



Plastiglomerados, piropásticos, plasticostras y antropoquinas: ¿nuevas rocas en el registro sedimentario?

Plastiglomerates, pyroplastics, plasticrusts and anthropoquinas: New rocks in the sedimentary record?



Trabajo de Fin de Grado

Laura González Méndez

Tutorizado por Javier Hernández Borges y María Candelaria Martín Luis.

Grado en Biología. Julio 2021.

Índice

Resumen.....	1
Summary	1
1. Glosario de términos.....	2
2. Introducción.....	3
3. Objetivo	4
4. Metodología para la búsqueda bibliográfica.....	4
5. Los plásticos	5
5.1. Degradación de los plásticos en el medioambiente.....	7
5.2. Métodos de identificación	8
5.3. Algunos efectos nocivos de los plásticos en el medio litoral	9
6. El ciclo biogeoquímico del plástico y el Antropoceno.....	11
7. Nuevas formaciones plásticas.....	13
7.1. Plastiglomerados	15
7.2. Piroplásticos	17
7.3. Plasticostras	19
7.4. Antropoquinas	21
7.5. Algunos ejemplos en Canarias	23
8. Conclusiones.....	25
9. Conclusions.....	26
10. Bibliografía	27

Resumen

La contaminación por plásticos y microplásticos, constituye uno de los problemas ambientales más preocupantes en la actualidad. De hecho, la huella antropogénica que estamos dejando en el planeta es de tal magnitud que ha llevado a diversos científicos a emplear el aún discutido término del “Antropoceno” para referirse a la época actual en la que vivimos. Además, se han identificado cuatro nuevos tipos de formaciones plásticas en los medios litorales que hasta ahora habían pasado desapercibidos, los plastiglomerados, las plasticostras, los piropásticos y las antropoquinas. Se trata de un fenómeno muy reciente del que aún queda mucho por estudiar, pero se conoce que su formación se debe a la llegada de residuos plásticos a los ambientes marinos, en los que son sometidos a diferentes condiciones tanto ambientales como antropogénicas, que les otorgan nuevas características respecto a su composición y sus propiedades fisicoquímicas. Esto hace que los impactos que éstos provoquen en los ecosistemas sean potencialmente diferentes de los provocados por los contaminantes plásticos hasta ahora conocidos y estudiados. Por lo tanto, queda mucho por investigar acerca de estos nuevos contaminantes, así como el determinar una metodología de estudio y muestreo estandarizada para cada una de estas formaciones.

Palabras clave: “plastiglomerados”, “piropásticos”, “plasticostras”, “antropoquinas”

Summary

Pollution due to plastics and microplastics is one of the most worrying environmental problems today. In fact, the anthropogenic footprint that we are leaving on the planet is of such magnitude that it has led various scientists to use the still disputed term “Anthropocene” to refer to the current time in which we live. In addition, four new types of plastic formations have been identified in coastal environments that until now had gone unnoticed: plastiglomerates, plasticrusts, pyroplastics and anthropoquinas. It is a very recent phenomenon about which there is still much to study, but it is known that its formation is due to the arrival of plastic waste to marine environments, in which they are submitted to different environmental and anthropogenic conditions, which give them new characteristics regarding composition and physicochemical properties. This means that the impacts they will cause on the ecosystems are potentially different from those caused by plastic pollutants so far known and studied. Therefore, much remains to be investigated about these new pollutants, as well as determining a standardized study and sampling methodology for each of these formations.

Key words: “plastiglomerates”, “pyroplastics”, “plasticrusts”, “anthropoquinas”

1. Glosario de términos

AIS: especies exóticas invasoras (*alien invasive species*)

BPA: Bisfenol A

COP: Contaminantes orgánicos persistentes

DMS: Dimetilsulfuro

FTIR: Espectroscopía infrarroja por transformada de Fourier

HD-PE: Polietileno de alta densidad

ISO: Organización Internacional para la Normalización

LD-PE: Polietileno de baja densidad

PCB: Bifenilo policlorado

PE: Polietileno

PET: Tereftalato de polietileno

PP: Polipropileno

PS: Poliestireno

PVC: Cloruro de polivinilo

PyrGC-MS: Pirólisis acoplada a cromatografía de gases y espectrometría de masas

XRF: Espectrometría de fluorescencia de rayos X

2. Introducción

Desde hace pocos años, diversos autores han informado acerca de la presencia de nuevos tipos de formaciones plásticas en los medios litorales de diferentes lugares del mundo como resultado de la interacción entre residuos plásticos y otros elementos del medioambiente, como maderas, arena, sedimentos y diferentes materiales orgánicos, además de, en algunos casos, la intervención de procesos antropogénicos, como puede ser la quema de residuos. Todo esto ha resultado en la formación de cuatro nuevos tipos de contaminantes plásticos, los plastiglomerados, los piropásticos, las plasticostas y las antropoquinas, cuyo significado e implicaciones ecológicas aún se desconocen.

Dado que estos términos han sido acuñados muy recientemente, los estudios realizados hasta ahora, además de ser escasos, se han limitado solo a informar de su presencia y a caracterizarlos. Aún no se han evaluado los potenciales impactos de estas nuevas formas de contaminación plástica, y solo algunos de los estudios han incluido un análisis por espectroscopía infrarroja por transformada de Fourier (FTIR) para conocer la composición química de dichos plásticos.

Por ello, es importante que se realicen más estudios para así poder conocer aspectos clave, como su proceso de formación, los mecanismos de transporte y sus efectos medioambientales. Además, para determinar si estos contaminantes están extendidos a nivel mundial, como se sospecha, deberían dedicarse también esfuerzos significativos tanto a investigar como a reportar la presencia de estas nuevas formaciones plásticas en otros lugares. Y, de acuerdo con Gestoso y cols. (2019), sería importante también incluir cuanto antes estas nuevas categorías de formaciones plásticas en las directrices de seguimiento y en los planes de acción con el fin de poder encontrar una manera de abordarlas y hallar la manera óptima de actuar al respecto.

3. Objetivo

El objetivo general de este trabajo de revisión bibliográfica es aportar una visión global y lo más actualizada posible acerca de la relativamente reciente presencia de cuatro nuevas formaciones plásticas en los medios litorales, las cuales poseen diferentes características respecto a las de los residuos plásticos conocidos y estudiados hasta ahora, por lo que cabría esperar que estos nuevos contaminantes plásticos no vayan a comportarse de la misma manera ni tener el mismo impacto sobre el medioambiente. Por esta razón y, dado que se trata de una problemática muy reciente de la cual aún hay pocos estudios, es importante recopilar toda la información disponible hasta ahora para poder compararla, sacar conclusiones y así poder entender las implicaciones y consecuencias medioambientales de estas nuevas formaciones.

4. Metodología para la búsqueda bibliográfica

La metodología empleada para la realización de este trabajo ha consistido en una extensa búsqueda y recopilación de todos los estudios científicos publicados hasta ahora en relación con la temática a tratar. Con este fin, se ha hecho uso de diversas bases de datos, tales como Web of Science (WOS), Scopus, o Google Scholar, empleando principalmente palabras clave como “plastiglomerados”, “piroplásticos”, “plasticostras” o “antropoquinas”. Asimismo, se estudiaron tanto la referencias como la propia bibliografía proporcionada por cada uno de los estudios hallados gracias a dichas bases de datos, además de diversas páginas webs. Dado que se trata de un fenómeno muy reciente, sólo se han encontrado 7 publicaciones (publicadas en los años 2019, 2020 y 2021, a excepción de una publicada en 2014), en las que se trata específicamente la formación de alguno de estos nuevos contaminantes plásticos. Dichos estudios han sido tanto revisiones bibliográficas como investigaciones experimentales, en las que se ha llevado a cabo el muestreo de estas formaciones plásticas en diferentes localizaciones.

5. Los plásticos

Según la Organización Internacional para la Normalización (ISO), los plásticos son un material que contiene como componente esencial un polímero de alto peso molecular y que, en alguna etapa de su procesamiento, puede moldearse para dar lugar a un producto final. Por esta razón, se ha empleado el término «plástico», proveniente del griego antiguo «*plastikos*», que hace referencia a algo que se puede moldear (Crawford & Quinn, 2017), gracias a la propia maleabilidad, o plasticidad, del material durante la fabricación, lo que permite la obtención de diferentes formas, como láminas, fibras, tubos, etc. Estas macromoléculas, denominadas *polímeros*, están a su vez compuestas por largas cadenas de miles de moléculas más simples, los *monómeros*, siendo la polimerización el proceso por el cual los monómeros se unen para dar lugar a un polímero. Normalmente, los plásticos comerciales, contienen entre 10.000 y 100.000.000 de monómeros por cadena, según el tipo de plástico (Crawford & Quinn, 2017).

Se podría decir que la historia de los plásticos comenzó a partir de la utilización de ciertos materiales naturales, como la goma natural o la goma laca, con propiedades plásticas intrínsecas. Pero rápidamente, estos materiales naturales se empezaron a modificar químicamente. Uno de los primeros ejemplos de esta modificación química es la “vulcanización de la goma natural” para la obtención del caucho, en 1843. Más tarde, en 1856, el británico Alexander Parkes, inventó la *parkesina*, una sustancia transparente con unas propiedades sorprendentes para aquel entonces, ya que era moldeable en caliente, pero rígida en frío. Unos pocos años después, John Wesley Hyatt, en 1860, patentó un nuevo invento al que llamó celuloide por tener en su composición celulosa de algodón, que sustituiría al marfil, obtenido a partir de los colmillos de elefantes, que estaba siendo empleado para la elaboración de bolas de billar, lo cual ya en aquel entonces estaba poniendo en peligro de extinción a estos grandes mamíferos. Y hace ya más de 100 años, en 1909, un químico llamado Leo Baekeland, creó el primer plástico cien por cien sintético, denominado *baquelita*, que progresivamente fue sustituyendo a materiales naturales como la goma laca, que se obtenía a partir de la secreción de un insecto asiático (*Kerria lacca*) (Crawford & Quinn, 2017).

A partir de los años 50 y, como se puede apreciar en la Figura 1, la aparición de plásticos comenzó a aumentar exponencialmente por su versatilidad, ligereza, resistencia y su bajo coste de producción. Según la Asociación Europea de Productores de Plásticos, *PlasticsEurope*, que monitoriza gran parte de los compuestos plásticos producidos en Europa y en el mundo, en 1950, el volumen de plásticos producidos fue de 1.5 millones de toneladas anuales. Sin embargo, ya alrededor de 1970 aumentó considerablemente dicha producción, alcanzando los 50 millones de toneladas. En 2018, esta cifra rozaba ya los 360 millones de toneladas. Y, según los últimos datos publicados en el año 2019, se alcanzaron ya casi las 370 millones de toneladas (PlasticsEurope, 2020).

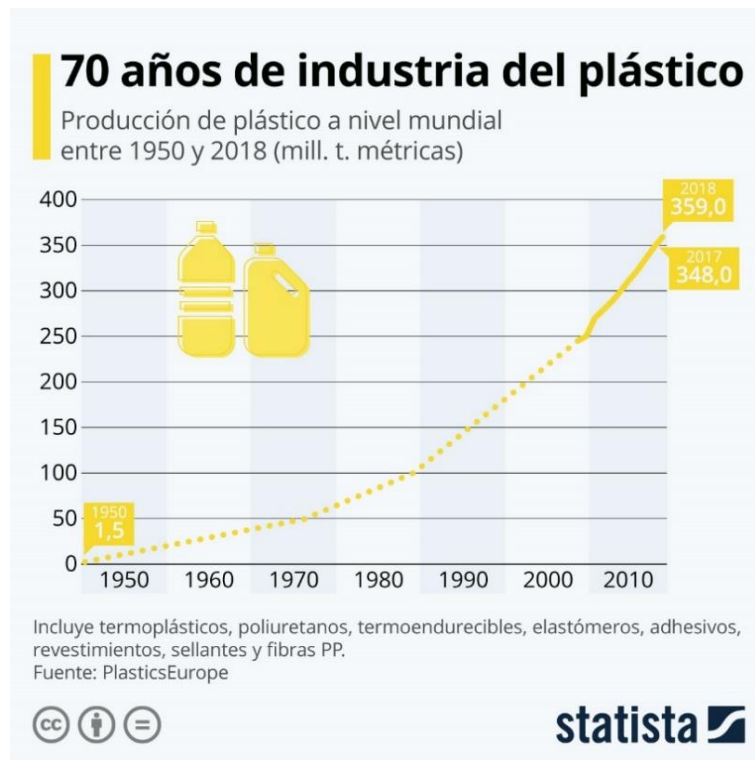


Figura 1.- Producción de plásticos a nivel mundial entre 1950 y 2018. Fuente: <https://es.statista.com/grafico/20441/produccion-de-plastico-a-nivel-mundial/>

Hoy en día, existen numerosos tipos de plásticos que, gracias a su alta versatilidad, son empleados en muchos sectores con el fin de cumplir diversas funciones. En 2019, los porcentajes de demanda de producción de plásticos por sectores europeos estaban distribuidos según refleja la Figura 2. Las industrias de embalaje y de edificación y construcción representan, con diferencia, los mercados más demandantes de plásticos, con un 39.6 y un 20.4%, respectivamente. Siendo el tercero el de transporte, con un 9.6%, puesto que el 16.7% representado como “otros” engloba a diversos sectores, como el sanitario, el de electrodomésticos, la ingeniería mecánica, etc. (PlasticsEurope, 2020).

Dentro de estas diferentes aplicaciones, cabe destacar seis resinas que son de uso masivo: el polietileno de alta densidad (HD-PE) y de baja densidad (LD-PE), el primero con pocas cadenas cortas, lo que lo hace más rígido y, el segundo, con muchas cadenas largas y cortas, lo que lo hace más flexible, el tereftalato de polietileno (PET), el cloruro de polivinilo (PVC), el polipropileno (PP) y el poliestireno (PS).

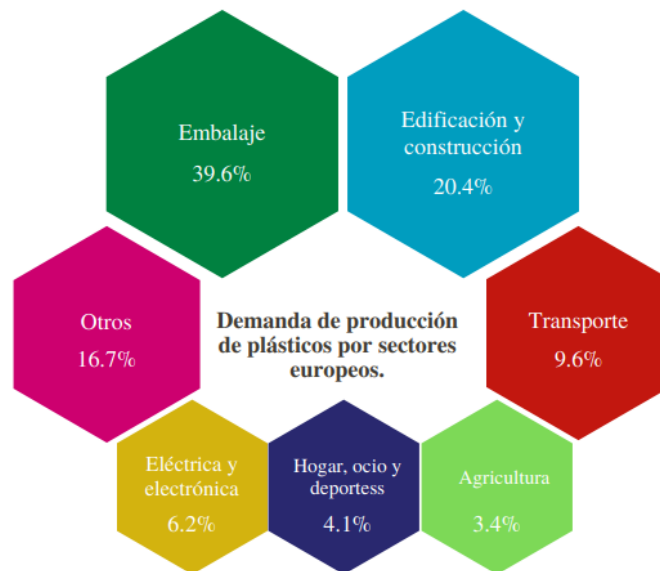


Figura 2.- Principales usos de los plásticos en Europa.

Los plásticos se clasifican principalmente en dos tipos, los termoplásticos y los termoestables (o termoendurecibles). Los termoplásticos se funden a altas temperaturas, lo que permite su moldeo para dar lugar a diversas formas, se endurecen cuando se enfrían, y este proceso puede repetirse varias veces, lo que hace posible que este tipo de plásticos puedan ser reciclados. Por otro lado, los termoestables, tras haber sido moldeados a altas temperaturas, experimentan un cambio químico que hace que adquieran una forma permanente y no puedan volver a ser fundidos y moldeados, por lo que no son reciclables. De esta manera, tanto por su capacidad para ser reutilizados como por su versatilidad, los termoplásticos son los que se producen en mayor medida a nivel mundial, lo que también hace que sean los que más se encuentran contaminando el medioambiente. Algunos ejemplos de termoplásticos son el PE, el PVC, el nylon (un tipo de poliamida), el PET, el PP, el PS, etc. (PlascticsEurope, 2020).

Sin embargo, esas mismas propiedades que hacen que los plásticos sean materiales tan útiles en todo tipo de sectores, hacen, a su vez, que sean materiales muy difíciles o, prácticamente imposibles de asimilar por la naturaleza una vez estos son desechados.

5.1. Degradación de los plásticos en el medioambiente

La degradación de los materiales plásticos es un proceso muy lento. De hecho, se ha estimado que la persistencia de los plásticos en el medioambiente está en el rango de cientos a miles de años, aunque su longevidad puede ser incluso mayor en climas fríos o si el material está enterrado en el fondo oceánico o bajo sedimentos (Gregory & Andrady, 2017), , puesto que las bajas temperaturas y una menor exposición a la radiación ultravioleta les proporcionaría un mayor potencial para persistir en el medio.

La degradación de los plásticos, una vez éstos llegan a los diferentes ecosistemas debido a una mala gestión, puede ocurrir de manera física o mecánica, química (degradación termo- o foto-oxidativa y oxidación atmosférica) y, en menor medida, biológica (Cooper & Corcoran, 2010). La degradación física o mecánica en el medio marino, por ejemplo, se produce por la acción de las corrientes marinas, el oleaje y las abrasiones con las rocas y la arena. Por otro lado, está la degradación química, la cual resulta de la alteración de los enlaces moleculares a través de reacciones químicas impulsadas por altas temperaturas (degradación termo-oxidativa), por una exposición prolongada al oxígeno atmosférico (oxidación atmosférica) o a la radiación solar (degradación foto-oxidativa) o, siendo este último tipo de degradación, junto con la mecánica, la causante de la fragmentación de la mayor parte de los plásticos, principalmente en entornos costeros (Shah et al., 2008). Y, por último, también existe la degradación biológica, llevada a cabo por bacterias y hongos, pero ésta ocurre sólo una vez ha tenido lugar anteriormente la fragmentación del plástico ya sea por procesos físicos o químicos (Shah et al., 2008).

Todos estos procesos de degradación conllevan la fragmentación de residuos plásticos de mayor tamaño (*meso-* y *macroplásticos*, los primeros con un tamaño comprendido entre 5 y 25 mm en su dimensión más larga, y los segundos mayor de 25 mm) hasta partículas plásticas de menos de 5 mm de diámetro, las cuales constituyen a los tan dañinos *microplásticos*. Éstos se pueden clasificar, a su vez, en dos categorías. Por un lado, están los microplásticos *primarios*, que son aquellas partículas fabricadas directamente con un tamaño inferior a 5 mm para ser utilizadas, por ejemplo, en cosméticos o productos de cuidado personal como exfoliantes, es el caso de ciertas cremas o pastas de dientes, o con otros fines, como es el caso de la purpurina; también se usan en productos médicos específicos, en abrasivos industriales, etc. Así, en esta categoría se incluyen también las granzas o *pellets*, los cuales constituyen la materia prima de la industria de producción de plásticos. Y, por otro lado, están los microplásticos secundarios, que son aquellas partículas que derivan de la fragmentación y degradación de plásticos de mayor tamaño. Estos provienen, por ejemplo, de materiales plásticos presentes en desechos orgánicos, de restos plásticos de actividades pesqueras, pinturas que contienen polímeros sintéticos, fibras procedentes de textiles sintéticos, etc.

5.2. Métodos de identificación

Una de las técnicas de identificación de la composición polimérica de los plásticos más utilizada es la espectroscopía infrarroja por transformada de Fourier (FTIR), pero existen otras técnicas, como la espectroscopía Raman o la pirólisis acoplada a cromatografía de gases y espectrometría de masas (PyrGC-MS), cada una de ellas con sus ventajas e inconvenientes (Wu et al., 2020).

La técnica FTIR es ampliamente utilizada según la bibliografía para el análisis de microplásticos. Con esta técnica, la identificación del polímero se lleva a cabo comparando el espectro de infrarrojos obtenido del microplástico estudiado con los espectros de una librería de referencia, sugiriéndose entonces el polímero de mayor similitud con la composición de la partícula plástica analizada. Para ello, normalmente se establece un umbral de similitud superior a un 70% para poder así determinar un grado de certeza al constatar las identidades poliméricas (Dioses-salinas et al., 2020). Pero hay factores, como la meteorización (Brandon et al., 2016), la presencia de contaminantes adheridos (De la Torre et al., 2021) o la humedad (Käppler et al., 2016), que pueden dificultar la lectura con la aparición de nuevas señales en los espectros FTIR, lo cual puede dar como resultado un menor porcentaje de similitud. Además, esta técnica permite también el análisis del nivel de oxidación de la superficie plástica.

Por otro lado, la espectroscopía Raman no es tan común en la literatura como la FTIR, pero presenta algunas ventajas, puesto que exhibe una mejor resolución espectral y una menor interferencia de señal debido a la humedad que la FTIR (Ribeiro-Claro et al., 2017).

En cuanto a la PyrGC-MS, es el único de los métodos mencionados que es destructivo. Se utiliza para obtener información estructural acerca de la composición química de los microplásticos mediante el análisis de los productos de degradación térmica (Fries et al., 2013), requiere pequeñas cantidades de muestra, concretamente de 5 a 20 μg (Kusch, 2017), y es además capaz de analizar también los aditivos plásticos (Qiu et al., 2016).

5.3. Algunos efectos nocivos de los plásticos en el medio litoral

Una vez los plásticos llegan al medio marino, ya sea a través de fuentes terrestres o marinas, se convierten en un contaminante persistente y omnipresente en el océano. Los residuos plásticos producen un impacto ambiental masivo debido a su abundancia y persistencia en el medioambiente, especialmente en el medio marino, convirtiéndose en una de las amenazas más graves para los océanos y su biodiversidad (Gall & Thompson, 2015). En un estudio se estimó que en el año 2010 ingresaron al océano entre 4.8 y 12.7 millones de toneladas de desechos plásticos mal gestionados (Jambeck et al., 2015). Así, los plásticos constituyen el componente más importante de los desechos marinos. Y, a su vez, dentro de los plásticos, los microplásticos (<5 mm) son los que más afectan a la biota marina (Ugwu et al., 2021).

La principal preocupación que despiertan los plásticos (y, más concretamente, los microplásticos) es su impacto en los organismos marinos. De hecho, el primer indicio de que los plásticos comenzaban a ser un problema en los ecosistemas marinos se produjo cuando empezaron a encontrarse fragmentos plásticos en el sistema gastrointestinal de las aves marinas en la década de

1960 (Ryan et al., 2009). Desde entonces, se ha demostrado que los microplásticos representan un peligro potencial para la fauna marina debido, principalmente, a dos razones. Por un lado, la ingesta accidental de microplásticos puede provocar que éstos se acumulen en el tracto digestivo del animal, generando una obstrucción y alterando sus patrones alimentarios (Anbumani & Kakkar, 2018). Y, por otro lado, también existe un impacto químico, ya que se ha demostrado que los microplásticos pueden contener contaminantes orgánicos persistentes (COPs), como los bifenilos policlorados (PCBs) (Hermsen et al., 2018), además de diversos aditivos, como estabilizadores, colorantes, retardantes de llama etc., que se emplean para mejorar o modificar las propiedades de los plásticos, y que también pueden resultar dañinos para la fauna, además de ralentizar la degradación química (oxidativa) de los plásticos en el medio. Por ejemplo, se ha estudiado que dos aditivos plásticos, los ftalatos (utilizados como plastificantes) y el bisfenol A (BPA) (un antioxidante), actúan como potenciales disruptores endocrinos, afectando a la reproducción en varios organismos, incluidos crustáceos y peces, produciendo malformaciones genéticas y alterando los sistemas hormonales (Oehlmann et al., 2009).

Cabe destacar, además, que, a lo largo de su proceso de degradación en los ecosistemas marinos, el *biofilm* que se crea alrededor de los microplásticos, libera compuestos orgánicos volátiles, como el dimetilsulfuro (DMS), un compuesto químico que también se encuentra presente en las algas. De esta manera, el DMS liberado por dicho *biofilm* genera una marca olfativa que puede confundir a algunos organismos planctónicos, como los copépodos, haciendo así que éstos consuman microplásticos (Procter et al., 2019). Este comportamiento también ha sido demostrado en aves marinas, estableciéndose así una relación positiva entre la señal química aromática liberada por los microplásticos y una mayor frecuencia de ingestión de plásticos por parte de la fauna marina (Savoca et al., 2016).

Y, dentro de esta perspectiva, debe señalarse que ya ha sido estudiada la ingesta de microplásticos por parte de peces (Adika et al., 2020; Baalkhuyur et al., 2018), así como por mamíferos marinos (Hernandez-Gonzalez et al., 2018; Hernandez-Milian et al., 2019; R. C. Moore et al., 2020; Rebolledo et al., 2013), moluscos (Gutow et al., 2019; Naidu, 2019), aves marinas (Kain et al., 2016; Provencher et al., 2018), y muchas otras especies marinas (Desforges et al., 2015; Duncan et al., 2018; Le Guen et al., 2020). Esto hace que exista un potencial riesgo de ingesta de contaminantes del medioambiente y que éstos sean transferidos a través de la cadena alimentaria, lo cual hace de los microplásticos una amenaza tanto para las especies marinas, como para los ecosistemas, la seguridad alimentaria y, en última instancia, la salud humana (Barboza et al., 2018; De la Torre et al., 2020). Sin embargo, el conocimiento sobre los efectos adversos en la salud humana

debido al consumo de organismos marinos que contienen microplásticos es aún muy limitado, controvertido y difícil de evaluar (De la Torre, 2019).

6. El ciclo biogeoquímico del plástico y el Antropoceno

Elementos como el carbono, el nitrógeno, el plomo o el agua siguen ciclos biogeoquímicos ampliamente estudiados y, por lo tanto, relativamente bien conocidos respecto a los principales principios que rigen su destino y transporte, tanto dentro como a través de los compartimentos de los ecosistemas y los reservorios ambientales (Bank & Hansson, 2019). Y así como el ciclo del carbono ha sido fundamental para identificar los factores relacionados con el cambio climático, diversos investigadores (Bank & Hansson, 2019) creen que el considerar la contaminación plástica como un ciclo ambiental o biogeoquímico serviría como base para el desarrollo de nuevas ideas y, con suerte, soluciones sostenibles para abordar este importante problema global de contaminación plástica, lo cual tendría, a su vez, ramificaciones importantes para la política y gestión de los plásticos.

Como se ha indicado anteriormente, desde la década de 1960, ya se observaba que, tanto macro- como meso- y microplásticos estaban depositándose en mares y océanos, causando ya un impacto ambiental significativo en las poblaciones de aves marinas (Kenyon & Kridler, 1969). Años más tarde, a finales de 1990, se descubrió también que grandes cantidades de plástico se estaban acumulando en el giro del Pacífico norte (C. J. Moore et al., 2001). Actualmente, la contaminación por plásticos constituye un fenómeno omnipresente, encontrándose ya en todos los compartimentos ambientales: agua, tierra, aire e incluso en la propia biota. Sin embargo, a día de hoy, tanto los mecanismos de transporte de los plásticos entre los distintos compartimentos como su destino final son aún poco conocidos, al igual que su longevidad, a escala de tiempo geológica, puesto que se trata de materiales recientes que llevan en el medioambiente sólo unas décadas (Zalasiewicz et al., 2016).

Por esta razón, en 2019, Michael S. Bank y Sophia V. Hansson describieron formalmente el ciclo del plástico como el movimiento continuo y complejo de materiales plásticos entre los diferentes compartimentos de los ecosistemas tanto abióticos como bióticos, incluyendo a los humanos (Bank & Hansson, 2019). Y, de esta manera, poco a poco, la noción de que el plástico sigue su propio ciclo está ganando popularidad (Bank & Hansson, 2019; Lecher, 2018). Así, otro paso adelante lo da la investigadora Xia Zhu con un estudio recientemente publicado en el que explica que, al igual que en cualquier otro ciclo biogeoquímico, en el del plástico también existen tanto fuentes como reservorios, sumideros y flujos de plástico. De esta manera, señala al medio terrestre como una importante fuente de plástico debido a las numerosas actividades humanas que emiten plásticos al medioambiente (Law, 2016; Lechthaler et al., 2020). También indica que hay muchas hipótesis acerca de los posibles

reservorios de contaminación plástica, como podrían ser las profundidades de los océanos (Cózar et al., 2014), los propios animales (Cózar et al., 2014) o las costas (Hardesty et al., 2016), si bien aún no se sabe si estos son temporales o permanentes. Asimismo, se sospecha que el fondo del océano también podría actuar como un sumidero de plásticos. Y, por último, se cree que las partículas plásticas se transportan a través de una alta variedad de flujos entre los distintos reservorios, como pueden ser las corrientes de viento a través de la atmósfera, la advección en ríos y arroyos, las olas y corrientes superficiales del océano o la migración de animales debajo de la superficie del océano.

Según la escala de tiempo geológica, actualmente el ser humano vive en la época del Holoceno. Sin embargo, dado el impacto tan fuerte que la humanidad está generando sobre la Tierra, la comunidad científica lleva ya años empleando, aunque no de manera oficial, el término “Antropoceno” como una manera de reflejar la época actual, en la que una gran variedad de procesos naturales están siendo alterados a causa de las actividades humanas.

Este término fue propuesto por Crutzen y Stoermer en el año 2000 con el fin de representar el período de tiempo entre la segunda mitad del siglo XVIII y la actualidad. Aunque muchos investigadores (Doughty et al., 2010; Ruddiman, 2003) no se ponen de acuerdo en el inicio, sí están de acuerdo en que el Antropoceno constituye un período de tiempo fuertemente marcado por la interacción humana (Zalasiewicz et al., 2011). Por esta razón, desde el año 2009, el Grupo de Trabajo sobre el Antropoceno de la Comisión Internacional de Estratigrafía, constituido por 35 geocientíficos de todo el mundo, está evaluando esta cuestión (Cearreta, 2018).

Por otra parte, el 60% de los plásticos producidos en las últimas décadas (3000 millones de toneladas) han sido ya depositados en vertederos o liberados al medioambiente (Cearreta, 2018). Así, el hecho de que los plásticos se encuentren ya en cantidades ingentes en el medioambiente, junto con su alto potencial de conservación, hacen de los plásticos los principales y más importantes tecnofósiles del futuro, pudiendo así formar un registro fósil permanente (Zalasiewicz et al., 2014). Adicionalmente, los tecnofósiles muestran una evolución extremadamente rápida (Zalasiewicz et al., 2016), muy superior a la de los taxones fósiles de origen biótico, por lo que podrían proporcionar una resolución estratigráfica mucho más detallada, de manera que las distintas formas de plástico desarrolladas en diferentes momentos podrían usarse como indicadores de intervalos específicos de tiempo. Con lo cual, los plásticos podrían ser considerados no solo contaminantes ambientales, sino también potenciales marcadores de los futuros estratos del Antropoceno (Zalasiewicz et al., 2016).

7. Nuevas formaciones plásticas

Los plastiglomerados, los pirolásticos, las plasticostras y las antropoquinas, nuevas formaciones de contaminación plástica y el objetivo central de este trabajo, han sido hasta ahora muy poco estudiadas. Tanto es así que su presencia solo ha sido registrada en un lugar, en el caso de los plastiglomerados y las antropoquinas (en Hawaii y en Brasil, respectivamente), y en dos lugares en el caso de los pirolásticos (en Reino Unido e Italia) y las plasticostras (en Madeira e Italia) (ver Figura 3).

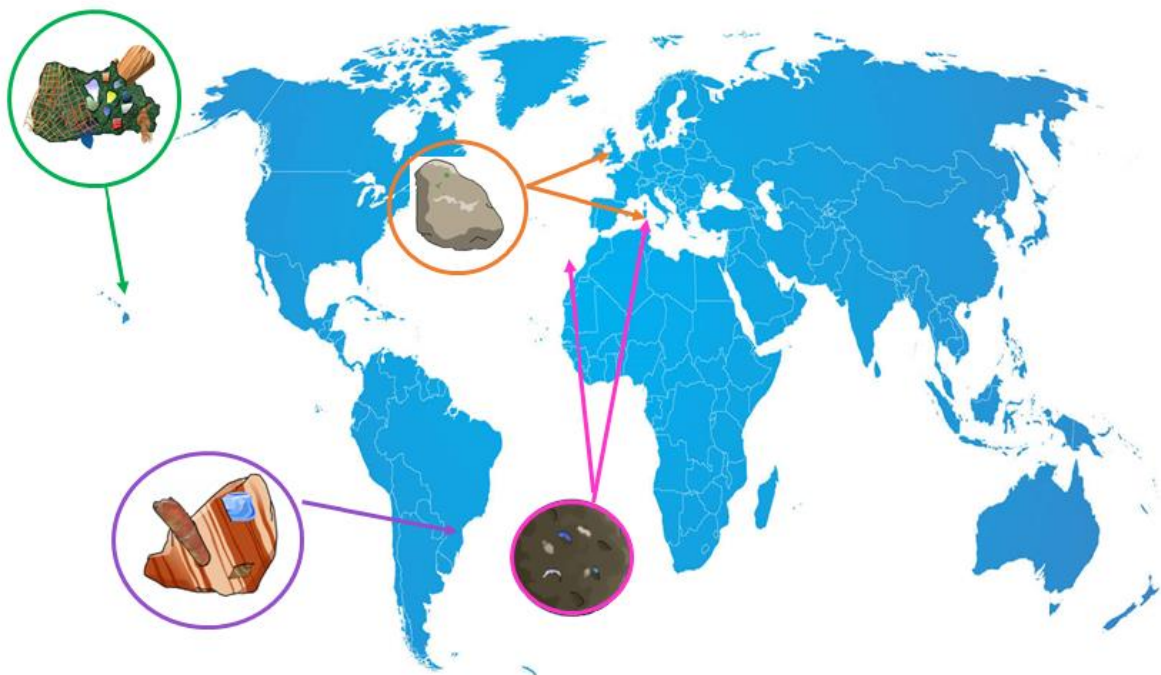


Figura 3.- Mapa con las localizaciones hasta ahora registradas de estas nuevas cuatro formaciones: plastiglomerados en verde, pirolásticos en naranja, plasticostras en rosa y antropoquinas en lila (imágenes gráficas tomadas de (De la Torre et al., 2021)).

Por otro lado, la Tabla 1 recoge los diferentes trabajos publicados hasta la fecha acerca de cada una de estas formaciones y refleja, de manera resumida, las definiciones de cada tipo de contaminante plástico junto con algunas características importantes, como el posible proceso por el cual se cree que estos contaminantes se han formado o los impactos ambientales que éstos pueden tener.

Tabla 1.- Principales características de los cuatro nuevos tipos de formaciones plásticas descritos.

Autor (año)	Terminología	Definición	Método analítico	Tipo de material antropogénico	Asociación con materiales naturales	Posible proceso de formación	Posible impacto ambiental asociado
Corcoran (2014) Corcoran y Jazvac (2020) De la Torre et al. (2021)	Plastiglomerados	Matriz antropogénica de plástico que, una vez fundido, se une con sedimentos de playa o arena, detritos de lava basáltica y materiales orgánicos, como conchas, maderas y restos de coral	Caracterización (descripción visual)	Plásticos	Material suelto con arena, coral y fragmentos de rocas que se encuentran en las playas	Artificial (queima)	Liberación de compuestos químicos
Turner et al. (2019) Ehlers y Ellrich (2020) De la Torre et al. (2021)	Piroplásticos	Matriz amorfa que parece formada por la combustión o fusión de plásticos a menudo asociados con arena y madera. Se caracterizan por ser de un solo color neutro (negro-gris carbón, blanquecino o marrón), con matices ocasionales de verde, azul, rosa o amarillo, y que va acompañado de grietas, fracturas, hoyos y cavidades.	Descripción del diámetro, aditivos (espectrómetro) e identificación de los polímeros (ATR-FTIR)	PE y PP (Turner et al., 2019) o PET (Ehlers y Ellrich, 2020)	Material suelto encontrado entre los sedimentos de playa	Artificial (queima y erosión)	Liberación de compuestos químicos y transporte de especies exóticas invasoras (AIS)
Gestoso et al. (2019) Ehlers y Ellrich (2020) De la Torre et al. (2021)	Plasticostras	Fragmentos plásticos adheridos o incrustados, pero no cementados, a la superficie de las rocas intermareales, que pueden persistir con el tiempo.	Descripción e identificación de los polímeros (ATR-FTIR)	PE	Adheridas a superficies rocosas	Natural (choque por la acción de las olas costeras)	Ingesta de los plásticos
Fernandino et al. (2020) De la Torre et al. (2021)	Antropoquinas	Rocas sedimentarias que contienen elementos antropogénicos (como plásticos) cementados con materiales orgánicos (como conchas de bivalvos) y rocas siliciclásticas.	Descripción visual e identificación del cemento mediante XRF	Plásticos y metales	Cementado en rocas sedimentarias (<i>beachrock</i>)	Natural (basura dentro de rocas sedimentarias)	Preservación en el registro geológico

7.1. Plastiglomerados

En 2014, los plastiglomerados fueron el primer tipo de nueva formación plástica descrita, por Corcoran y cols., en la playa Kamilo, en Hawaii. En general, la ubicación de las islas hawaianas en el giro subtropical del Pacífico norte las hace vulnerables a actuar como sumideros de desechos plásticos y, concretamente, la playa Kamilo, ubicada en el extremo sureste de la isla de Hawaii, destaca por su acumulación de grandes cantidades de desechos marinos (Charles J. Moore, 2008).

Los investigadores (Corcoran et al., 2014) describieron los plastiglomerados como una matriz antropogénica de compuestos múltiples, constituida por plásticos derretidos, sedimentos de playa o arena, detritos de lava basáltica y fragmentos de materiales orgánicos. Esto hace de la quema ilegal de residuos o fogatas en las playas, los responsables de la formación de plastiglomerados, ya que provocan que los plásticos previamente presentes en la playa se derritan y, una vez en ese estado, se conglomeren con el resto de los materiales. Aunque, a escala global sería concebible también que los desechos plásticos globales pudieran conducir a un depósito similar, pero generado por flujos de lava, incendios forestales o temperaturas extremas (Corcoran et al., 2014).

Según Corcoran y cols. (2014), inicialmente los plastiglomerados se clasificaron en dos tipos. Por un lado, están los plastiglomerados del tipo *in situ*, que son aquellos en los que el plástico se encuentra adherido a la superficie de las rocas (ver Figura 4.A.). Por otro lado, los plastiglomerados del tipo clástico, constituidos por combinaciones de basalto, corales, conchas o detritos leñosos con granos de arena cementados en una matriz plástica con otros materiales de origen antropogénico (ver Figura 4.B.). Sin embargo, en una publicación más reciente de la misma autora, se indica que los plastiglomerados incluyen ahora también a los piropásticos y a las plasticostras (Corcoran & Jazvac, 2020), otros tipos de nuevas formaciones plásticas de las cuales se habla en los siguientes apartados. De igual forma, comúnmente, se hace referencia a los plastiglomerados como un nuevo tipo de roca, salvo que en el sentido estricto no lo son, ya que las rocas se forman de manera natural y los plastiglomerados son el resultado tanto de procesos (la quema) como de materiales (plásticos) de origen antropogénico (Corcoran & Jazvac, 2020).

En el muestreo de plastiglomerados llevado a cabo por Corcoran y col. en 2014, en 21 ubicaciones a lo largo de la playa Kamilo, se recolectaron 167 fragmentos de plastiglomerados clásticos de más de 2 cm de longitud, a lo largo de las 21 ubicaciones de la playa y, 38 plastiglomerados del tipo *in situ* en tan sólo 9 de las localizaciones. Cabe destacar que, como resultado de la abrasión, los fragmentos de plastiglomerados clásticos que se encontraban cerca de la línea de playa poseían una morfología redondeada, mientras que en el resto de las situaciones los fragmentos eran más angulosos. Así, se muestrearon en total 205 plastiglomerados, cuya composición mostraba

diferentes combinaciones de fragmentos de corales y conchas, basaltos, restos leñosos, semillas, carbón, arena y plásticos. Los productos plásticos más abundantes que se encontraron formando parte de estos plastiglomerados era un “confeti” de diversos colores de una amplia variedad de restos plásticos fragmentados y, en menor medida, envases, tapas y restos de materiales relacionados con la pesca, como redes, cuerdas, nylon, etc.

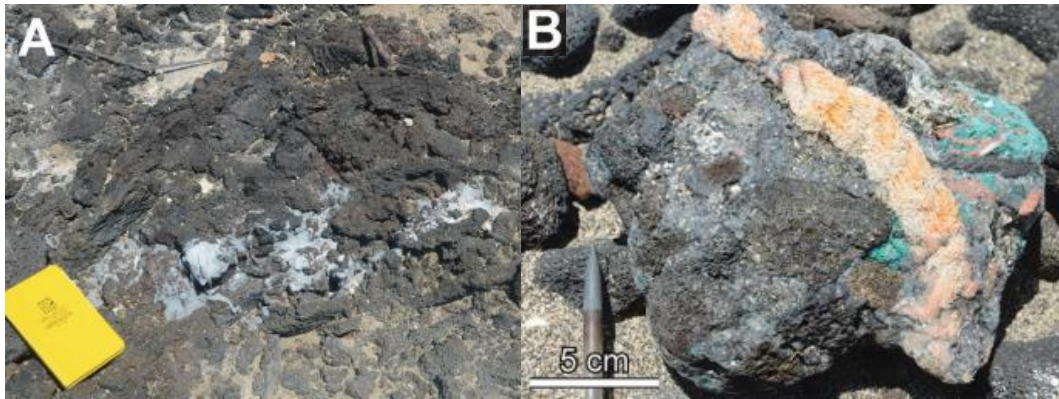


Figura 4.- (A) Plastiglomerado *in situ* en el que el plástico derretido se encuentra adherido a la superficie de un flujo basáltico; (B) Plastiglomerado clástico redondeado que contiene clastos de basalto, plástico fundido, una cuerda amarilla y redes verdes y rojas (tomadas de (Corcoran et al., 2014)).

Además de lo anterior, los autores midieron la densidad aparente de 20 de los 167 fragmentos de plastiglomerados clásticos recolectados, obteniendo como resultado densidades de 1.7 a 2.8 g/cm³. Esto demostró que este nuevo tipo de contaminante plástico posee un mayor potencial para quedar enterrado y ser preservado en el registro geológico que las partículas únicamente plásticas, puesto que éstas últimas tienen densidades generalmente menores, de 0.8 a 1.8 g/cm³. De esta manera, los resultados de este estudio indicaron que los plastiglomerados no suelen viajar con las corrientes oceánicas ni con el viento debido a su elevada densidad, pero sí tienen la capacidad de formar un horizonte que refleje una señal de contaminación humana, apoyando así la existencia de la discutida época del Antropoceno. Esto convierte a la playa Kamilo, en Hawaii, en un claro ejemplo de acción antropogénica, como es la quema de residuos, dando como resultado un horizonte distintivo que puede quedar reflejado en el registro geológico (Corcoran et al., 2014). Sin embargo, en este estudio no se aplicaron ninguna de las técnicas disponibles para analizar la composición polimérica de los plásticos que forman parte de los plastiglomerados.

En esta playa, tan sólo tres años después de un extenso esfuerzo de limpieza, se volvieron a encontrar plastiglomerados, puesto que, además de que la arena estaba altamente contaminada por fragmentos plásticos, la separación de los plastiglomerados de la materia orgánica no sólo resulta muy difícil, sino prácticamente imposible sin causar daños al sistema natural (Corcoran & Jazvac, 2020). Por lo tanto, como estas dos autoras destacan, para prevenir la futura formación de los

plastiglomerados, los plásticos deberían ser desechados y reciclados adecuadamente en todas las regiones del mundo con el fin de, tanto reducir el volumen de plásticos que llegan a los océanos, como evitar la necesidad de quemar los plásticos en las playas para así intentar limpiarlas.

7.2. Piroplásticos

Los piroplásticos fueron descritos por primera vez por Turner y col. en 2019, en playas de la bahía de Whitsand, al suroeste de Inglaterra. Estos investigadores los definieron como una matriz amorfa que parece estar formada por la combustión o fusión de plásticos y que, generalmente, se caracterizan por poseer un sólo color neutro (negro-gris carbón, blanquecino o marrón) con matices ocasionales de verde, azul, rosa o amarillo, que va acompañado de grietas, fracturas y cavidades. Por lo tanto, los piroplásticos tienen una apariencia muy similar a las de las rocas, como se puede apreciar en la Figura 5, salvo que se forman cuando los desechos plásticos se queman y enfrían, lo que crea aglomerados grisáceos con materiales plásticos encapsulados.



Figura 5.- Piroplásticos recolectados de la línea de playa en Whitsand Bay (imagen tomada de (Turner et al., 2019)).

Turner y cols. consideraron que su apariencia también era similar a la de los plastiglomerados descritos por Corcoran y cols. en 2014, pero el material encapsulado en este caso era plástico, en lugar de fragmentos de rocas o arena, lo que hace que la densidad de los plastiglomerados sea mayor que la de los piroplásticos. Además, muchas de las muestras estudiadas no habían aglomerado cantidades significativas de materiales de origen antropogénico, como restos de pajitas y de envases, tapas de botellas, cuerdas, etc., lo que hace que los piroplásticos tengan una densidad aparente relativamente baja y, por lo tanto, floten en el agua de mar (Turner et al., 2019). Así, estos piroplásticos pueden ser arrastrados por las corrientes y mareas, y terminar incrustados en afloramientos rocosos de playas y acantilados o a lo largo de la línea de playa.

Estos autores recolectaron 165 muestras de las playas de Whitsand Bay y otras 30 de otros lugares, que se clasificaron por densidad, según si flotaban o no. Las muestras se analizaron mediante XRF y, además, del total de 195 pirolásticos, 35 fueron analizados también mediante FTIR.

Se describieron dos morfologías principales, pirolásticos más esféricos o redondeados que parecían contener una menor cantidad de materiales de origen antropogénico aglomerados, y pirolásticos más angulosos que podrían describirse incluso como plastiglomerados. El tipo de materiales extraños que contenían era muy variable, incluyendo restos de pajitas, envases, tapas, cuerdas, botellas, etc. Estos plásticos, de formas y colores variados, se encontraban fusionados con la superficie de la matriz, permaneciendo así intactos o solo parcialmente fundidos. La masa media de las muestras de pirolásticos estudiadas fue de 350 mg, con una relación de aspecto (diámetro 1/ diámetro 2) de 0.42 a 7.5 cm. Casi todos los pirolásticos eran menos densos que el agua (de grifo) a temperatura ambiente, por lo que flotaban, exceptuando cinco de ellos. Y, de estos cinco, tres de ellos contenían depósitos calcáreos del gusano poliqueto *Spirobranchus triqueter*, además de parches formados por el briozoo *Electra pilosa*, factores que les otorgaban una mayor densidad; y los otros dos simplemente eran los de mayor tamaño, por lo que también se hundieron. Los espectros resultantes del análisis FTIR revelaron que la matriz polimérica consistía en PE, PP o ambos polímeros. Y el análisis XRF reveló la presencia de Br, Cd, Cr, Cu, Fe, Pb, Sb y Zn en cantidades variables; elementos indicativos de aditivos, residuos poliméricos y materia inorgánica, como arena. Específicamente, los resultados indicaron una alta concentración de Cd y Pb entre las muestras, metales pesados que ya no se utilizan o están muy regulados, pero que, hace décadas, se empleaban, entre otros, como pigmentos para dar color a la mayoría de los plásticos (Turner et al., 2019).

Al contrario que los plastiglomerados, que sólo han sido estudiados hasta ahora por Corcoran y cols., en el caso de las pirolásticos hay un artículo más acerca de su estudio, publicado en 2020, por Ehlers y Ellrich. Estos investigadores examinaron por primera vez en la isla de Giglio, en el mar Tirreno, la aparición de pirolásticos y plasticostas. Concretamente, hallaron pirolásticos en una playa de arena protegida por las olas, pero que se usa con frecuencia para actividades recreativas como la pesca, buceo y fogatas. Cerca de la ubicación examinada en la que encontraron los pirolásticos, encontraron también restos de carbón quemado y varias botellas de tereftalato de polietileno azules. Visualmente, los pirolásticos encontrados en Giglio (Ehlers & Ellrich, 2020) eran semejantes a los presenciados en las playas al sudoeste del Reino Unido (Turner et al., 2019), siendo similar tanto su apariencia como su tamaño y el color grisáceo, pero en este caso, el análisis FTIR reveló que el componente polimérico era el PET, en lugar de PE y PP, como reflejaban los resultados de Turner y cols.

Resumidamente, la edad de deposición de los piroplásticos, presumiblemente, está relacionada con el grado de erosión y redondez, aunque no existen métodos claros para cuantificar este efecto. Sin embargo, la edad de fabricación del plástico en sí se puede obtener mediante una evaluación cualitativa de la distribución de ciertos aditivos dentro de la matriz, como el Cd y el Pb que se encontraron en el primer estudio (Turner et al., 2019). A su vez, la presencia de elementos como el Cd y el Pb en los piroplásticos podría constituir uno de sus posibles impactos, puesto que cabría pensar que estos metales pesados puedan ser movilizados y así entrar de alguna manera en la cadena alimentaria. Por otro lado, tanto la flotabilidad como la durabilidad de los piroplásticos podría hacer de ellos unos vectores ideales de especies exóticas invasoras, más conocidas en inglés como *alien invasive species* (AIS) (De la Torre et al., 2021). Sin embargo, la presencia del gusano poliqueto y los briozoos en algunos de los piroplásticos es, a su vez, indicadora de que estuvieron el suficiente tiempo sumergidos en el agua como para poder ser colonizados. Las principales fuentes de piroplásticos son las fogatas al aire libre y la quema de desechos plásticos en las playas (De la Torre et al., 2021), y se sospecha que su distribución puede ser muy amplia, ya que al haberse reportado su presencia también en Giglio, se descarta el hecho de que pueda tratarse de un fenómeno regional. Aunque faltan muchos más estudios al respecto, además de que por su apariencia, muy similar a la de las rocas, son difíciles de reconocer (Turner et al., 2019).

7.3. Plasticostras

En un estudio publicado en 2019, Gestoso y cols. alertan sobre la presencia de otro nuevo fenómeno de contaminación plástica que se llevaba viendo desde 2016 en las costas de la isla de Madeira, al noreste del océano Atlántico. Desde entonces, en las rocas de la zona media-alta del intermareal en las costas del sur de la isla se han visto constantemente partículas plásticas incrustadas, que seguramente derivan del continuo choque contra las propias rocas, inducido por acción del oleaje, de objetos plásticos de mayor tamaño que terminan degradándose y fragmentándose. Así, acuñaron el nuevo término de *plasticostras*.

Inicialmente, en 2016, pensaron que podía tratarse de una circunstancia puntual, pero en 2019, con un nuevo muestreo llevado a cabo para la publicación de su investigación, confirmaron la persistencia de las *plasticostras* a lo largo del tiempo. En dicho muestreo, determinaron un grosor de *plasticostras* de 0.77 ± 0.10 mm y un área de cobertura de 9.46 ± 1.77 cm², mediante el uso de cuadrantes de 20 x 20 cm. Observaron la formación de diferentes variedades de *costras* plásticas, tanto por el tamaño como por el color, ya que eran blancas o azules (ver Figura 6.A.). Pero el análisis FTIR llevado a cabo en 10 muestras elegidas al azar (5 de 2016 y 5 de 2019) determinó que todas tenían la misma composición, PE. Gestoso y cols. señalan que es posible que estos elementos de

contaminación plástica provengan de residuos de diferentes actividades marítimas costeras, como la pesca, o de residuos de origen doméstico, como los plásticos de un solo uso.

Cabe destacar que, durante el muestreo, también presenciaron numerosos individuos del gasterópodo litorínido *Tectarius striatus* (ver Figura 6.B.), cuya abundancia era similar tanto en zonas en las que había plasticostas, con 8.5 ± 2.5 individuos/m², como en zonas en las que no, con 10.2 ± 1.6 individuos/m² (Gestoso et al., 2019). En un estudio de laboratorio llevado a cabo con *Littorina littorea*, otra especie de gasterópodo litorínido, se demostró que no diferenciaba como recurso alimenticio las algas limpias de las algas contaminadas con microplásticos (Gutow et al., 2019). Por lo tanto, cabe pensar que *T. striatus* actúe de la misma manera, puesto que es también un herbívoro que se alimenta de las algas y diatomeas de las rocas del intermareal, y se encontraba tanto en zonas contaminadas por plasticostas como en zonas sin contaminación. Aunque, de nuevo, son necesarios más estudios para evaluar esta potencial nueva vía de ingreso del plástico en las redes tróficas marinas.



Figura 6.- (A) plasticostas azules en la superficie de las rocas; (B) plasticostas rodeadas por el gasterópodo litorínido *Tectarius striatus* (imágenes tomadas de (Gestoso et al., 2019)).

Al igual que en el caso de los piroplásticos, como se vio anteriormente, Ehlers y Ellrich examinaron también en la isla de Giglio, en el mar Tirreno, la aparición de plasticostas. Y, al igual que Gestoso y cols. en Madeira, encontraron plasticostas azules en las rocas del intermareal, expuestas a las olas. En este caso, el grosor de las plasticostas osciló entre 0.5 y 0.7 mm y el área de cobertura era de 0.46 ± 0.08 mm², muy inferior respecto al obtenido en Madeira, y lo obtuvieron mediante el uso de cuadrantes de 10 x 10 cm. Aunque el análisis FTIR sí reveló los mismos resultados, y es que el material del que estaban compuestas las plasticostas era PE.

Por lo tanto, y como refleja la Tabla 2, los resultados obtenidos en el estudio de las plasticostas en la isla de Giglio son semejantes a los de Madeira en lo que respecta al color, el grosor y el material del que están compuestas. Sin embargo, a pesar de que las rocas del intermareal de

ambas localizaciones poseían una rugosidad similar (Ehlers & Ellrich, 2020), la abundancia o cobertura media de plasticostas fue mucho mayor en Madeira que en Giglio. Esto se cree que puede deberse a que Madeira se encuentra más expuesta a este tipo de procesos al encontrarse en el océano Atlántico, un sistema más abierto y energético, mientras que Giglio, situada en el mar Tirreno, es una isla relativamente protegida de las olas y corrientes por otras islas cercanas (Elba, Córcega y Cerdeña) e Italia (Ehlers & Ellrich, 2020). Además, las plasticostas en Madeira se extienden a lo largo del intermareal medio – superior (Gestoso et al., 2019), mientras que en Giglio están limitadas a una estrecha franja a lo largo del intermareal medio, lo cual puede ser el resultado de que la amplitud de marea en Madeira sea superior, alcanzando los 2.6 metros (Cacabelos et al., 2019), a la del mar Tirreno, cerca de los 0.45 metros (Cutroneo et al., 2017).

Tabla 2.- Comparación de los resultados obtenidos acerca del estudio de plasticostas en Madeira y en la isla de Giglio.

	Color	Grosor	Material	Área de cobertura	Extensión
Madeira (Gestoso y col. 2019)	Blanco y azul	0.6 – 0.8 mm	PE	9.46 +/- 1.77 cm ²	Intermareal medio - superior
Isla de Giglio (Ehlers y Ellrich, 2020)	Azul	0.5 - 0.7 mm	PE	0.46 +/- 0.08 mm ²	Intermareal medio

En cuanto a los posibles efectos nocivos de las plasticostas, debido a su pequeño tamaño, entran en el rango de tamaño de las partículas plásticas, lo cual hace que puedan ser fácil- y accidentalmente ingeridas por organismos marinos que buscan alimento en la zona del intermareal, como es el caso del gasterópodo *T. striatus* presenciado por Gestoso y cols. en zonas rocosas contaminadas por plasticostas, en Madeira.

7.4. Antropoquinas

Las antropoquinas constituyen el último y más reciente ejemplo de nuevo contaminante plástico, descritas por primera vez por Fernandino y cols. en 2020 en playas del estado de Río Grande del Sur, al sur de Brasil. En su estudio, las describen como rocas sedimentarias costeras que contienen partículas antropogénicas cementadas, junto con caparzones de moluscos y granos siliciclásticos. La elección del término “antropoquina” fue debida a la frecuente presencia de conchas de moluscos cementadas junto con granos siliciclásticos y elementos antropogénicos, además del hecho de que las muestras analizadas fueron recolectadas entre clastos de coquina, un tipo de roca sedimentaria que se encuentra comúnmente a lo largo de las playas de la región.

A diferencia del proceso de formación de los plastiglomerados y los piropásticos, que es de origen antropogénico, debido a la quema de residuos plásticos, la formación de las antropoquinas no está mediada por actividades humanas, sino que son rocas sedimentarias que se forman de manera natural por un proceso de cementación de diferentes materiales disponibles en el medio, entre ellos, plásticos y otros tecnofósiles. Este proceso se produce, principalmente, debido a la precipitación de cemento (CaCO_3) que une tanto los materiales litológicos como los biológicos y antropogénicos en una masa rocosa consolidada.

Para el estudio, describieron y caracterizaron seis muestras de antropoquinas encontradas en la costa de Río Grande del Sur, un tramo de la costa brasileña que está altamente dominado por la acción del oleaje y un régimen de mareas bajo (Fernandino et al., 2020). Concretamente, las antropoquinas fueron recolectadas de tres playas, la playa Cassino, la playa Concheiros do Albardão y la playa Hermenegildo. Además, pequeños fragmentos extraídos de las muestras 3 y 6 se sometieron a un análisis de espectrometría de fluorescencia de rayos X (XRF). Los resultados de este estudio se resumen a continuación, además de en la Tabla 3.



Figura 7.- Antropoquinas encontradas a lo largo de la costa de Río Grande del Sur, Brasil. (A) muestra 1; (B) muestra 2; (C) muestra 3; (D) muestras 4, 5 y 6. Imágenes tomadas de Fernandino y cols., 2020.

La muestra 1 (ver Figura 7.A.) consistía en un fragmento de roca de playa cementado con fragmentos de conchas de moluscos bivalvos y granos líticos. Los fragmentos de estas conchas presentaban diversos tamaños (entre 0.5 y 2.5 cm), colores (amarillo-marrón) y estadios de redondez (entre 2 y 4, según la escala propuesta por (Pilkey et al., 1967)). Además, se observaba un tono rojo que sugiere la presencia de óxido de hierro y, en uno de los extremos, había una pieza de plástico translúcido de 6 cm de largo. La antropoquina 2 (ver Figura 7.B.) constaba de una roca de playa también rica en conchas de bivalvos junto con un clavo de metal de unos 6 cm, granos de arena fina y fragmentos líticos gruesos de hasta 3 cm de grava y guijarro, cementados. En este caso, las conchas mostraban un estado de 3 a 4 respecto a su redondez y los mismos colores (amarillo-marrón). Y la oxidación del clavo atribuyó un color rojizo predominante en la muestra. La muestra 3 (ver Figura 7.C.) era un pendiente de plástico negro adornado con perlas plásticas también, cementado con granos

de arena fina y fragmentos de conchas amarillentos, en el estadio 1 y 2 de la escala de redondez. Algunos de los adornos aún presentaban su brillos, mientras que otros, debido a la abrasión con la arena, eran ya opacos. Por último, las muestras 4, 5 y 6 (ver Figura 7.D.) eran tapas de botellas metálicas sobre las que se observaba una capa de arena de cuarzo de grano fino cementada con bioclastos. Las tres tapas presentaban un color rojizo debido a la oxidación del metal. La muestra seis, concretamente, presentaba además dos conchas de bivalvos cementadas y relativamente bien conservadas. Una de ellas, la de mayor tamaño, incluso se pudo identificar como *Macra isabelleana*. Por otro lado, la estructura interna característica de las tapas de plástico que mantiene la presión del líquido en la botella y evita que se escape el gas, aún se conserva en las muestras cuatro y cinco.

Tabla 3.- Características más relevantes de las seis muestras de antropoquinas recolectadas a lo largo de las costas del estado de Río Grande del Sur.

	Recolectada en	Longitud	Pieza antropogénica (tecnofósil)	Fragmentos de conchas de bivalvos	Análisis XRF
Muestra 1	No especificado	15 cm	Pieza plástica	✓	✗
Muestra 2	No especificado	15 cm	Clavo	✓	✗
Muestra 3	Playa Cassino	No especificado	Pendiente de plástico	✓	↑ C, Ca y Mg
Muestra 4	Playa Cassino	No especificado	Tapa de botella metálica	✗	✗
Muestras 5	Playa Cassino	No especificado	Tapa de botella metálica	✗	✗
Muestra 6	Playa Cassino	No especificado	Tapa de botella metálica	✓	↑ Fe y S

El análisis XRF llevado a cabo en las muestras tres y seis reflejó una composición distinta en cada una. La muestra tres presentó mayores cantidades de carbono, calcio y magnesio, mientras que en la muestra seis era mucho más abundante el hierro y el azufre. Esto indica la formación de, al menos, dos tipos diferentes de antropoquinas, una (muestra 3) más rica en carbonato de calcio, que es el cemento más común en las rocas de las playas (Danjo & Kawasaki, 2014), y otra (muestra 6) con cemento ferruginoso.

7.5. Algunos ejemplos en Canarias

A día de hoy, no hay estudios publicados acerca de la presencia de ninguna de estas cuatro nuevas formaciones plásticas en Canarias. Sin embargo, en playa Grande, en el Porís de Abona, el punto negro de la isla de Tenerife en cuanto a microplásticos se refiere (Álvarez-Hernández et al.,

2019) recientemente han sido recolectados pirolásticos por el grupo de investigación en Química Analítica Aplicada (AChem) de la Universidad de La Laguna. Y, como se aprecia en la Figura 8.A., realmente su apariencia es muy similar a la de las rocas, con la excepción de que los pirolásticos generalmente flotan, y las rocas, salvo las pumitas, no.

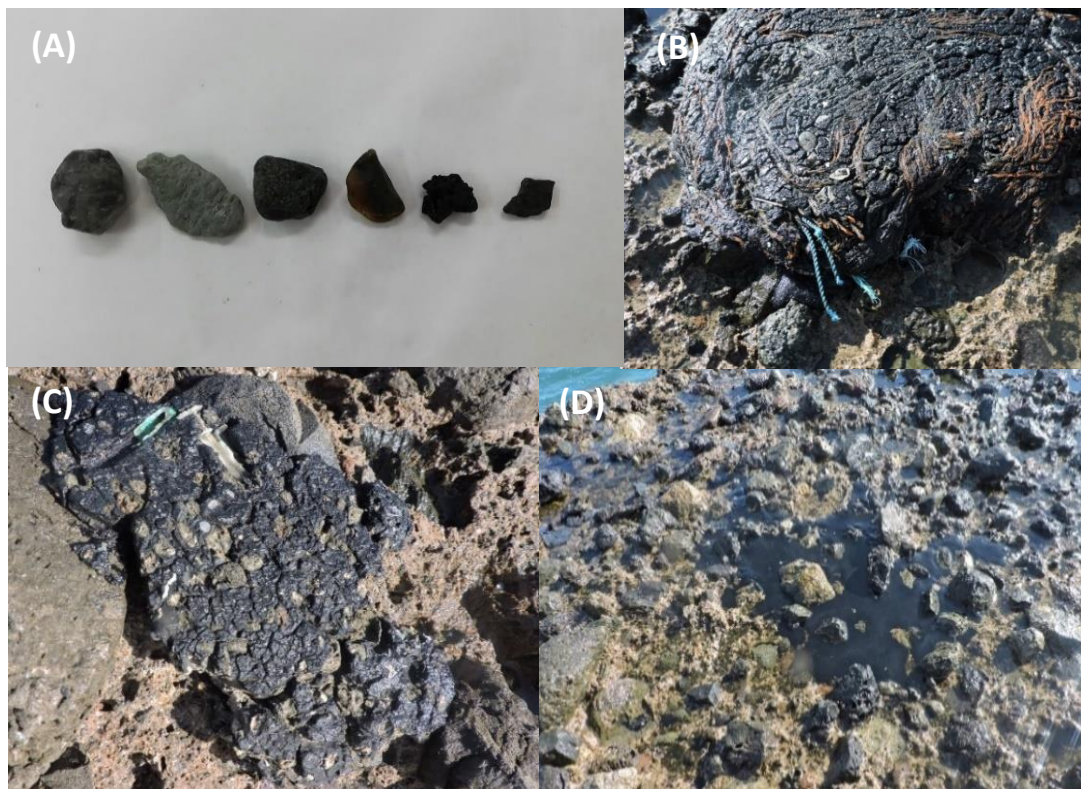


Figura 8.- (A) Pirolásticos hallados en playa Grande (imagen cedida por el Grupo de Investigación en Química Analítica Aplicada (AChem) de la Universidad de La Laguna); (B-D) Plastiglomerados mezclados con piche en playa Grande y Punta Sarnosa (el Porís de Abona, Tenerife).

Asimismo, se hizo una visita a playa Grande (el Porís de Abona) donde se pudo presenciar una formación similar a la de los plastiglomerados junto con alquitrán (Figuras 8.B-D). Además, para la realización de este TFG se recorrió toda la zona y, antes de llegar a playa Grande, en Punta Sarnosa, se pudo observar también estos conglomerados de plásticos y materiales biogénicos, junto con el alquitrán como aglutinante. En ambos lugares, estas formaciones se encontraban fusionadas a las zonas rocosas. Uno de los días incluso se pudo ver en Punta Sarnosa una mancha de este piche, aparentemente reciente, puesto que aún no se encontraba del todo solidificada ni contenía residuos plásticos ni otros materiales antropogénicos mezclados (ver imagen D). Como se puede apreciar en las otras dos imágenes (B y C), en estos casos el componente predominante es el alquitrán o piche. En la foto B, por ejemplo, se puede apreciar que éste está mezclado con una gran cantidad de cuerdas, y en la C, se puede incluso identificar una jeringuilla incluida en la matriz de piche.

8. Conclusiones

Las conclusiones que pueden extraerse de este trabajo son las siguientes:

- (1) La descripción estos nuevos tipos de contaminantes plásticos refleja cuán profundamente influye el comportamiento humano en los compartimentos naturales, lo cual es realmente preocupante.
- (2) Estos fenómenos son tan recientes que aún no hay una clasificación clara, puesto que hay científicos que engloban a los piroplásticos y las plasticostras dentro de un tipo de plastiglomerados (Corcoran & Jazvac, 2020), mientras que otros los clasifican como formaciones distintas (Gestoso et al., 2019; Turner et al., 2019).
- (3) Además, es necesario que se definan procedimientos estándar para las metodologías de muestreo, extracción y análisis de estas nuevas formaciones con el fin de facilitar la comparación entre estudios de diferentes lugares y autores.
- (4) Los hallazgos durante el estudio de "plasticostras" y "piroplásticos" en Giglio (Ehlers & Ellrich, 2020) demuestran que, al menos la formación de estos dos nuevos contaminantes plásticos, no son fenómenos locales, sino que podría tratarse de un fenómeno generalizado en diversas costas del mundo. Aunque aún se desconoce si, por ejemplo, puede haber lugares geográficos que, por determinadas circunstancias también desconocidas, puedan ser más propensos o no a albergar estas nuevas formaciones.
- (5) En los estudios publicados hasta ahora (Fernandino et al., 2020; Gestoso et al., 2019; Turner et al., 2019) se recomienda que, en adelante, los estudios sobre estas formaciones documenten tanto su distribución como su abundancia, además de examinar más detalladamente los posibles impactos de estos materiales, para así también poder decidir sobre la inclusión o no de éstos en la política medioambiental marina.
- (6) De estas cuatro nuevas formaciones, los piroplásticos constituyen una dificultad añadida, puesto que su reconocimiento es más difícil debido a que su apariencia es muy similar a la de las rocas. Esto hace que su identificación como basura marina sea más complicada, lo cual, potencialmente, provoca una subestimación del inventario de plásticos en las playas.
- (7) Algunos de los impactos de estas cuatro nuevas formaciones plásticas son: la liberación de compuestos tóxicos y aditivos asociados al plástico (plastiglomerados y piroplásticos), el transporte de especies exóticas invasoras (piroplásticos) y la propia ingesta de los plásticos, introduciéndose así éstos en las redes tróficas (plasticostras).
- (8) Durante muchos años se han investigado los macroplásticos, por lo que sus efectos sobre el ambiente y organismos marinos son más conocidos. En la actualidad, la atención se centra en los microplásticos (< 5mm), de manera que en los últimos años el número de investigaciones publicadas al respecto y la atención que reciben se ha disparado. Pero en estos últimos años se ha

descrito un nuevo problema ambiental: estas nuevas cuatro formaciones plásticas, las cuales requieren una mayor atención por parte de la comunidad científica, como primer paso para conocer en mayor detalle este nuevo problema y así poder encontrar soluciones al respecto.

9. Conclusions

The conclusions that can be drawn from this report are the following:

- (1) The description of all these new types of plastic pollutants reflects how profoundly human behavior can influence the natural compartments, which is truly concerning.
- (2) These phenomena are so recent that there is still no official classification, since there are scientists who include pyroplastics and plasticrusts within a type of plastiglomerates (Corcoran & Jazvac, 2020), while others classify them as different formations (Gestoso et al., 2019; Turner et al., 2019).
- (3) In addition, it is necessary to define standard procedures for the methodologies of sampling, extraction and analysis of these new formations in order to ease the comparison between different studies conducted by several authors in different locations.
- (4) The findings of the study about "plasticrusts" and "pyroplastics" in Giglio's island (Ehlers & Ellrich, 2020) show that, at least these two new formations, are not local phenomena, so they could be a generalized phenomenon in various coasts of the world. However, it is still unknown, for example, if there could be some locations that due to certain circumstances also unknown, may or may not be more likely to host these new formations.
- (5) Therefore, in the studies published so far (Fernandino et al., 2020; Gestoso et al., 2019; Turner et al., 2019) it is recommended that, from now on, all studies about these formations address both their distribution and their abundance, furthermore to examine in more detail the possible impacts of these materials, being able to decide whether or not to include them in marine environmental policy.
- (6) Of these four new formations, pyroplastics constitutes an added difficulty since their recognition is more difficult because of their similar appearance to rocks. This makes the identification of marine litter more difficult, leading to a potential underestimation of the plastic inventory on beaches.
- (7) Some of the suspected and potential impacts of these four new plastic formations are: the release of toxic compounds and pollutants associated to plastics (plastiglomerates and pyroplastics), transport of alien invasive species (pyroplastics) and the intake of plastics, thus introducing them into the trophic networks (plasticrusts).

(8) Macroplastics have been investigated for many years, so their effects on the environment and marine organisms are better known. Nowadays, the focus is on microplastics (<5mm), so that in recent years the number of published researched and attention recieved on it have grown exponentially. Nevertheless, in recent years a new environmental problem has been described: these four new plastic formations, which require greater attention from the scientific community, as a first step to learn in more detail about this new problem and thus be able to seek solutions regarding this.

10. Bibliografía

- Adika, S. A., Mahu, E., Crane, R., Marchant, R., Montford, J., et al.** (2020). Microplastic ingestion by pelagic and demersal fish species from the Eastern Central Atlantic Ocean, off the Coast of Ghana. *Marine Pollution Bulletin*, **153**.
- Álvarez-Hernández, C., Cairós, C., López-Darias, J., Mazzetti, E., Hernández-Sánchez, C., et al.** (2019). Microplastic debris in beaches of Tenerife (Canary Islands, Spain). *Marine Pollution Bulletin*, **146**, 26–32.
- Anbumani, S., y Kakkar, P.** (2018). Ecotoxicological effects of microplastics on biota : a review. *Environmental Science and Pollution Research*, **25**, 14373–14396.
- Baalkhuyur, F. M., Bin Dohaish, E. J. A., Elhalwagy, M. E. A., Alikunhi, N. M., AlSuwailam, A. M., et al.** (2018). Microplastic in the gastrointestinal tract of fishes along the Saudi Arabian Red Sea coast. *Marine Pollution Bulletin*, **131**, 407–415.
- Bank, M. S., y Hansson, S. V.** (2019). The Plastic Cycle: A Novel and Holistic Paradigm for the Anthropocene. *Environmental Science and Technology*, **53**, 7177–7179.
- Barboza, L. G. A., Vethaak, A. D., Lavorante, B. R. B. O., Lundebye, A., y Guilhermino, L.** (2018). Marine microplastic debris : An emerging issue for food security, food safety and human health. *Marine Pollution Bulletin*, **133**, 336–348.
- Brandon, J., Goldstein, M., y Ohman, M. D.** (2016). Long-term aging and degradation of microplastic particles : Comparing in situ oceanic and experimental weathering patterns. *Marine Pollution Bulletin*, **110**, 299–308.
- Cacabelos, E., Gestoso, I., Ramalhosa, P., Riera, L., Neto, A. I., et al.** (2019). Intertidal assemblages across boulders and rocky platforms : a multi-scaled approach in a subtropical island. *Marine Biodiversity*, **49**, 2709–2723.
- Cearreta, A.** (2018). ¿Existe el Antropoceno? *Investigación y Ciencia*, **88**.
- Cooper, D. A., y Corcoran, P. L.** (2010). Effects of mechanical and chemical processes on the degradation of plastic beach debris on the island of Kauai , Hawaii. *Marine Pollution Bulletin*, **60**, 650–654.
- Corcoran, P. L., y Jazvac, K.** (2020). The consequence that is plastiglomerate. *Nature Reviews Earth & Environment*, **1**, 6–7.
- Corcoran, P. L., Moore, C. J., y Jazvac, K.** (2014). An anthropogenic marker horizon in the future rock record. *GSA Today*, **24**, 4–8.
- Cózar, A., Echevarría, F., González-Gordillo, J. I., Irigoien, X., Úbeda, B., et al.** (2014). Plastic debris in the open ocean. *National Academy of Sciences*, **28**, 10239–10244.
- Crawford, C. B., y Quinn, B.** (2017). The Emergen of Plastics. *Microplastic Pollutants*, **1** (pp. 1–17). Elsevier.

- Crawford, C. B., y Quinn, B.** (2017). Plastic production, waste and legislation. *Microplastic Pollutants*, 3 (pp. 39–56). Elsevier.
- Cutroneo, L., Ferretti, G., Scafidi, D., Ardizzone, G. D., Vagge, G., et al.** (2017). Current observations from a looking down vertical V-ADCP: interaction with winds and tide? The case of Giglio Island (Tyrrhenian Sea, Italy). *Oceanologia*, **59**, 139–152.
- Danjo, T., y Kawasaki, S.** (2014). Characteristics of Beachrocks: A Review. *Geotechnical and Geological Engineering*, **32**, 215–246.
- De la Torre, G. E.** (2019). Microplásticos en el medio marino : una problemática que abordar. *Ciencia y Tecnología*, **15**, 27–37.
- De la Torre, G. E., Dioses-Salinas, D. C., Castro, J. M., Antay, R., Fernández, N. Y., et al.** (2020). Abundance and distribution of microplastics on sandy beaches of Lima, Peru. *Marine Pollution Bulletin*, **151**, 110877.
- De la Torre, G. E., Dioses-Salinas, D. C., Pizarro-Ortega, C. I., y Santillán, L.** (2021). New plastic formations in the Anthropocene. *Science of the Total Environment*, **754**, 142216.
- Desforges, J.-P. W., Galbraith, M., y Ross, P. S.** (2015). Ingestion of Microplastics by Zooplankton in the Northeast Pacific Ocean. *Archives of Environmental Contamination and Toxicology*, **69**, 320–330.
- Dioses-salinas, D. C., Pizarro-ortega, C. I., & De-la-torre, G. E.** (2020). A methodological approach of the current literature on microplastic contamination in terrestrial environments: Current knowledge and baseline considerations. *Science of the Total Environment*, **730**, 139-164.
- Doughty, C. E., Wolf, A., y Field, C. B.** (2010). Biophysical feedbacks between the Pleistocene megafauna extinction and climate : The first human - induced global warming ? *Geophysical Research Letters*, **37**, 1–5.
- Duncan, E. M., Broderick, A. C., Fuller, W. J., Galloway, T. S., Godfrey, M. H., et al.** (2018). Microplastic ingestion ubiquitous in marine turtles. *Global Change Biology*, **25**, 744–752.
- Ehlers, S. M., y Ellrich, J. A.** (2020). First record of ‘plasticrusts’ and ‘pyroplastic’ from the Mediterranean Sea. *Marine Pollution Bulletin*, **151**, 110845.
- Fernandino, G., Elliff, C. I., Francischini, H., y Dentzien-Dias, P.** (2020). Anthropoquinas: First description of plastics and other man-made materials in recently formed coastal sedimentary rocks in the southern hemisphere. *Marine Pollution Bulletin*, **154**, 111044.
- Fries, E., Dekiff, J. H., Willmeyer, J., Nuelle, M.-T., Ebert, M., et al.** (2013). Identification of polymer types and additives in marine microplastic particles using pyrolysis-GC/MS and scanning electron microscopy. *Environmental Science: Processes & Impacts*, **15**, 1949–1956.
- Gall, S. C., y Thompson, R. C.** (2015). The impact of debris on marine life. *Marine Pollution Bulletin*, **92**, 170–179.
- Gestoso, I., Cacabelos, E., Ramalhosa, P., y Canning-Clode, J.** (2019). Plasticrusts: A new potential threat in the Anthropocene’s rocky shores. *Science of the Total Environment*, **687**, 413–415.
- Gregory, M. R., y Andrady, A. L.** (2017). Plastics in the Marine Environment. *Annual Review of Marine Science*, **9**, 205–229.
- Gutow, L., Bartl, K., Saborowski, R., y Beermann, J.** (2019). Gastropod pedal mucus retains microplastics and promotes the uptake of particles by marine periwinkles. *Environmental Pollution*, **246**, 688–696.
- Hardesty, B. D., Lawson, T., van der Velde, T., Lansdell, M., y Wilcox, C.** (2016). Estimating quantities and sources of marine debris at a continental scale. *Frontiers in Ecology*, **15**, 18–25.
- Hermsen, E., Mintenig, S., Besseling, E., y Koelmans, A. A.** (2018). Quality Criteria for the Analysis of Microplastic in Biota Samples. Critical review. *Environmental Science & Technology*, **52**, 10230–

- Hernandez-Gonzalez, A., Saavedra, C., Gago, J., Covelo, P., Santos, M. B., et al.** (2018). Microplastics in the stomach contents of common dolphin (*Delphinus delphis*) stranded on the Galician coasts (NW Spain, 2005 – 2010). *Marine Pollution Bulletin*, **137**, 526–532.
- Hernandez-Milian, G., Lusher, A., MacGibbon, S., y Rogan, E.** (2019). Microplastics in grey seal (*Halichoerus grypus*) intestines: Are they associated with parasite aggregations? *Marine Pollution Bulletin*, **146**, 349–354.
- Jambeck, J. R., Geyer, R., Wilcox, C., Siegler, T. R., Perryman, M., et al.** (2015). Plastic waste inputs from land into the ocean. *Science*, **347**, 768–771.
- Kain, E. C., Lavers, J. L., Berg, C. J., Raine, A. F. y Bond, A. L.** (2016). Plastic ingestion by Newell's (*Puffinus newelli*) and wedge-tailed shearwaters (*Ardenna pacifica*) in Hawaii. *Environmental Science and Pollution Research*, **23**, 23951–23958.
- Käppler, A., Fischer, D., Oberbeckmann, S., Schernewski, G., Labrenz, M., et al.** (2016). Analysis of environmental microplastics by vibrational microspectroscopy: FTIR, Raman or both? *Analytical and Bioanalytical Chemistry*, **408**, 8377–8391.
- Kenyon, K. W., y Kridler, E.** (1969). Laysan Albatrosses Swallow Indigestible Matter. *Oxford Journals*, **86**, 339–343.
- Kusch, P.** (2017). Application of Pyrolysis-Gas Chromatography/Mass Spectrometry (Py-GC/MS). In *Characterization and Analysis of Microplastics. Comprehensive Analytical Chemistry*. (Vol. **75**, pp. 169–207). Elsevier Ltd.
- Law, K. L.** (2016). Plastics in the Marine Environment. *Annual Review of Marine Science*, **9**, 205–229.
- Le Guen, C., Suaria, G., Sherley, R. B., Ryan, P. G., Aliani, S., et al.** (2020). Microplastic study reveals the presence of natural and synthetic fibres in the diet of King Penguins (*Aptenodytes patagonicus*) foraging from South Georgia. *Environment International*, **134**, 105303.
- Lecher, A. L.** (2018). Piecing together the plastic cycle. *Nature Geoscience*, **11**, 150–154.
- Lechthaler, S., Waldschläger, K., Stauch, G. y Schüttrumpf, H.** (2020). The Way of Macroplastic through the Environment. *Environments*, **7**, 1–30.
- Moore, C. J., Moore, S. L., Leecaster, M. K. y Weisberg, S. B.** (2001). A Comparison of Plastic and Plankton in the North Pacific Central Gyre. *Marine Pollution Bulletin*, **42**, 1297–1300.
- Moore, Charles J.** (2008). Synthetic polymers in the marine environment: A rapidly increasing, long-term threat. *Environmental Research*, **108**, 131–139.
- Moore, R. C., Loseto, L., Noel, M., Etemadifar, A., Brewster, J. D., et al.** (2020). Microplastics in beluga whales (*Delphinapterus leucas*) from the Eastern Beaufort Sea. *Marine Pollution Bulletin*, **150**, 110723.
- Naidu, S. A.** (2019). Preliminary study and first evidence of presence of microplastics and colorants in green mussel, *Perna viridis* (Linnaeus, 1758), from southeast coast of India. *Marine Pollution Bulletin*, **140**, 416–422.
- Oehlmann, J., Schulte-Oehlmann, U., Kloas, W., Jagnytsch, O., Lutz, I., et al.** (2009). A critical analysis of the biological impacts of plasticizers on wildlife. *Philosophical Transaction of The Royal Society*, **364**, 2047–2062.
- Pilkey, O. H., Morton, R. W., y Luternauer, J.** (1967). The carbonate fraction of beach and dune sands. *Sedimentology*, **8**, 311–327.
- PlasticsEurope.** (2020). Plastics – the Facts 2020. *PlasticEurope*, 1–64.
<https://www.plasticseurope.org/en/resources/publications/4312-plastics-facts-2020>
- Procter, J., Hopkins, F. E., Fileman, E. S. y Lindeque, P. K.** (2019). Smells good enough to eat: Dimethyl sulfide (DMS) enhances copepod ingestion of microplastics. *Marine Pollution Bulletin*, **138**,

- Provencher, J. F., Vermaire, J. C., Avery-Gomm, S., Braune, B. M. y Mallory, M. L.** (2018). Garbage in guano? Microplastic debris found in faecal precursors of seabirds known to ingest plastics. *Science of the Total Environment*, **644**, 1477–1484.
- Qiu, Q., Tan, Z., Wang, J., Peng, J., Li, M., et al.** (2016). Extraction, enumeration and identification methods for monitoring microplastics in the environment. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, **176**, 102–109.
- Rebolledo, E. L. B., Van Franeker, J. A., Jansen, O. E. y Brasseur, S. M. J. M.** (2013). Plastic ingestion by harbour seals (*Phoca vitulina*) in The Netherlands. *Marine Pollution Bulletin*, **67**, 200–202.
- Ribeiro-Claro, P., Nolasco, M. M. y Araújo, C.** (2017). Characterization of Microplastics by Raman Spectroscopy. In *Characterization and Analysis of Microplastics. Comprehensive Analytical Chemistry*. (Vol. **75**, pp. 119–151).
- Ruddiman, W. F.** (2003). The Anthropogenic Greenhouse Era began thousand of years ago. *Climatic Change*, **61**, 261–293.
- Ryan, P. G., Moore, C. J., Van Franeker, J. A. y Moloney, C. L.** (2009). Monitoring the abundance of plastic debris in the marine environment. *Philosophical Transaction of The Royal Society*, **364**, 1999–2012.
- Savoca, M. S., Wohlfeil, M. E., Ebeler, S. E. y Nevitt, G. A.** (2016). Marine plastic debris emits a keystone infochemical for olfactory foraging seabirds. *Chemical Ecology*, **2**, 1–9.
- Shah, A. A., Hasan, F., Hameed, A. y Ahmed, S.** (2008). Biological degradation of plastics: A comprehensive review. *Biotechnology Advances*, **26**, 246–265.
- Turner, A., Wallerstein, C., Arnold, R. y Webb, D.** (2019). Marine pollution from pyroplastics. *Science of the Total Environment*, **694**, 133610.
- Ugwu, K., Herrera, A. y Gómez, M.** (2021). Microplastics in marine biota: A review. *Marine Pollution Bulletin*, **169**, 112540.
- Wu, M., Yang, C., Du, C. y Liu, H.** (2020). Microplastics in waters and soils: Occurrence, analytical methods and ecotoxicological effects. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, **202**, 110910.
- Zalasiewicz, J., Waters, C. N., Ivar do Sul, J. A., Corcoran, P. L., Barnosky, A. D., et al.** (2016). The geological cycle of plastics and their use as a stratigraphic indicator of the Anthropocene. *Anthropocene*, **13**, 4–17.
- Zalasiewicz, J., Williams, M., Haywood, A. y Ellis, M.** (2011). The Anthropocene : a new epoch of geological time? *Philosophical Transaction of The Royal Society*, **369**, 835–841.
- Zalasiewicz, J., Williams, M., Waters, C. N., Barnosky, A. D. y Haff, P.** (2014). The technofossil record of humans. *The Anthropocene Review*, **1**, 34–43.