CONAMA 2026

OCEANZYME

Soluciones para la valorización de las basuras marinas mediante reciclado enzimático.

Edita: Fundación Conama

Año: 2026

Este documento está bajo una licencia de Creative Commons Reconocimiento-NoComercial 4.0 Internacional.

Personas autoras de la presente comunicación técnica

Autor Principal de la comunicación: Francisco Javier Miranda Aparicio. Técnico en gestión de residuos. Asociación Vertidos Cero (AVC).

Otros Autores:

Dra. Silvia González. Acinas. Profesora de investigación del Consejo Superior de Investigaciones Científicas. Instituto de Ciencias del Mar (ICM-CSIC).

Dr. Francesco Colizzi. Científico Titular del Consejo Superior de Investigaciones Científicas. Instituto de Química Avanzada de Cataluña (IQAC-CSIC).

Dr. Rafael Jiménez Aguilar. Grupo Biotecnología. AIMPLAS

María José De Manuel Herrera. Grupo Biotecnología. AIMPLAS

Alejandro Giganto Rodríguez. Técnico del grupo de investigación de Ecología de microorganismos marinos. Instituto de Ciencias del Mar (ICM-CSIC),

Javier Grau Forner. Grupo de Reciclado Mecánico. AIMPLAS.

Rubén Rodríguez Alonso. Técnico gestión de proyectos. Asociación Vertidos Cero (AVC)

Dr. Pablo Ferrero Aguar. Responsable del Grupo de Biotecnología. AIMPLAS

Índice

1. Introducción 1

2. Objetivos 2

3. Contexto y dimensión del problema 3

4. Desarrollo y resultados 4

4.1. Acumulación de la basura marina 4

4.2. Retirada y caracterización por tipologías de basura marina 6

4.3. Caracterización de los materiales de plástico 7

4.4. Comunidades microbianas asociadas al plástico 8

4.4.1. Recogida de muestras de microorganismos 8

4.4.2. Aislamiento de los microorganismos 9

4.4.3. Amplificación y secuenciación del gen 16S rRNA 9

4.4.4. Análisis de secuencias e identificación taxonómica 10

4.4.5. Análisis filogenético 12

4.4.6. Extracción del material genético (ácido desoxirribonucleico-ADN) 12

4.4.7. Análisis metagenómico 13

4.5. Modelización de enzimas 13

4.6. Producción de enzimas 14

4.7. Reciclado químico mediante catálisis enzimática 14

5. Conclusiones 14

6. Agradecimientos 15

7. Bibliografía 15

1. Introducción

OCEANZYME («Innovación metagenómica y enzimática para nuevas soluciones de reciclado de basuras marinas») responde de manera directa y eficaz a múltiples compromisos. Su enfoque innovador, basado en herramientas biotecnológicas como el análisis metagenómico, simulaciones computacionales y la biocatálisis enzimática, permite abordar de forma integral uno de los retos ambientales más urgentes del contexto nacional e internacional como son los residuos plásticos persistentes en el medio marino, como principal categoría dentro de las basuras marinas.

El proyecto OCEANZYME[1] se desarrolla con la colaboración de la Fundación Biodiversidad del Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico, a través del Programa Pleamar, y se cofinancia por la Unión Europea por el FEMPA (Fondo Europeo Marítimo, de Pesca y de Acuicultura).

OCEANZYME se enmarca plenamente en los objetivos establecidos por la Estrategia Española de Economía Circular 2030 (EEEC 2030), que persigue una reducción del 30% del consumo nacional de materiales y un 15% en la generación de residuos con respecto a 2010 y promueve el aprovechamiento de recursos mediante procesos sostenibles. Mediante la valorización biotecnológica de las basuras marinas, OCEANZYME no solo evita su acumulación en el medio natural, sino que reintroduce materiales y subproductos en la cadena de valor contribuyendo a la transición hacia una economía circular más eficiente y regenerativa, reincorporando en el ciclo de producción los materiales contenidos en los residuos como materias primas secundarias.

Asimismo, el proyecto se alinea con los objetivos del Plan de Acción de Economía Circular del Gobierno de España, y con el Plan Nacional Integrado de Energía y Clima (PNIEC) 2021 2030, que reconoce el papel clave de la innovación en los sectores productivos para avanzar hacia un modelo más sostenible y menos intensivo en carbono. OCEANZYME contribuye a estos objetivos mediante la investigación aplicada a la biodegradación de polímeros sintéticos y su conversión en productos de alto valor añadido, lo cual tiene implicaciones directas en la reducción del consumo de recursos fósiles y en la mitigación de emisiones asociadas a la gestión ineficiente de residuos.

Por otra parte, el proyecto está en línea con el Plan Estratégico de la Ciencia, la Tecnología y la Innovación (PEICTI) 2021-2027, especialmente en línea estratégica de Alimentación, Bioeconomía, Recursos naturales y Medio Ambiente. OCEANZYME se encuentra vinculado a estas líneas, ya que bioprospectará en basuras marinas posibles soluciones como microorganismos degradadores de plásticos o enzimas hidrolíticas para el reciclado de las mismas basuras marinas, mejorando la sostenibilidad de los océanos gracias a la identificación de puntos críticos de acumulación de las basuras marinas y aportando nuevas soluciones bio-basadas para su tratamiento. En lo que respecta al Plan Nacional de Residuos, y en particular al Plan Estatal Marco de Gestión de Residuos, el proyecto aporta soluciones a la problemática de residuos no gestionados que terminan en el medio marino, disminuyendo su impacto ambiental en el ecosistema marino.

Además, OCEANZYME contribuye al cumplimiento de los Objetivos de Desarrollo sostenible, en particular:

[1] “Las opiniones y documentación aportadas en esta publicación son de exclusiva responsabilidad de la persona o personas que ostenten su autoría y no reflejan necesariamente los puntos de vista de las entidades que apoyan económicamente el proyecto”.

- ODS 9, Industria, innovación e infraestructuras, ya que apuesta por tecnologías emergentes como el reciclado enzimático aplicadas a la sostenibilidad.
- ODS 12. Producción y consumo responsables, ofreciendo a las empresas una tecnología que permita el reciclado de estos residuos siendo convertidos en productos de valor añadido.
- ODS 14 Vida Submarina, ya que reduce la presencia e impacto de los plásticos en los ecosistemas marinos.
- ODS 17. Alianzas para lograr objetivos, a través de una colaboración multiactor entre diferentes tipos de entidades: una organización de la sociedad civil, la Asociación Vertidos Cero, una agencia estatal dedicada a la investigación científica y técnica, el Consejo Superior de Investigaciones Científicas a través del Instituto de Ciencias de Mar y el Instituto de Química Aplicada de Cataluña, una asociación tecnológica e innovación que da servicios al sector del plástico, AIMPLAS y el apoyo fundamental de dos entidades del sector pesquero, las Cofradías de Pescadores de Gandía y San Martiño de Bueu.

2. Objetivos

El objetivo principal del proyecto es desarrollar un enfoque integral para la recogida, caracterización y valorización de basuras marinas, mediante técnicas de predicción de zonas de acumulación de basuras marinas y el metagenoma asociado a las basuras marinas, desarrollando soluciones de reciclado enzimático, con el fin de reducir el impacto ambiental de los residuos plásticos en el medio marino y generar soluciones sostenibles aplicables al sector pesquero y acuícola.

Incluyendo entre sus objetivos específicos, los siguientes:

- Identificar y validar puntos críticos de acumulación de basuras marinas en la costa atlántica y mediterránea.
- Caracterizar física y químicamente los residuos plásticos para determinar su composición, frecuencia y origen
- Analizar las comunidades microbianas asociadas a los residuos y establecer correlaciones con el tipo de polímero, zona geográfica y origen
- Identificar enzimas hidrolíticas implicadas en la degradación de plásticos
- Modelar y Seleccionar las enzimas candidatas
- Producir enzimas degradadoras de plástico y evaluar su actividad frente a las basuras marinas
- Explorar aplicaciones potenciales de los productos de degradación enzimática en el sector pesquero y acuícola
- Divulgar los resultados del proyecto por medio de diversas formas de comunicación

3. Contexto y dimensión del problema

Las basuras marinas son residuos sólidos abandonados en el medio, abundantes y dañinos para los ecosistemas marinos. Debido a su elevada producción y la falta de gestión, han terminado por alcanzar el medio marino generando un problema global que necesita la búsqueda de una solución.

Las estimaciones de la cantidad de residuos que llegaron en 2010 al medio marino únicamente desde fuentes terrestres oscilan entre unos 5 y 13 millones de toneladas métricas (Jambeck et al., 2015). Parte de esta incertidumbre se debe a que resulta genuinamente difícil obtener datos fiables: las corrientes y los vientos desplazan los residuos visibles, de modo que un mismo objeto puede contabilizarse más de una vez, y solo una pequeña fracción de la basura marina llega a verse. Según el PNUMA, apenas un 15 % de la basura marina flota en la superficie; otro 15 % permanece suspendido en la columna de agua; y el 70 % restante reposa en el fondo marino, fuera de la vista (United Nations Environment Programme - UNEP,2005).

Para establecer un contexto global sobre el problema de estos contaminantes marinos se ha estimado como relación que diferencia entre las fuentes terrestres (ríos, turismo costero, vertederos ilegales, que representan alrededor del 80 % de los contaminantes que llegan de los entornos costeros al mar, mientras que el 20 % restante procede del actividades marinas (actividad pesquera, transporte marítimo, embarcaciones de recreo, (Joint Group of Experts on the Scientific Aspects of Marine Pollution - GESAMP,1990), principalmente de artes de pesca perdidas o abandonadas (APPA), como redes, líneas y boyas. Si bien, esta estimación 80:20 debe tratarse con cuidado, al no referirse a estudios científicos rigurosos (Hudson et al., 2025)

Los 10 principales ríos del mundo transportan entre el 88 % y el 95 % de la carga global al mar. Utilizando como variable los residuos mal gestionados, las aportaciones globales de residuos procedentes de los ríos al mar oscilan entre 0,41 y 4 millones de toneladas al año (Schmidt et al., 2017). Una vez en el agua, el viento, las mareas y las corrientes oceánicas dispersan ampliamente el material, lo que complica tanto su retirada como su seguimiento.

Una segunda dimensión del problema, menos evidente, es qué ocurre con la basura una vez recuperada. La fracción plástico de los residuos marinos son notoriamente difíciles de reciclar y valorizar. Tras una larga exposición al agua de mar, la luz solar y el estrés mecánico, el material suele estar parcialmente degradado, de modo que el producto reciclado no alcanza las propiedades técnicas necesarias para aplicaciones útiles. Los plásticos marinos recuperados presentan además con frecuencia un olor persistente; aunque existen tecnologías para reducir los compuestos causantes del olor, no se eliminan por completo, lo que limita aún más el uso de este material reciclado. En resumen, recoger la basura marina es solo la mitad de la batalla: convertirla de nuevo en algo valioso es la mitad más difícil, y es precisamente donde el reciclado mecánico y térmico convencionales se quedan cortos.

Sobre la base de estos antecedentes, se origina OCEANZYME. Este proyecto trata de dar una solución a la basura marina siendo abordado desde diferentes perspectivas, integrando la

identificación de zonas críticas donde se pueden acumular, su retirada y caracterización, el estudio de las comunidades microbianas asociadas y la evaluación de su capacidad degradadora, la identificación de los enzimas de interés y su potencial aplicación en procesos de reciclado enzimático posibilitando la valorización de estos residuos y el uso de los productos resultantes en el sector pesquero y de la acuicultura.

4. Desarrollo y resultados

OCEANZYME es un proyecto que se desarrolla en el periodo que va de enero de 2026 a enero de 2028, por esta razón, en este apartado se presentan las actividades que se contemplan en el mismo, pero se recogen solo los resultados parciales que se han logrado a la fecha de esta comunicación.

Dentro de las actividades, dos de ellas son transversales al proyecto, una es la comunicación y divulgación, dirigida a los diferentes actores identificados, de los sectores pesquero y acuicultura, sector plástico, la academia y la ciencia, la gobernanza o al público general. La otra, es la coordinación, engloba a todos los miembros del consorcio, ayudando a gestionar el proyecto para conseguir una ejecución técnica y económica exitosa y alcanzar los objetivos contemplados.

El resto de actividades se desarrollan secuencialmente, desde trabajos de campo, como la toma de muestras y caracterización por tipologías, el trabajo de gabinete o en laboratorio, con la caracterización de los materiales, el cultivo de microorganismos o el análisis metagenómico, y las tecnológicas, como la simulación computacional o la biocatálisis enzimática. Estas actividades se exponen a continuación.

4.1. Acumulación de la basura marina

Con esta actividad se ha identificado dónde se localiza la basura marina en las dos demarcaciones marinas seleccionadas, a partir de los valores obtenidos de las densidades de basuras marinas (ítems/km^2) en dichas demarcaciones marinas: la levantino-balear (Golfo de Valencia en la Comunidad Valenciana) y la noratlántica (zona oeste de la Comunidad Autónoma de Galicia).

Empleando los registros históricos de datos, entre 2018 y 2025, de proyectos de retirada de pesca pasiva de residuos marinos en fondos profundos por parte de embarcaciones de arrastre de las zonas seleccionadas, con caracterización por categorías y objetos basada en la lista de referencia y clasificación de objetos de la *Joint List* del Marine Strategy Framework Directive Technical Group on Marine Litter (MSFD TG ML, Fleet et al., 2021). Además, del uso de datos de navegación del sistema AIS (traducido del inglés como Sistema de Identificación Automática) que recoge la posición, rumbo, velocidad y datos de la embarcación). Introducidos y filtrando estos datos en la herramienta *QGIS v 3.44LTR* (QGIS Development Team, 2025), entre los límites de profundidad autorizados a la pesca de arrastre en cada zona o bien por las velocidades adecuadas a la realización de los lances de arrastre por las embarcaciones, se ha estimado las densidades de

basura marinas identificando las zonas de mayor acumulo de residuos. Estos mapas predictivos de acumulación (**Figura 1**) pueden orientar decisiones de retirada de basuras marinas, protección y gestión mucho más allá del proyecto.

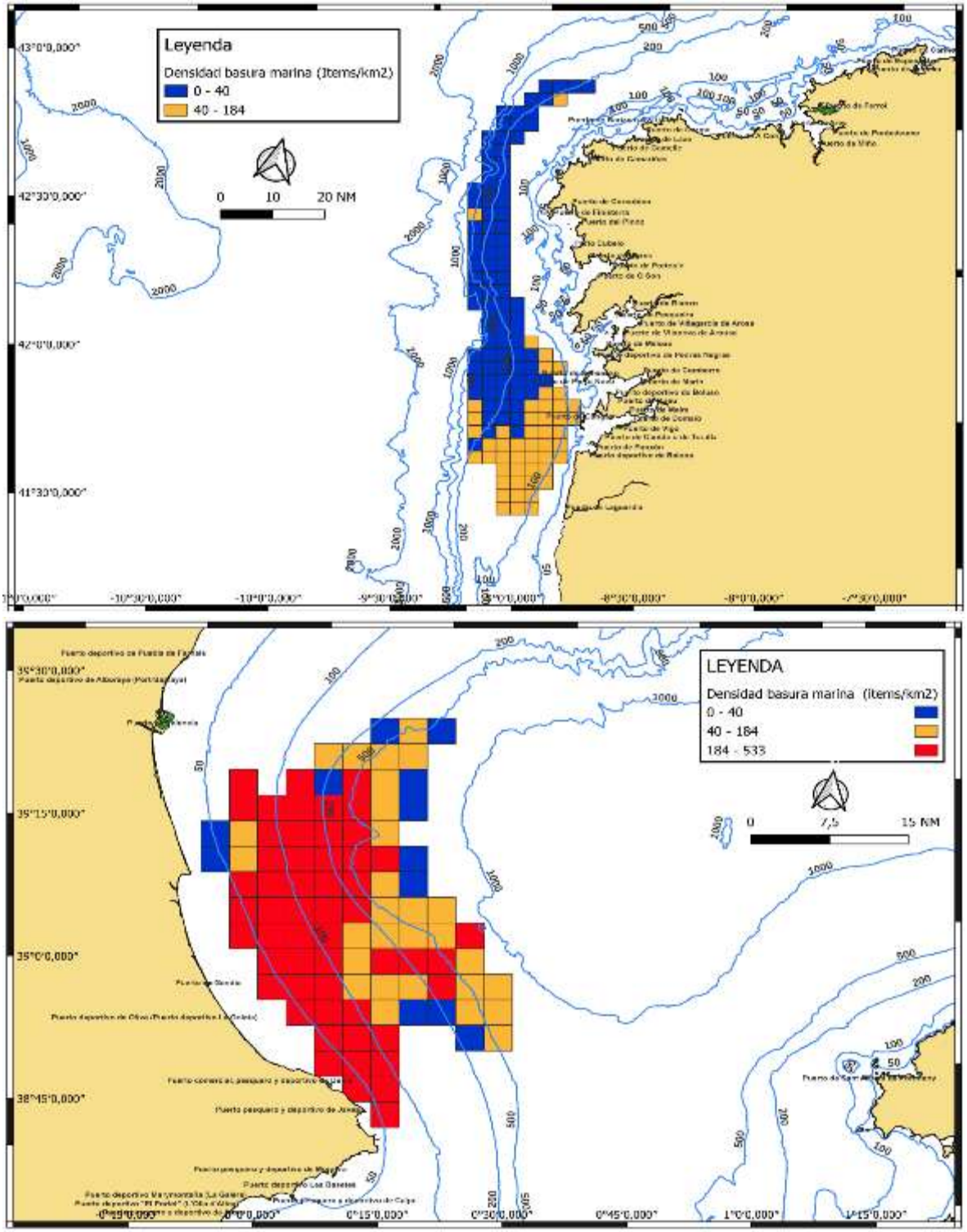


Figura 1. Densidades de basura marina (items/km^2) en la demarcación marina noratlántica, noroeste de España en la Comunidad Autónoma de Galicia y en el Golfo de Valencia, demarcación marina levantino-balear, en la Comunidad Valenciana
Fuente: OCEANZYME

Las densidades de basuras marinas (**Figura 1**) se han calculado siguiendo la metodología establecida por Gaudin et al. (2025) pero adaptado a zonas locales con una malla de 5 x 5 km.

Cada celda representa el nivel de acumulación de basura marina en el fondo por medio de la media ponderada de la densidad, esta representa la densidad media normalizada de basura en la celda, expresada en ítems/km². Para calcular el valor asignado a cada celda, se realiza una ponderación por la longitud del segmento, de modo que la densidad obtenida en cada lance de arrastre se pondera según la longitud del tramo de dicho lance que discurre dentro de los límites de la celda.

Como se observa en la **Figura 1**, los valores resultantes cambian entre las dos demarcaciones marinas estudiadas, resultando valores más bajos en la zona analizada de la demarcación noratlántica respecto a la levantino-balear, con valores para la zona norte (0-40 items/km^2) y valores más elevados en la zona sur (40 – 184 items/km^2), zona de las Rías Bajas de la Comunidad de Galicia. En la levantino-balear, aunque algunas cuadrículas indican valores entre 0 - 40 items/km^2 y 40 – 184 items/km^2 aquí un mayor número de celdas (32), las más cercanas a la costa, al norte en línea con la Albufera y al sur a la altura del puerto de Jávea, entre la isobata de -50m y -100m, muestran un rango de valores entre 184 – 533 items/km^2.

4.2. Retirada y caracterización por tipologías de basura marina

En lugar de organizar campañas de retirada de basuras marinas dirigidas, OCEANZYME trabaja con el apoyo del sector pesquero. Dos cofradías de pescadores —la Cofradía de Pescadores de Gandía en el Mediterráneo y la Cofradía de San Martiño de Bueu en el Atlántico— donde sus embarcaciones de arrastre recogen basura marina de fondos profundos mediante pesca pasiva: los residuos se separan de los peces atrapados en las redes durante las operaciones pesqueras habituales, siendo recuperados del mar para ser depositados en los puertos y gestionados como residuos. Un protocolo desarrollado para las actividades de pesca pasiva (Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico-MITECO, 2023) regula cómo se toman y preparan las muestras para una caracterización posterior de los residuos retirados, ayudados de la aplicación móvil MARNOBA desarrollada por la Asociación Vertidos Cero – AVC (s.f.), permite clasificar las basuras marinas en las categorías establecidas para los materiales y, dentro de estas categorías, en los tipos de objeto establecidos dentro de la *Joint List* de la Unión Europea desarrollada por el MSFD del TG ML, terminando con su pesaje posterior, depósito temporal en contenedores y gestión por parte de un gestor de residuos autorizado.

En la **Figura 2** se observan, como muestra, algunos de los objetos retirados y caracterizados por tipologías, en la primera de las dos campañas que se van a realizar en los puertos participantes en el proyecto, Gandía (Comunidad Valenciana) realizada en mayo de 2026 y Bueu (Comunidad Autónoma de Galicia) realizada en septiembre de 2026, mayoritariamente objetos de la categoría “plástico” y en menor porcentaje de la categoría “metal”, cuyas fuentes son tanto de objetos de origen terrestre o marino, caso de los sedales empleados en la pesca.

En la demarcación noratlántica aparecen objetos de la categoría "plástico" (60,4%), "metal" (10,4%) y "madera trabajada"(8,3%) con un total de 48 objetos (principalmente 5 redes y objetos pesca; 5 cuerdas/cordeles; 5 latas bebida). En la demarcación levantino-balear aparecen objetos de la categoría "plástico (83,9%), "metal"(11,8%) con un total de 93 objetos (principalmente 22 bolsas de compra, comidas o congelados; 11 sedales; 9 latas de bebida)

Se puede observar el estado de degradación del material, así como su colonización por diversos organismos marinos, caso del fragmento del objeto en la imagen superior izquierda y la botella de la parte inferior derecha.



Figura 2. Objetos retirados y caracterizados en los puertos de Gandía y Bueu dentro de la primera campaña. Fuente: OCEANZYME

4.3. Caracterización de los materiales de plástico

En relación con la identificación de los materiales plásticos, tras una primera fase de caracterización, se ha llevado a cabo un análisis individualizado de los elementos recuperados mediante técnicas de espectroscopia en el infrarrojo cercano (NIR). Esta tecnología permite obtener el espectro característico de cada muestra, proporcionando información sobre su composición polimérica. Los

espectros obtenidos se han analizado y contrastado con referencias bibliográficas y espectros de materiales conocidos, con el objetivo de determinar la naturaleza de los polímeros presentes.

Los resultados de esta caracterización han permitido identificar los principales materiales plásticos presentes en las fracciones recuperadas, observándose un predominio de polímeros pertenecientes a la familia de las poliolefinas, polietilenos (PE) y polipropilenos (PP).

4.4. Comunidades microbianas asociadas al plástico

4.4.1. Recogida de muestras de microorganismos

Se recogieron muestras de biofilm (**Figura 3**) adherido a la superficie de diferentes objetos plásticos presentes en las basuras marinas recogidas y recién desembarcadas en los puertos de Gandía (mayo 2026) y de Bueu (septiembre 2026), tanto para aislar los microorganismos presentes como para la extracción de material genético y su posterior análisis metagenómico. En el primer caso, se raspó la superficie de los plásticos y se pasó un hisopo estéril. El material recolectado se introdujo en crioviales con una solución previamente filtrada de PBS (solución salina tamponada con fosfato) y DMSO (Dimetilsulfóxido) al 7%, que se congelaron hasta su procesamiento en el laboratorio. En total, se recolectaron 9 muestras de plásticos provenientes del puerto de Gandía y 14 del puerto de Bueu. En el segundo caso, se pasó un hisopo por el biofilm, guardándolo en un tubo con una solución para la preservación del material genético (DNA/RNA Shield Collection Tube with Swab, Zymo Research). Las muestras se guardaron a 4 ºC hasta su uso.



Figura 3. Objetos retirados y tomas de muestra del biofilm en los puertos de Gandía y Bueu en la primera campaña.
Fuente: OCEANZYME

4.4.2. Aislamiento de los microorganismos

Las muestras provenientes de residuos plásticos del puerto de Gandía se procesaron con el objetivo de aislar bacterias en cultivo puro presentes en la comunidad microbiana adherida a los plásticos. Se llevó a cabo una homogeneización previa de las muestras mediante agitación en vórtex, resuspensión con pipeta automática y aplicación de presión mecánica empleando las puntas de la pipeta. Las muestras procesadas se sembraron en césped mediante diluciones en serie en placas con medio Zobell Agar (**Figura 4A**) para el crecimiento de microorganismos marinos. Tras varios días de incubación a temperatura ambiente y en oscuridad, se seleccionaron 32 colonias (**Figura 4B),** que fueron sembradas en placas con medio Zobell Agar para su aislamiento. Una vez aisladas (**Figura 4C**), se seleccionó una colonia de cada cepa para su crecimiento en medio Zobell líquido.

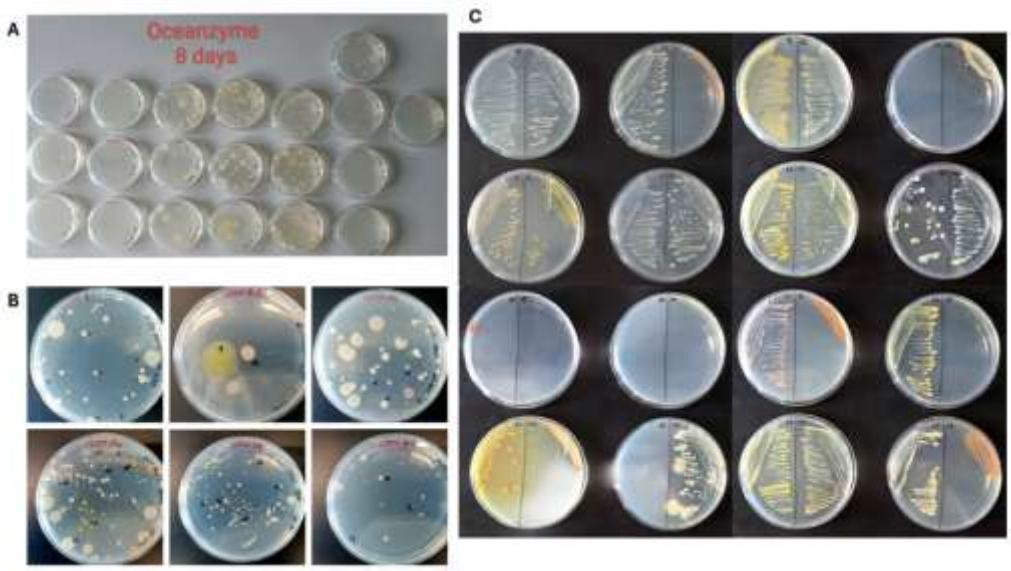


Figura 4. A) Placas con diluciones en serie de las muestras provenientes de residuos plásticos. B) Colonias seleccionadas (32 en total) para su aislamiento. C) Cepas aisladas.
Fuente: OCEANZYME

4.4.3. Amplificación y secuenciación del gen 16S rRNA

Tras el crecimiento de las cepas en medio líquido y con el objetivo de obtener su ADN genómico, los cultivos se centrifugaron a 4700 r.p.m. durante 12 minutos, obteniendo un sedimento celular. Se decantó el medio de cultivo y se resuspendió el sedimento en 1 mL de medio Zobell líquido fresco. Posteriormente, se traspasaron 10 µL del cultivo a tubos estériles con 90 µL de agua ultrapura Milli-Q®. Para la extracción del ADN genómico, se lisaron las células aplicando un programa de 95ºC durante 15 minutos en un termociclador. El ADN extraído se utilizó para amplificar el gen marcador 16S rRNA mediante la técnica de la reacción en cadena de la polimerasa (PCR, *Polimerase Chain Reaction*). Para ello, se emplearon los cebadores 27F y 1492R, que permiten amplificar prácticamente la totalidad del gen 16S rRNA. Los amplicones obtenidos se enviaron a GenoScreen (https://www.genoscreen.fr) para su secuenciaron mediante el método de Sanger con ambos cebadores, para obtener secuencias de cada cepa en sentido directo e inverso.

4.4.4. Análisis de secuencias e identificación taxonómica

Las secuencias obtenidas del gen 16S rRNA se utilizaron para evaluar las diferencias genéticas entre las cepas aisladas de los residuos plásticos, así como para llevar a cabo su identificación taxonómica. En primer lugar, se procesaron las secuencias obtenidas para eliminar los cebadores y los nucleótidos de baja calidad. Posteriormente, se ensamblaron las secuencias directa e inversa para reconstruir la secuencia del gen 16S rRNA prácticamente completa. Las secuencias reconstruidas se compararon con las secuencias depositadas en la base de datos del NCBI (National Center for Biotechnology Information) mediante la herramienta *BLAST*® (Basic Local Alignment Search Tool, Johnson et al., 2008), con el objetivo de identificar las cepas taxonómicamente en función de su similitud, o porcentaje de identidad, con las secuencias de referencia (**Tabla 1**).

Tabla 1. Identificación taxonómica de las cepas aisladas en función de su similitud con las secuencias de referencia.
Fuente: OCEANZYME

Cepa	Identificación taxonómica	Identidad de la secuencia (%)
OZYME-1	*Psychrobacter sp.*	96.37%
OZYME-2	*Psychrobacter submarinus*	97.32%
OZYME-3	*Psychrobacter submarinus*	97.70%
OZYME-4	*Flagellimonas sp.*	95.27%
OZYME-5	*Thalassorhabdomicrobium marinisediminis*	99.24%
OZYME-6	*Qipengyuania vulgaris*	99.40%
OZYME-7	*Psychrobacter celer*	97.16%
OZYME-8	*Psychrobacter nivimaris*	98.01%
OZYME-9	*Tenacibaculum discolor*	98.19%
OZYME-10	*Pseudoalteromonas sp.*	96.39%
OZYME-11	*Neolewinella sp.*	96.19%
OZYME-12	*Thalassorhabdomicrobium marinisediminis*	98.48%
OZYME-13	*Mesonia algae*	96.99%
OZYME-14	*Qipengyuania vulgaris*	97.67%
OZYME-15	*Vibrio sp.*	96.74%
OZYME-16	*Psychrobacter celer*	97.03%

Cepa	Identificación taxonómica	Identidad de la secuencia (%)
OZYME-17	*Aquimarina muelleri*	97.51%
OZYME-21	*Phaeobacter gallaeciensis*	97.93%
OZYME-22	*Thalassorhabdomicrobium marinisediminis*	98.79%
OZYME-24	*Ruegeria atlantica*	98.78%
OZYME-25	*Kocuria sp.*	94.62%
OZYME-26	*Qipengyuania citrea*	98.64%
OZYME-27	*Agrococcus baldri*	99.04%
OZYME-28	*Mesonia ostreae*	97.92%
OZYME-29	*Agrococcus sp.*	93.91%
OZYME-30	*Agrococcus baldri*	99.04%
OZYME-31	*Marihabitans asiaticum*	98.39%
OZYME-32	*Qipengyuania sp.*	96.02%

Los géneros predominantes entre los microorganismos aislados de las muestras (**Figura 5**) fueron *Psychrobacter, Qipengyuania, Thalassorhabdomicrobium y Agrococcus*, que en conjunto representaron más de la mitad de los géneros identificados. En las cepas restantes se observó una elevada diversidad de géneros, muchos de los cuales se encuentran en la literatura asociados a ambientes marinos.

Destaca especialmente el género *Pseudoalteromonas*, ya que se ha demostrado su capacidad para biodegradar plásticos como el poliestireno (PS) o el polipropileno (PP), incluso en condiciones de bajas temperaturas (Lv et al., 2024). A su vez, existe evidencia de degradación de polietileno (PE) por parte de *Qipengyuania citrea* (Zeng et al., 2026). Estos resultados preliminares sugieren el posible aislamiento de nuevas cepas con enzimas capaces de degradar los residuos plásticos.

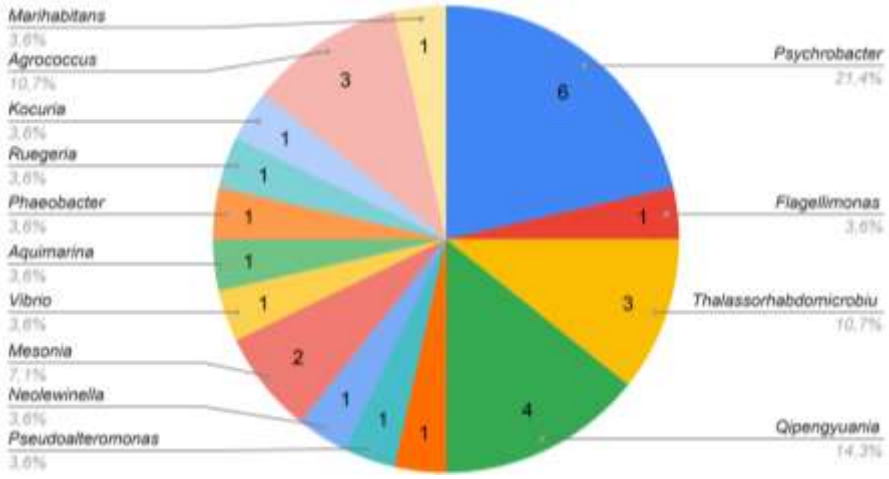


Figura 5. Identificación taxonómica a nivel de género de las cepas aisladas
Fuente: OCEANZYME

4.4.5. Análisis filogenético

Por último, se realizó un alineamiento de las secuencias del gen 16S rRNA junto con sus parientes filogenéticos más cercanos, obtenidos de la base de datos *SILVA* (Chuvochina et al., 2026), para elaborar un árbol de relaciones filogenéticas con el programa *MEGA12* (Molecular Evolutionary Genetics Analysis, Kumar et al., 2024) (**Figura 6**). Los resultados del análisis filogenético, junto con los porcentajes de identidad de las secuencias respecto a las disponibles en las bases de datos de referencia, permitirán determinar la posible existencia de nuevas especies, así como establecer sus relaciones evolutivas con especies previamente descritas.

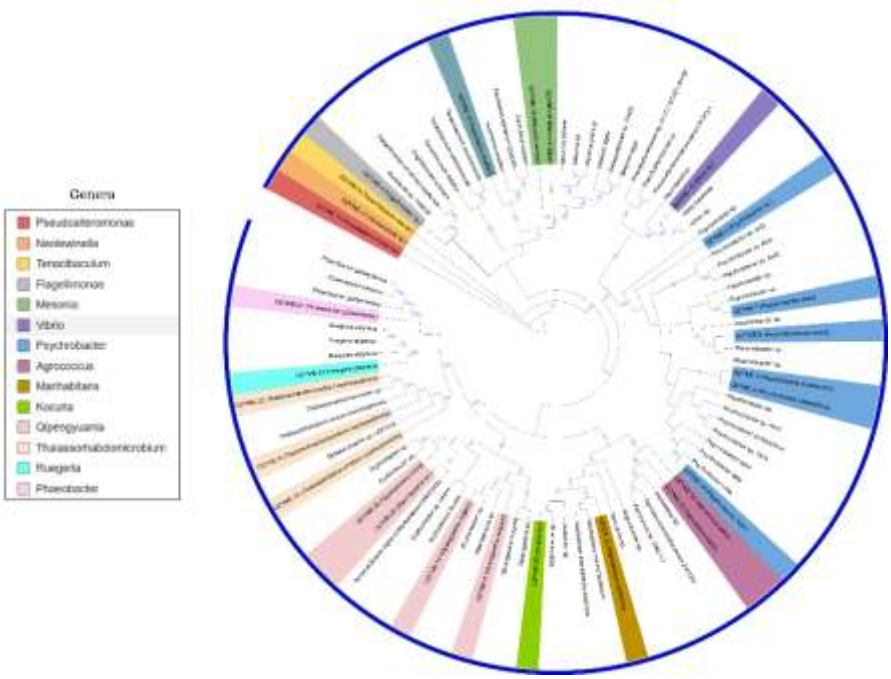


Figura 6. Árbol filogenético de las cepas aisladas y sus parientes filogenéticos más cercanos. Árbol filogenético inferido mediante *MEGA12* (Kumar et al., 2024) y editado gráficamente en iTOL (Interactive Tree Of Life, Letunic y Bork, 2024)
Fuente: OCEANZYME

4.4.6. Extracción del material genético (ácido desoxirribonucleico-ADN)

Una vez recolectadas las muestras de biofilm, se llevó a cabo una extracción de ADN de cada una con el objetivo de realizar posteriormente un análisis metagenómico, que permitirá identificar, por un lado, las especies microbianas asociadas a cada residuo plástico, y, por otro lado, secuencias de enzimas potencialmente degradadoras de cada tipo de plástico. Para la extracción de ADN, se siguieron las instrucciones de un kit específico para muestras de biofilm (DNeasy PowerBiofilm Kit, Qiagen). Para la extracción, se pesan 0,05–0,20 g de biofilm y se centrifugan a 13.000 × g durante 1 minuto. Se resuspende la muestra en 350 µl de la solución MBL (solución de lisis) y se añaden

100 µl de la solución FB (solución de lisis complementaria). Se incuba a 65 °C durante 5 minutos y se realiza la lisis mecánica mediante *bead beating* (rotura celular con perlas). Después, se centrifuga y se recupera el sobrenadante, al que se añaden 100 µl de IRS (solución de eliminación de inhibidores), incubando a 4 °C durante 5 minutos. Tras una nueva centrifugación, se añade la solución MR (solución de unión del ADN) y se carga la muestra en la columna MB Spin Column (columna de membrana de sílice para retener el ADN). Se realizan los lavados con la solución PW (solución de lavado) y etanol, y finalmente se eluye el ADN con 100 µl de la solución EB (solución de elución). Una vez eluido el ADN, se cuantifica la concentración mediante técnicas espectrofotométricas.

La concentración del ADN extraído de las muestras recogidas de Gandía (las que se han analizado hasta ahora) variaba considerablemente dependiendo de la muestra, en un rango entre 2 y 200 µg/mL.

4.4.7. Análisis metagenómico

Esta actividad se iniciará en un breve periodo de tiempo. Para el análisis metagenómico de las muestras de ADN extraídas de los biofilms, se realizará la preparación de librerías y la secuenciación masiva a través de la plataforma Illumina (https://www.illumina.com/), mediante lecturas paired-end de 150 pb (2 × 150 pb). Posteriormente, se llevará a cabo el ensamblado de las secuencias obtenidas y la anotación bioinformática de los metagenomas, con el objetivo de caracterizar la diversidad microbiana presente en los biofilms e identificar genes potencialmente implicados en la producción de enzimas degradadoras de plástico.

4.5. Modelización de enzimas

Esta actividad se desarrollará en el segundo año del proyecto. A partir de las secuencias obtenidas en el análisis metagenómico, se seleccionan las enzimas con mayor potencial para degradar plásticos y se estudian computacionalmente antes de abordar la fase experimental. En primer lugar, se generan modelos tridimensionales de las enzimas candidatas mediante herramientas de predicción estructural (AlphaFold y ESMFold), evaluando su calidad con métricas estándar (pLDDT y TM-score). A continuación, se aplican simulaciones de dinámica molecular —basadas en un protocolo de muestreo mejorado, desarrollado inicialmente para modelar la interacción entre las PETasas y el tereftalato de polietileno (PET)— para estimar la actividad hidrolítica de las enzimas frente a distintos polímeros (PET y otros poliésteres, poliuretano, succinato de polibutileno (PBS) o la poliamida-6). En particular, se monitoriza la capacidad de la enzima para formar *catalytic ensembles*, es decir, el conjunto de orientaciones y configuraciones del complejo enzima-sustrato que resultan productivas y que determinan que la reacción catalítica pueda llegar a producirse. Los polímeros se modelan como oligómeros, una aproximación ya validada frente a datos experimentales en el caso del PET. Las simulaciones se ejecutan en infraestructuras nacionales de supercomputación (CESGA y DRAGO).

4.6. Producción de enzimas

Esta es otra de las actividades que se desarrollarán durante el segundo año del proyecto. Una vez identificadas mediante metagenómica las potenciales enzimas degradadoras de plástico y realizadas las simulaciones moleculares, se procederá a su producción heteróloga en *Escherichia coli (E. coli).* En resumen, las secuencias obtenidas se incorporarán en plásmidos adecuados para la transformación de *E. coli*, con la adición de una cola de histidinas a la proteína, se evaluarán las mejores condiciones para la sobreexpresión de la enzima y se purificará mediante la lisis de las células y la posterior retención en columna de níquel en un sistema ÄKTA.

4.7. Reciclado químico mediante catálisis enzimática

Esta actividad, como sucedía con la anterior, se desarrollará a lo largo del próximo año. Una vez purificadas las enzimas, se evaluará su actividad de depolimerización frente a diferentes tipos de plásticos. Para estos ensayos, se pesarán unos pocos gramos del material plástico, que se añadirán a un matraz esférico que contendrá el tampón de reacción más adecuado para la enzima a ensayar. A continuación, se añadirá la enzima y se dejará agitando durante un tiempo determinado, en las condiciones de temperatura y pH más adecuadas para la enzima, y se analizará la cinética de degradación del material plástico que se esté ensayando.

5. Conclusiones

Las actividades desarrolladas hasta el momento en el proyecto OCEANZYME ofrecen unos resultados preliminares, así respecto a las zonas de acumulación de basuras marinas se muestra una clara diferencia entre las demarcaciones marinas noratlántica y levantino-balear, las dos zonas seleccionadas para realizar este proyecto. Los valores para las densidades de basuras marinas resultan ser más elevados en la zona del Golfo de Valencia, dentro de la demarcación levantino-balear, que para la zona de la costa gallega analizada perteneciente a la demarcación noratlántica.

Entre las basuras marinas retiradas de los fondos profundos (la pesca de arrastre solo puede ejercerse en fondos con profundidades superiores a la isobata de -50m para el mar Mediterráneo y de la isobata de -100m para la costa de Galicia) por las embarcaciones participantes predominan los materiales de la categoría “plástico”, con un porcentaje algo más elevado de nuevo en la zona de la demarcación levantina-balear, que presenta también un mayor número de ítems u objetos totales retirados durante la primera campaña.

Respecto a la caracterización por materiales de los residuos analizados predominan los polímeros pertenecientes a la familia de las poliolefinas, polietileno (PE) y polipropileno (PP) en consonancia con los objetos mayoritarios retirados en la zona de Gandía (Golfo de Valencia) que corresponden

a diferentes tipos de bolsas de plástico (compra, comida o congelados), cuyo principal material es el polietileno de baja densidad (PEBD).

Los objetos extraídos en la primera campaña de muestreos han posibilitado recoger el biofilm necesario que ha dado paso al trabajo en los laboratorios, con el aislamiento de microorganismos marinos y el análisis de las secuencias obtenidas del gen 16S rRNA se ha posibilitado su identificación taxonómica, incluyendo especies de microorganismos que ya han demostrado su capacidad para biodegradar plásticos como el poliestireno (PS), el polipropileno (PP) o el polietileno (PE). Estos resultados ofrecen una oportunidad al proyecto, al posibilitar el aislamiento de nuevas cepas de enzimas que también dispongan de capacidad degradativa del material plástico.

Por otro lado, con las primeras extracciones de ADN a partir de las muestras recogidas de biofilm, se dará continuidad a otras actividades previstas en el proyecto a desarrollar durante los próximos meses y en un segundo año, como el análisis metagenómico, la identificación de las enzimas hidrolíticas, su modelización tridimensional y su producción, que permitirá realizar ensayos de degradación de los materiales plásticos, analizando su cinética de despolimerización. Gracias a esta catálisis enzimática podrán obtenerse monómeros que, en una nueva polimerización, podrán dar lugar a nuevos materiales con propiedades vírgenes.

6. Agradecimientos

El proyecto OCEANZYME («Innovación metagenómica y enzimática para nuevas soluciones de reciclado de basuras marinas») se desarrolla con la colaboración de la Fundación Biodiversidad del Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico, a través del Programa Pleamar, y se cofinancia por la Unión Europea por el FEMPA (Fondo Europeo Marítimo, de Pesca y de Acuicultura).

Los autores agradecen a las cofradías de pescadores colaboradoras —la Cofradía de Pescadores de Gandía y la Cofradía de San Martiño de Bueu— su participación activa en la recuperación de basuras marinas.

7. Bibliografía

[1] Asociación Vertidos Cero. (s.f.). Marnoba. https://vertidoscero.com/marnoba/

[2] Chuvochina *et al*. (2026): Chuvochina M, Gerken J, Frentrup M, Sandikci Y, Goldmann R, Freese HM, Göker M, Sikorski J, Yarza P, Quast C, Peplies J, Glöckner FO, Reimer LC (2026) SILVA in 2026: a global core biodata resource for rRNA within the DSMZ digital diversity. Nucleic Acids Research, Volume 54, Issue D1, 6 January 2026, Pages D334–D341, https://doi.org/10.1093/nar/gkaf1247

[3] Fleet *et al.* (2021): Fleet, D., Vlachogianni, T. and Hanke, G. (2021). *A Joint List of Litter Categories for Marine Macrolitter Monitoring,* EUR 30348 EN, Publications Office of the

European Union, Luxembourg, 2021, ISBN 978-92-76-21445-8, doi:10.2760/127473, JRC121708.

[4] Gaudin *et al.* (2025): Gaudin, F., Caër, G., Molina Jack, M. E., Vinci, M., Cociancich, A., Giorgetti, A., Le Moigne, M., Quimbert, E., Barth, A., Holdsworth, N., Galgani, F., & Thomas, A. (2025). *Visualization products for seafloor litter data.* EMODnet Chemistry. https://doi.org/10.13120/c622d045-94ed-4b6a-9c78-404e86b8b9a3.v1

[5] Hudson *et al*. (2025): Hudson, A., Gilardi, K. y Vousden, D. (2025). *The 80:20 estimate of land vs. ocean sources of marine pollution: fit for purpose?* Front. Mar. Sci. 12:1587805. doi: 10.3389/fmars.2025.1587805

[6] Jambeck *et al.* (2015): Jambeck, J.R., Geyer, R., Wilcox, C., Siegler, T. R., Perryman, M., Andrady, A., Narayan, R. y Law, K.L. (2015). *Plastic waste inputs from land into the ocean*. Science 13 Feb 2015 Vol 347, Issue 6223 pp. 768-771. DOI: 10.1126/science.126035

[7] Johnson *et al.* (2008): Johnson, M., Zaretskaya, I., Raytselis, Y., Merezhuk, Y., McGinnis, S., & Madden, T. L. (2008). NCBI BLAST: a better web interface. Nucleic Acids Research, 36(Supl. 2), W5–W9. doi.org

[8] Joint Group of Experts on the Scientific Aspects of Marine Pollution (GESAMP) and Commissioned by IMO/FAO/UNESCO/WMO/WHO/IAEA/UN/UNEP. (1990). *The state of the marine environment.* GESAMP Reports & Studies no. 39. 111.

[9] Kumar *et. al* (2024): Kumar, S., Stecher, G., Suleski, M., Sanderford, M., Sharma, S., y Tamura, K. (2024). MEGA12: Molecular Evolutionary Genetic Analysis version 12 for adaptive and green computing. Molecular Biology and Evolution, 41(12), Artículo msae263. https://doi.org/10.1093/molbev/msae263

[10] Letunic, I., y Bork, P. (2024). Interactive Tree of Life (iTOL) v6: recent updates to the phylogenetic tree display and annotation tool, Nucleic Acids Research, Volume 52, Issue W1, 5 July 2024, Pages W78–W82, https://doi.org/10.1093/nar/gkae268

[11] Lv *et al.* (2024): Lv, S., Wang, Q., Li, Y., Gu, L., Hu, R., Chen, Z., y Shao, Z. (2024). *Biodegradation of polystyrene (PS) and polypropylene (PP) by deep-sea psychrophilic bacteria of Pseudoalteromonas in accompany with simultaneous release of microplastics and nanoplastics.* Science of the Total Environment, 948, 174857. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.174857

[12] Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico – MITECO (2023). *Documentos de criterios generales para la pesca de basura. Caladeros limpios.* LIFE IP INTEMARES. Gestión integrada, innovadora y participativa de la Red Natura 2000 en el medio marino español. https://www.miteco.gob.es/content/dam/miteco/es/costas/temas/temas-pm/basuras-marinas/acciones/basuras-acciones-doc_Criterios_ES.pdf

[13] QGIS Development Team. (2025). *QGIS Geographic Information System* (Versión 3.44LTR) [Software de computación]. qgis.org

[14] Schmidt *et al*. (2017): Schmidt, C., Krauth, T., y Wagner, S. (2017). *Export of plastic debris by rivers into the sea.* Environmental Science & Technology, 51(21), 12246–12253. https://doi.org/10.1021/acs.est.7b02368

[15] United Nations Environment Programme (UNEP). (2005). *Marine Litter, an analytical overview.*

[16] Zeng *et al.* (2026): Zeng, Q., Chang, L., Liu, Y., Shi, S., Yang, J., Li, Q., Long, L., y Tian, X. (2026). *Isolation and characterization of marine microorganisms capable of degrading plastics.* mSystems, 11, e01388-25. https://doi.org/10.1128/msystems.01388-25

CONAMA 2026