas de *H. decipiens* se observaron valores promedio de 2153 ± 2686 ítems kg^{-1} PS en Pichilingue y de 19 ± 12 ítems kg^{-1} PS en los Aripes. Estudios previos de microplásticos en sedimentos de praderas de pastos marinos del género *Halophila* han mostrado que la cantidad de microplásticos promedio es variable: *H. ovalis* 45 ítems kg^{-1} PS (Huang *et al.*, 2021), 1000 ítems kg^{-1} PS (Wright *et al.*, 2023), *H. beccarii* 78 ítems kg^{-1} PS (Huang *et al.*, 2021). En otras especies de pastos marinos con mayor desarrollo foliar las cantidades promedio de microplásticos varían desde 3 hasta 3819 ítems kg^{-1} PS, pero la mayoría

de los estudios presentan valores > 100 y < 500 ítems kg^{-1} PS (Tabla 6). Estas observaciones sugieren que la influencia de actividades humanas con aportes de microplásticos en cada localidad, así como las características de las praderas de pastos marinos y su entorno ambiental son factores que inciden en la cantidad de microplásticos observados.

La diferencia de abundancia de microplásticos entre los sedimentos de las praderas y las zonas sin vegetación puede estar asociada a las características de cada localidad en términos de su profundidad, hidrodinámica y granulometría de los sedimentos, así como de la fuente de microplásticos y coincide con algunos estudios realizados en praderas de diferentes especies de pastos marinos grandes como *Cymodocea nodosa*, *Enhalus acoroides*, *Zostera capensis*, *Zostera japónica*, *Zostera noltii* y *Zostera marina* y especies de pastos pequeños como *Halophila ovalis* y *Halophila beccarii*, en países como Portugal, China, Escocia y Sudáfrica (Cozzolino *et al.*, 2020; Huang *et al.*, 2020; Jones *et al.*, 2020; Huang *et al.*, 2021; Boshoff *et al.*, 2023) (Tabla 6). Sin embargo, en Los Aripes, se observó mayor cantidad de microplásticos en los sedimentos de la zona sin vegetación (74%) que en sedimentos de la pradera (26%), y esto también ha sido observado en otros estudios realizados en localidades con praderas de *Zostera marina* y *Zostera noltii* en Inglaterra y *Halophila ovalis* en Australia (Unsworth *et al.*, 2021; Wright *et al.*, 2023).

En este estudio, las localidades de Pichilingue y Los Aripes, tienen diferente profundidad, sedimentos con diferente granulometría, así como distintas fuentes de microplásticos. En particular, la pradera en Pichilingue está a una profundidad ≈ 5 m con sedimentos de arena fina y muy fina; mientras que en Los Aripes la pradera está $< 3 - 5$ m de profundidad con sedimentos de arenas gruesas y medias. Sobre esto, de acuerdo con Pineda y Chang (2021), la granulometría ayuda a inferir el movimiento de las partículas que se encuentran en el sedimento, que se debe al oleaje, las corrientes y los vientos. En este sentido, la pradera y la zona de vegetación adyacente de Pichilingue, asociadas a sedimentos muy finos, indican una zona protegida de baja energía que favorece la sedimentación de partículas, y ayuda a explicar el mayor número de ítems kg^{-1} PS presentes en esta localidad. Por el contrario, los pastos marinos en Los Aripes están asociados a sedimentos gruesos indicando zonas con mayor energía y susceptibles al arrastre, lo que implica que favorece una menor acumulación de partículas, lo

que ayuda explicar la menor abundancia de microplásticos presentes en esta localidad y el hecho de que no se encontraran partículas de microplásticos en las estructuras de *H. decipiens*; sin embargo, en las zonas sin vegetación de esta localidad, los sedimentos son muy finos y la energía baja, lo que coincide con el incremento en la abundancia de microplásticos con respecto a lo observado en la pradera (Ríos y Cisternas, 1998; Pineda y Chang, 2021).

Tabla 6. Cantidad y tipos de microplásticos observados en sedimentos de praderas de pastos marinos y de zonas adyacentes sin vegetación en diferentes localidades alrededor del mundo. Modificada de Unsworth *et al.*, (2021).

Referencia	Lugar	Localidades	Especie	n	Praderas de pastos marinos			Sitios sin vegetación		
					Abundancia (ítems kg ⁻¹ PS)	% de muestras	Tipo dominante	Abundancia (ítems kg ⁻¹ PS)	% de muestras	Tipo dominante
(Tahir <i>et al.</i> , 2019)	Indonesia	3	<i>Halophila</i> , <i>Cymodocea</i> , <i>Ehalus</i> , <i>Thalassia</i> , <i>Syringodium</i> , <i>Halodule</i>	81	131 ± 100	27	Fibras Filamentos	-	-	-
(Cozzolino <i>et al.</i> , 2020)	Portugal	1	<i>Cymodocea nodosa</i> <i>Zostera noltii</i> <i>Zostera marina</i>	40	35.2 ± 26.7	100	Fibras	20.4 ± 14.5	100	Fibras
(Huang <i>et al.</i> , 2020)	China	2	<i>Enhalus acoroides</i>	12	196.7 ± 16.1 780.2 ± 147	100	Fibras Filamentos	93.3 ± 15.3 267.1 ± 60.5	100	Fibras Filamentos
(Jones <i>et al.</i> , 2020)	Escocia	1	<i>Zostera marina</i>	25	300 ± 30	100	Fibras	110 ± 20	100	Fibras
Tahir <i>et al.</i> , 2020	Indonesia	3	-	27	2.96 ± 28.3	100	Fibras Fragmentos	-	-	-
Dahl <i>et al.</i> , 2021	España	3	<i>Posidonia oceanica</i>	10	3819 2173 68 ± 362	100	Películas Fibras	-	-	-
Huang <i>et al.</i> , 2021	China	3	<i>Zostera japónica</i> <i>Halophila ovalis</i> <i>Halophila beccarii</i>	4 6 18	213.75 ± 41.3 44.89 ± 18.14 77.61 ± 14.62	100	Fibras Espumas	115.75 34.84 ± 8.16 41.59 ± 15.25	100	Fibras Espumas
Kreitsberg <i>et al.</i> , 2021	Mar Báltico	15	<i>Zostera marina</i>	30	72.1 ± 9.1 (g 50 ml)	100	Fibras Películas	-	-	-
Unsworth <i>et al.</i> , 2021	Inglaterra	8	<i>Zostera marina</i> <i>Zostera noltii</i>	80	215 ± 163	98	Fibras Filamentos	221 ± 236	98	Fibras Filamentos
Zhao <i>et al.</i> , 2022	China	4	<i>Zostera marina</i>	16	440 ± 39.2 208 ± 33.3 238 ± 31.2 159 ± 17.9	100	Biopelículas	-	-	-
Boshoff <i>et al.</i> , 2023	Sudáfrica	2	<i>Zostera capensis</i>	72	89 ± 58	96	Fibras Películas	94 ± 106	96	Fibras Películas
Wright <i>et al.</i> , 2023	Australia	6	<i>Halophila ovalis</i>	72	1000	83	Películas Fragmentos	750	82	Películas Fragmentos
Presente estudio	México	2	<i>Halophila decipiens</i>	12 12	2153 ± 2686 19 ± 12	67.36	Películas Fibras	79 ± 40 31 ± 31	67.36	Películas Fibras

En abundancia, los datos están dados en promedio y desviación estándar, excepto en los que sólo se presenta un número, en estos indican los ítems kg⁻¹ PS reportados.

La evidencia de los distintos tipos de microplásticos observados en las dos localidades estudiadas indica que las fuentes de microplásticos son distintas. En Pichilingue, las partículas más abundantes fueron las películas negras y las fibras transparentes. En Los Aripes, las fibras azules, negras y transparentes fueron los MPs más abundantes, estos resultados coinciden con lo anteriormente reportado (Goss *et al.*, 2018; Datu *et al.*, 2019; Priscilla *et al.*, 2019; Jones *et al.*, 2020; Seng *et al.*, 2020). Se ha reportado que los microplásticos más comunes encontrados en sedimentos de praderas de pastos marinos, así como en sitios adyacentes sin vegetación son las fibras, principalmente, las fibras azules (Cozzolino *et al.*, 2020; Huang *et al.*, 2020; Jones *et al.*, 2020; Tahir *et al.*, 2020; Huang *et al.*, 2021; Kreitsberg *et al.*, 2021; Unsworth *et al.*, 2021).

De acuerdo con Cozzolino *et al.* (2020), la diferencia entre los microplásticos encontrados en los sitios de estudio, puede ser el resultado de los niveles de contaminación presentes en cada localidad, por lo tanto, dependiendo de las actividades que se realicen en cada una de estas será el tipo de partículas que se encuentren, por ejemplo, provenientes de empaques de comidas y desechos relacionados con actividades de recreación, navegación o pesca. Con base en esto, se puede inferir que las partículas encontradas en Pichilingue proceden de los desechos del puerto, de los ferris, de las actividades que se realizan cerca del muelle y de estanques de cultivo de especies acuícolas cuyos fondos son revestidos con plástico negro (PVC). Por tanto, la gran abundancia de películas negras podría provenir de la degradación del revestimiento plástico de los estanques y de los desechos plásticos de las actividades portuarias. Por otro lado, en Los Aripes, que es una de recreación, las partículas encontradas pueden originarse de basura proveniente de estas actividades y probablemente de pesca, también recreativa.

En ambas localidades, las fibras y las madejas de los diferentes colores que se encontraron pueden provenir del lavado de prendas de vestir, de redes y cuerdas de pesca (Huang *et al.*, 2020). Sin embargo, se necesitan análisis de espectrofotometría para conocer el tipo de polímero presente en cada partícula y con eso, conocer con más exactitud su origen (Avio *et al.*, 2017; Wang *et al.*, 2018; Rochman *et al.*, 2019).

El tipo y color de microplástico tiene implicaciones importantes en el ambiente y en los organismos que de este dependen indirecta o directamente. Las fibras, debido a que tienen una velocidad de sedimentación menor a otros tipos de microplástico, son comúnmente consumidas por tortugas, bivalvos y macrofauna que habita o utiliza los pastos marinos como zona de refugio y alimentación (Huang *et al.*, 2020), sin embargo, cualquier tipo de microplástico que esté adherido a las hojas de los pastos marinos, puede ser consumidos por organismos asociados a estos o al sedimento de las praderas, lo que puede tener como consecuencia que dichas partículas sean transportados fuera de este ambiente (Jones *et al.*, 2020).

Los colores de MPs más abundantes en este estudio fueron el negro, el amarillo, el transparente y el azul y es de relevancia porque el color incrementa las probabilidades de detección e ingesta por parte de los organismos, esto atribuido a que pueden tener una similitud con sus presas y además, pueden verse apetecibles para algunos peces, quienes prefieren presas blancas, ámbar u opacas (Huang *et al.*, 2020). Wang *et al.* (2018) y Marti *et al.* (2020) observaron que algunos depredadores prefieren la ingesta de presas de color azul y que la presencia de microplásticos de color amarillo o café se asocia con procesos de foto oxidación, lo que puede indicar que las partículas de estos colores tienen más antigüedad en los ambientes marinos. Entre más tiempo tenga el MP, mayor será la concentración de químicos, mientras que a mayor degradación, se incrementará la capacidad de adsorción, por lo tanto, el color también está relacionado con la cantidad que puede adsorber el microplástico, lo que puede aumentar el daño que cause en los organismos (Wang *et al.*, 2018; Marti *et al.*, 2020).

Existen ciertos factores que pueden estar influenciando la presencia de las partículas de microplásticos, tanto en las hojas como en los sedimentos, entre estos se encuentran factores antropogénicos como los empaques de comida, el revestimiento plástico de los estanques o de la pesca recreativa, pero también se encuentran factores físicos como las diferencias en la hidrodinámica y sedimentos de cada localidad (Cozzolino *et al.*, 2020; Unsworth *et al.*, 2021; Boshoff *et al.*, 2023), como se observó en las localidades de Pichilingue y Los Aripes.

A pesar de ser un tema cada vez más estudiado, existe todavía una carencia de conocimiento en cuanto a las implicaciones que los microplásticos causan en un ecosistema, particularmente en las praderas de pastos marinos. Al respecto, se requiere una estandarización de los métodos de recolecta y análisis de microplásticos tanto en pastos marinos como en sedimentos, para poder tener una información más veraz alrededor del mundo y evitar una subestimación de los datos generados acerca de este tema. Un mejor conocimiento permitirá crear conciencia y, por lo tanto, un plan de acción para evitar que estas partículas se adhieran a las hojas y se retengan en el sedimento de las praderas.

Sin embargo, algunas acciones pueden realizarse, a nivel local, regional, nacional y global. Por ejemplo la reutilización de plásticos considerados como de un solo uso, el reciclaje, limpieza, la pesca de basura, el monitoreo, la creación de conciencia y promover la investigación del tema, todo esto con la intención de mitigar los efectos adversos que los microplásticos causan al ambiente.

Se requieren más estudios para determinar el origen y los tipos de polímeros de microplásticos observados en las praderas de *Halophila decipiens* en la zona costera de La Paz, B.C.S.

9. CONCLUSIONES

El pasto remo *Halophila decipiens*, a pesar de su escaso desarrollo foliar, tiene la capacidad de retener microplásticos en hojas, raíces y en sus sedimentos.

La densidad de haces promedio de la pradera de Pichilingue fue mayor (2650 ± 1926 haces m^{-2}) que la de los Aripes (1377 ± 1074 haces m^{-2}), pero la biomasa promedio de Los Aripes (21.7 ± 23.9 g PS m^{-2}) fue mayor que la de Pichilingue (17.5 ± 17.4 g PS m^{-2}).

En Los Aripes no se observaron microplásticos en las estructuras de *H. decipiens* y en Pichilingue se observaron 120 partículas de MPs en el material vegetal.

En Pichilingue, la cantidad de microplásticos en sedimentos de la pradera (2153 ± 2686 ítems kg^{-1} PS) fue mayor que la observada en sedimentos de la zona sin vegetación acuática (79 ± 40 ítems kg^{-1} PS) y los tipos de microplásticos más abundantes fueron las películas negras y las fibras transparentes.

En Los Aripes, en sedimentos con vegetación se observó una menor cantidad de microplásticos (19 ± 12 ítems kg^{-1} PS) que en los sedimentos de la zona sin vegetación (31 ± 31 ítems kg^{-1} PS) y los tipos de microplásticos más abundantes fueron las fibras azules, negras y transparentes.

En Pichilingue, la pradera de *Halophila decipiens* se caracterizó por sedimentos de arenas finas y muy finas; mientras que en Los Aripes, se caracterizó por sedimentos de arena gruesa y muy gruesa. En ambas localidades, las zonas sin vegetación acuática sumergida se caracterizaron por sedimentos de arena muy fina y limo grueso.

En las localidades estudiadas, se observaron microplásticos en diferentes cantidades y de distintos tipos asociadas a las características del ambiente y a las fuentes potenciales de microplásticos.

10. LITERATURA CITADA

- Abalansa, S., El Mahrad, B., Vondolia, G.K., Icely, J., Newton, A. (2020). The marine plastic litter issue: A social-economic analysis. *Sustainability*, 12: 8677. <https://doi.org/10.3390/su12208677>
- Administración Portuaria Integral de Baja California Sur (API-BCS). (2020). Puerto de Pichilingue. Puerto comercial, industrial y turístico. Disponible en: <https://apibcs.com.mx/puerto-de-pichilingue/> [consulta: 23 abril 2022].
- Alvarez-Zeferino, J.C., Ojeda-Benítez, S., Cruz-Salas, A.A., Martínez-Salvador, C., Vázquez-Morillas, A. (2020). Microplastics in Mexican beaches. *Resources, Conservation and Recycling*, 155: 104633. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2019.104633>
- Avio, C.G., Gorbi, S., Regoli, F. (2017). Plastics and microplastics in the oceans: From emerging pollutants to emerged threat. *Marine Environmental Research, Blue Growth and Marine Environmental Safety*, 128: 2–11. <https://doi.org/10.1016/j.marenvres.2016.05.012>
- Bank, M.S., Hansson, S.V. (2022). The microplastic cycle: An introduction to a complex issue. En: *Microplastic in the environment: Pattern and process, environmental contamination remediation and management*. Springer International Publishing, Massachusetts, USA.
- Besseling, E., Quik, J.T.K., Sun, M., Koelmans, A.A. (2017). Fate of nano- and microplastic in freshwater systems: A modeling study. *Environmental Pollution*, 220: 540–548. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2016.10.001>
- Boshoff, B.J., Robinson, T.B., von der Heyden, S. (2023). The role of seagrass meadows in the accumulation of microplastics: Insights from a South African estuary. *Marine Pollution Bulletin*, 186: 114403. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2022.114403>
- Cole, M., Lindeque, P., Halsband, C., Galloway, T.S. (2011). Microplastics as contaminants in the marine environment: A review. *Marine Pollution Bulletin*, 62: 2588–2597. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2011.09.025>
- Conover, W. J. (1980). Nonparametric statistics. 2nd edition, John Wiley & Sons, New York, USA.
- Cozzolino, L., Nicastro, K.R., Zardi, G.I., de los Santos, C.B. (2020). Species-specific plastic accumulation in the sediment and canopy of coastal vegetated habitats. *Science of the Total Environment*, 723: 138018. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.138018>
- Crawford, C.B., Quinn, B. (2017). Microplastic pollutants. Elsevier, Amsterdam.
- Cruz Salas, A., Alvarez Zeferino, J., Martínez-Salvador, C., Enriquez, R., Ojeda-Benitez, S., Vazquez, A., Gutiérrez-Ortiz, M. (2020). Cuantificación y caracterización de microplásticos y residuos sólidos urbanos en playa Zipolite, Oaxaca. *Ciencia y Mar*, 24 (71): 3-21.
- Dahl, M., Bergman, S., Björk, M., Diaz-Almela, E., Granberg, M., Gullström, M., Leiva-Dueñas, C., Magnusson, K., Marco-Méndez, C., Piñeiro-Juncal, N., Mateo, M.Á. (2021). A temporal record of microplastic pollution in Mediterranean seagrass soils. *Environmental Pollution*, 273: 116451. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2021.116451>
- Datu, S., Supriadi, S., Tahir, A. (2019). Microplastic in *Cymodocea rotundata* seagrass blades. *International Journal of Agriculture, Environment and Biotechnology*, 4: 1758–1761. <https://doi.org/10.22161/ijeab.46.21>
- Dawes, C.J., Hanisak, D., Kenworthy, J.W. (1995). Seagrass biodiversity in the Indian river lagoon. *Bulletin of Marine Science*, 57: 59–66.
- den Hartog, C., Kuo, J., Larkum, A., Orth, R., Duarte, C. (2007). Taxonomy and biogeography of seagrasses. En: *Seagrasses: biology, ecology and conservation*. Springer, Dordrecht. pp. 1–23.

- den Hartog, C., van Tussenbroek, B.I., Wong, J.G.R., Mercado Ruaro, P., Márquez Guzmán, J.G. (2016). A new *Ruppia* from Mexico: *Ruppia mexicana* n.sp. *Aquatic Botany*, 131: 38–44. <https://doi.org/10.1016/j.aquabot.2016.02.005>
- Derraik, J.G.B. (2002). The pollution of the marine environment by plastic debris: a review. *Marine Pollution Bulletin*, 44: 842–852. [https://doi.org/10.1016/S0025-326X\(02\)00220-5](https://doi.org/10.1016/S0025-326X(02)00220-5)
- de Smit, J.C., Anton, A., Martin, C., Rossbach, S., Bouma, T.J., Duarte, C.M. (2021). Habitat-forming species trap microplastics into coastal sediment sinks. *Science of the Total Environment*, 772: 145520. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.145520>
- Diario Oficial de la Federación (DOF). (2019). Modificación del Anexo Normativo III, Lista de especies en riesgo de la Norma Oficial Mexicana NOM-059-SEMARNAT-2010, Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales, 30 de noviembre de 2019. Disponible en: https://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5578808&fecha=14/11/2019#gsc.tab=0 [consulta: 1 de febrero de 2024]
- Fonseca, M.S. (1989). Sediment stabilization by *Halophila decipiens* in comparison to other seagrasses. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 29: 501–507. [https://doi.org/10.1016/0272-7714\(89\)90083-8](https://doi.org/10.1016/0272-7714(89)90083-8)
- Fonseca, M.S., Kenworthy, W.J., Griffith, E., Hall, M.O., Finkbeiner, M., Bell, S.S. (2008). Factors influencing landscape pattern of the seagrass *Halophila decipiens* in an oceanic setting. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 76: 163–174. <https://doi.org/10.1016/j.ecss.2007.06.014>
- Fossi, M.C., Baini, M., Panti, C., Galli, M., Jiménez, B., Muñoz-Arnanz, J., Marsili, L., Finioia, M.G., Ramírez-Macías, D. (2017). Are whale sharks exposed to persistent organic pollutants and plastic pollution in the Gulf of California (Mexico)? First ecotoxicological investigation using skin biopsies. *Comparative Biochemistry and Physiology Part C: Toxicology & Pharmacology*, 199: 48-58. <https://doi.org/10.1016/j.cbpc.2017.03.002>
- Gerstenbacher C.M., Finzi A.C., Rotjan R.D., Novak A.B. (2022). A review of microplastic impacts on seagrasses, epiphytes, and associated sediment communities. *Environmental Pollution*, 303: 119108. DOI: 10.1016/j.envpol.2022.119108
- Gil Rodríguez, M.C., Cruz Simó, T. (1981). "*Halophila decipiens*" Ostenfeld "(Hydrocharitaceae)". Una fanerogama marina nueva para el Atlántico oriental. *Vieraea: Folia Scientiarum Biologiarum Canariensium*, 207–216.
- Goss, H., Jaskiel, J., Rotjan, R. (2018). *Thalassia testudinum* as a potential vector for incorporating microplastics into benthic marine food webs. *Marine Pollution Bulletin*, 135: 1085–1089. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2018.08.024>
- Hammerstrom, K.K., Kenworthy, W.J., Fonseca, M.S., Whitfield, P.E. (2006). Seed bank, biomass, and productivity of *Halophila decipiens*, a deep water seagrass on the west Florida continental shelf. *Aquatic Botany*, 84: 110–120. <https://doi.org/10.1016/j.aquabot.2005.08.002>
- Huang, S., Jiang, R., Craig, N.J., Deng, H., He, W., Li, J.-Y., Su, L. (2023). Accumulation and re-distribution of microplastics via aquatic plants and macroalgae - a review of field studies. *Marine Environmental Research*, 187, 105951. <https://doi.org/10.1016/j.marenvres.2023.105951>
- Huang, Y., Xiao, X., Effiong, K., Xu, C., Su, Z., Hu, J., Jiao, S., Holmer, M. (2021). New insights into the microplastic enrichment in the blue carbon ecosystem: Evidence from seagrass meadows

- and mangrove forests in Coastal south China sea. *Environmental Science and Technology*, 55: 4804–4812. <https://doi.org/10.1021/acs.est.0c07289>
- Huang, Y., Xiao, X., Xu, C., Perianen, Y.D., Hu, J., Holmer, M. (2020). Seagrass beds acting as a trap of microplastics - Emerging hotspot in the coastal region? *Environmental Pollution*, 257: 113450. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2019.113450>
- Ibarra-Obando, S.E., Ríos, R. (1993). Ecosistemas de Fanerógamas Marinas. En: *Biodiversidad marina y costera de México*. Salazar-Vallejo, S.I., González, N.E. (eds.) CONABIO y CIQRO, México, pp. 54-65
- INECC-PNUD. (2017). Estudio para la identificación, caracterización y evaluación del balance entre las emisiones de GEI y las zonas de captura y almacenamiento de carbono en zonas de ecosistemas costero/marinos del Pacífico, Golfo de México y la Península de Yucatán (Carbono azul). Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático y Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo, Proyecto 85488 “Sexta Comunicación Nacional de México ante la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático”. México.
- Jiménez-Illescas, A.R., Obeso-Nieblas, M., Salas de, D.A.L. (1997). Oceanografía Física de la Bahía de La Paz, B.C.S. En: *La bahía de La Paz, investigaciones y conservación*. UABCS, CICIMAR, SCRIPPS, La Paz, B.C.S., pp. 31-41.
- Jones, K.L., Hartl, M.G.J., Bell, M.C., Capper, A. (2020). Microplastic accumulation in a *Zostera marina* L. bed at Deerness Sound, Orkney, Scotland. *Marine Pollution Bulletin*, 152: 110883. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2020.110883>
- Kenworthy, W.J. (1999). The role of sexual reproduction in maintaining populations of *Halophila decipiens*: implications for the biodiversity and conservation of tropical seagrass ecosystems. *Pacific Conservation Biology*, 5: 260–268. <https://doi.org/10.1071/pc000260>
- Kreitsberg, R., Raudna-Kristoffersen, M., Heinlaan, M., Ward, R., Visnapuu, M., Kisand, V., Meitern, R., Kotta, J., Tuvikene, A. (2021). Seagrass beds reveal high abundance of microplastic in sediments: A case study in the Baltic Sea. *Marine Pollution Bulletin*, 168, 112417. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2021.112417>
- Kuo, J., den Hartog, C. (2001). Seagrass taxonomy and identification key. En: *Global seagrass research methods*. Elsevier, Amsterdam. pp. 31–58. <https://doi.org/10.1016/B978-044450891-1/50003-7>
- Kuo, J., den Hartog, C. (2006). Seagrass morphology, anatomy and ultrastructure. En: *Seagrasses: Biology, Ecology and Conservation*. Springer, Dordrecht. pp. 51–87. https://doi.org/10.1007/978-1-4020-2983-7_3
- Kuo, J., Kirkman, H. (1995). *Halophila decipiens* Ostenfeld in estuaries of southwestern Australia. *Aquatic Botany*, 51: 335-340
- López-Calderón J., Riosmena- Rodríguez, J. Torre, A. Meling López. (2013). El pasto marino en el Golfo de California: estado actual y amenazas. *Biodiversitas*, 97:20-15.
- Martí, E., Martín, C., Galli, M., Echevarría, F., Duarte, C.M., Cózar, A. (2020). The colors of the ocean plastics. *Environmental Science and Technology*, 54: 6594–6601. <https://doi.org/10.1021/acs.est.9b06400>
- Menicagli, V., Castiglione, M.R., Balestri, E., Giorgetti, L., Bottega, S., Sorce, C., Spanò, C., Lardicci, C. (2022). Early evidence of the impacts of microplastic and nanoplastic pollution on the growth and physiology of the seagrass *Cymodocea nodosa*. *Science of the Total Environment*, 838: 156514. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.156514>

- Ortega-Borchardt, J.Á., Ramírez-Álvarez, N., Rios Mendoza, L.M., Gallo-Reynoso, J.P., Barba-Acuña, I.D., García-Hernández, J., Égido-Villarreal, J., Kubenik, T. (2023). Detection of microplastic particles in scats from different colonies of California sea lions (*Zalophus californianus*) in the Gulf of California, Mexico: A preliminary study. *Marine Pollution Bulletin*, 186: 114433. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2022.114433>
- Phillips, R.C. y Meñez, E.G. (1988). Seagrasses. Smithsonian Contributions to the Marine Sciences. Washington, United States.
- Pineda, O.T., Chang, J.C. (2021). Granulometría de los sedimentos del Estero Farfán, Golfo De Montijo. *Tecnociencia*, 23: 16–35.
- Piñon-Colin, T. de J., Rodríguez-Jimenez, R., Pastrana-Corral, M.A., Rogel-Hernandez, E., Wakida, F.T. (2018). Microplastics on sandy beaches of the Baja California Peninsula, Mexico. *Marine Pollution Bulletin*, 131: 63–71. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2018.03.055>
- Priscilla, V., Sedayu, A., Patria, M.P. (2019). Microplastic abundance in the water, seagrass, and sea hare *Dolabella auricularia* in Pramuka Island, Seribu Islands, Jakarta Bay, Indonesia. *Journal of Physics: Conference Series*, 1402: 033073. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1402/3/033073>
- Ramírez-García, P., Lot, A. (1994). La distribución del manglar y de los pastos marinos en el Golfo de California, México. *Anales del Instituto de Biología, Serie Botánica*, 65(1): 63-72.
- Ramírez-García, P., Pedraza, K., Granados-Barba, A. (2019). Los pastos marinos y la captura de carbono azul una razón para estudiarlos en el CASGM. En: *Estudios Científicos en el Corredor Arrecifal del Suroeste del Golfo de México*. Universidad Autónoma de Campeche, Campeche, México. pp. 281–300.
- R Core Team (2018). R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria.
- Red Hemisférica de Reservas para Aves Playeras (WHSRN). (2023). Ensenada de La Paz. Disponible en: https://whsrn.org/es/whsrn_sites/ensenada-de-la-paz/ [consulta: 19 abril 2023]
- Rosas, L.R., González-Salvatierra, C., Polett-Gurrola, M. (2022). Las dunas del Caribe y su contaminación por plásticos. *Ciencia*, 73(2): 42-49
- Ríos R., F., Cisternas V., M. (1998). Uso de parámetros sedimentológicos en el reconocimiento de ambientes hidrodinámicos en los canales y fiordos adyacentes a “Campos de Hielo Sur.” *Investigaciones Marinas*, 26: 21–30. <https://doi.org/10.4067/S0717-71781998002600003>
- Rochman, C.M., Brookson, C., Bikker, J., Djuric, N., Earn, A., Bucci, K., Athey, S., Huntington, A., McIlwraith, H., Munno, K., De Frond, H., Kolomijeca, A., Erdle, L., Grbic, J., Bayoumi, M., Borrelle, S.B., Wu, T., Santoro, S., Werbowski, L.M., Zhu, X., Giles, R.K., Hamilton, B.M., Thaysen, C., Kaura, A., Klasios, N., Ead, L., Kim, J., Sherlock, C., Ho, A., Hung, C. (2019). Rethinking microplastics as a diverse contaminant suite. *Environmental, Toxicology and Chemistry*, 38: 703–711. <https://doi.org/10.1002/etc.4371>
- Salazar-Pérez, C., Amezcua, F., Rosales-Valencia, A., Green, L., Pollorena-Melendrez, J.E., Sarmiento-Martínez, M.A., Tomita-Ramírez, I., Gil-Manrique, B.D., Hernández-Lozano, M.Y., Muro-Torres, V.M., Green-Ruiz, C., Piñon-Colín, T.D.J., Wakida, F.T., Barletta, M. (2021). First insight into plastics ingestion by fish in the Gulf of California, Mexico. *Marine Pollution Bulletin*, 171: 112705. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2021.112705>

- Sánchez-Mejía, Z.M., Galdamez-Meneses, M.G. (2019). ¿Sabías que los pastos también crecen en el océano y fijan CO₂? *Ciencia y Desarrollo*, CONACYT, número 301. Disponible en: <https://www.cyd.conacyt.gob.mx/?p=articulo&id=479> [consulta: 19 abril 2022].
- Santamaría-Gallegos, N.A., Riosmena-Rodríguez, R., Sánchez-Lizaso, J.L. (2006). Occurrence and seasonality of *Halophila decipiens* Ostenfeld in the Gulf of California. *Aquatic Botany*, 84: 363–366. <https://doi.org/10.1016/j.aquabot.2005.12.001>
- Seng, N., Lai, S., Fong, J., Saleh, M.F., Cheng, C., Cheok, Z.Y., Todd, P.A., Seng, N., Lai, S., Fong, J., Saleh, M.F., Cheng, C., Cheok, Z.Y., Todd, P.A. (2020). Early evidence of microplastics on seagrass and macroalgae. *Marine and Freshwater Research*, 71: 922–928. <https://doi.org/10.1071/MF19177>
- Short, F.T. (2003). *World Atlas of Seagrasses*. University of California Press, Berkeley, USA.
- Short, F.T., Polidoro, B., Livingstone, S.R., Carpenter, K.E., Bandeira, S., Bujang, J.S., Calumpong, H.P., Carruthers, T.J.B., Coles, R.G., Dennison, W.C., Erftemeijer, P.L.A., Fortes, M.D., Freeman, A.S., Jagtap, T.G., Kamal, A.H.M., Kendrick, G.A., Judson Kenworthy, W., La Nafie, Y.A., Nasution, I.M., Orth, R.J., Prathep, A., Sanciangco, J.C., Tussenbroek, B. van, Vergara, S.G., Waycott, M., Zieman, J.C. (2011). Extinction risk assessment of the world's seagrass species. *Biological Conservation*, 144: 1961–1971. <https://doi.org/10.1016/j.biocon.2011.04.010>
- Silveira, J.A., Mendoza-Martínez, J.A., Morales-Ojeda, S.M., Camacho-Rico, A., Medina-Gómez, I., Ramírez-Ramírez, J., López-Herrera, M., Pech-Poot, E.Y., Pérez-Martínez, O., Pech-Cárdenas, M., Cota-Lucero, T., Teutli-Hernández, C. (2018). Base de datos de almacenes de carbono en los pastos marinos de México. *Elementos para Políticas Públicas*, 1(4): 1-8.
- Silveira, J., Morales-Ojeda, S., Mendoza Martínez, J., Medina-Gómez, I., Ramirez-Ramirez, J., Sandoval-Gil, J.M., Camacho-Ibar, V. (2019). Pastos Marinos. En: *Estado del ciclo del carbono: Agenda azul y verde*. Programa Mexicano del Carbono. Texcoco, Estado de México, México. pp. 150–177.
- Tahir, A., Samawi, M.F., Sari, K., Hidayat, R., Nimzet, R., Wicaksono, E.A., Asrul, L., Werorilangi, S. (2019). Studies on microplastic contamination in seagrass beds at Spermonde Archipelago of Makassar Strait, Indonesia. *Journal of Physics: Conference Series*, 1341: 022008. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1341/2/022008>
- Tahir, A., Soeprapto, D.A., Sari, K., Wicaksono, E.A., Werorilangi, S. (2020). Microplastic assessment in seagrass ecosystem at Kodingareng Lompo Island of Makassar City. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 564: 012032. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/564/1/012032>
- Thompson, R.C., Olsen, Y., Mitchell, R.P., Davis, A., Rowland, S.J., John, A.W.G., McGonigle, D., Russell, A.E. (2004). Lost at sea: Where is all the plastic? *Science*, 304: 838–838. <https://doi.org/10.1126/science.1094559>
- Torrez-Pérez, K.A., Cervantes, O., Reyes Gomez, J., Olivos Ortiz, A. (2021). Clasificación de microplásticos en playas urbanas, suburbanas, rurales y naturales de Colima y Jalisco, México. *Costas*, 3 (1): 207-230. <https://doi.org/10.25267/Costas.2021.v2.i3.0903>
- Unsworth, R.K.F., Higgs, A., Walter, B., Cullen-Unsworth, L.C., Inman, I., Jones, B.L. (2021). Canopy accumulation: Are seagrass meadows a sink of microplastics? *Oceans*, 2: 162–178. <https://doi.org/10.3390/oceans2010010>

- van Tussenbroek, B., Barba-Santos, M.-G., Wong, J., Dijk, K., Waycott, M. (2010). Guía de los pastos marinos tropicales del Atlántico oeste. Instituto de Ciencias del Mar y Limnología. Universidad Nacional Autónoma de México, Ciudad de México.
- Walter-Gauger, M.F. (2021). Modelado de la presencia de tursiones (*Tursiops truncatus*) en la Ensenada de La Paz, México, a partir de monitoreo acústico pasivo. *Tesis Doctoral*. Centro de Investigaciones Biológicas del Noroeste, S.C., La Paz, B.C.S., México.
- Wang, Fen, Wong, C.S., Chen, D., Lu, X., Wang, Fei, Zeng, E.Y. (2018). Interaction of toxic chemicals with microplastics: A critical review. *Water Research*, 139: 208–219. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2018.04.003>
- Ward, D.H., Lee Tibbitts, T., Morton, A., Carrera-González, E., Kempka, R. (2004). Use of digital multispectral videography to assess seagrass distribution in San Quintín Bay, Baja California, Mexico. *Ciencia y Mar*, 30: 47–60.
- Waycott, M., Duarte, C.M., Carruthers, T.J.B., Orth, R.J., Dennison, W.C., Olyarnik, S., Calladine, A., Fourqurean, J.W., Heck, K.L., Hughes, A.R., Kendrick, G.A., Kenworthy, W.J., Short, F.T., Williams, S.L. (2009). Accelerating loss of seagrasses across the globe threatens coastal ecosystems. *Proceedings of the National Academy of Sciences USA*, 106: 12377–12381. <https://doi.org/10.1073/pnas.0905620106>
- Waycott, M., Freshwater, D.W., York, R.A., Calladine, A., Kenworthy, W.J. (2002). Evolutionary trends in the seagrass genus *Halophila* (Thouars): Insights from molecular phylogeny. *Bulletin of Marine Science*, 71: 1299–1308.
- Wright, J., Hovey, R.K., Paterson, H., Stead, J., Cundy, A. (2023). Microplastic accumulation in *Halophila ovalis* beds in the Swan-Canning Estuary, Western Australia. *Marine Pollution Bulletin*, 187: 114480. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2022.114480>
- Zar, J. H. (1984). *Biostatistical Analysis*. 2nd edition, Prentice Hall, Englewood, NJ, USA.
- Zhao, L., Ru, S., He, J., Zhang, Z., Song, X., Wang, D., Li, X., Wang, J. (2022). Eelgrass (*Zostera marina*) and its epiphytic bacteria facilitate the sinking of microplastics in the seawater. *Environmental Pollution*, 292: 118337. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2021.118337>