



# Micro y nanoplásticos: los que no salen en la foto

**Ana Martínez Vázquez**

Departamento de Materiales de Baja Dimensionalidad  
Instituto de Investigaciones en Materiales, Universidad Nacional Autónoma de México, Circuito Exterior S. N. Ciudad Universitaria, CP 04510, CDMX, México  
[martina@unam.mx](mailto:martina@unam.mx)

## Palabras clave:

Toxicidad; polímeros; nanoplásticos; degradación

## Resumen

Antes de que nos pusieran esas imágenes de plásticos en basureros y mares, o saliendo de la nariz de una tortuga en forma de popote, la humanidad pensaba y sentía que los plásticos eran el “material por excelencia”: baratos de producir, resistentes, ligeros y versátiles. La palabra plástico viene del griego *plastikos*, que significa “que se puede moldear”. Por eso se pueden hacer objetos de distintas formas y por lo mismo se utilizan para todo. Ser barato y duradero tiene sus consecuencias, porque se pueden hacer muchos plásticos a bajo costo que persisten mucho tiempo y esto, a su vez, produce una enorme contaminación plástica en el mundo. En general, la idea hoy es tratar de usar menos plástico, para que las montañas de basura plástica (que también están en los mares) vayan disminuyendo. Lo sabemos y somos conscientes de ello. El problema ahora es con

los plásticos que no salen en la foto, que no se ven y que no sabemos el daño que pueden hacer. Son los llamados micro- y nanoplásticos, pequeños pedazos que se van formando cuando el material, que es tan resistente, se va partiendo hasta formar pedazos de menos de cinco milímetros (microplásticos) o menores a cien nanómetros (nanoplásticos). De hecho, comemos el equivalente a una tarjeta de crédito al año de micro y nanoplásticos. Eso ¿nos hace daño? ¿Qué se sabe? Se sabe poco, pero se sabrá más. Por lo pronto esto es parte de lo que tenemos.

Los microplásticos no se descubrieron, ¡se buscaron! Todo empezó con Richard Thompson, un joven voluntario recolector de basura en las playas. Él vio cómo la gente ignoraba la basura que podía estar en pequeños pedazos y sólo recogía la que estaba en grandes piezas, como redes de pescar o llantas. No recogían ni buscaban los pedazos más chicos. Años después, ya como profesor de biología marina en la Universidad de Plymouth (Reino Unido),

se dio a la tarea con sus estudiantes de recoger basura pequeña. Así encontró los microplásticos. Todo lo publicó en 2004, en la revista *Science*, bajo el título. “Perdido en el mar: ¿dónde está todo el plástico?” [Thomson, 2004] En este artículo define a un microplástico como aquella pieza de polímero que mide máximo 5 milímetros. Después de encontrar a los microplásticos buscaron nanoplásticos porque no parecía haber alguna razón para que esos pequeños pedazos de plástico no siguieran rompiéndose. ¡Y los encontraron! Los nanoplásticos son un millón de veces más pequeños que los microplásticos, recordando que un milímetro (mm) equivale a 1 000 000 de nanómetros (nm). Un nanoplástico se define como aquella pieza que tiene un diámetro menor a 100 nm.

¿Cómo se forman los micro y los nanoplásticos? Empecemos pensando en que los plásticos son polímeros. Polímero viene del griego y significa *poly* muchos *mero* partes. Es un material formado por muchas partes iguales que se repiten muchas veces. Por ejemplo, el polietileno es una molécula de etileno que se repite muchas veces (ver Tabla 1). Los polímeros son duraderos porque tardan mucho tiempo en degradarse. Esto significa que son resistentes al ataque microbiano porque, finalmente, en el tiempo que tienen de existencia no ha evolucionado un grupo de enzimas que sea capaz de degradarlos. Los materiales para hacer polímeros vienen principalmente del petróleo, y aunque sí hay enzimas que degradan petróleo, a los plásticos todavía no les llega la hora. Ya se empiezan a descubrir algunas enzimas y algunos organismos, y ya se hacen plásticos biodegradables, pero eso es otra historia.

Tabla 1. Ejemplo de materiales plásticos, su fórmula química y tiempo estimado para su degradación





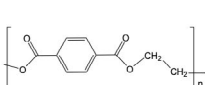

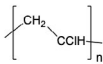
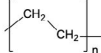
500 años		300 años	150 años
			
Poliétileno tereftalato (PET)	Poliestireno (unicel)	Cloruro de polivinilo	Polietileno
			

Tabla 1. Ejemplo de materiales plásticos, su fórmula química y tiempo estimado para su degradación

En la tabla 1 se presentan algunos ejemplos de objetos hechos con polímeros, su fórmula química y los tiempos estimados de degradación. Recordemos que todo material termina degradándose. El reto es que sea en poco tiempo para que no se nos acumule la basura. Para darnos una idea del potencial contaminante de los materiales también hay que considerar el tiempo de vida de uso que tienen. De los objetos de la tabla 1, las botellas de PET y las bolsas de polietileno se usan y se tiran, por lo que su tiempo de vida es corto, días o meses a lo mucho. La ropa hecha del llamado poliéster (que también es PET) suele durar más, aunque situaciones como la moda también han provocado la cultura de “usar y tirar”. El unicel es uno de los materiales que más contaminan y que menos se recicla. También suele utilizarse una sola vez cuando son vasos y platos, aunque los tortilleros y los envases como los que se usan para el trasplante de órganos tienen una vida más larga. Las muñecas en general “viven” más porque son objetos que se utilizan para jugar por largos periodos tiempo, años incluso. Decimos que “para ver lo que contaminan también tenemos que considerar lo que viven”, porque cuando un material llega a la basura ahí va a permanecer un buen rato. Una bolsa de

plástico, donde colocamos una manzana para llevarla a casa, “vive” unas horas, pero tarda 150 años en degradarse. El análisis costo beneficio sale muy caro cuando los materiales se usan por poco tiempo.

La degradación consiste en cambiar a un material como resultado de factores ambientales, como pueden ser la luz, el calor, condiciones químicas o la actividad biológica. Para degradarse completamente se tiene que formar  $\text{CO}_2$  y  $\text{H}_2\text{O}$ , que es lo que se llama la mineralización. Si los polímeros tienen además otros elementos, como el polivinilo que tiene cloro, o el poliuretano que tiene nitrógeno, la degradación además dará otros productos. De cualquier manera, para poderse degradar se tiene que formar el monómero, es decir, la parte más pequeña que es la que se repite. Se sabe que hay enzimas y gusanos que son capaces de realizar la degradación de los plásticos, pero primero se tienen que despolimerizar hasta formar monómeros y oligómeros. Los oligómeros (del griego ολιγος, que significa poco o pocos) están formados por pocos monómeros. Cuando son largas cadenas de polímero no es tan fácil degradarlos, porque no pasan por la membrana celular de los organismos que los pueden procesar. Monómeros, dímeros y oligómeros son más fáciles de degradar y mineralizar, porque pueden atravesar la membrana celular.

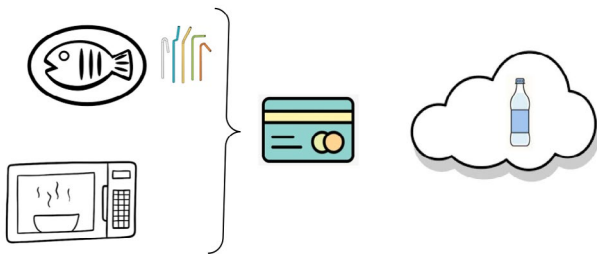
Los micro- y nanoplásticos no necesariamente surgen de algún tipo de degradación, porque en principio los plásticos sólo se parten en pedazos. Cuando se dividen en pedazos es como si se erosionaran. Cuando se hacen pequeños, la fórmula química se conserva y sólo cambia el número de monómeros que hay en la cadena.

Cada nanoplástico de PET sigue siendo PET y conserva sus propiedades, aunque no necesariamente todas, porque quizás ya no es tan versátil y ya no se pueden hacer objetos con ese pedazo. Hoy se sabe que en el mar, el plástico se rompe más fácilmente en pequeños pedazos. Esto se debe a la salinidad, a los microorganismos y la fuerza mecánica de las olas, que van dando golpeteos que favorecen la fractura de los polímeros. Hasta qué tamaño se pueden ir partiendo es algo que todavía no sabemos. En el límite de las cosas, se podría pensar que los nanoplásticos, si siguen dividiéndose, llegarán a formar oligómeros, con lo cual podrían ser más fácilmente biodegradables, pero esto es algo que no sabemos todavía y que habrá que seguir investigando. El problema con el que nos enfrentamos es el tamaño. Son tan pequeños y muchos de ellos transparentes, que son muy difíciles de detectar y manipular. Se analizan por técnicas de microscopía electrónica y por infrarrojo, pero seguimos teniendo problemas con las técnicas de detección.

Los plásticos tirados como basura, además de que se ven horribles, provocan problemas en la vida animal porque taponan las vías de digestión cuando son grandes piezas; las redes o bolsas de plástico atrapan animales marinos y en general les estorban para vivir. Tienen efectos físicos muy perjudiciales, pero parece que no reaccionan, que no son tóxicos, porque no nos envenenan como el cianuro que sí reacciona con la hemoglobina y entonces mueres. En realidad, no sabemos si al comer mucho plástico vamos a terminar envenenados porque, finalmente, en la dosis está el veneno y todo en grandes cantidades nos puede perjudicar. Lo que sí sabemos es

que dañan físicamente a los animales, porque los atrapan, no los dejan respirar y alteran sus aparatos digestivos. Los micro- y los nanoplásticos no provocan esos daños físicos, porque al ser pequeños no atrapan a nadie, ni taponan las vías digestivas. Si no “salen en la foto” porque no se ven y porque no provocan los daños que hacen los plásticos de mayor tamaño, ¿por qué nos preocupan? ¿Dejaremos que se sigan haciendo pequeños hasta que lleguen a formar oligómeros y puedan ser degradados por organismos y enzimas?

Las cosas no son tan sencillas, porque no sabemos si los micro- y nanoplásticos son capaces de envenenar. Lo que sí sabemos es que nos lo comemos con los alimentos y también con los que se van produciendo de los envases de plástico que metemos al microondas para calentar la comida. Se ha estimado que los humanos comemos el equivalente a una tarjeta de crédito al año. Además, están en el aire y los inhalamos o se introducen a través de la piel. No sabemos eso qué daño nos produce. En eso es en lo que se centran muchos trabajos de investigación en los últimos años. ¿Qué nos hacen los micro- y nanoplásticos?



Se estima que ingerimos el equivalente a una tarjeta de crédito al año de plástico con la comida. Además, están en el aire y los respiramos o nos entran por la piel

Los micro y nanoplásticos entran en los animales por tres vías: la digestiva, por la respiración y por la piel. Parece que la más

peligrosa es la vía de la inhalación. En experimentos que se han hecho con el pez cebra se ha encontrado que la presencia de nanoplásticos provoca cambios en la conducta. Otros experimentos con caracoles gigantes indican que no les produce estrés oxidativo ni les perjudican, al contrario, los que comieron plásticos crecieron más. Parece que los microplásticos funcionan como una licuadora en el estómago de estos caracoles, lo que ayuda a dividir los alimentos y eso facilita su digestión. Experimentos con ratones parecen indicar que los nanoplásticos pueden alcanzar el cerebro, pero no se demostró que esto les causara algún problema de salud. Los experimentos con tejidos de pulmón o a nivel celular parecen mostrar que los nanoplásticos son capaces de entrar en la célula y también alcanzar el flujo sanguíneo, con lo cual podrían llegar a cualquier parte del organismo. Estos experimentos en tejidos, *in vitro*, no son capaces de determinar lo que sucede en vivo. Además, en estas investigaciones se utiliza mucho plástico, que es irreal porque en el ambiente nunca se llegará a tener esas cantidades. Hay que hacer experimentos en vivo, con concentraciones más acorde con las que tenemos en el ambiente y buscando los efectos que pueden producir.

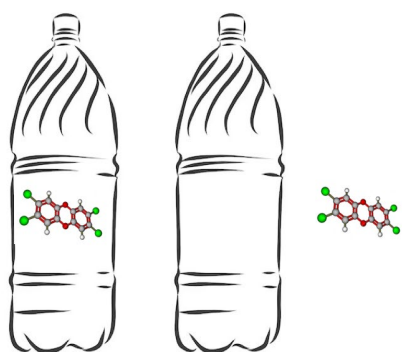
Algunos de los experimentos en vivo se han enfocado en ver qué le pasa al nanoplástico una vez que ingresa en el organismo. En particular hicieron poliestireno modificado, al que le colocaron zirconio radioactivo que podían seguir con imágenes de Tomografías de Emisión de Positrones. Este poliestireno radioactivo se lo dieron a comer a ratones, y después les hicieron las tomografías. En las imágenes encuentran que a las seis horas después de haberlo

ingerido, el microplástico se encuentra en el estómago, después se va moviendo al intestino hasta que después de 48 horas, no aparece ningún rastro del microplástico en el cuerpo del ratón. Este experimento parece indicar que el nanoplastico atraviesa al ratón sin acumularse ni hacerle daño.



Con poliestireno modificado se puede seguir el plástico una vez que entra en el organismo del ratón, usando Tomografías de Emisión de Positrones

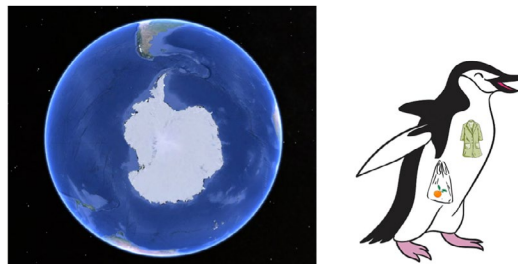
Los plásticos pueden absorber contaminantes químicos y biológicos en su superficie, con lo cual los pueden transportar. Esto se sabe, pero se desconoce si los contaminantes se quedan atrapados en el plástico o si se van soltando. Podrían ser peligrosos los plásticos con contaminantes porque estarían acarreado y entregando contaminantes allá por donde van, o podrían ser beneficiosos si solamente los absorben y ya no los volvieran a soltar, porque sería una forma de atraparlos.



¿Atrapan y sueltan sustancias venenosas contaminantes, o se los quedan y los guardan?

Con toda esta información, que en realidad es un resumen, porque hay mucha más, parece que hay más preguntas abiertas que respuestas certeras. Lo que sabemos es que hay micro- y nanoplasticos en todos sitios, que los humanos ingerimos sin darnos cuenta el equivalente a una tarjeta de crédito al año, que los nanoplasticos absorben contaminantes y poco más. La dificultad en las investigaciones como dijimos antes, está en su tamaño. Son tan pequeños que es difícil hacer investigación. Aquí es donde la química computacional puede dar algunas ideas, pero para cálculos cuánticos incluso los nanoplasticos son sistemas muy grandes. Esa es la paradoja. Son grandes para estudios de química cuántica pero muy pequeños para trabajarlos en el laboratorio. Aun así, nos las arreglamos para saber más de estos materiales. Con la química cuántica, usamos modelos.

Una forma de estudiar a los polímeros con la química computacional es usando oligómeros. Así se han hecho muchas investigaciones exitosas por ejemplo para estudiar polímeros conductores. En particular los resultados que aquí presentaremos se enfocan en dos tipos de nanoplasticos, que fueron los que se encontraron como microplásticos en las heces fecales de los pingüinos de la Antártida: polietileno y poliéster. Se cree que el poliéster se desprende de la ropa al lavarse.



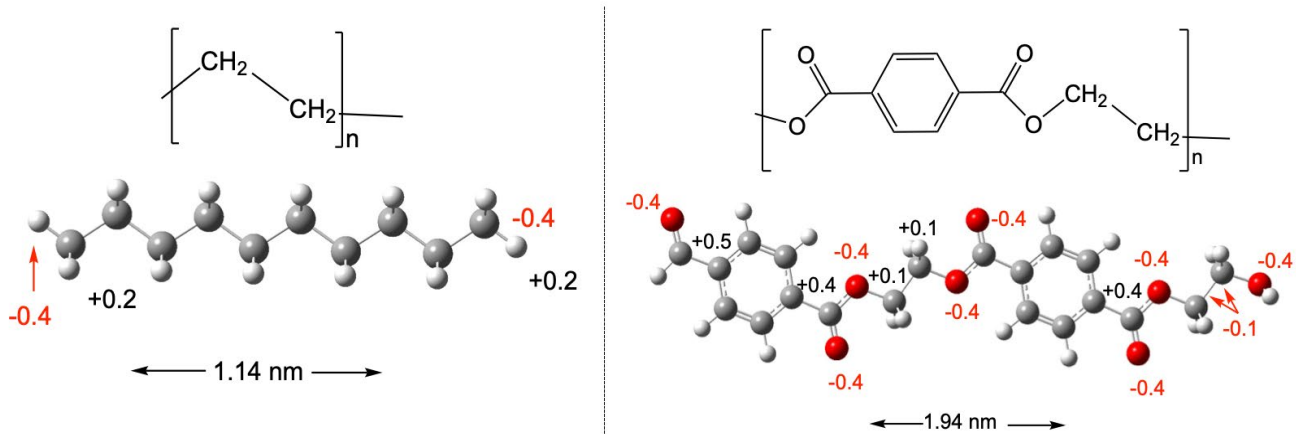
En las heces de los pingüinos de la Antártida se encontraron microplásticos de polietileno y poliéster



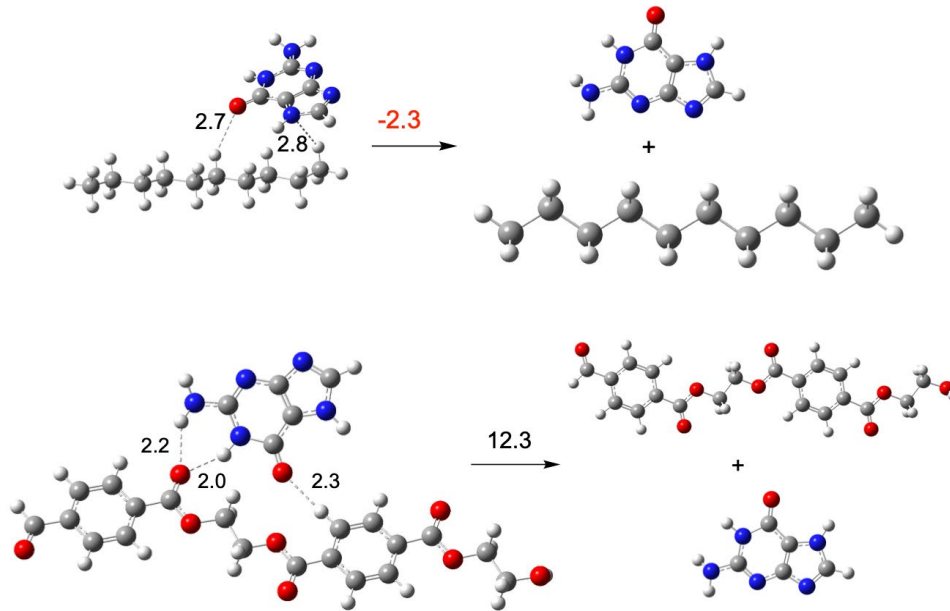
Como modelo de polietileno se utilizó un oligómero de diez átomos de carbono. Para el poliéster se utilizaron dos monómeros. A continuación, se presentan las estructuras de estos dos modelos, una vez realizada la optimización de la geometría. Esto significa que esta es la geometría más estable. El oligómero de polietileno tiene una longitud de 1.14 nm mientras que el del poliéster (que es tereftalato de polietileno, PET) mide 1.94 nm. También se reportan los valores de las cargas atómicas de Mulliken. Con base en estos valores podemos decir que los carbonos del polietileno y los oxígenos del PET tienen carga negativa, mientras que los hidrógenos son positivos. Esto es lo que se espera con base en sus valores de electronegatividad. Lo que se puede deducir al comparar estos dos modelos es que el PET, al tener oxígenos negativos, podrá interactuar con otras moléculas formando puentes de hidrógeno, por ejemplo. En el caso del polietileno los átomos de carbono negativos tienen un impedimento estérico que no les permitirá formar puentes de hidrógeno con otras moléculas. En este caso serán los hidrógenos los que puedan interactuar.

Esto es importante cuando queremos analizar si estos nanoplásticos interactúan con moléculas relevantes para la vida, como las bases nitrogenadas del ADN. Para ver si esto ocurre se calculó la interacción entre estos dos sistemas y la molécula de guanina. La guanina es una de las bases nitrogenadas que forma al ADN. En la figura se observa cómo se enlazan. También se presenta la energía de disociación (en Kcal/mol) que se calcula como la suma de la energía de los productos menos la energía de los reactivos (en este caso, el sistema oligómero-guanina).

En el caso del polietileno, la reacción de disociación tiene una energía que es negativa, lo que significa que los sistemas disociados son más estables que cuando están unidos. Cuando es el PET el que interactúa, se observa la formación de puentes de hidrógeno y la energía de disociación es positiva. Por eso podemos decir que la interacción entre PET y guanina es favorable. Como se predijo cuando se observaron las cargas de Mulliken, los oxígenos del PET y los átomos de hidrógeno del polietileno



Estructuras optimizadas de los dos modelos. Se incluyen los valores de la longitud de la molécula y de las cargas atómicas de Mulliken



Interacción de los oligómeros con guanina. El valor corresponde a la energía de disociación en Kcal/mol. Las distancias de enlace se reportan en Å

forman puentes de hidrógeno. El puente de hidrógeno O---H es más fuerte que la interacción H---H. El PET forma tres puentes de hidrógeno O---H mientras que el polietileno forma dos interacciones H---H y un puente de hidrógeno O---H. Esto explica que el sistema con PET unido a la guanina sea más estable que el del polietileno. Si se enlaza a una molécula tan importante como la guanina, esto puede significar la posibilidad de alterar el funcionamiento de la replicación del ADN y esto tendría consecuencias graves. En este caso, el PET es potencialmente más peligroso que el polietileno.

Con estudios como este se puede investigar la potencial reactividad (y toxicidad) de distintos sistemas poliméricos, para tratar de dilucidar la peligrosidad de estos materiales cuando se vuelven nanométricos. Seguimos preguntándonos si con los nanoplásticos es como con el chile, que mientras más pequeño más picoso. ¿Así serán los plásticos, mientras más pequeños más pe-

ligrosos? No se sabe, pero se sabrá pronto. Lo que sí queda claro es que se producen y se utilizan millones de toneladas de plásticos al año. El compromiso social es usar menos plásticos, aunque no sepamos si los que no salen en la foto son peligrosos. Mientras no se haga nada con los plásticos de la basura éstos son potencialmente dañinos. En una visión optimista del mundo, pensemos que el petróleo con el que se hacen los plásticos se va a terminar algún día. Cuando esto ocurra no habrá nuevos plásticos, pero seguirán estando esas grandes montañas plásticas terrestres y marinas. Como ya no va a haber petróleo, esos plásticos tirados en la basura quizás puedan servir como materia prima. Si así fuera, las montañas de plástico serán como minas de gran riqueza de donde se podrán obtener materiales para hacer nuevos materiales. En este escenario los micro- y nanoplásticos no participan, pero sí lo hace la basura. Son ideas. Quizás algún día se forme un Instituto de Investigaciones en la Basura.

## Agradecimientos

A la DGAPA por la beca recibida a través del Programa de Apoyo para la Superación del Personal Académico de la UNAM (PASPA) y a DGTIC-UNAM por el apoyo con el uso de la computadora a través del proyecto LANCAD-UNAM-DGTIC-141.

Esta investigación se realizó en una estancia sabática en el Museo Nacional de Ciencias Naturales, CSIC. Madrid, España. Dedicado a Andrés Barbosa Alcón†.

## Referencias

- 1- Coreño-Alonso J, Méndez-Bautista MT, Relación estructura-propiedades de polímeros Educación Química 2010, 21, 291.
- 2- Fragão F, Bessa F, Otero V, Barbosa A, Sobral P, Waluda CM, Guimarães HR, Xavier JC, Microplastics and other anthropogenic particles in Antarctica: Using penguins as biological samplers. Science Total Environment 2021, 788, 147698.
- 3- Joel FR, Polymer Science & Technology: Introduction to polymer science, Eds. 3, Pub: Prentice Hall PTR Inc., Upper Saddle River, New Jersey 07458, 1995, 4.
4. Lim JZ, Microplastics are everywhere – but are they harmful? Nature, 2021, 593, 22.
5. Nor NHM, Kooi M, Diepens NJ, Koelmans AA, Lifetime Accumulation of Microplastic in Children and Adults. Environmental Science Technology 2021, 55, 5084.
- 6- Riaz U, Singh N, Banoo S. Theoretical studies of conducting polymers: a mini review. New Journal of Chemistry, 2022, 46, 4954.
- 7- Shah AA, Hasan F, Hameed A, Ahmed S, Biological degradation of plastics: A comprehensive review. Biotechnology Advances, 2008, 26, 246.
8. Shen M, Zhang Y, Zhu Y, Song B, Zeng G, Hu D, Wen X, Ren X, Recent advances in toxicological research of nanoplastics in the environment: A review. Environmental Pollution, 2019, 252, 511.
- 9- Thomson RC, Olsen Y, Mitchell RP, Davis A, Rowland SJ, John AWG, McGonigle D, Russ AE, Lost at Sea: Where Is All the Plastic? Science, 2004, 104, 838.