

UNIVERSIDAD POLITECNICA DE VALENCIA

ESCUELA POLITECNICA SUPERIOR DE GANDIA

**Master en Eval. Amb. Ecosistemas marinos y Cost.**

---



UNIVERSIDAD  
POLITECNICA  
DE VALENCIA



ESCUELA POLITECNICA  
SUPERIOR DE GANDIA

# **“Contaminación por plásticos en el mar Mediterráneo: aproximación cuantitativa y modelización para la comparación de estrategias de futuro”**

**TRABAJO FINAL DE MASTER**

Autor/a:

**Paula Pérez Sánchez**

Tutor/a:

**Silvia Laura Falco Giaccaglia**

**César Bordehore Fontanet**

**GANDIA, 2020**

# Resumen

Los plásticos representan hoy en día un problema muy grave para el ecosistema del mar Mediterráneo, tanto que este mar está catalogado como el ecosistema marino más contaminado del mundo, ya que se estima que contiene en torno al 8% de los plásticos globales. Los macroplásticos y microplásticos que llegan al mar provienen en un 80% de fuentes terrestres y en un 20% de fuentes marinas como la pesca o las pérdidas accidentales en embarcaciones. Utilizando el software STELLA®, se ha elaborado un modelo en el que se detalla el recorrido que realiza el plástico, tanto microplástico como macroplástico, desde que se convierte en residuo hasta que llega al mar, para poder desarrollar una serie de escenarios en el que se estudie los efectos de cambios como una mejora en la gestión de residuos o disminuir la cantidad de macroplásticos en el agua. Los resultados demuestran la necesidad de tomar medidas para mitigar los efectos de la contaminación, ya que de no ser así, la cantidad de plástico que llega al mar seguirá aumentando y con ella los daños que provoca a la fauna marina. Tomar medidas que impliquen una disminución en la cantidad de macroplásticos y microplásticos que llega al mar mejoraría notablemente los valores de contaminación y disminuiría las cifras de ingesta y enredos que sufren la fauna con los plásticos.

**PALABRAS CLAVE:** macroplásticos, microplásticos, STELLA®, Mediterráneo, fauna.

## Abstract:

Plastics represent a very serious problem for the Mediterranean Sea ecosystem, so much that this sea is catalogued as the most polluted marine ecosystem in the world, containing an estimated 8% of global plastics. The macro- and micro-plastics that reach the sea come 80% from land-based sources and 20% from marine sources such as fishing or accidental loss in vessels. Using STELLA® software, a model has been developed detailing the path taken by plastic, both microplastic and macroplastic, from the time it becomes waste to the time it reaches the sea, in order to develop a series of scenarios to study the effects of changes such as improved waste management or a reduction in the amount of macroplastic in the water. The results show that is need to take measures to mitigate pollution, because if not, the amount of plastic that reaches the sea will continue to increase and with it the damage it causes to marine fauna. Taking measures that imply a decrease in the amount of macro- and micro-plastics that reach the sea would notably improve the contamination values and would decrease the ingestion and entanglement that the fauna suffers with plastics.

**KEYWORDS:** macroplastics, microplastics, STELLA®, Mediterranean, fauna.

1. Introducción	1
1.1 Breve historia y evolución del plástico	1
1.2 Tipos de plástico y origen	2
1.3 Factores y fuentes de la contaminación por plásticos en el medio marino	3
1.4 Primeros pasos del plástico en el mar	5
1.5 Efectos en la fauna marina	7
1.6 Efectos en la economía	9
1.7 Acciones y medidas de prevención y mitigación ya tomadas	10
2. Objetivos	11
3. Material y métodos	12
3.1 Características de la zona de estudio	12
3.2 Obtención de datos	12
3.3 Características generales del modelo	13
3.4 Calibración del modelo y estimaciones	14
3.5 Generación de diferentes escenarios	16
4. Resultados	17
4.1 Modelo	17
4.2 Escenarios	18
4.2.1. Escenario 1	18
4.2.2. Escenario 2	20
4.2.3. Escenario 3	21
5. Discusión	23
5.1 General	23
5.2 Escenarios	25
5.3 Propuestas para mejorar el problema de la contaminación	26
6. Conclusión	28
7. Bibliografía	29
8. Anexo I	36

# 1. Introducción

Hoy en día los plásticos están tan arraigados en nuestras vidas que prácticamente nuestro día a día sería imposible sin ellos. Presentes en embalajes, cosméticos, muebles, electrodomésticos e incluso en la ropa, desde su descubrimiento la sociedad ha ido evolucionando y desarrollándose entorno a este material que resulta casi vital para llevar el nivel de vida que tenemos actualmente.

En torno a estos polímeros, que se podrían considerar casi milagrosos, existe un vacío de conocimiento de la gente de a pie acerca de su descubrimiento, su composición y sobretodo las ventajas y desventajas de su uso, particularmente en el alcance de los daños a la naturaleza.

## 1.1 Breve historia y evolución del plástico

A principios del siglo XX, el químico belga Leo Baekeland sometió fenol y formaldehído a altas temperaturas y presiones en un autoclave, provocando que estos dos compuestos reaccionaran entre sí creando un compuesto completamente nuevo para la ciencia, acababa de abrir la puerta a una nueva era de materiales sintéticos que cambiaría el mundo por completo. Acaba de crear la Baquelita (nombrada así en su honor), el primer plástico completamente sintético del mundo (Powers, 1993).

A partir de entonces su uso fue principalmente militar y no fue hasta después de la Segunda Guerra Mundial que empezó a usarse fuera de este ámbito (Geyer *et al.*, 2017). Desde entonces su popularidad no fue más que ir al alza conforme avanzaban los años y se iban descubriendo nuevas propiedades. Formados por largas cadenas de polímeros originados a partir de materias primas tanto orgánicas como inorgánicas, obtenidas generalmente del petróleo, carbón y gas natural; su popularidad viene dada por su versatilidad, poco peso, su resistencia, su bajo coste de producción, sus propiedades para proteger a su contenido del oxígeno y la humedad, su alto poder aislante frente a la temperatura y a la electricidad, su alta resistencia a la corrosión y su longevidad. (Andrady, 2011; Ivar do Sul y Costa, 2014).

Incluso la propia etimología de la palabra plástico indica uno de sus principales puntos fuertes y sobretodo el origen de su popularidad. El término plástico viene de la palabra que los antiguos griegos usaban para indicar que algo era moldeable: “*Plastikos*” (Powers, 1993)

Las dos guerras mundiales acaecidas en la primera mitad del siglo XX y sus consecuencias (pobreza, hambruna...) ralentizaron el desarrollo de la industria del plástico notablemente. No obstante, conforme el mundo se iba recuperando de esos episodios oscuros de nuestra historia, la fabricación de plástico rápidamente comenzó a reavivarse y a crecer exponencialmente pasando de los 2 millones de toneladas fabricadas por año a principios de la década de los 50 a las más de 380 millones de toneladas producidas en el año 2015 como se puede observar en la figura 1.1 (Geyer *et al.*, 2017).

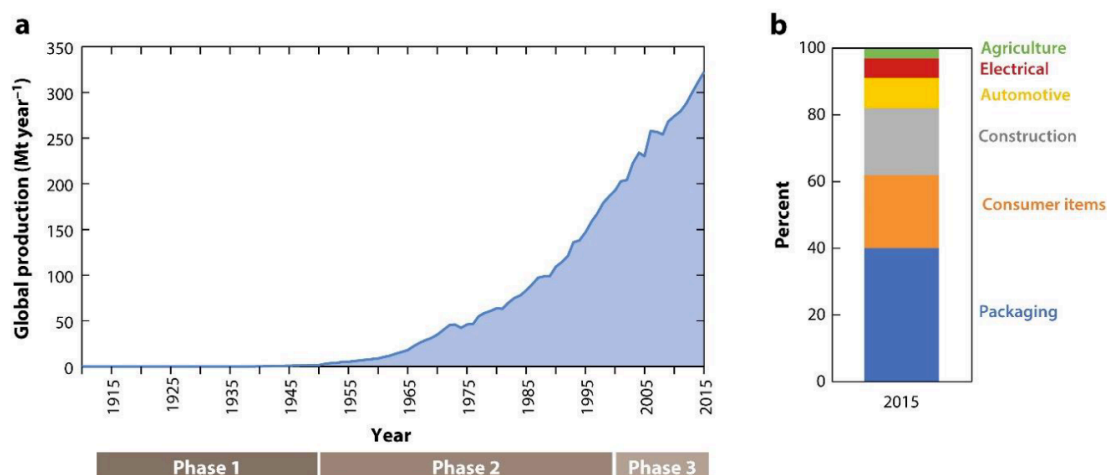


Fig 1.1. El gráfico “a” muestra la tendencia de la producción de plásticos a nivel mundial desde principios del siglo XX. El gráfico “b” representa el uso final del plástico en porcentaje respecto al total producido. Fuente: Worm *et al.*, 2017

El alto rápido crecimiento de la industria del plástico estuvo altamente ligado al aumento de la población y el aumento de su uso en situaciones cotidianas, como el uso en envases de alimentos, ropa, etc. Todo ello provocó que cada vez se generaran más y más residuos de origen plástico, el cual por diferentes motivos fue llegando a la naturaleza.

No fue hasta 1972 cuando los científicos E. J. Carpenter y K. L. Smith se encontraban tomando muestras de *Sargassum* pelágico, en el oeste del Atlántico norte, cuando se percataron de la presencia de una gran cantidad de pellets de plástico de entre 1 y 2 milímetros y alertaron por primera vez de este nuevo tipo de contaminación en los mares (Ivar do Sul y Costa, 2014). Lamentablemente este estudio causó un mínimo interés en la comunidad científica del momento (Andrady, 2011).

Por suerte, el número de investigaciones en este campo poco a poco fue aumentando y la comunidad científica al final se ha dado cuenta del alcance de la contaminación por plásticos que sufren los mares y océanos de todo el mundo, estimando que actualmente aproximadamente un 10% de los residuos plásticos generados acaban en el mar (Thompson, 2006), o en otras palabras, cada año 8 millones de toneladas de plástico entran a los océanos desde fuentes terrestres (Jambeck *et al.*, 2015), haciendo un total aproximado de plástico flotando en los océanos del mundo entre 14 mil y 269 mil millones de toneladas (Eriksen *et al.*, 2014).

## 1.2 Tipos de plástico y origen

Como se puede observar en la figura 1.2, la familia de los plásticos es amplia y compleja, y es posible clasificarlas por su composición o tipo de resina usada, su densidad y/o tamaño. En cuanto a su composición, encontramos que los tipos de plástico más fabricados son el polietileno (36%), el polipropileno (19%), y el policloruro de vinilo (10%), seguido de cerca por el polietileno tereftalato, el poliuretano y el poliestireno (<10% cada uno) (Geyer *et al.*, 2017; Plastics Europe, 2019)

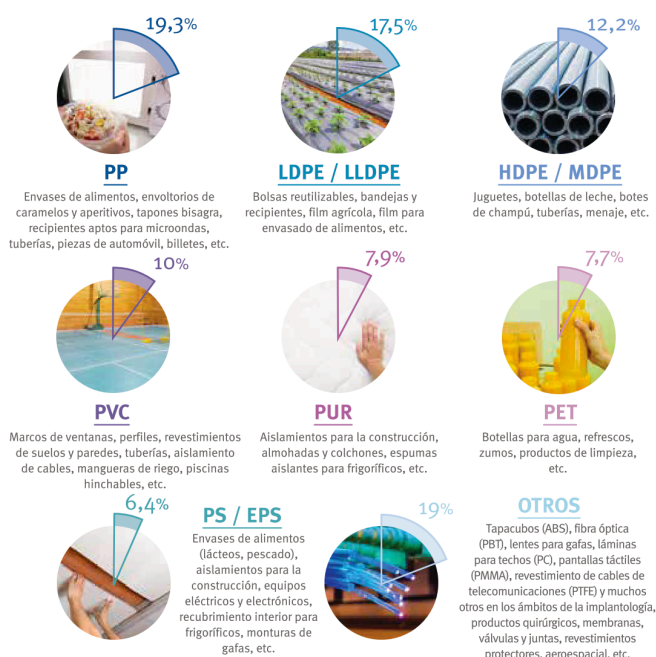


Fig 1.2. Distribución de la demanda de plásticos por tipo de resina y usos de cada uno. Extraído de: Plastics Europe, 2019

Respecto a su tamaño, encontramos macroplásticos ( $\geq 1$  cm), mesoplásticos ( $\geq 5$  mm a 1 cm), microplásticos ( $\leq 5$  mm) y nanoplásticos ( $\leq 100$  nm) (Cincinelli *et al.*, 2019). Dentro de los microplásticos encontramos dos tipos según su origen, microplásticos primarios y microplásticos secundarios.

Los primarios son aquellos que se fabrican directamente en ese tamaño, como por ejemplo, en forma de microesferas para incluirlos en abrasivos industriales o en productos cosméticos exfoliantes (Cole et al., 2016; Ivar do Sul y Costa, 2014). En cuanto a los microplásticos considerados de origen secundario, se originan por la fragmentación de plásticos más grandes, los conocidos como macroplásticos (Cole et al., 2011).

La fragmentación de los macroplásticos se da principalmente por fotodegradación, aunque también sufren degradación térmica, degradación mecánica, degradación química e hidrólisis, aunque este último tiene una eficiencia poco significativa (Andrady, 2011; Ivar do Sul y Costa, 2014). La fotodegradación, causada por los rayos UV del sol, rompe la matriz polimérica del plástico provocando que el peso molecular de los polímeros disminuya, lo que deriva en una debilitación del material que hace más fácil su rotura por la acción de otros agentes (Andrady, 2011; Cole et al., 2011). La gran mayoría de los microplásticos secundarios se originan en las playas, por la fragmentación de los plásticos que se hallan en ellas (Andrady 2011), ya que en las playas la degradación es mucho más rápida que en el mar puesto que la radiación UV y la temperatura son mucho más altas en comparación con las que se dan en el agua; además el empuje del viento en la playa favorece la fragmentación por acción mecánica al desplazarse los plásticos por los sedimentos (Fok et al., 2017).



Fig 1.3. Fotografías de microplásticos extraídos en las costas de Dénia, Alicante. Las fotografías a y b son fibras probablemente de origen textil, mientras que la fotografía c corresponde a un microplástico secundario. Fuente: propio autor.

La figura 1.3 es un pequeño ejemplo de la amplia multitud de tamaños, composición, forma, colores etc, que pueden sufrir y que hacen que la contaminación por plásticos sea muy complicada de solucionar ya que, al ser un material tan versátil, tratar de encontrar una solución estándar es una tarea muy exigente y complicada.

### 1.3 Factores y fuentes de la contaminación por plásticos en el medio marino

Un factor muy importante a tener en cuenta para buscar una solución, es la población residente en la costa, ya que los residuos generados por estos habitantes son de alto interés debido a su cercanía con el mar. Jambeck et al (2015) cifran en más de 2 mil millones de personas que actualmente residen en los primeros 50 kilómetros de costa de todo el mundo. Con unas tasas de generación de residuos de entre 0,1 y 5 kilogramos por habitante y día, el citado artículo estima que sólo en el año 2010, el conjunto total de la población costera mundial generó un total de casi 32 millones de toneladas de basura que no se gestionaron de manera correcta y, por tanto, acabó llegando a los mares y océanos de todo el mundo.

Cabe destacar la importancia del turismo, ya que éste aumenta de manera notable la población en las zonas costeras y, por tanto, la cantidad de residuos generados que por mala gestión acaban llegando a los mares. En los países mediterráneos como Grecia se observa un aumento de los desechos de entre el 23 y el 26%, o en Italia el aumento es ligeramente mayor, de hasta el 30% en las zonas costeras. Las instalaciones locales de gestión de residuos (EDAR, vertederos...) suelen verse abrumadas por estos desechos adicionales, lo que puede dar lugar a mayores cantidades de desechos mal gestionados y a un mayor riesgo de contaminación. Como resultado, los desechos marinos aumentan hasta un 40% en las costas del Mediterráneo durante la temporada turística alta (WWF, 2019)

Los plásticos desechados de origen terrestre que no se gestionan de manera adecuada acaban llegando a los océanos principalmente por los ríos, los vertidos de las aguas residuales a ríos y mares, el viento y los vertidos directamente de forma ilegal en la costa o directamente en el mar.

Algunas de las investigaciones realizadas hasta el momento, ponen de relieve el papel de los ríos en este tipo de contaminación. Moore (2008) encontró que los dos ríos más importantes de Los Angeles (California, EEUU) vertían al océano Pacífico entorno a 2 billones de partículas de plástico en periodos de 3 días. Por otro lado, Liubartseva et al (2018) estimaron que 30 000 toneladas de plástico es la cantidad que vierten los ríos a la cuenca del mar Mediterráneo en un solo año.

Una parte importante de los residuos tanto directamente vertidos al mar como vertidos a los ríos y éstos al mar provienen de las aguas residuales depuradas que vierten las EDAR. A pesar de poseer unas tasas de eficiencia de retirada de microplásticos entre el 40 y el 95%, el número de microplásticos que terminan liberando con sus aguas salientes es notablemente alto (Akarsu et al., 2020).



Fig 1.4. Muestras de microesferas extraídas de seis productos cosméticos distintos de uso cotidiano. Imagen obtenida de Anderson et al., 2016

Estos microplásticos que, debido a las características técnicas de las EDAR no se retiran del flujo de agua, provienen principalmente del desgaste de los neumáticos en la carretera que por escorrentía terminan en el sistema de alcantarillado, de la ropa y de los productos cosméticos (Akarsu et al., 2020; van Wijnen et al., 2019).

Respecto a éstos últimos, sólo en Europa se estima que se usan al año 4130 toneladas de microesferas plásticas en los productos cosméticos como los mostrados en la figura 1.4, yéndose por el desagüe de nuestros hogares por cada uso de dichos productos entre 4594 y 94 500 microesferas (Anderson et al., 2016)

Por otro lado, la ropa que actualmente usamos para vestirnos está fabricada en su mayor parte por componentes poliméricos como el nylon o el poliéster. Al introducirla en la lavadora, el roce producido durante el ciclo de lavado provoca que se liberen entorno a 700 000 microfibras en cada lavado que se van por el desagüe (Constant et al., 2019)

Además de las fuentes de origen terrestre, las cuales corresponden al 80% de los vertidos que llegan al mar (Alimba y Faggio, 2019), encontramos como fuente importante de contaminación, la generada dentro del propio mar, que correspondería al 20% del total.

Entre los vertidos producidos en el mar, encontramos multitud de fuentes que podrían resumirse en tres grandes fuentes de contaminación por plásticos: los residuos de pesca, la pérdida de mercancías accidental y los vertidos de las embarcaciones.

Además del conocido peligro del transporte de especies foráneas en las aguas de lastre, Liubartseva et al (2018) estima que únicamente en el mar Mediterráneo, en las principales líneas de navegación marítima, tanto de transporte de mercancías como de pasajeros, se vierten al mar una media de 20000 toneladas de residuos plásticos al año. Debido a que el Convenio Internacional para Prevenir la Contaminación por los Buques (MARPOL), en el anexo V especifica

claramente que está terminante prohibido verter materiales como el plástico al océano, independientemente de la distancia a la costa que se halle el buque, los datos estimados tienen su origen en vertidos ilegales, accidentales y/o de embarcaciones pequeñas que no se adhieren al convenio o desconocen la existencia de éste (UNEP, 2015). Un pequeño ejemplo de ello es el estudio llevado a cabo por Walker et al (2006) en el puerto de Halifax, un importante puerto de mercancías y pasajeros de Canadá, donde encontraron que cerca del 7% de las basuras plásticas marinas encontradas dentro de las aguas del recinto portuario provenían de actividades relacionadas con la navegación.

De igual manera las pérdidas de mercancía accidentales que se producen en el transporte de mercancías por mar, conforman una fuente de entrada de plásticos a los mares. El Consejo Mundial de Transporte Marítimo, estimó que en el 2019 se perdieron en el océano 1382 contenedores de mercancías por motivos relacionados con la mala estiba de la carga y/o situaciones de mala mar (World Shipping Council, 2020), fueran o no mercancías fabricadas con plástico, al caerse al mar suponen una contaminación en sí. No hay más que recordar el famoso caso de los patitos de plásticos, cuando en 1992 un barco perdió varios contenedores y algunos de ellos terminaron abriéndose y liberando al mar su carga, la cual consistía en cerca de 29000 juguetes de plástico con forma de pato entre otros, que terminaron repartiéndose por todos los mares y océanos del mundo gracias de las corrientes oceánicas (Ebbesmeyer e Ingraham, 1994).

Pero la pérdida de mercancía no se da únicamente por contenedores en alta mar, ya que durante las operaciones de carga y descarga en puertos también se producen pérdidas. Grote et al (2016) estiman que entorno al 0,05% de la carga se pierde en las operaciones de carga y descarga de materiales secos a granel.

Finalmente, pero no menos importante, la pesca supone también una importante fuente de contaminación directa debido a que la mayoría de los artes de pesca están fabricados por plásticos. Macfadyen et al (2009) estiman que al año se pierden en el mar 640000 toneladas de redes de pesca, lo que correspondería en aguas de Europa, a 33 mil redes de pesca al año (Hariede et al., 2005).

## 1.4 Primeros pasos del plástico en el mar

Todas las diferentes fuentes de contaminación mencionadas arrojan al mar plásticos de distintos tamaños y composición. En cuanto a la composición, el polietileno seguido muy de cerca por el polipropileno y el poliestireno son los tipos de plástico más abundantes según los estudios llevados a cabo tanto en el Mediterráneo como en el mundo entero. Estos tres tipos de plástico se utilizan principalmente en el envasado de alimentos y embalaje, representan una proporción importante de los plásticos de demanda mundial, más del 40%, respectivamente y tienen una vida útil breve, por lo que terminan rápidamente en la corriente de desechos convirtiéndose en los plásticos más abundantes de playas (figura 1.5) y más posteriormente del mar (de Haan et al., 2019; Schönlaue et al., 2020).



Fig 1.5. Principales productos de plástico encontrados en las playas europeas. Fuente: European Commission, 2018



Independientemente de si se trata de un macroplástico o microplástico, su composición determinará si en un primer momento el residuo plástico se hundirá o quedará flotando en la superficie. Polímeros que tengan una densidad menor que la del agua, como el polietileno y el polipropileno, flotarán en la superficie mientras que los de mayor densidad, como el policloruro de vinilo, tenderán a hundirse (Cincinelli *et al.*, 2019).

Una vez el plástico llega al océano, empezará sufrir diferentes tipos de procesos físicos, químicos y biológicos que terminaran por degradar y hundir el residuo al fondo. Weinstein *et al* (2016) estimaron que un macroplástico empezaba a desprender microplásticos tras 8 semanas de exposición a procesos físico químicos, como fragmentación mecánica por el viento y las olas, y la fotodegradación por la radiación ultravioleta (Andrady, 2011; Cole *et al.*, 2011; Ivar do Sul y Costa, 2014).

Por otro lado, hay que sumarle el efecto del biofouling que aumenta la densidad del desecho facilitando así su hundimiento. Cózar *et al.* (2014) asumieron que el biofouling aumenta las densidades de los microplásticos hasta tal punto que las partículas con densidades inferiores a la densidad del agua de mar (por ejemplo, polietileno o polipropileno) pueden alcanzar densidades que coinciden o exceden la densidad del agua de mar, lo que lleva a un lento hundimiento, cuya velocidad también dependerá de la forma de la partícula. Además, los biofilms pueden reducir la hidrofobia de las partículas de plástico haciéndolas más propensas a hundirse (Li *et al.*, 2020).

Debido a que el 80% de los residuos se generan en tierra firme, la dinámica de las corrientes influye notablemente en el reparto de éstos a lo largo de todos los océanos. Eriksen *et al* (2014) elaboraron un modelo de dispersión oceanográfico que, teniendo en cuenta las fuentes de contaminación y las corrientes marinas, estimaba la concentración de plásticos en superficie en todos los océanos del mundo, siendo las zonas centrales de los giros oceánicos donde más acumulación se produce (figura 1.6)

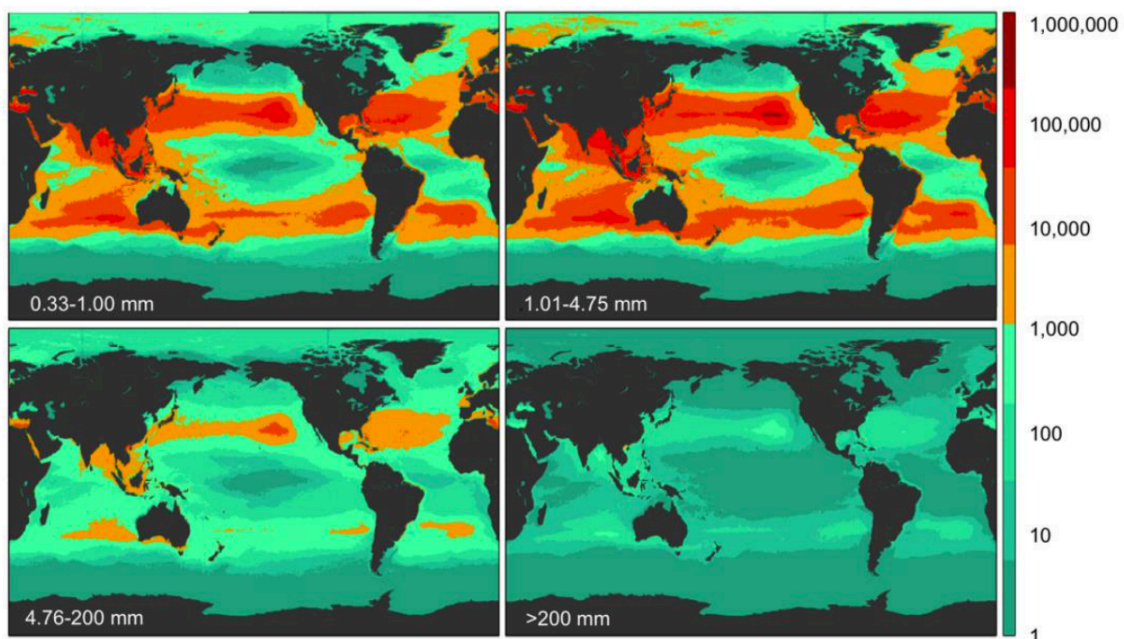


Fig 1.6. Modelo oceanográfico de predicción de acumulación de plásticos en superficie agrupados en 4 rangos de tamaño: 0,33-1 mm (pequeños microplásticos); 1,01-4,75 mm (microplásticos); 4,76- 200 mm (mesoplásticos) y >200 mm (macroplásticos). Fuente: Eriksen *et al.*, 2014.

Modelos realizados por Lebreton *et al.* (2012), muestran que más del 8% de los plásticos flotantes del mundo podrían estar siendo retenidos en el mar Mediterráneo. Datos que confirman que el mar Mediterráneo es una de las regiones más contaminadas de plástico del mundo, en gran medida por su alta población costera, sus características geológicas de cuenca semicerrada y su alto tráfico marítimo (Lebreton *et al.*, 2012).

Pero no todos los plásticos que llegan al mar se quedan en el mar, una parte es devuelta a las costas por las corrientes y el viento. Liubartseva et al (2018) acuñaron este fenómeno como efecto *boomerang* y vieron que aproximadamente el 80% de la contaminación costera que sufren los países de la cuenca mediterránea, era producida por este efecto.

## 1.5 Efectos en la fauna marina

Los desechos plásticos, una vez en el mar, empiezan a interactuar con la fauna marina, desde el zooplancton hasta las aves y los grandes cetáceos, provocando un abanico muy amplio de desordenes alimentarios, enredos e impactos relacionados con las características físico químicas de los plásticos.

Empezando por este último, particularmente concierne a los microplásticos ya que su relación área/volumen es mayor que la de los macroplásticos, lo que los hace propicios a adsorber los contaminantes, los conocidos como contaminantes orgánicos persistentes (COPs), así como antibióticos, metales, e hidrocarburos aromáticos policíclicos (PAHs), además de los propios aditivos químicos añadidos durante la propia fabricación del plástico (Ivar do Sul y Costa, 2014; Ferreira *et al.*, 2020; Li *et al.*, 2020; Savoca *et al.*, 2019; Walkinshaw *et al.*, 2020).

Las características principales de estos contaminantes es que son tóxicos, y muchos de ellos persistentes y bioacumulativos, y gracias a sus características hidrofóbicas son atraídos y adsorbidos por los microplásticos (Ivar do Sul y Costa, 2014), dándose concentraciones mucho más elevadas en los microplásticos que en las aguas circundantes. Debido a que el impacto en el organismo y la transferencia por la cadena trófica depende de cada especie animal (figura 1.7) y del contaminante que sea, ya que cada uno tiene un tiempo distinto de residencia en el organismo, es muy difícil establecer patrones de transferencia e impactos en las redes tróficas marinas, así como de establecer soluciones posibles a este problema (Andrady, 2011). No obstante, hay que destacar que un estudio demostró que la exposición a estos tóxicos ingeridos a través de presas naturales es más significativo que la exposición a través de la ingesta de microplásticos (Koelmans *et al.*, 2017).

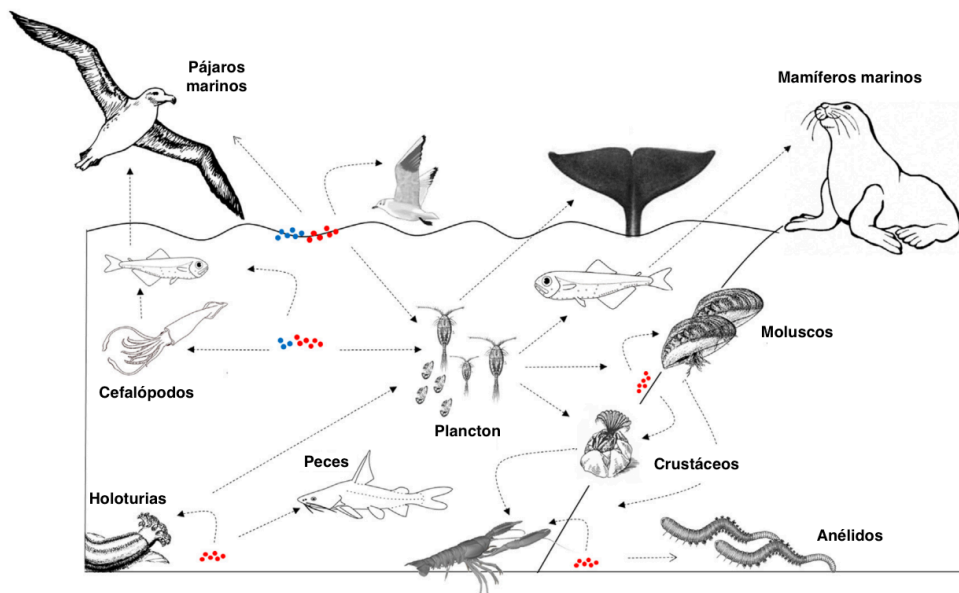


Fig 1.7. Modelo conceptual de las rutas tróficas que pueden seguir los microplásticos a través de los distintos grupos de vertebrados e invertebrados marinos. Los puntos azules representan los polímeros menos densos que el agua de mar mientras que los rojos representan aquellos más densos que el agua marina. Las flechas discontinuas representan las rutas de transferencia hipotéticas que seguirían los microplásticos en el océano. Modificado de Ivar do Sul y Costa, 2014.

Uno de los impactos más relevantes es la introducción de estos polímeros en la cadena trófica por vía de los invertebrados marinos que los ingieren de manera directa desde el agua (Ivar do Sul y Costa, 2014). Diferentes estudios han observado los efectos que tiene la ingesta de microplásticos en los invertebrados y vertebrados marinos, efectos tan diversos entre los que se encuentran: abrasión y/o obstrucción intestinal, aumento de la respuesta inmunológica en mejillones, reducción de las reservas energéticas en los poliquetos, toxicidad hepática en peces, reducción de las tasas de alimentación, fecundidad y supervivencia en copépodos, alteración de las tasas de respiración, capacidad reproductiva y filtración en moluscos bivalvos (Cole *et al.*, 2016; Green *et al.*, 2016; Ivar do Sul y Costa, 2014). Algunos de estos animales, como los cangrejos, añaden los micro y nano plásticos a su tejido corporal, lo que facilita su bioacumulación en los depredadores superiores entre los que no quedan exentos los humanos (Ivar do Sul y Costa, 2014). Otros, como los copépodos, los expulsan en sus pellets fecales, los cuales son ingeridos por coprófagos introduciéndose así en la red trófica. Cabe destacar que la fragmentación de los microplásticos a nanoplásticos aumenta las probabilidades de que el zooplancton los confunda por alimento (Cole *et al.*, 2016).

Por lo menos de más de 690 especies marinas, que van desde invertebrados, como cnidarios y crustáceos, hasta vertebrados y grandes vertebrados como peces, tortugas, pájaros y mamíferos marinos, han sido vistas en interacción con basuras marinas, de las que 92% de las interacciones correspondían con algún tipo de plástico (Gall y Thompson, 2015)

El problema más común con la ingesta de plásticos es la perforación del intestino de los animales, cambios en los patrones de alimentación, así como la falsa sensación de saciedad que induce a los animales a problemas de nutrición y en peores casos, la muerte por inanición (Cincinelli *et al.*, 2019; Walkinshaw *et al.*, 2020)

Alexiadou *et al* (2019), se hallaban realizando un estudio acerca de la ingesta de macroplásticos en los cetáceos del este del mar Mediterráneo, cuando dieron con una cría de cachalote (*Physeter macrocephalus*) muerta en las costas de Grecia que contenía más de 2 kilogramos de plástico en su estómago, que correspondían con más de 100 ítems de plástico, los cuales se puede observar sus dimensiones en la fotografía a de la figura 1.8.



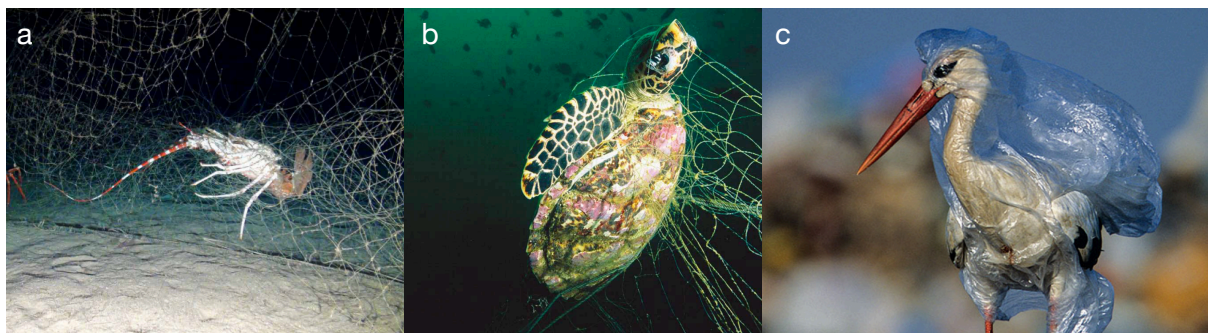
**Fig 1.8.** Fotografía a: fotografía aérea que muestra la cantidad total de restos encontrados en el contenido del estómago del cachalote joven colocado en una cancha de tenis. El primer y último autor del trabajo (1,71 m de altura cada uno) se utilizan como escala aproximada a la derecha de la foto. Fuente: Alexiadou *et al* (2019). Fotografía b: albatros de la especie *Phoebastria immutabilis* muerto con el estómago abierto y lleno de residuos plásticos en su mayoría. Fuente: NOAA Marine Debris Program. Fotografía c: pez macarela amarilla (*Elagatis bipinnulata*) diseccionado y con pequeños microplásticos extraídos de su interior. Fuente: Scientific American.

Además de los problemas derivados de la ingesta de macro y microplásticos, la fauna marina también se enfrenta a la posibilidad de quedarse atrapada al enredarse con las conocidas como redes fantasma y otro tipo de macroplásticos como las anillas de plástico que sujetan los refrescos, bolsas de los supermercados...

Las artes de pesca perdidas o descartadas pueden practicar “pesca fantasma” durante cientos de años antes de degradarse (Aguilar *et al.*, 2019). Los efectos del enredo incluyen el ahogamiento, la asfixia, las laceraciones, la disminución de la capacidad de atrapar alimentos y la incapacidad de evitar eficazmente a los depredadores (Gall y Thompson, 2015).

Según Gall y Thompson (2015), de los más de 30000 individuos de 243 especies que se tiene constancia que han sufrido episodios de enredo, el 71% de éstos sufrió encuentros con redes y cuerdas relacionadas con el sector pesquero como se ilustra en los ejemplos de la figura 1.9. Así mismo concluyen que en el 79% de los casos con daño directo o la muerte se producen como consecuencia del enredo, mientras que un 4% se da en los casos de ingestión.

En el Mediterráneo, las principales víctimas de los enredos con plásticos son las aves (35%), los peces (27%), los invertebrados (20%), los mamíferos marinos (13%) y las tortugas marinas (5%), lo que correspondería a 134 especies repartidas en 66 especies de peces, 5 especies de mamíferos marinos, 3 especies de tortugas marinas y 9 especies de aves. Todos estos animales son principalmente víctimas del enredo con hilo de pesca de monofilamento desechado, ya que representa el 65% de los enredos registrados (Alessi y Di Carlo, 2018; UNEP, 2015).



**Fig 1.9.** Fotografía a muestra a una langosta, probablemente de las especie *Palinurus elephas*, enredada en una red a más de 300 metros de profundidad. Fuente: Aguilar *et al.*, 2019. La fotografía b muestra una tortuga carey (*Eretmochelys imbricata*) fallecida probablemente por asfixia al quedar enredada en una red fantasma. Fuente: World Animal Protection. (2014). La fotografía c retrata a una cigüeña blanca (*Ciconia ciconia*) atrapada dentro de un envoltorio de plástico. Fotografía de John Cancalosi.

## 1.6 Efectos en la economía

Aunque como se ha demostrado a lo largo de toda esta introducción, el impacto de los plásticos, tanto macro como microplásticos, es amplio, éste no se restringe solo a la fauna marina sino que también afecta a la economía mundial de multitud de diferentes formas, siendo los desechos marinos uno de los factores que pueden socavar los beneficios de los servicios de los ecosistemas marinos (GESAMP, 2015).

Los desechos plásticos marinos pueden obstruir los motores de los barcos y las redes de pesca, lo que provoca la interrupción de las operaciones de pesca. El mayor costo para el sector está relacionado con los daños y el mantenimiento de los barcos causados por la colisión con los desechos de plástico, y también se producen retrasos causados por el hecho de que las redes de pesca se llenan de plástico en lugar de peces, así como la necesidad de realizar reparaciones en los aparejos de pesca por daños derivados de la interacción de éstos con plásticos. El costo total de los desechos marinos para la flota pesquera de la Unión Europea es de 61,7 millones de euros al año (GESAMP, 2015; ten Brink *et al.*, 2016).

Por otro lado, la presencia de plásticos en la costa tiene un efecto negativo en el turismo, ya que las playas contaminadas pueden desanimar a los visitantes, reducir su número y provocar la reducción de los ingresos y la pérdida de puestos de trabajo en el sector del turismo. También puede haber un aumento de los costos de limpieza para mantener las actividades turísticas y de recreación y para prevenir el daño a las playas, por ejemplo el Reino Unido gasta al año 18 millones de euros en la limpieza y el mantenimiento de sus playas (GESAMP, 2015).

En general, McIlgorm *et al* (2011) estima que el turismo pierde hasta 268 millones de euros cada año por la contaminación del plástico. Además el turismo aumenta la generación mensual de residuos en temporada alta, lo que puede provocar que los municipios se vean sobrepasados por la afluencia adicional de desechos, dando lugar a que no se recojan los residuos o a prácticas de gestión inseguras. Como resultado, la industria turística a menudo asume el costo de la limpieza para asegurar que los lugares sigan siendo atractivos para los turistas, lo que repercute en notables pérdidas para el sector (WWF, 2019).

Finalmente, la presencia de plásticos en los océanos, repercute de manera negativa en la industria del transporte marítimo provocando pérdidas cuantiosas en sus cuentas anuales. La industria del transporte marítimo pierde unos 235 millones de euros al año por los desechos plásticos marinos, ya que éstos pueden provocar colisiones y dañar los barcos al ensuciar las hélices y los sistemas de refrigeración. Esto deriva en costos adicionales de mantenimiento, pérdidas de productividad e ingresos y perturbar las cadenas de suministro por retrasos y accidentes. Además, los operadores pueden tener que hacer frente a gastos de reparación, esfuerzos de rescate y pérdida de vidas o lesiones por accidentes derivados con la interacción con plásticos. Por otro lado las instalaciones portuarias también corren el riesgo de sufrir daños por la contaminación de los plásticos, incluida la obstrucción de las vías fluviales, lo que crea retrasos e incurre en costos de limpieza (Kaza *et al.*, 2018; ten Brink *et al.*, 2016).

## 1.7 Acciones y medidas de prevención y mitigación ya tomadas

Por suerte, muchos países y organizaciones han tomado conciencia de la problemática medio ambiental que supone la presencia de plásticos en el mar y ya se han propuesto y puesto en marcha muchas medidas que pretenden mitigar y/o prevenir esos problemas.

La iniciativa más fácil y común a realizar a pequeña escala es la organización de limpiezas de playas, donde participe el conjunto de vecinos y turistas y sirva, además de la limpieza en sí, de actividad de concienciación y educación medio ambiental.

Marine Litter Watch es una aplicación para móviles desarrollada por la Agencia Europea del Medio Ambiente y basada en la Directiva Marco de la Estrategia Marina que permite a cualquier usuario u organización crear un registro de las basuras que se encuentren en la playa que se almacene en una base de datos común de libre acceso.

Esta aplicación móvil se desarrolló con el fin de fortalecer la base de conocimientos de Europa acerca de la problemática de las basuras marinas y así proporcionar apoyo a la elaboración de las políticas europeas (Agencia Europea del Medio Ambiente, 2020).

Una de las políticas europeas que busca solucionar la contaminación por plásticos es la nueva ley que prohibirá a partir de 2021 la venta de plástico de un solo uso como pajitas, bastoncillos, cubertería no reutilizable, además de introducir nuevos objetivos de reciclaje, como por ejemplo alcanzar para el 2025 la meta de reciclar el 77% en peso de los productos de plástico introducidos en el mercado por año (Unión Europea, 2019).

Respecto a medidas que incumben de manera directa a los océanos encontramos el Convenio MARPOL de ámbito internacional que busca la protección del mar frente a la contaminación provocada por los buques mercantes y otras embarcaciones, el Convenio MARPOL (de sus siglas en inglés Marine Pollution) creado por la Organización Marítima Internacional, marca unos protocolos para regular la eliminación de residuos producidos en los buques para así evitar que éstos terminen siendo fuentes de contaminación. Concretamente, en el anexo V marca claramente la prohibición expresa de eliminar los plásticos desechados en alta mar, establece la obligatoriedad de almacenarlos adecuadamente para depositarlos a su llegada a puerto (Convenio MARPOL, 1973).

Además las grandes compañías responsables de gran parte de los plásticos que terminan contaminando los mares y océanos del mundo, como PepsiCo y Unilever, ya han anunciado sus planes de convertir, sino el 100% gran parte de sus productos en productos aptos para ser reutilizables, reciclables o aptos para el compostaje así como tratar de fabricar sus productos con materiales reciclados en su mayor medida (Our Ocean, 2017).

## 2. Objetivos

El presente trabajo tiene como objetivo principal el analizar la evolución futura de los niveles de plástico tanto en aguas, sedimentos como organismos en el mar Mediterráneo e indicar medidas de gestión. Para ello se establecen los siguientes objetivos específicos:

- Trazar un modelo conceptual y cuantitativo utilizando la modelización de sistemas (en lenguaje Stella®) desde que el plástico se convierte en residuo y llega hasta el mar Mediterraneo con el consecuente impacto en el ecosistema marino.
- Proponer diferentes escenarios de futuro y ponerlos a prueba con ayuda del programa Stella ®
- En base a los resultados obtenidos determinar cuales son las medidas de gestión y mitigación más efectivas para enfrentar el escenario actual de contaminación.

## 3. Material y métodos

### 3.1 Características de la zona de estudio

El mar Mediterráneo (figura 3.1) es un mar semicerrado, situado entre tres continentes, Europa, África y Asia. Está ubicado en la zona templada del hemisferio norte, entre los 35 °N y los 45 °N de latitud aproximadamente. Su principal conexión con el océano es el estrecho de Gibraltar, a través del cual intercambia con el Atlántico agua, calor, sal, oxígeno, nutrientes, etc (Vargas *et al.*, 2007).



Fig 3.1. Mapa de la cuenca mediterránea y algunos de los países circundantes. Fuente: Agencia Europea del Medio Ambiente, 2020

Su costa mide unos 46 000 km y tiene una superficie de 2,5 millones de kilómetros cuadrados sobre los que vierten aproximadamente 110 ríos (Vargas *et al.*, 2007; Liubartseva *et al.*, 2018).

El Mediterráneo es un mar amenazado, no sólo por los efectos del cambio climático, sino por la actividad humana, ha sido descrito recientemente cómo el ecosistema marino más afectado por contaminación de basuras (Cincinelli *et al.*, 2019).

Es uno de los más importantes destinos turísticos del mundo, con 100 millones de visitantes al año, y lugar de un intenso tráfico marítimo con más de 200 000 travesías anuales, lo que correspondería con un 30% del tráfico marítimo mundial (UNEP, 2015; Vargas *et al.*, 2007).

Se trata de un mar oligotrófico con salinidad y temperaturas superiores al océano Atlántico (Vargas *et al.*, 2007). Además una parte de su importancia reside en ser el hogar de multitud de especies endémicas como la planta acuática *Posidonia oceanica* (Gobert *et al.*, 2020), elasmobranchios como las rayas de la especie *Raja polystigma* (Coll-Calvo *et al.*, 2020), moluscos como *Pinna nobilis* (Čižmek *et al.*, 2020) y multitud de peces e invertebrados (Vargas *et al.*, 2007).

### 3.2 Obtención de datos

Los datos obtenidos para realizar el presente trabajo se realizaron a través de una extensa búsqueda bibliográfica con ayuda de las herramientas online Scopus, Science Direct y Google Scholar.

Realizando distintos tipos de búsqueda con diferentes combinaciones de palabras clave como “macroplásticos y agua”, “contaminación plásticos y mediterráneo”, “microplásticos y ríos” y “plásticos e ingesta animal” y usando como idioma principal de búsqueda el inglés, se recogieron entorno a 160 artículos y escritos de diferente índole .

Éstos se trataron de obtener de fechas de publicación lo más recientes posible para tratar de evitar datos obsoletos, y sirvieron tanto para articular la introducción como para sustentar la calibración del modelo y discutir los resultados.

### 3.3 Características generales del modelo

El programa de modelización STELLA® es un software muy utilizado en el campo de la ecología ya que se trata de una potente herramienta de conocimiento y gestión de una especie o ecosistema que sirve para entender, evaluar, optimizar un sistema y/o hacer predicciones de futuro.

STELLA ® es un programa que utiliza una interfaz iconográfica (figura 3.2) para facilitar la construcción de estructuras de sistemas dinámicos. Las características esenciales del sistema se definen en términos de existencias, flujos y parámetros auxiliares. El usuario decide dónde colocar los iconos de cada una de estas características en la zona de modelización y establece las conexiones adecuadas entre ellas. Las relaciones funcionales entre los rasgos son entonces definidas por el usuario. Estas relaciones pueden ser funciones matemáticas, lógicas o gráficas, ya que el programa permite bastante flexibilidad en este aspecto (Costanza y Gottlieb, 1998).El



Fig 3.2. Iconografía usada por el programa STELLA®. De izquierda a derecha: stock, flujo y tasa o variable auxiliar.

programa funciona con stocks, que representan el material, como en este caso, la cantidad de micro o macropásticos que se encuentran en el sedimento, o la cantidad de plásticos mal gestionados en un determinado año; entre stock y stock discurre un flujo que indica la cantidad de “material” en transporte por unidad de tiempo, como por ejemplo la cantidad de macropásticos que llegan al mar al año, entre un stock, y otro y está afectado por variables auxiliares o tasas que pueden tomar la forma de constantes, funciones matemáticas o gráficas, y conjuntos de datos, como en este caso podría ser el porcentaje de residuos que se recicla adecuadamente (Costanza y Gottlieb, 1998)

El software STELLA ® ha sido usado para la creación de multitud de modelos en distintas ramas de la ciencia como la creación de modelos para la evolución de distintos cánceres (Ehrenpreis y Smith, 2018), la producción energética a base de uranio en China (Fang *et al.*, 2018), el estudio de la contaminación producida por hidrocarburos policíclicos aromáticos (Chen *et al.*, 2018) y cuestiones relacionadas con el ámbito de la ecología como la modelización poblacional del oso negro americano (Patten, 1997) o la modelización de una especie en concreto de copépodos (Marín, 1997)

En el caso del presente trabajo, el modelo realizado en STELLA® pretende representar el proceso que sufren los plásticos desde que se convierten en residuos hasta que terminan siendo bien procesados (reciclaje, incineración...) o en los fondos marinos debido a la mala gestión de los residuos, así como la multitud de variables que influyen en todo el proceso y cómo alteran en mayor o menor medida el destino final del plástico.



### 3.4 Calibración del modelo y estimaciones

Para un correcto funcionamiento del modelo, es importante que los datos se ajusten lo más posible a la realidad. Para ello se requiere de un importante trabajo bibliográfico para encontrar datos que se adapten a las necesidades del modelo y que se hayan determinado de forma experimental y por tanto, sean lo más cercanos a la realidad.

En ciertas ocasiones, debido a la ausencia de datos bibliográficos concretos, ha sido necesario calcular algunos valores de las variables auxiliares mediante estimaciones en base a datos similares.

Primeramente se ajustará el modelo en base a las tasas y variables auxiliares obtenidas de la bibliografía (tabla 3.1).

**Tabla 3.1.** Variables auxiliares usadas en el modelo, con datos y su correspondiente fuente. Aquellos que la fuente sea "Estimación", no provienen de fuentes bibliográficas y a continuación se describirá el proceso de estimación y/o cálculo de datos. \*FG: indica que el dato de la población costera está representada de forma gráfica dentro del modelo de STELLA®

Variable auxiliar	Dato	Unidad	Fuente	Variable auxiliar	Dato	Unidad	Fuente
Población costera anual	FG*	habitantes	Gapminder, 2016	MiP sedimento	25	%	Estimación
Generación RSU plástico per cápita	FG*	Ton/hab/año	Jambeck et al 2015	MiP biofouling	0,01	año <sup>-1</sup>	Liubartseva et al 2018
Buena gestión	80	%	Estimación	MaP a Playa	225	%	Estimación
Mala gestión	20	%	Jambeck et al 2015	Retirada limpieza	30	%	UNEP 2015
MaP mala gestión	30	%	Estimación	Fragmentación	0,025	año <sup>-1</sup>	Estimación
MiP mala gestión	70	%	Estimación	MaP mercancía	0,014	%	Estimación
MiP mercancía	0,0028	%	Estimación	MaP embarcaciones	6	%	Soto-Navarro et al 2020
MiP agua	75	%	Estimación	MaP pesca	10	%	Brown et al 2007
Limpieza a buena gestión	100	%	Estimación	MaP agua	75	%	Estimación
MaP sedi	25	%	Estimación	MaP biofouling	0,01	año <sup>-1</sup>	Liubartseva et al 2018
MaP Agua Fragmentación	0,025	año <sup>-1</sup>	Estimación	MaP Sedi Fragmentación	0,025	año <sup>-1</sup>	Estimación

Estimaciones realizadas para la obtención de tasas y/o variables auxiliares:

- Buena gestión: al tratarse de dos flujos que salen de un mismo stock, la suma de ambas variables auxiliares debe de ser 1, por tanto, como la tasa de mala gestión si que está proporcionada por la bibliografía, se resta uno a dicha tasa y se obtiene la tasa de buena gestión
- Mala gestión de macroplásticos: Plastics Europe, 2019, estima que se recogen el 72,7% de residuos de plásticos, principalmente residuos del hogar y pequeñas empresas por lo que se considera macroplásticos, para destinarlos a buena gestión, es decir, para tareas de reciclaje, incineración... por tanto el tanto por cien restante comprendería que 27,3% de los residuos no son tratados adecuadamente. Decido redondear a 30% para tratar de abarcar las regiones del norte de África y Oriente Próximo.
- Mala gestión de microplásticos: de igual manera que con la tasa de buena gestión, la suma de la tasa de mala gestión de microplásticos y macroplásticos a de ser igual a uno, por tanto la mala gestión de microplásticos sería de un 70%. Explico tales diferencias en la dificultad de retener los microplásticos en los sistemas de depuración y limpieza de aguas.
- Pérdidas durante el transporte de mercancías: en el mundo hay alrededor de 96 millones de contenedores siendo transportados por mar (UNCTAD, 2019), de los cuales se pierden al año 1382 en el mar (World Shipping Council, 2020), lo que correspondería a que al año se pierden 0,0014% de contenedores. Según Plastics Europe, 2019, se importaron y exportaron en Europa el doble de microplásticos de macroplásticos, dado que esos transportes son mayoritariamente

por mar, estimo que los microplásticos tienen el doble de posibilidades de perderse en el mar que los macroplásticos. Por tanto:

- Microplásticos perdidos en mercancías: 0,0028%
- Macroplásticos perdidos en mercancías: 0,0014%

- Microplásticos y macroplásticos en agua y sedimento: según la bibliografía los principales tipos de plástico encontrados en el mar son PE, PP, PS y PET, los cuales tienen densidades de 0,94, 0,9, 1,06 y 1,38 respectivamente. Teniendo en cuenta que la densidad del agua de mar es de 1,02, asumo que el 25% va al sedimento directamente sin mediación de biofouling y el 75% queda flotando. Como la composición polimérica no varía de micro a macroplásticos, asumo que:
  - Macro y microplásticos que van al sedimento directamente: 25%
  - Macro y microplásticos que quedan flotando: 75%
- Respecto a la fragmentación, se tomaron datos de la NOAA (NOAA Marine Debris Program, 2020), acerca de los diferentes ratios de degradación y fragmentación que sufrían los principales tipos de plásticos en los océanos y se realizó un promedio.
- Macroplásticos que regresan a la playa una vez vertidos al mar: según Liubartseva et al (2018) la tasa de macroplásticos que regresan a las playas es aproximadamente 9 veces mayor que la tasa de macroplásticos que van al sedimento. Por tanto, si la tasa de macroplásticos en sedimento es 25%, 25 multiplicado por 9 es igual a 225.
- La tasa de plásticos recogidos en las limpiezas de playas que son bien gestionadas la estimo en un 100%, ya que al tratarse de una actividad medio ambiental y de concienciación asumo que los organizadores se responsabilizaran que la basura recogida sea procesada adecuadamente.

Respecto a la población costera y a la generación per cápita de residuos sólidos urbanos (RSU) plásticos, se establece una función gráfica exponencial. La población costera basada en datos bibliográficos a partir de 1950 (Gapminder, 2016) y la generación per cápita de RSU plásticos se establece un punto bibliográfico estipulado por Jambeck et al (2015) en 0,033 toneladas per cápita en 2015 y se modifica la gráfica para que sea exponencial en base a que el crecimiento de la población y el de la fabricación de plásticos es exponencial tal y cómo se muestra en la figura 3.3.

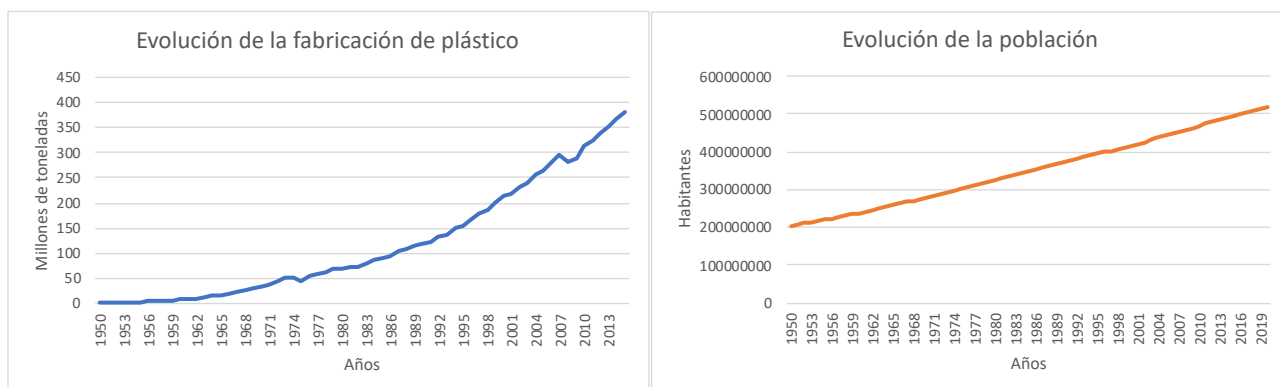


Figura 3.3. Derecha: evolución de la fabricación de plástico desde el año 1950 hasta 2015. Fuente: Geyer et al., 2017. Izquierda: evolución de la población de los países costeros del mediterráneo desde 1950 hasta 2019. Fuente: Gapminder, 2016.

A continuación, el modelo se ajusta a mano modificando el valor de las tasas añadidas previamente para que los flujos y/o los stocks coincidan con lo estipulado por la bibliografía o lo calculado según la premisa de que el flujo es igual a la tasa o variable auxiliar multiplicada por el stock, o en su defecto que el dato del stock es igual al flujo dividido por la tasa o variable auxiliar. Se usarán los datos mostrados en la tabla 3.2.

En el anexo I se detalla con precisión los cálculos realizados para determinar los flujos y stocks que no se encontraban presentes en la bibliografía.

Tabla 3.2. Flujos y stocks usados para la calibración manual del modelo en STELLA®

Flujo				Stock			
	Dato	Unidad	Fuente		Datos	Unidad	Fuente
Buena gestión	10506414	toneladas/año	Jambeck et al 2015	MaP Agua	10600	toneladas	Eriksen et al 2014
Mala gestión	2981056	toneladas/año	Jambeck et al 2015	MaP Sedi	20745	toneladas	Cálculo
MiP mala gestión	100000	toneladas/año	Bayo et al 2018	MiP agua	5380	toneladas	Eriksen et al 2014
MiP mercancía	4,4	toneladas/año	Cálculo	MiP sedi	396580	toneladas	Cálculo
MiP biofouling	0,01	toneladas/año	Liubartseva et al 2018				
MaP mala gestión	300000	toneladas/año	Bayo et al 2018				
MaP embarcaciones	6000	toneladas/año	Liubartseva et al 2018				
MaP mercancía	2,2	toneladas/año	Cálculo				
MaP pesca	3600	toneladas/año	Cálculo				
MaP biofouling	0,01	toneladas/año	Liubartseva et al 2018				

### 3.5 Generación de diferentes escenarios

Tras el montaje y calibración del modelo con los datos bibliográficos y calculados, se procede a generar una serie de escenarios diferentes para simular posibles situaciones y ver cómo reaccionan los datos variando ligeramente distintos valores y parámetros como las variables auxiliares.

- Escenario 1: no se aplica modificación alguna de los datos del modelo, es decir, se mantienen las tasas, variables auxiliares, flujos usados en la calibración, y los valores de población anual mediterránea y generación de RSU plástico per cápita actuales (figura 3.4)

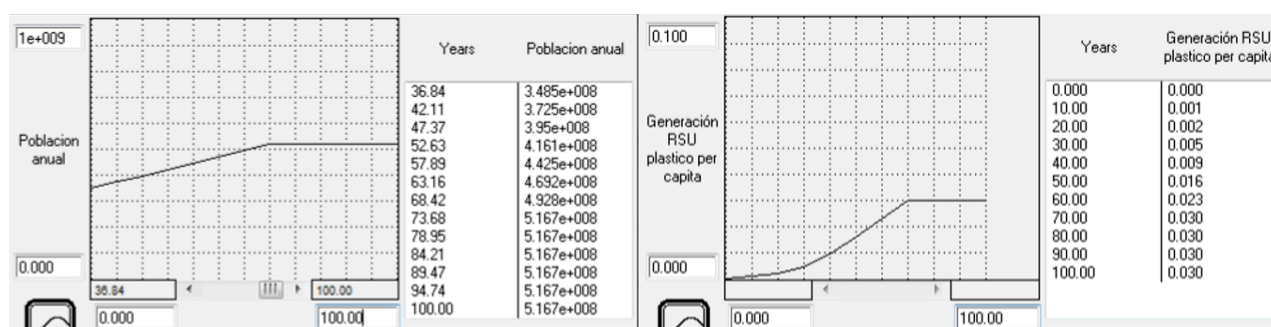


Figura 3.4. Derecha: gráfico que muestra la evolución de la generación de residuos sólidos urbanos (RSU) plásticos per cápita. Izquierda: gráfico de la evolución de la población de los países costeros mediterráneos.

- Escenario 2: para el año 2050:
  - 2.1: Se produce un aumento del 50% de la tasa de mala gestión.
  - 2.2: Se produce un aumento del 20% de la tasa de mala gestión.
  - 2.3: Se produce un descenso del 20% de la tasa de mala gestión.
  - 2.4: Se produce un descenso del 50% de la tasa de mala gestión.
- Escenario 3: para el año 2050:
  - 3.1: Se logra retirar un 5% de los macroplásticos presentes en el agua.
  - 3.2: Se logra retirar un 20% de los macroplásticos presentes en el agua.



Como ya se comentó en material y métodos (figura 3.2), los rectángulos corresponderían a los compartimentos o stocks del sistema, los cuales están unidos entre sí mediante flujos que representan las entradas y salidas a éstos. Además, los pequeños círculos unidos a las flechas rojas son la representación iconográfica de las tasas o variables auxiliares que influyen en los flujos.

El modelo se inicia con un flujo de generación de residuos plásticos que está influenciado por la generación de residuos sólidos urbanos (RSU) plásticos per cápita y por ende, de la población anual que tengan los países costeros del mar Mediterráneo. Una vez se han generado los residuos, existen dos vías, o se gestionan adecuadamente mediante incineración, reciclaje, etc; o sufren una mala gestión que provoca que los plásticos acaben en los ríos, mares..., siendo la mala gestión la causante del 80% de la basura plástica que se encuentra en el mar (Alimba y Faggio, 2019).

Además a estos macroplásticos y microplásticos que han llegado al mar desde tierra firme, se les suman los generados de actividades marítimas como la pesca, la pérdida de mercancía que es transportada por mar y los vertidos accidentales de las embarcaciones.

Una vez en el mar, estos plásticos en primera instancia se hundirán o se quedarán en superficie según la densidad que éstos tengan. Los que se encuentren en superficie o en la columna de agua se verán afectados por el fenómeno del biofouling, es decir, la generación de una capa microbiana, y posteriormente de algas y macrofauna, sobre su superficie que hará que la densidad de los plásticos aumente paulatinamente provocando así su hundimiento. Durante todo el proceso, la fauna correrá el riesgo de ingerirlo o enredarse en ellos (particularmente con los macroplásticos), provocándoles multitud de daños ya comentados anteriormente.

Una parte de los macroplásticos será fragmentada a microplásticos por acción físico química, foto-oxidación, degradación mecánica, etc. Mientras que otra pequeña porción sufrirá lo que Liubartseva et al (2018) denominan efecto *boomerang*, es decir, retornan a la costa varándose en las playas. Si la zona en la que quedan varados tiene una buena gestión, será limpiada adecuadamente a menudo, retirando una porción de dichos residuos, los cuales se procesarán y gestionarán adecuadamente.

## 4.2 Escenarios

### 4.2.1. Escenario 1

El primer escenario propuesto consiste en mantener los datos que han sido usados para la calibración, para que en el caso de que no se produzcan cambios en los parámetros actuales, determinar cuál sería la evolución en el tiempo de la contaminación por plásticos en el mar Mediterráneo.

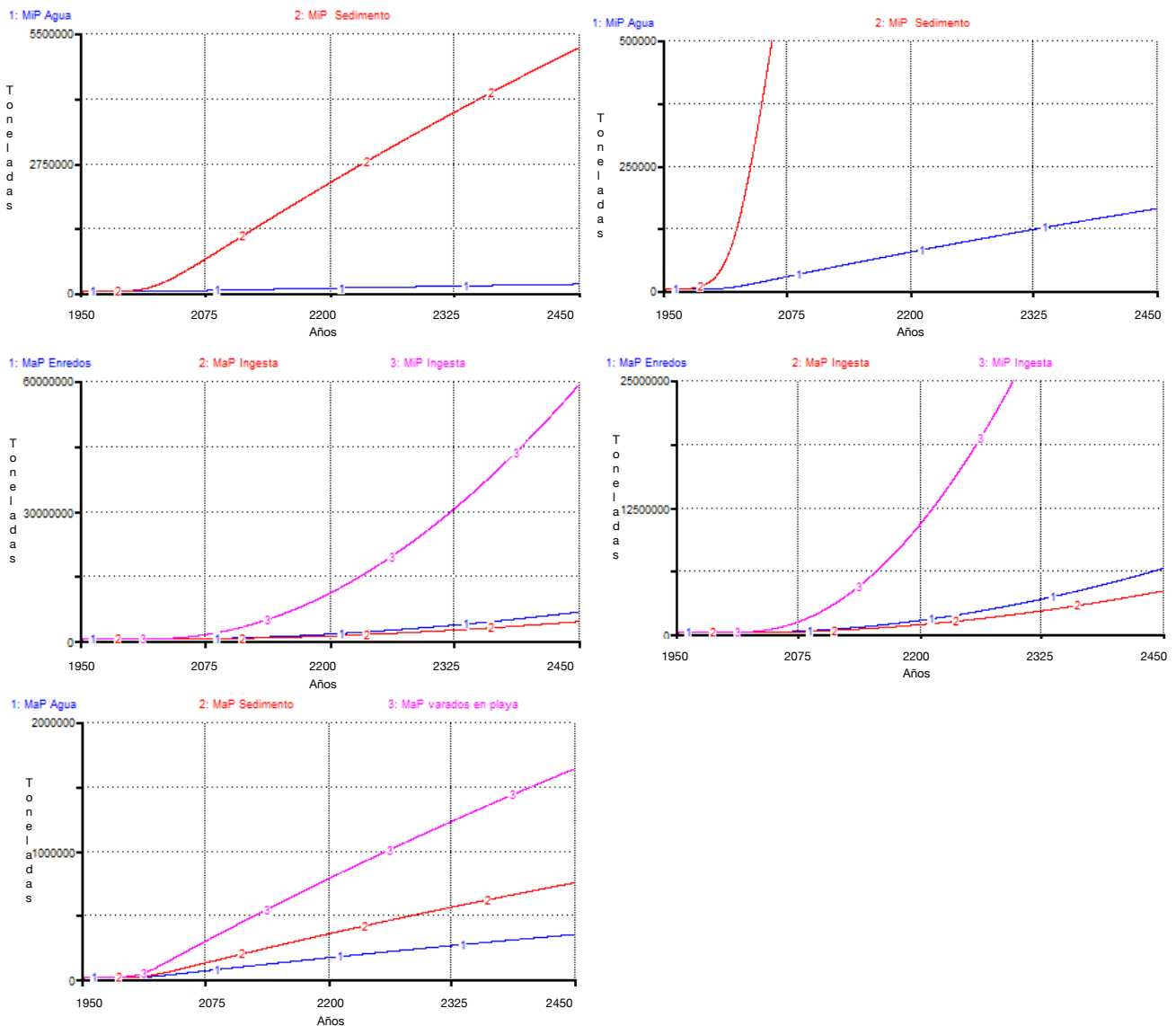
Tal y como se muestra en la figura 4.2, si no se toman medidas de gestión, la contaminación, tanto de macroplásticos como de microplásticos, continuará al alza en el futuro.

Los macroplásticos comienzan a ser relevantes entorno a comienzos del siglo XXI, cuando empiezan a experimentar un crecimiento lineal, particularmente son los macroplásticos que llegan a las playas desde el mar, los cuales son todo momento superiores a los macroplásticos presentes en el agua y en el sedimento.

A largo plazo, con la proyección a 500 años, los macroplásticos en el agua continúan la misma tendencia, manteniéndose en todo momento los macroplásticos en agua en menor cantidad que los presentes en el sedimento y los que retornan a las playas, los cuales a largo plazo siguen siendo los más destacables.

Respecto a los microplásticos, hay que destacar el crecimiento tan elevado de los microplásticos en sedimento respecto a los microplásticos en agua, el cual comienza a crecer entorno a la década de 1970 mientras que los microplásticos en agua empiezan a destacar a principios del siglo XXI. A largo plazo se puede observar que se mantiene la misma tendencia, pero en todo

momento la cantidad de microplásticos presentes en el mar Mediterráneo es menor que la de macroplásticos.



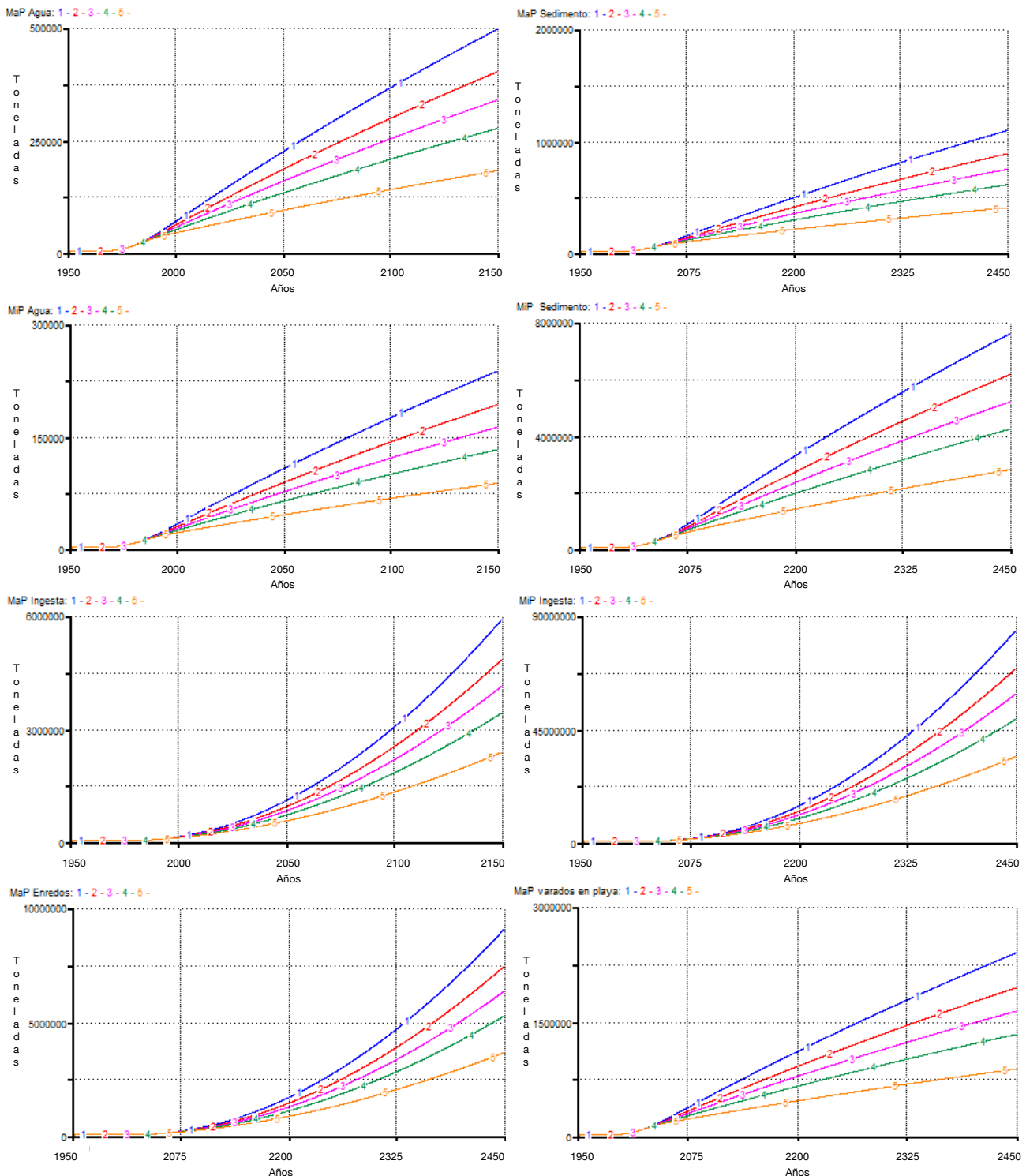
**Figura 4.2.** Gráficos generados para el escenario 1 con una escala temporal de 500 años. La columna derecha se ha reducido la escala de los gráficos para ver mejor los resultados con valores más bajos.

En cuanto a la interacción de la fauna marina con los plásticos, se puede ver en los gráficos que el valor más elevado en todo momento, es la ingesta de microplásticos.

A principios de la primera década del siglo XXI empiezan a ser visibles los impactos en la fauna, con un crecimiento ligeramente exponencial para todos los casos, aunque ligeramente menor para los enredos y la ingesta de macroplásticos. Como se puede observar la ingesta de macroplásticos por la fauna causa un menor impacto que el resto de interacciones.

## 4.2.2. Escenario 2

Con el escenario número 2 se pretende escenificar el comportamiento de la contaminación por plásticos del mar Mediterráneo si se producen cambios en la tasa de mala gestión.



**Figura 4.3.** Gráficos generados para el escenario 2 con una escala temporal de 500 años. Cada línea representa una situación para la tasa de mala gestión en el año 2050. La línea azul (1) representa el aumento del 50%, la línea roja (2) el aumento del 20%, la línea rosa (3) representa la situación actual, la línea verde (4) representa un descenso del 20% en la generación de RSU plásticos per cápita y la línea naranja (5) representa un descenso del 50%.

Los macroplásticos en agua se mantienen en todo momento cerca de un orden de magnitud menor que los macroplásticos presentes en el sedimento. En ambos casos se experimenta cierta mejoría de los valores si se aplican mejoras del 20% de la tasa de mala gestión, y una mejoría muy notable si se mejora un 50% la tasa de mala gestión. De igual manera ocurre a la inversa,

como se puede observar, si la mala gestión de los residuos plásticos empeorara un 20% o un 50% las cifras actuales de contaminación de macroplásticos en agua y sedimentos empeorarían notablemente.

En cuanto a los microplásticos, los presentes en agua se encuentran en menor que los microplásticos en el sedimento. Ambos dos experimentan unas tendencias idénticas a la de los macroplásticos, es decir, si se logra mejorar en un 20% la mala gestión para el año 2050, los valores de contaminación serán menores a los que habría de continuar con la tasa actual, y notablemente menores si se mejorara en un 50%. Por lo contrario, si se empeorara un 20% o un 50% la tasa de mala gestión la cantidad de microplásticos en agua y sedimentos sería mayor a la que habría de continuar con la tasa actual de que le 20% de los residuos plásticos no son gestionados adecuadamente.

Respecto a la interacción de la fauna marina con los plásticos presentes en el ecosistema mediterráneo, se puede observar que tanto la ingesta de macroplásticos y microplásticos como los enredos generados por los macroplásticos, empeorarían ligeramente si se empeorara en un 20% la mala gestión, y las cifras serían aun mayores si no se gestionaran los residuos un 50% más de lo actual. De igual manera, si se mejorara la mala gestión en un 20 o un 50%, el impacto de los residuos plásticos sobre fauna marina del mar Mediterráneo sería menor a la que se obtendría con los valores del escenario 1, ya que el número de enredos y de macroplásticos y microplásticos ingeridos disminuirían gracias a la reducción de la tasa de mala gestión.

Finalmente, los macroplásticos varados en la playa por el efecto *boomerang*, seguirían la misma dinámica que el resto de parámetros estudiados, disminuyendo o aumentando proporcionalmente a la modificación de la tasa de mala gestión aplicada.

#### **4.2.3. Escenario 3**

El escenario 3 explora los diferentes resultados que se obtendrían si se lograra reducir en un 5% o un 20% la cantidad de macroplásticos presentes en el agua, ya que hoy en día hay multitud de proyectos científicos y tecnológicos que buscan alcanzar objetivos similares.

Como se puede observar en la figura 4.4, los macroplásticos en agua serían los mayores beneficiarios de estas actividades de limpieza, ya que, partiendo de la base que la línea 3 es la situación en la que no se toman medidas, se puede ver claramente como simplemente reduciendo un 5% la cantidad de macroplásticos se vería mejoría a largo plazo notable, por no decir que si redujera un 20% la mejoría sería más que notable. No obstante, los macroplásticos presentes en el fondo, en el sedimento, no sufrirían ninguna alteración si se dedicaran esfuerzos a disminuir la cantidad de macroplásticos en el agua.

Por otro lado, los microplásticos sufren variaciones prácticamente imperceptibles si se reduce la cantidad de macroplásticos en agua. Si se reducen en un 5% los macroplásticos en agua, los microplásticos en agua y en sedimento disminuirán ligeramente, la cual será un poco más pronunciada si se logra reducir un 20% los macroplásticos presentes en el agua.

La ingesta de macroplásticos por la fauna marina se verá afectada si se implementan medidas para lograr una reducción de los plásticos de este tamaño presentes en el agua, sufrirá una reducción directamente proporcional a la reducción de macroplásticos lograda. Sin embargo, los valores de ingesta por microplásticos no se verían significativamente afectados por la reducción de macroplásticos en el agua, disminuiría ligeramente, pero de una forma muy poco relevante respecto a los valores que se darían con las tasas actuales.

Respecto a los enredos de la fauna con los macroplásticos, éstos disminuirían si se produjeran actividades de limpieza de macroplásticos en el agua, aunque la disminución de enredos sería menos notable que la disminución producida por la ingesta de macroplásticos.

Finalmente, los macroplásticos que varan en la playa no sufrirían alteración alguna, es decir, que las cantidades seguirían siendo las mismas independientemente de la cantidad de macroplásticos que se lograra retirar del agua.



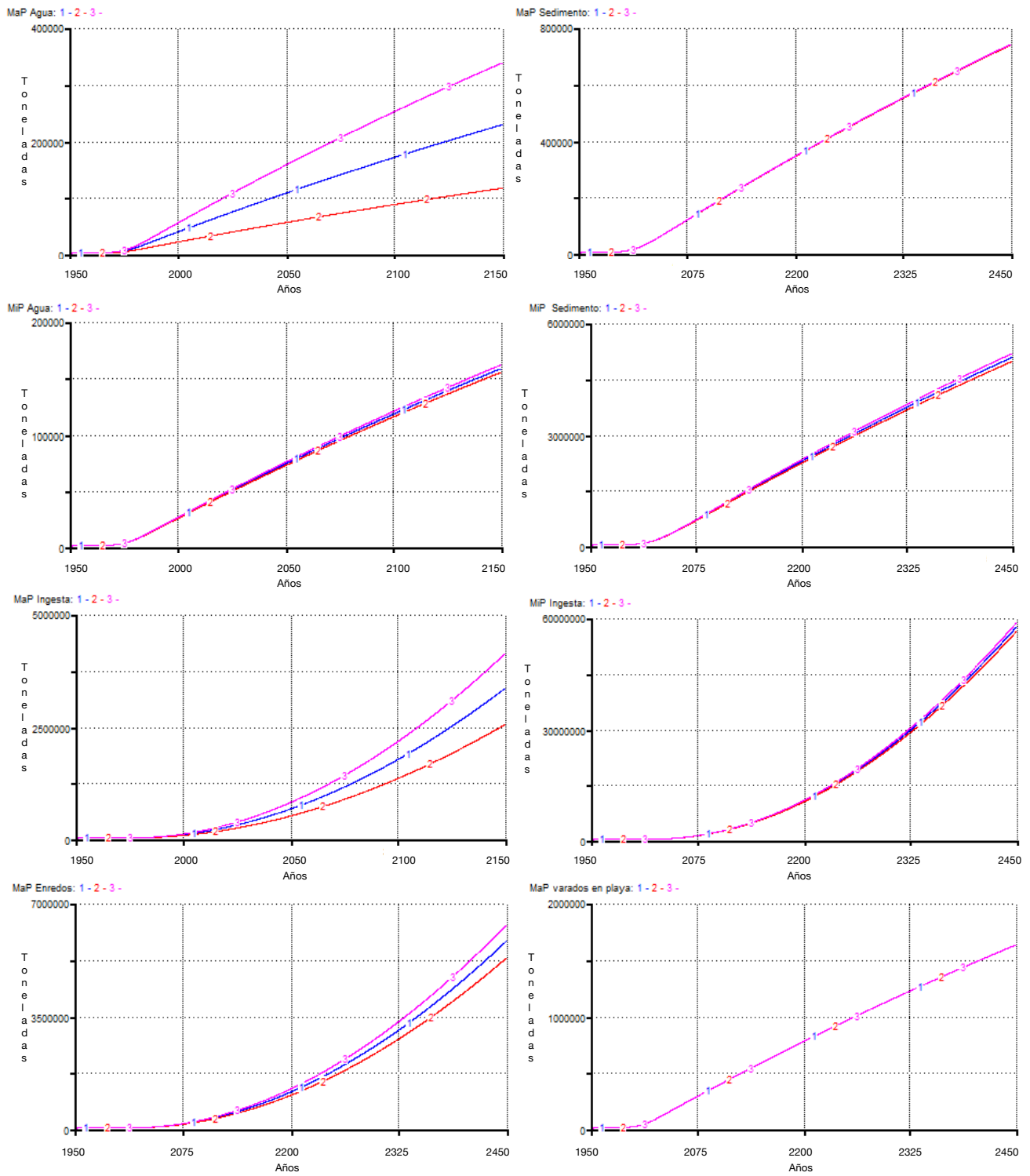


Figura 4.4. Gráficos generados para el escenario 3 con una escala temporal de 500 años. Cada línea representa una situación para la limpieza de macroplásticos en agua en el año 2050. La línea azul (1) representa una reducción de macroplásticos en agua del 5%, la línea roja (2) una reducción del 20%, la línea rosa (3) representa la situación actual.

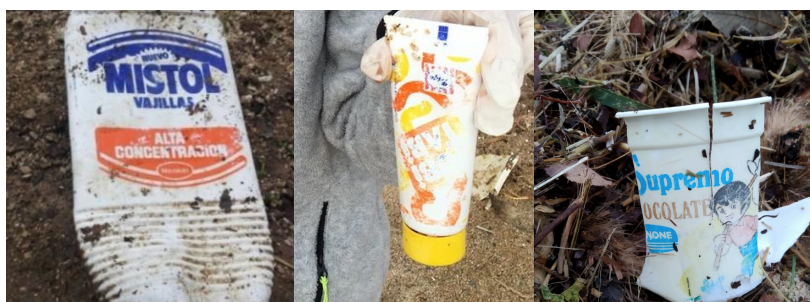
## 5. Discusión

### 5.1 General

Los resultados obtenidos en el presente estudio demuestran la imperiosa necesidad de tomar medidas de control sobre la generación y gestión de residuos plásticos, ya que, de no ser así, continuarán llegando grandes cantidades de macroplásticos y microplásticos al mar Mediterráneo, provocando un aumento significativo de daños a la fauna marina, y por tanto, al estado de salud general de los ecosistemas marinos.

De igual manera, con los escenarios propuestos en el apartado anterior, se puede deducir que, debido a que se necesita cierto margen de tiempo para poder observar los cambios en el ecosistema, sería más que recomendable tomar medidas cuanto antes para poder ver los efectos lo antes posible.

No obstante, hay que destacar que al tratarse de proyecciones de futuro a medio y largo plazo, hay que tener en cuenta que la cantidad de parámetros que influyen en la contaminación marina por plásticos es inmensa, yendo desde variaciones en la economía y en la población, a las leyes que rijan en cada país en determinados momentos, el turismo de cada año, o incluso la meteorología, ya que lluvias y fuertes vientos arrastrarán más residuos desde tierra al mar que en situaciones normales (ver figura 5.1); por tanto, hay que considerar que los resultados arrojados en el presente estudio son meras aproximaciones a situaciones futuras.



**Figura 5.1.** Residuos plásticos encontrados en las playas españolas, tras el paso de la tormenta Gloria a principios del año 2020. Las tres fotografías muestran envases que se dejaron de fabricar entorno a finales de la década de 1980 y principios de 1990. Fuente: El Mundo.es

Además, a lo largo del proceso de búsqueda bibliográfica para este estudio, se ha constatado la necesidad de establecer un protocolo común para el estudio de la contaminación de plásticos, toma de muestras, procesado de datos, expresión de los resultados... A pesar de que la Unión Europea tiene publicado desde el año 2013, un protocolo para el monitoreo de la basura marina en los mares europeos (European Commission, 2013), se ha visto en la literatura científica multitud de formas de expresar los resultados así como de toma de muestras, es decir, distintas unidades ( $\text{items}/\text{km}^2$ ,  $\text{items}/\text{m}^3$ ...), distintos tamaños y tipos de redes, distintos tiempos de muestreo, etc; lo que hace muy complicado el trabajo de realizar un estudio comparativo entre diferentes resultados de diferentes investigaciones. Un protocolo común, es decir, un método estándar, facilitaría en gran medida el poder comparar y, por tanto, el poder obtener una visión global de la problemática y elaborar medidas de actuación en consecuencia. Preferiblemente sería más adecuado que todas las publicaciones científicas, expresaran también los resultados en masa ( $\text{g}/\text{km}^2$ ), ya que no existe forma posible de averiguar cuántos ítems de microplásticos se producirán por la fragmentación de un macroplástico. Expresando los resultados en masa, sería más fácil interpretar el alcance de la contaminación.

Por otro lado, Cincielli et al (2019) sugieren que sería adecuado realizar programas de vigilancia a largo plazo de forma regular para aumentar los datos in situ, cuantificar mejor la presencia de macroplásticos y microplásticos en los perfiles espaciales y verticales de la columna de agua y en los sedimentos de una gama más amplia de subregiones del Mediterráneo, y traducir estas observaciones en modelos de predicción para obtener estimaciones lo más cercanas a la realidad posibles.

El modelo desarrollado en STELLA® presenta una serie de limitaciones que hay que tener en cuenta a la hora de interpretar los resultados. La ya comentada, que al carecer de datos bibliográficos de antes de los 80, hay un vacío de información en la primera franja de tiempo del modelo. También, hay que destacar la dificultad de obtener datos bibliográficos suficientes para poder contrastar con mayor claridad los resultados obtenidos, ya que se trata de un campo de estudio muy reciente y aún con muchos vacíos que cubrir, como por ejemplo, existe muy poca bibliografía acerca de la degradación físico-química de los plásticos en la naturaleza, motivo por el cual se ha optado por no incluir la degradación en el modelo, además de que son valores tan pequeños que no alterarían los resultados a medio plazo estudiados en el apartado de resultados (Frid y Caswell, 2017).

La bibliografía disponible muestra claramente que los plásticos se hayan por todo el mar Mediterráneo de manera prácticamente homogénea, desde el mediterráneo occidental, al oriental, pasando por los mares Adriático, Egeo, Tirreno...y tanto en superficie como en sedimentos (Alvito *et al.*, 2018; Bainsi *et al.*, 2018; Caldwell *et al.*, 2019; Collignon *et al.*, 2012; Constantino *et al.*, 2019; García-Rivera *et al.*, 2017; Gomiero *et al.*, 2017).

De igual manera, la presencia de plásticos, sobretodo microplásticos ha sido detectada en multitud de diferentes especies de animales marinos, desde grandes cetáceos y tiburones hasta pequeños organismos planctónicos y gran variedad de especies de peces como los salmonetes (*Mullus sp.*), sardinas (*Sardina pilchardus*) y merluzas (*Merluccius merluccius*), no siempre causando la muerte del individuo pero si daños en el sistema digestivo (Alexiadou *et al.*, 2019; Bernardini *et al.*, 2018; Cole *et al.*, 2016; Giani *et al.*, 2019; Rodríguez-Romeu *et al.*, 2020)

Los escenarios generados representan una pequeña fracción de la multitud de posibilidades que ofrece el modelo. Se ha optado por generar escenarios en base a variaciones de las tasas de mala gestión de los residuos plásticos y a los efectos que tendría el invertir esfuerzos en la limpieza de los macroplásticos del agua; también se ha optado por generar un escenario en la que la situación actual se mantenga constante, sin cambios de ningún tipo.

En todos los casos, se necesita cierto margen de tiempo desde que se aplica la medida de gestión hasta que es posible ver los efectos reales sobre el ecosistema marino, principalmente debido a las necesidades técnicas y de logística necesarias para adaptar todo el proceso y debido a la vida útil de los plásticos.

Como se puede observar en la figura 5.2, no todos los productos de plástico tienen la misma vida útil, por tanto, algunas de las medidas de gestión que se adopten no se pueden aplicar sobre los plásticos que ya están en circulación, sino que se aplican sobre los que entran en el mercado por primera vez. Por tanto, se necesita un período de tiempo para que los productos plásticos previos a la entrada en vigor de las nuevas medidas de gestión agoten su vida útil y el mercado pase a estar manejado al cien por cien bajo las nuevas medidas propuestas, y entonces es cuando empezarán a verse los efectos de la nueva gestión (Geyer *et al.*, 2017).

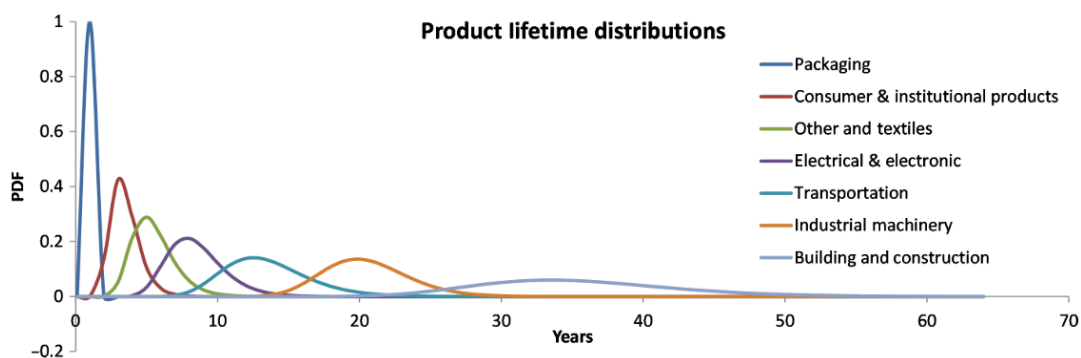


Figura 5.2. Vida útil de distintos tipos de productos plásticos. PDF: funciones de distribución de probabilidad log-normal. Fuente: Geyer *et al.*, 2017

## 5.2 Escenarios

La cantidad de macroplásticos y microplásticos que llega al mar Mediterráneo cada año continuará en aumento si no se toman medidas de gestión más eficientes que las actuales, como se demuestra en el escenario 1. Como muestra la figura 4.3, si se lograra reducir la mala gestión de los residuos plásticos, la cantidad de macroplásticos y microplásticos disminuiría considerablemente, aunque en menor medida que las que habría con la tasa actual de que 20% de los residuos son mal gestionados, pero mantendrían una tendencia al crecimiento, tanto los que están presentes en el agua como los que se encuentran en el sedimento de los fondos marinos.

Éstos últimos, particularmente los microplásticos en sedimento, se mantienen en todo momento siendo superiores al resto, es decir, según los resultados obtenidos la cantidad de microplásticos en el sedimento del mar Mediterráneo es mayor a la cantidad de microplásticos en el agua y a la cantidad de macroplásticos en el agua y en el sedimento (ver figura 4.2 y 4.3). Estos resultados se justifican en base al hecho de que la entrada directa al sedimento es mucho más elevada que los microplásticos que, al llegar al mar, se quedan en el agua debido a su baja densidad (tabla 3.2); y por otro lado, estos resultados también se deben a que los fondos marinos actúan como sumideros, o sea, cómo destino final de los plásticos que se encuentran en el mar gracias al efecto del biofouling y de las tasas de fragmentación de los macroplásticos que ya se encuentran en el fondo (Woodall *et al.*, 2014). Además, el tipo de degradación que éstos poseen, aspecto que no ha sido incorporado en este modelo, hacen que tarden siglos en desaparecer por completo del ecosistema y, por tanto, que los microplásticos se acumulen más rápidamente de lo que se degradan.

Por otro lado, en el escenario 3 se observa el fenómeno de que si se invirtieran esfuerzos en retirar un porcentaje de macroplásticos del agua, no se vería ninguna mejoría en los macroplásticos en el sedimento y apenas se reducirían los microplásticos tanto en agua como en sedimento, como se puede observar en la figura 4.4. La ligera reducción de microplásticos es debida, primeramente, a que la fuente de entrada de microplásticos directa al mar sigue siendo constante y, en segundo lugar a la lentitud de las tasas de fragmentación de los macroplásticos. Por tanto, sería necesario un gran espacio de tiempo para poder observar cambios más significativos en la cantidad de microplásticos.

En cuanto a la contaminación de plásticos en las playas debida a los macroplásticos que retornan a éstas desde el agua, se observa en el escenario 2 que la disminución de las tasas de mala gestión, es decir, el aumento en la buena gestión de los residuos plásticos, sí que influye de manera beneficiosa, manteniendo la tendencia al alza pero disminuyendo proporcionalmente la cantidad de macroplásticos que varan en las playas en función a la mejora de la gestión tomada. No obstante, el escenario 3 indica que los esfuerzos en retirar macroplásticos del agua no influye en los macroplásticos que llegan a las playas, ya que Liubartseva *et al* (2018) establece que la tasa de macroplásticos que varan en la playa es aproximadamente nueve veces superior a la tasa de macroplásticos que va al sedimento, por tanto, es una tasa tan elevada que los cambios propuestos en este estudio respecto a la cantidad de macroplásticos en el agua no afectan de manera significativa.

Finalmente, la interacción de la fauna marina con los microplásticos y macroplásticos presentes en el ecosistema, se verá afectada también en función de los cambios que se realicen en la gestión de los residuos plásticos y los esfuerzos de limpieza.

Como indica el escenario 1, si no se toman medidas para controlar la llegada de los plásticos al mar Mediterráneo, los enredos de la fauna con macroplásticos así como la ingesta de macro y microplásticos, irán creciendo año a año, particularmente la ingesta de microplásticos será siempre más relevante que la de los macroplásticos. Si se aplicaran las medidas expuestas en el escenario 2 y 3, estas interacciones disminuirían significativamente, pero aun así continuarían en crecimiento a lo largo de los años estando siempre la ingesta de microplásticos por encima de la ingesta de macroplásticos y los enredos.

Esta particularidad se explica con la característica de las dimensiones de los plásticos, es decir, un macroplásticos debido su tamaño, solamente podrá ser ingerido por animales de medio-gran

tamaño, como cetáceos, tortugas, tiburones, túnidos... mientras que los microplásticos, debido a su pequeño tamaño, pueden ser ingeridos por un abanico de especies mayor en la que se incluirían sedimentívoros, suspensívoros, filtradores, pequeños pelágicos, etc. Si se realiza una búsqueda bibliográfica se puede encontrar fácilmente investigaciones en este campo que encuentran una media de microplásticos de entorno a 1 o 2 ítems por individuo mientras que la media de macroplásticos por individuo se sitúa alrededor del 0,5 ítem (Alexiadou *et al.*, 2019; Giani *et al.*, 2019; Mancía *et al.*, 2020). Por tanto, aunque 0,5 ítems de macroplástico puedan pesar más que varios ítems de microplásticos, si se observara el problema en conjunto, los microplásticos, al ser más ubicuos en la cadena trófica, tienen más peso que los macroplásticos, los cuales sólo afectan a la parte superior de ésta. Además, según Cole *et al* (2016) la fragmentación de los microplásticos a nanoplásticos aumenta las probabilidades de que el zooplancton los confunda por alimento. Por lo tanto, si se realizara una ruta de influencia del plástico en la cadena trófica, sería perfectamente plausible retroceder hasta el escalón de los organismos unicelulares y/o microscópicos que pululan por los océanos. Hay que tener en cuenta que, una entrada tan temprana en la cadena trófica provoca que los animales superiores puedan llegar a contener grandes cantidades de microplásticos y/o nanoplásticos en su organismo debido a su carácter bioacumulativo (Ivar do Sul y Costa, 2014). Incluso, algunos estudios señalan el peligro para el ser humano debido al potencial de acumulación de plásticos que tienen mariscos comerciales como el mejillón *Mytilus edulis* o la ostra *Spondylus spinosus* (Llorca *et al.*, 2020).

### 5.3 Propuestas para mejorar el problema de la contaminación

Una mejora de la infraestructura y tecnología de las estaciones depuradoras de aguas residuales (EDAR) permitiría una retención y eliminación mayor de los microplásticos. Akarsu *et al* (2020) determinaron que únicamente las 3 EDARs que ellos estudiaron vertían más de 100 000 millones de microplásticos al año, por tanto tomar medidas en este ámbito reduciría notablemente la cantidad de microplásticos que acaba en el flujo de salida de dichas estaciones, y por tanto de entrada al mar.

También, se pueden implementar sencillas y baratas medidas para retener la basura que viaja los flujos de escorrentía que no llegan a las EDAR y son vertidos a la naturaleza. Un buen ejemplo de ello es la medida llevada a cabo en la ciudad de Kwinana, en Australia. En esta ciudad decidieron colocar redes a la salida de los tubos de desagüe de la ciudad (figura 5.3), los cuales recogen la escorrentía y distintos vertidos que no llegan a las EDAR de la zona. De esta forma, lograron retener toda la basura, principalmente plásticos, que viajan en ese flujo de agua, impidiendo de esta forma tan sencilla y barata que terminaran contaminando la naturaleza adyacente a la ciudad.



Figura 5.3. Red colocada en la boca de salida de una tubería de drenaje de la ciudad australiana de Kwinana. Fuente: Ecoinventos, 2020

En cuanto a lograr la reducción de RSU plásticos per cápita, la mejor forma sería la concienciación ciudadana. Realizar tareas de limpieza de la naturaleza, como playas, puertos, montañas, etc, donde se implique de manera activa a la población; actividades de concienciación en escuelas;

ofrecer facilidades y alternativas económicas a los habitantes para que abandonen el uso de plásticos, principalmente los de un solo uso, pueden ser algunas de las medidas que logren concienciar a la población y por tanto reducir la generación doméstica de basuras plásticas.

Con la futura entrada en vigor de la ley europea que prohibirá la venta de plásticos de un solo uso, se espera disminuir en gran medida la generación de RSU plástico per cápita, forzando al consumidor a buscar alternativas (Unión Europea, 2019).

Alternativas como el uso de envases de silicona, pajitas de papel o acero, bolsas de tela, productos de higiene libres de plásticos como cepillos de dientes de bambú o exfoliantes sin microesferas; ya están disponibles en el mercado y proporcionan una alternativa libre de plásticos para productos de uso diario.

Además, cada vez el mercado se está inundando más con inventos que buscan la limpieza de las aguas. Por ejemplo, la compañía tecnológica RanMarine Technology, creó un robot marino autónomo llamado Waste Shark (tiburón de basura), que es capaz de recoger 500 kg de los residuos flotantes, principalmente plásticos, de ríos y puertos, ayudando así en las tareas de limpieza (RanMarine Technology, 2019). También están disponibles en el mercado, gracias al Sea Bin Project 2020 (Proyecto de papeleras marinas), una serie de dispositivos que se instalan en el agua de zonas portuarias que actúan como papeleras, creando un flujo de agua hacia estos dispositivos y reteniendo el plástico en ellos (ver figura 5.4).



Figura 5.4. Izquierda: robot Waste Shark. Fuente: Ran Marine Technology. Derecha: papeleras marinas del proyecto Sea Bin. Fuente: Sea Bin Project.

La concienciación ciudadana junto con la ciencia forman un arma muy poderosa para la lucha de los diferentes problemas a los que se enfrentan los ecosistemas, tanto marinos como terrestres. Es un proceso a medio-largo plazo, que conlleva un esfuerzo conjunto de la ciencia, la administración y la población para alcanzar un objetivo común, la salud de nuestros océanos, de los cuales depende la salud de todo nuestro planeta.

## 6. Conclusión

- Las actividades de limpieza de plásticos del ecosistema no tienen una influencia significativa en los efectos de la contaminación por plásticos. No obstante, es una buena herramienta de concienciación y educación medio ambiental.
- Es más efectivo actuar en los primeros pasos del proceso, es decir, trabajar en medidas y acciones que reduzcan la generación de residuos plásticos y mejoren los procesos de gestión de los residuos.
- De no tomar medidas más severas que las actuales contra la contaminación, el problema continuará haciéndose más grande, con el consecuente impacto en el ecosistema.
- Es necesario mejorar y estandarizar los procedimientos científicos en este campo de investigación para obtener mejores datos y, por tanto, una visión lo más cercana a la realidad posible. Mejores datos implica mejor gestión del problema.

## 7. Bibliografía

Agencia Europea del Medio Ambiente. Marine Litter Watch. Extraída de: <https://www.eea.europa.eu/themes/water/europes-seas-and-coasts/assessments/marine-litterwatch> (Consultado el 7 de noviembre de 2020).

Aguilar, R., Marín, P., Álvarez, H., Blanco J., Sánchez, N. (2019) Plástico en las profundidades: Un problema invisible. Los fondos marinos, convertidos en trampas de plástico. *Oceana*, Madrid, 24 pp. <https://doi.org/10.5281/zenodo.3944737>

Akarsu, A., Kumbur, C., Gökdağ, H., Kıdeyş, k., A. E., & Sanchez-Vidal, A. (2020). Microplastics composition and load from three wastewater treatment plants discharging into Mersin Bay, north eastern Mediterranean Sea. *Marine Pollution Bulletin*, 150(November). <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2019.110776>

Alessi, E., & Di Carlo, G. (2018). Una trampa de plástico. *World Wildlife Fund*, 3–25. Retrieved from [https://d80g3k8vowjyp.cloudfront.net/downloads/wwf\\_trampa\\_plasticook.pdf](https://d80g3k8vowjyp.cloudfront.net/downloads/wwf_trampa_plasticook.pdf)

Alexiadou, P., Foskolos, I., & Frantzis, A. (2019). Ingestion of macroplastics by odontocetes of the Greek Seas, Eastern Mediterranean: Often deadly! *Marine Pollution Bulletin*, 146(May), 67–75. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2019.05.055>

Alimba, C. G., & Faggio, C. (2019). Microplastics in the marine environment: Current trends in environmental pollution and mechanisms of toxicological profile. *Environmental Toxicology and Pharmacology*, 68(December 2018), 61–74. <https://doi.org/10.1016/j.etap.2019.03.001>

Alvito, A., Bellodi, A., Cau, A., Moccia, D., Mulas, A., Palmas, F., Pesci, P., Follesa, M. C. (2018). Amount and distribution of benthic marine litter along Sardinian fishing grounds (CW Mediterranean Sea). *Waste Management*, 75, 131–140. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2018.02.026>

Andrady, A. L. (2011). Microplastics in the marine environment. *Marine Pollution Bulletin*, 62(8), 1596–1605. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2011.05.030>

Baini, M., Fossi, M. C., Galli, M., Caliani, I., Campani, T., Finoia, M. G., & Panti, C. (2018). Abundance and characterization of microplastics in the coastal waters of Tuscany (Italy): The application of the MSFD monitoring protocol in the Mediterranean Sea. *Marine Pollution Bulletin*, 133(June), 543–552. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2018.06.016>

Bayo, I. F., Pozo, E. D., dan Fuertes, J. (2018). The Plastic in the Mediterranean Sea, 1–46.

Bernardini, I., Garibaldi, F., Canesi, L., Fossi, M. C., & Baini, M. (2018). First data on plastic ingestion by blue sharks (*Prionace glauca*) from the Ligurian Sea (North-Western Mediterranean Sea). *Marine Pollution Bulletin*, 135(July), 303–310. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2018.07.022>

Brown, J., & Macfadyen, G. (2007). Ghost fishing in European waters: Impacts and management responses. *Marine Policy*, 31(4), 488–504. <https://doi.org/10.1016/j.marpol.2006.10.007>

Caldwell, J., Petri-Fink, A., Rothen-Rutishauser, B., & Lehner, R. (2019). Assessing meso- and microplastic pollution in the Ligurian and Tyrrhenian Seas. *Marine Pollution Bulletin*, 149(October), 110572. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2019.110572>

Chen, L. L., Tseng, C. H., & Tseng, W. J. (2018). Development of a system dynamics model for polycyclic aromatic hydrocarbons and its application to assess the benefits of pollution reduction. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 166(September), 231–236. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2018.09.072>



- Cincinelli, A., Martellini, T., Guerranti, C., Scopetani, C., Chelazzi, D., & Giarrizzo, T. (2019). A potpourri of microplastics in the sea surface and water column of the Mediterranean Sea. *TrAC - Trends in Analytical Chemistry*, 110, 321–326. <https://doi.org/10.1016/j.trac.2018.10.026>
- Čižmek, H., Čolić, B., Gračan, R., Grau, A., & Catanese, G. (2020). An emergency situation for pen shells in the Mediterranean: The Adriatic Sea, one of the last *Pinna nobilis* shelters, is now affected by a mass mortality event. *Journal of Invertebrate Pathology*, 173(April), 1–5. <https://doi.org/10.1016/j.jip.2020.107388>
- Cole, M., Lindeque, P. K., Fileman, E., Clark, J., Lewis, C., Halsband, C., & Galloway, T. S. (2016). Microplastics Alter the Properties and Sinking Rates of Zooplankton Faecal Pellets. *Environmental Science and Technology*, 50(6), 3239–3246. <https://doi.org/10.1021/acs.est.5b05905>
- Cole, M., Lindeque, P., Halsband, C., & Galloway, T. S. (2011). Microplastics as contaminants in the marine environment: A review. *Marine Pollution Bulletin*, 62(12), 2588–2597. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2011.09.025>
- Coll-Calvo, E., Barría, C., Recasens, L., & Navarro, J. (2020). Feeding ecology of a Mediterranean endemic mesopredator living in highly exploited ecosystems. *Marine Environmental Research*, 157(February), 104932. <https://doi.org/10.1016/j.marenvres.2020.104932>
- Collignon, A., Hecq, J. H., Glagani, F., Voisin, P., Collard, F., & Goffart, A. (2012). Neustonic microplastic and zooplankton in the North Western Mediterranean Sea. *Marine Pollution Bulletin*, 64(4), 861–864. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2012.01.011>
- Conferencia “Our Ocean”. Final Report. 5 y 6 de octubre de 2017. Malta
- Consoli, P., Romeo, T., Angiolillo, M., Canese, S., Esposito, V., Salvati, E., Scotti, G., Adaloro, F., Tunesi, L. (2019). Marine litter from fishery activities in the Western Mediterranean sea: The impact of entanglement on marine animal forests. *Environmental Pollution*, 249, 472–481. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2019.03.072>
- Constant, M., Kerhervé, P., Mino-Vercellio-Verollet, M., Dumontier, M., Sánchez Vidal, A., Canals, M., & Heussner, S. (2019). Beached microplastics in the Northwestern Mediterranean Sea. *Marine Pollution Bulletin*, 142(July 2018), 263–273. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2019.03.032>
- Constantino, E., Martins, I., Salazar Sierra, J. M., & Bessa, F. (2019). Abundance and composition of floating marine macro litter on the eastern sector of the Mediterranean Sea. *Marine Pollution Bulletin*, 138(August 2018), 260–265. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2018.11.008>
- Costanza, R., & Gottlieb, S. (1998). Modelling ecological and economic systems with STELLA: Part II. *Ecological Modelling*, 112(2–3), 81–84. [https://doi.org/10.1016/S0304-3800\(98\)00073-8](https://doi.org/10.1016/S0304-3800(98)00073-8)
- Convenio internacional para prevenir la contaminación por los buques (MARPOL) 1973. Organización Marítima Internacional. Extraído de: [https://www.imo.org/es/About/Conventions/Paginas/International-Convention-for-the-Prevention-of-Pollution-from-Ships-\(MARPOL\).aspx](https://www.imo.org/es/About/Conventions/Paginas/International-Convention-for-the-Prevention-of-Pollution-from-Ships-(MARPOL).aspx) (Consultado el 7 de noviembre de 2020)
- Cózar, A., Echevarría, F., González-Gordillo, J. I., Irigoien, X., Úbeda, B., Hernández-León, S., ... Duarte, C. M. (2014). Plastic debris in the open ocean. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 111(28), 10239–10244. <https://doi.org/10.1073/pnas.1314705111>
- de Haan, W. P., Sanchez-Vidal, A., & Canals, M. (2019). Floating microplastics and aggregate formation in the Western Mediterranean Sea. *Marine Pollution Bulletin*, 140(January), 523–535. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2019.01.053>
- Ebbesmeyer, C. C., & Ingraham Jr, W. J. (1994). Pacific toy spill fuels ocean current pathways research. *Eos, Transactions American Geophysical Union*, 75(37), 425-430

Ecoinventos (2020). Simple y eficiente. Las redes de drenaje de Kwinana recogen 370 kg de basura. Extraído de: <https://ecoinventos.com/redes-de-drenaje-de-kwinana/> (Consultado el 24 de noviembre de 2020)

Ehrenpreis, E. D., & Smith, D. G. (2018). Patients with newly diagnosed cervical cancer should be screened for anal human papilloma virus and anal dysplasia: Results of a pilot study using a STELLA computer simulation and economic model. *Papillomavirus Research*, 5(June 2017), 38–45. <https://doi.org/10.1016/j.pvr.2017.12.001>

El temporal Gloria devuelve plásticos de hace 40 años (28 de enero de 2020). *El Mundo*. Extraído de: <https://www.elmundo.es/ciencia-y-salud/ciencia/2020/01/28/5e301852fc6c83264c8b4624.html> (Consultado el 19 de noviembre de 2020)

Eriksen, M., Lebreton, L. C. M., Carson, H. S., Thiel, M., Moore, C. J., Borerro, J. C., Galgani, F., Ryan, P., Reisser, J. (2014). Plastic Pollution in the World's Oceans: More than 5 Trillion Plastic Pieces Weighing over 250,000 Tons Afloat at Sea. *PLoS ONE*, 9(12), e111913. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0111913>

European Commission. (2018). Changing the way we use plastics, 4. <https://doi.org/10.2779/768741>

European Commission. (2013). MSDF Guidance on Monitoring Marine Litter. <https://doi.org/10.2788/99475>

Fang, J., Lau, C. K. M., Lu, Z., & Wu, W. (2018). Estimating Peak uranium production in China – Based on a Stella model. *Energy Policy*, 120(March), 250–258. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2018.05.049>

Ferreira, M., Thompson, J., Paris, A., Rohindra, D., & Rico, C. (2020). Presence of microplastics in water, sediments and fish species in an urban coastal environment of Fiji, a Pacific small island developing state. *Marine Pollution Bulletin*, 153(February), 110991. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2020.110991>

Fok, L., Cheung, P. K., Tang, G., & Li, W. C. (2017). Size distribution of stranded small plastic debris on the coast of Guangdong, South China. *Environmental Pollution*, 220, 407–412. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2016.09.079>

Frid, C. L., & Caswell, B. A. (2017). *Marine pollution*. Oxford University Press.

Gall, S. C., & Thompson, R. C. (2015). The impact of debris on marine life. *Marine Pollution Bulletin*, 92(1–2), 170–179. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2014.12.041>

Gapminder, HYDE (2016) and United Nations Population Division (2019). Extraído de: <https://ourworldindata.org/search?q=populaton> (Consultado el 11 de noviembre de 2020)

García-Rivera, S., Lizaso, J. L. S., & Millán, J. M. B. (2017). Composition, spatial distribution and sources of macro-marine litter on the Gulf of Alicante seafloor (Spanish Mediterranean). *Marine Pollution Bulletin*, 121(1–2), 249–259. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2017.06.022>

Gerigny, O., Brun, M., Fabri, M. C., Tomasino, C., Le Moigne, M., Jadaud, A., & Galgani, F. (2019). Seafloor litter from the continental shelf and canyons in French Mediterranean Water: Distribution, typologies and trends. *Marine Pollution Bulletin*, 146(July), 653–666. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2019.07.030>

GESAMP. (2015). Sources, fate and effects of MP in the marine environment. *Journal Series GESAMP Reports and Studies*, 90, 98. Retrieved from [www.imo.org](http://www.imo.org)

Geyer, R., Jambeck, J. R., & Law, K. L. (2017). Production, use, and fate of all plastics ever made. *Science Advances*, 3(7), 25–29. <https://doi.org/10.1126/sciadv.1700782>

- Giani, D., Bains, M., Galli, M., Casini, S., & Fossi, M. C. (2019). Microplastics occurrence in edible fish species (*Mullus barbatus* and *Merluccius merluccius*) collected in three different geographical sub-areas of the Mediterranean Sea. *Marine Pollution Bulletin*, 140 (July 2018), 129–137. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2019.01.005>
- Gobert, S., Lefebvre, L., Boissery, P., & Richir, J. (2020). A non-destructive method to assess the status of *Posidonia oceanica* meadows. *Ecological Indicators*, 119(April), 106838. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2020.106838>
- Gomiero, A., Strafella, P., & Fabi, G. (2019). From Macroplastic to Microplastic Litter: Occurrence, Composition, Source Identification and Interaction with Aquatic Organisms. Experiences from the Adriatic Sea. *Plastics in the Environment*. <https://doi.org/10.5772/intechopen.81534>
- Green, D. S., Boots, B., O'Connor, N. E., & Thompson, R. (2016). Microplastics affect the ecological functioning of an important biogenic habitat. *Environmental Science & Technology*, Submitted. <https://doi.org/10.1021/acs.est.6b04496>
- Grote, M., Mazurek, N., Gräbsch, C., Zeilinger, J., Le Floch, S., Wahrendorf, D. S., & Höfer, T. (2016). Dry bulk cargo shipping — An overlooked threat to the marine environment? *Marine Pollution Bulletin*, 110(1), 511–519. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2016.05.066>
- Hareide, N., Rihan, D., Mulligan, M., McMullen, P., Garnes, G., Clark, M., ... Humborstad, O. B. (2005). A preliminary Investigation on Shelf Edge and Deepwater Fixed Net Fisheries to the West and North of Great Britain , Ireland , 1–47.
- Ivar Do Sul, J. A., and Costa, M. F. (2014). The present and future of microplastic pollution in the marine environment. *Environmental Pollution*, 185, 352–364. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2013.10.036>
- Jambeck, J., Geyer, R., Wilcox, C., Siegler, T. R., Perryman, M., Andrady, A., Narayan, R., Law, K. L. (2015). Plastic waste inputs from land into ocean. *Science*, 347(6223), 3–6. <https://doi.org/10.1126/science.1260352>
- Kanhai, L. D. K., Officer, R., Lyashevskaya, O., Thompson, R. C., & O'Connor, I. (2016). Microplastic abundance, distribution and composition along a latitudinal gradient in the Atlantic Ocean. *Marine Pollution Bulletin*, 115, 307–314. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2016.12.025>
- Kaza, Silpa; Yao, Lisa C.; Bhada-Tata, Perinaz; Van Woerden, Frank. (2018). *What a Waste 2.0 : A Global Snapshot of Solid Waste Management to 2050*. Urban Development;. Washington, DC: World Bank. © World Bank. <https://openknowledge.worldbank.org/handle/10986/30317> License: CC BY 3.0 IGO
- Koelmans, A. A., Bakir, A., Burton, G. A., & Janssen, C. R. (2016). Microplastic as a Vector for Chemicals in the Aquatic Environment: Critical Review and Model-Supported Reinterpretation of Empirical Studies. *Environmental Science and Technology*, 50(7), 3315–3326. <https://doi.org/10.1021/acs.est.5b06069>
- Lebreton, L. C. M., Greer, S. D., & Borrero, J. C. (2012). Numerical modelling of floating debris in the world's oceans. *Marine Pollution Bulletin*, 64(3), 653–661. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2011.10.027>
- Llorca, M., Álvarez-Muñoz, D., Ábalos, M., Rodríguez-Mozaz, S., Santos, L. H. M. L. M., León, V. M., Farré, M. (2020). Microplastics in Mediterranean coastal area: toxicity and impact for the environment and human health. *Trends in Environmental Analytical Chemistry*, 27, e00090. <https://doi.org/10.1016/j.teac.2020.e00090>
- Li, Y., Zhang, H., & Tang, C. (2020). A review of possible pathways of marine microplastics transport in the ocean. *Anthropocene Coasts*, 3(1), 6–13. <https://doi.org/10.1139/anc-2018-0030>

- Lide, D. R. (2003). CRC Handbook of Chemistry and Physics, 84th Edition, 2003-2004. Handbook of Chemistry and Physics (Vol. 53). <https://doi.org/10.1136/oem.53.7.504>
- Liubartseva, S., Coppini, G., Lecci, R., & Clementi, E. (2018). Tracking plastics in the Mediterranean: 2D Lagrangian model. *Marine Pollution Bulletin*, 129(1), 151–162. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2018.02.019>
- Loulad, S., Houssa, R., Ouamari, N. EL, & Rhinane, H. (2019). Quantity and spatial distribution of seafloor marine debris in the Moroccan Mediterranean Sea. *Marine Pollution Bulletin*, 139(August 2018), 163–173. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2018.12.036>
- Lusher, A. L., Tirelli, V., O'Connor, I., & Officer, R. (2015). Microplastics in Arctic polar waters: the first reported values of particles in surface and sub-surface samples. *Scientific Reports*, 5(March 2016), 14947. <https://doi.org/10.1038/srep14947>
- Macfadyen, Graeme;Huntington, Tim;Cappell, R. (2009). Abandoned, lost or otherwise discarded fishing gear. *FAO Fisheries and Aquaculture Technical Paper 523* (Vol. 523). Retrieved from <http://www.unep.org/regionalseas/marinelitter/publications/default.asp>
- Mancia, A., Chenet, T., Bono, G., Geraci, M. L., Vaccaro, C., Munari, C., Mistri, M., Cavazzini, A., Pasti, L. (2020). Adverse effects of plastic ingestion on the Mediterranean small-spotted catshark (*Scyliorhinus canicula*). *Marine Environmental Research*, 155(January), 104876. <https://doi.org/10.1016/j.marenvres.2020.104876>
- Marín, V. H. (1997). A simple-biology, stage-structured population model of the spring dynamics of *Calanus chilensis* at Mejillones del Sur Bay, Chile. *Ecological Modelling*, 105(1), 65–82. [https://doi.org/10.1016/S0304-3800\(97\)00139-7](https://doi.org/10.1016/S0304-3800(97)00139-7)
- McIlgorm, A., Campbell, H. F., & Rule, M. J. (2011). The economic cost and control of marine debris damage in the Asia-Pacific region. *Ocean and Coastal Management*, 54(9), 643–651. <https://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2011.05.007>
- Mistri, M., Scoponi, M., Granata, T., Moruzzi, L., Massara, F., & Munari, C. (2020). Types, occurrence and distribution of microplastics in sediments from the northern Tyrrhenian Sea. *Marine Pollution Bulletin*, 153(February), 111016. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2020.111016>
- Moore, C. J. (2008). Synthetic polymers in the marine environment: A rapidly increasing, long-term threat. *Environmental Research*, 108(2), 131–139. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2008.07.025>
- Morris, R. J. (1980). Floating plastic debris in the Mediterranean. *Marine Pollution Bulletin*, 11(5), 125. [https://doi.org/10.1016/0025-326X\(80\)90073-9](https://doi.org/10.1016/0025-326X(80)90073-9)
- Murphy, F., Russell, M., Ewins, C., & Quinn, B. (2017). The uptake of macroplastic & microplastic by demersal & pelagic fish in the Northeast Atlantic around Scotland. *Marine Pollution Bulletin*, 122(1–2), 353–359. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2017.06.073>
- Mutlu, E., Özvarol, Y., Şahin, A., Duman, G. S., & Karaca, D. (2020). Macro litter distribution of the Turkish Mediterranean coasts dominated by pleasure crafts. *Marine Pollution Bulletin*, 151(October 2019). <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2019.110833>
- NOAA Marine Debris Program. Disponible en: <https://blog.marinedebris.noaa.gov/ditching-plastic-debris-our-feathered-friends-world-migratory-bird-day> (Consultado el 5 de Noviembre de 2020)
- Patten, B. C. (1997). Synthesis of chaos and sustainability in a nonstationary linear dynamic model of the American black bear (*Ursus americanus* Pallas) in the Adirondack Mountains of New York. *Ecological Modelling*, 100(1–3), 11–42. [https://doi.org/10.1016/S0304-3800\(97\)00154-3](https://doi.org/10.1016/S0304-3800(97)00154-3)
- Plastics Europe, 2019. *Plastics — the facts 2018. An analysis of European plastics production, demand and waste data.* <https://www.plasticseurope.org>. (2019). Plásticos – Situación en 2019. Plastic Europe.

Powers, V. (1993). A National Historic Chemical Landmark The Bakelizer. American Chemical Society National Historic Chemical Landmarks, 1–2. Retrieved from <https://www.acs.org/content/acs/en/education/whatischemistry/landmarks/bakelite.html#citation>

RanMarine Technology (2019). Waste Shark. Extraído de: <https://www.wasteshark.com> (Consultado el 24 de noviembre de 2020)

Renzi, M., Blašković, A., Bernardi, G., & Russo, G. F. (2018). Plastic litter transfer from sediments towards marine trophic webs: A case study on holothurians. *Marine Pollution Bulletin*, 135(July), 376–385. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2018.07.038>

Rodríguez-Romeu, O., Constenla, M., Carrassón, M., Campoy-Quiles, M., & Soler-Membrives, A. (2020). Are anthropogenic fibres a real problem for red mullets (*Mullus barbatus*) from the NW Mediterranean? *Science of the Total Environment*, 733, 139336. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.139336>

Savoca, S., Capillo, G., Mancuso, M., Bottari, T., Crupi, R., Branca, C., ... Spanò, N. (2019). Microplastics occurrence in the Tyrrhenian waters and in the gastrointestinal tract of two congener species of seabreams. *Environmental Toxicology and Pharmacology*, 67(January), 35–41. <https://doi.org/10.1016/j.etap.2019.01.011>

Schönlau, C., Karlsson, T. M., Rotander, A., Nilsson, H., Engwall, M., Bavel, B. Van, & Kärrman, A. (2020). Microplastics in sea-surface waters surrounding Sweden sampled by manta trawl and in-situ pump. *Marine Pollution Bulletin*, 153(October 2019), 111019. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2020.111019>

Scientific American. Disponible en: <https://www.scientificamerican.com/article/from-fish-to-humans-a-microplastic-invasion-may-be-taking-a-toll/> (Consultado el 5 de Noviembre 2020)

Soto-Navarro, J., Jordá, G., Deudero, S., Alomar, C., Amores, Á., & Compa, M. (2020). 3D hotspots of marine litter in the Mediterranean: A modeling study. *Marine Pollution Bulletin*, 155(February), 111159. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2020.111159>

ten Brink, P., Schweitzer, J. P., Watkins, E., & Howe, M. (2016). *Plastics Marine Litter and the Circular Economy*. Institute for European Environmental Policy for the MAVA Foundation, (October), 1–17.

Thompson, R. C. (2006). Plastic debris in the marine environment: consequences and solutions. In: Krause, J.C., Nordheim, H., Bräger, S. (Eds.), *Marine Nature Conservation in Europe*. Federal Agency for Nature Conservation, Stralsund, Germany., *Marine Nature Conservation in Europe*, (May 2006), 107–116. Retrieved from [https://www.bfn.de/fileadmin/MDB/documents/themen/meeresundkuestenschutz/downloads/Fachtagungen/Marine-Nature-Conservation-2006/Proceedings-Marine\\_Nature\\_Conservation\\_in\\_Europe\\_2006.pdf](https://www.bfn.de/fileadmin/MDB/documents/themen/meeresundkuestenschutz/downloads/Fachtagungen/Marine-Nature-Conservation-2006/Proceedings-Marine_Nature_Conservation_in_Europe_2006.pdf)

Tsangaris, C., Digka, N., Valente, T., Aguilar, A., Borrell, A., de Lucia, G. A., ... Matiddi, M. (2020). Using Boops boops (osteichthyes) to assess microplastic ingestion in the Mediterranean Sea. *Marine Pollution Bulletin*, 158(March), 111397. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2020.111397>

UNCTAD. (2019). Informe Sobre El Transporte Marítimo 2019. Unctad.

UNEP/MAP (2015) *Marine Litter Assessment in the Mediterranean*. Technical Report. United Nations Environment Program (2015)

Unión Europea. Directiva (UE) 2019/904 del Parlamento Europeo y del Consejo, de 5 de junio de 2019, relativa a la reducción del impacto de determinados productos de plástico en el medio ambiente (Diario Oficial de la Unión Europea L 155/1, 12 de junio de 2019, pp. 1-19)

U.S. National Park Service; Mote Marine Lab, Sarasota, FL; National Oceanic and Atmospheric Administration Marine Debris Program

van Wijnen, J., Ragas, A. M. J., & Kroeze, C. (2019). Modelling global river export of microplastics to the marine environment: Sources and future trends. *Science of the Total Environment*, 673, 392–401. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.04.078>

Vargas, M., García, M., Moya, F., Tel, E., Parrilla G., Lavín A. (2007). Cambio climático en el Mediterráneo español. Retrieved from <http://scholar.google.com/scholar?hl=en&btnG=Search&q=intitle:Cambio+climático+en+el+Mediterráneo+español#0>

Walker, T. R., Grant, J., & Archambault, M. C. (2006). Accumulation of marine debris on an intertidal beach in an urban park (Halifax Harbour, Nova Scotia). *Water Quality Research Journal of Canada*, 41(3), 256–262. <https://doi.org/10.2166/wqrj.2006.029>

Walkinshaw, C., Lindeque, P. K., Thompson, R., Tolhurst, T., & Cole, M. (2020). Microplastics and seafood: lower trophic organisms at highest risk of contamination. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 190(December 2019), 110066. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2019.110066>

Weinstein, J. E., Crocker, B. K., & Gray, A. D. (2016). From macroplastic to microplastic: Degradation of high-density polyethylene, polypropylene, and polystyrene in a salt marsh habitat. *Environmental Toxicology and Chemistry*, 35(7), 1632–1640. <https://doi.org/10.1002/etc.3432>

Woodall, L. C., Sanchez-Vidal, A., Canals, M., Paterson, G. L. J., Coppock, R., Sleight, V., ... Thompson, R. C. (2014). The deep sea is a major sink for microplastic debris. *Royal Society Open Science*, 1(4). <https://doi.org/10.1098/rsos.140317>

World Animal Protection. (2014). Fishing 's phantom menace endangering our sea life.

World Shipping Council (2020). Containers Lost At Sea – 2020 Update, 4–7.

Worm, B., Lotze, H. K., Jubinville, I., Wilcox, C., & Jambeck, J. (2017). Plastic as a Persistent Marine Pollutant. *Annual Review of Environment and Resources*, 42, 1–26. <https://doi.org/10.1146/annurev-environ-102016-060700>

WWF. (2019). Stop the Flood of Plastic: How Mediterranean countries can save their sea, 46.

WWF.(2018).The lifecycle of plastics. Extraído de: <https://www.wwf.org.au/news/blogs/the-lifecycle-of-plastics#gs.m1ozm4> (Consultado el 21 de noviembre de 2020).

## 8. Anexo I

### CÁLCULOS PARA OBTENER EL FLUJO DE MICROPLÁSTICOS POR PÉRDIDA DE MERCANCÍA:

Tasa de pérdida de mercancía: 0,0028 (tabla 3.1)

En el año 2019 se perdieron 1382 contenedores en el mundo (World Shipping Council, 2020), si por el mar Mediterráneo pasa el 30% del tráfico marítimo (UNEP, 2015) , en el mar Mediterráneo se perdieron 414 contenedores en el 2019.

El volumen medio de un contenedor estándar es de 59 m<sup>3</sup> (World Shipping Council, 2020), la la densidad media del plástico es de 65 kg/m<sup>3</sup> (Lide, 2003). Por tanto, la cantidad de toneladas que lleva un contenedor es de  $(65 \cdot 59) / 1000 = 3,835$  toneladas.

Si se perdieron 414 contenedores, en el 2019 se perdieron 1587 toneladas de plásticos  $(414 \cdot 3,835)$ .

El software STELLA® determina que un flujo es igual a la tasa por el stock, por tanto el flujo de microplásticos por pérdida de mercancía es de:  $1587 \cdot 0,0028 =$  **4,4 toneladas/año de microplásticos.**

### CÁLCULOS PARA OBTENER EL FLUJO DE MACROPLÁSTICOS POR PÉRDIDA DE MERCANCÍA:

Tasa de pérdida de mercancía: 0,0014 (tabla 3.1)

Siguiendo el mismo razonamiento que para calcular el flujo de microplásticos por pérdida de mercancías, se obtiene que en el año 2019 se perdieron 1587 toneladas

El software STELLA® determina que un flujo es igual a la tasa por el stock, por tanto el flujo de microplásticos por pérdida de mercancía es de:  $1587 \cdot 0,0014 =$  **2,2 toneladas/año de macroplásticos.**

### CÁLCULOS PARA OBTENER EL FLUJO DE MACROPLÁSTICOS QUE SE ORIGINAN POR VERTIDOS DE PESCA:

Según Liubartseva et al (2018) se vierten en el mar Mediterráneo 20 000 toneladas al año de parte de las embarcaciones, Andrady (2011) dice que el 18% de los residuos de origen marino provienen de la pesca.

Entonces el flujo de macroplásticos de origen pesquero es de: **3 600 toneladas/año.**

### CÁLCULOS PARA DETERMINAR EL STOCK DE MACROPLÁSTICOS EN SEDIMENTO:

Se realiza una búsqueda bibliográfica de macroplásticos en sedimento y se obtienen los siguientes datos:

- Garcia-Rivera et al (2017): 0-11 600 g/km<sup>2</sup>
- Mutlu et al (2020): 50-68 000 g/km<sup>2</sup>
- Gerigny et al (2019): 9180 g/km<sup>2</sup>
- Alvito et al (2018): 7350 g/km<sup>2</sup>
- Loulad et al (2019) 26 000-80 000 g/km<sup>2</sup>

Se realiza un promedio tomando un valor medio para aquellos que aporten un rango de datos y se obtiene: 8265 g/km<sup>2</sup>.

Se transforma a toneladas y se multiplica por la superficie total del mar Mediterráneo: (8265/1000000)\*2510000. De tal manera que se obtiene que en el sedimento del mar Mediterráneo hay **20 745 toneladas** de macroplásticos.

### CÁLCULOS PARA DETERMINAR EL STOCK DE MICROPLÁSTICOS EN SEDIMENTO:

Se realiza una búsqueda bibliográfica de macroplásticos en sedimento y se obtienen los siguientes datos:

- Mistri et al (2020): 158 000 g/km<sup>2</sup>

No se pueden obtener más datos debido a la escasez de investigaciones que publiquen sus resultados en masa/superficie.

Se realiza el mismo proceso que para macroplásticos, es decir, se transforma a toneladas y se multiplica por la superficie total del mar Mediterráneo: (158000/1000000)\*2510000. De tal manera que se obtiene que en el sedimento del mar Mediterráneo hay **396 580 toneladas** de microplásticos.