

## Contaminación por microplásticos en el acuífero kárstico de la península de Yucatán

### Microplastic contamination in the Yucatan Peninsula karst aquifer

Itzel Jocelin Mendoza-Olea<sup>1,3</sup> ,  
 Rosa María Leal-Bautista<sup>1</sup> ,  
 Eduardo Cejudo<sup>1</sup> ,  
 José Manuel Cervantes-Uc<sup>2</sup> ,  
 Nayeli Rodríguez-Fuentes<sup>2</sup> ,  
 Gilberto Acosta-González<sup>1\*</sup> 

<sup>1</sup>Centro de Investigación Científica de Yucatán A.C., Unidad de Ciencias del Agua. Calle 8, No. 39, Mz 29, SM 64, CP. 77524. Cancún, Quintana Roo, México.

<sup>2</sup>Centro de Investigación Científica de Yucatán A.C., Unidad de Materiales, Calle 43 No. 130 x 32 y 34, Col. Chuburná de Hidalgo, Mérida, CP. 97205, Yucatán, México.

<sup>3</sup>Universidad del Caribe. Esquina Fraccionamiento, Tabachines, CP. 77528 Cancún, Quintana Roo, México.

\*Autor de correspondencia: gilberto.acosta@cicy.mx

#### Nota científica

Recibida: 04 de mayo 2022

Aceptada: 02 de septiembre 2022

**Como citar:** Mendoza-Olea IJ, Leal-Bautista RM, Cejudo E, Cervantes-Uc JM, Rodríguez-Fuentes N, Acosta-González G (2022) Contaminación por microplásticos en el acuífero kárstico de la península de Yucatán. Ecosistemas y Recursos Agropecuarios 9(3): e3360. DOI: 10.19136/era.a9n3.3360

**RESUMEN.** La contaminación por microplásticos (MP) afecta a los ecosistemas terrestres, acuáticos y aéreos. Existen pocos estudios que han analizado la presencia de MP en aguas subterráneas. El acuífero kárstico de la península de Yucatán (AKPY) es la principal fuente de abastecimiento de agua de la región. Por lo cual, el objetivo del estudio fue determinar la presencia de MP en AKPY. Se tomaron muestras de agua de cenotes y pozos, se filtraron y el material retenido en el filtro se observó en un microscopio estereoscópico para identificar y clasificar los MP. Las formas de MP observadas fueron las fibras (94%) y el color más abundante fue blanco (51%). La concentración máxima fue de 936 partículas L<sup>-1</sup> y la mínima de 10 partículas L<sup>-1</sup>. Se encontró presencia de MP en todas las muestras de agua subterránea, por lo que es imprescindible determinar las fuentes para mitigar su presencia en AKPY.

**Palabras clave:** Agua subterránea, cenotes, pozos, microplásticos, polímero.

**ABSTRACT.** Microplastics (PM) pollution affects terrestrial, aquatic and aerial ecosystems. There are few studies that have analyzed the presence of PM in groundwater. The Yucatan Peninsula Karst Aquifer (AKPY) is the region's main source of water supply. Therefore, the objective of this study was to determine the presence of MP in AKPY. Water samples were taken from cenotes and wells, filtered and the material retained in the filter was observed under a stereoscopic microscope to identify and classify PM. The PM forms observed were fibers (94%) and the most abundant color was white (51%). The maximum concentration was 936 particles L<sup>-1</sup> and the minimum 10 particles L<sup>-1</sup>. PM was found in all groundwater samples, so determining sources is critical to mitigating its presence in AKPY.

**Key words:** Groundwater, cenotes, water well, microplastics, polymer.

## INTRODUCCIÓN

En la actualidad casi todos los aspectos de la vida cotidiana involucran plásticos, como la ropa, el calzado y materiales de embalaje que facilitan el transporte de una amplia gama de alimentos, bebidas y otros bienes (Thompson *et al.* 2009), entre estas formas de plástico, que son principalmente envases, botellas y artículos de un solo uso ha surgido un nuevo tema de creciente preocupación que son los microplásticos (Re 2019). Los microplásticos (MP), son partículas de plástico de tamaño inferior a 5 mm, suelen ser considerados como un contaminante emergente en los ecosistemas marinos, terrestres y en la atmósfera (Rillig y Bonkowski 2018, Ganguly y Ariya 2019, Li *et al.* 2021). Los MP primarios abarcan procesos industriales empleados para elaborar polvos de plástico utilizados en moldeado, microperlas en productos cosméticos, y más recientemente, para la impresión 3D (Rodríguez-Hernández *et al.* 2020). Los MP secundarios se forman de la fragmentación de objetos plásticos más grandes (GESAMP 2015, UNEP 2016). La fragmentación puede suceder durante la fase de uso de los productos, o una vez que los artículos han sido liberados al medio ambiente donde los desechos plásticos pueden sufrir varios procesos físicos, químicos y biológicos como fragmentación, fotodegradación y biodegradación, produciendo fragmentos más pequeños generando así los microplásticos (Mattsson *et al.* 2018).

La contaminación por MP es un problema ambiental presente y cada vez más grave en los hábitats terrestres, acuáticos y aéreos (Luo *et al.* 2021). Se ha demostrado que los MP presentan efectos secundarios potenciales para animales, plantas, microbiota, además para la función y estructura del suelo e incluso afectan a los seres humanos (Huang *et al.* 2021). En las plantas afecta el crecimiento, la fotosíntesis, estrés oxidativo y se presenta inflamación de tejidos (Anbumani y Kakkar 2018). Esta problemática nunca ha sido más relevante, sin embargo, aún está lejos de alcanzarse una comprensión completa de sus impactos en el medio ambiente (Re 2019). La mayoría de las investigaciones han determinado la

contaminación por MP en los ecosistemas de todo el mundo (Panno *et al.* 2019). Pero existen muy pocos estudios que han examinado la presencia, la abundancia o los impulsores ambientales de los MP en los sistemas de aguas subterráneas (Re 2019, Chia *et al.* 2021). Por lo cual, se desconoce el estado exacto de la contaminación por MP de las aguas subterráneas (Kim y Lee 2020).

Los acuíferos kársticos son ecosistemas de aguas subterráneas formados por rocas carbonatadas (Duarte *et al.* 2013). Se estima que el karst representa aproximadamente el 20% de la superficie terrestre global mientras que en México y Centroamérica representa el 23% (Kueny y Day 2002). La naturaleza abierta de los acuíferos kársticos los hace vulnerables al rápido transporte de contaminantes (Panno *et al.* 2019). El presente estudio se enfoca en el acuífero de la península de Yucatán (PY), el cual es importante porque el agua subterránea es la única fuente de abastecimiento de agua dulce y sustenta el desarrollo de los principales sectores como lo es el público-urbano, de servicios y el industrial (CONAGUA 2012). Así mismo, es importante recalcar el valor geológico que tiene la PY gracias a sus acuíferos kársticos, donde es importante investigar si existe una contaminación inminente por residuos de MP. Debido a esta preocupación, el objetivo principal de este trabajo es determinar la presencia de MP en el acuífero kárstico de la PY.

## MATERIALES Y MÉTODOS

### Área de estudio

El área de estudio se encuentra en la península de Yucatán, la cual está situada en el extremo oriental de la República Mexicana y colinda geográficamente con el Mar Caribe y el Golfo de México. El territorio de la región se describe como una superficie plana y de baja altitud conformada principalmente de rocas carbonatadas. La península corresponde a un sistema geológico-hidrológico y es clasificada como una región kárstica húmeda y subtropical (Hubp *et al.* 1992). Debido a la conformación del terreno este carece de una red fluvial, la precipitación que se presenta en la parte

continental se evapotranspira y el resto se infiltra a través de fracturas formando un manto freático que se encuentra muy cercano a la superficie (Aguirre 1986, Hubp *et al.* 1992). Ocasionalmente cuando se disuelven las calizas debido a la actividad de sus aguas ocurre un hundimiento del terreno que da lugar a dolinas conocidos como cenotes (Rodríguez y Crespo 2010). La CONAGUA (2012) menciona que los cenotes son cuerpos de agua que hoy son aprovechados como fuentes de abastecimiento y como sitios de recreación (balnearios, ecoturismo, buceo subacuático y espeleobuceo). Los sitios de muestreo se ubican en la porción norte de la península de Yucatán, se ubicaron nueve sitios de muestreo en el estado de Quintana Roo y 10 sitios en el estado de Yucatán, en cada uno de los sitios de muestreo se obtuvo la posición geográfica con un GPS marca Garmin (Figura 1).

### Colecta de la muestra

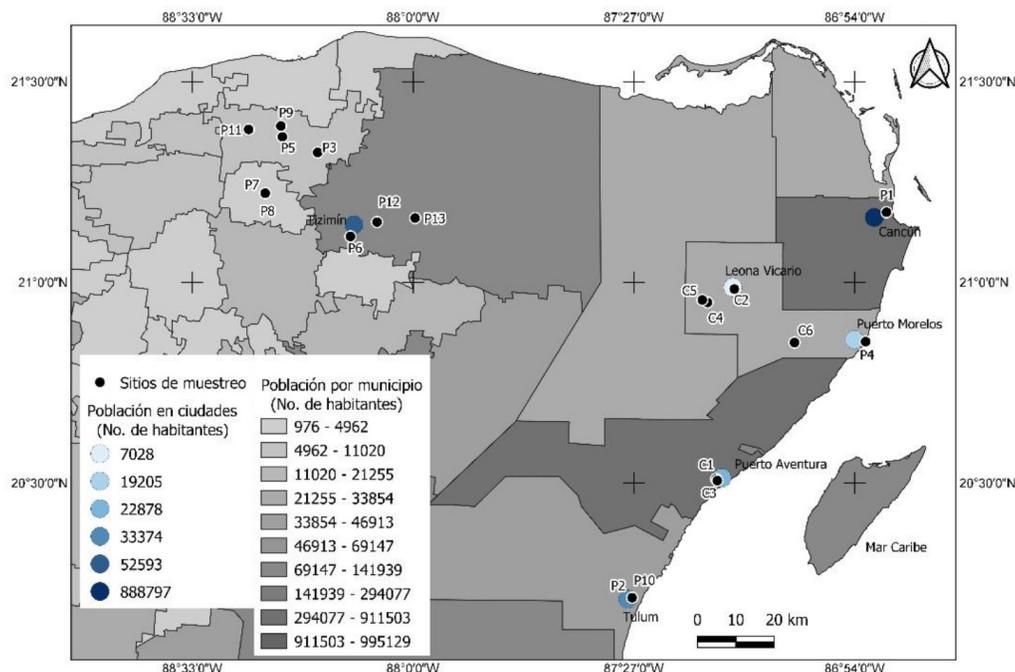
El muestreo se realizó durante septiembre del 2019 y agosto del 2021, se colectaron 19 muestras de agua subterránea en pozos y cenotes, de las cuales 13 fueron de pozos y seis de cenotes. Las muestras de agua subterránea colectadas en Quintana Roo se tomaron con una botella vertical de metal tanto en pozos como en cenotes. Posterior a la toma, las muestras se vaciaron en botellas de HDPE y se taparon inmediatamente para evitar la contaminación atmosférica. En los sitios localizados en Yucatán se tomaron muestras de agua subterránea directamente del pozo con botellas de HDPE (Panno *et al.* 2019). Previamente al muestreo, cada una de estas botellas fueron enjuagadas vigorosamente cinco veces con agua desionizada, este número de enjugues se obtuvo de un ensayo previo donde se observó que se eliminan las posibles partículas plásticas derivadas del material con el que están hechas las botellas. Todas las muestras se transportaron al laboratorio de la Unidad de Ciencias del Agua del Centro de Investigación Científica de Yucatán (CICY) donde se mantuvieron refrigeradas a 4 °C hasta el momento del análisis.

### Tratamiento de la muestra y extracción de microplásticos

El estudio de MP en el medio acuático se encuentra en una fase de desarrollo, por lo que actualmente no existe una metodología estandarizada para la separación de estos polímeros de muestras tomadas de la columna de agua, de la superficie del agua o de sedimentos. Al respecto, Prata *et al.* (2018) mencionan que el filtrado o tamizado es el método más frecuente en la separación de MP de muestras de agua; ya que el tamaño de los poros o de la malla permite determinar el tamaño más bajo de los MP a detectar. En el presente estudio la filtración de cada muestra se hizo mediante vacío y se utilizaron filtros Millipore con poros de 0.45  $\mu\text{m}$  de diámetro. Con el fin de evitar contaminaciones cruzadas se utilizaron filtros de ultra celulosa ya que el uso de filtros de nylon contradice las recomendaciones de minimizar el uso de materiales plásticos a la hora de realizar determinaciones. Los filtros con el material retenido se almacenaron en papel aluminio dentro de un recipiente hermético a temperatura ambiente.

### Identificación de microplásticos

Cada uno de los filtros fueron observados utilizando un microscopio estereoscópico (Nikon modelo SMZ 745) para identificar y cuantificar (abundancia) las partículas de MP. El criterio para la identificación de MP se basó en la ausencia de estructuras celulares u orgánicas; un espesor homogéneo de las partículas y colores y brillo homogéneos (Lusher *et al.* 2017). Adicionalmente, se aplicó la técnica conocida como hot needle, que consistía en aplicar la aguja caliente a las partículas para asegurar si era material plástico (Pizzurro *et al.* 2022, Mengatto y Hanae 2022). Los MP fueron contados y clasificados según su morfología, además se registró el color de cada partícula microplástica. Los MP fueron reportados en número de partículas por volumen de agua (partículas  $\text{L}^{-1}$ ).



**Figura 1.** Ubicación de los sitios de muestreo (P = pozo y C = cenote). La Información de número de pobladores por municipios y en las ciudades cercanas a los sitios de muestreo proviene del INEGI (2020).

### Relación entre actividades humanas y abundancia de microplásticos

Como un proxy de que las actividades humanas tengan relación con el número de partículas ( $L^{-1}$ ) de MP en el agua de las muestras colectadas, se eligieron las variables del número total de población por municipio y la distancia (metros) a la ciudad más cercana de los sitios de muestreo. La información fue obtenida del Censo de Población y Vivienda 2020 (INEGI 2020). La información se espacializó en un Sistema de Información Geográfico (QGIS versión 3.14.1-Pi) y se realizaron los análisis espaciales para extraer valores raster a puntos y se creó una matriz de distancia entre las ciudades y los sitios de muestreo.

### Análisis estadístico

Se utilizó el análisis multivariante permutacional de varianza de una vía (PERMANOVA, Anderson *et al.* 2008) para determinar diferencias estadísticamente significativas de la variable abundancia de MP (partículas  $L^{-1}$ ) entre el agua de pozos y

de cenotes. La prueba se realizó con 9999 permutaciones bajo la suma de cuadrados (SS) de Tipo III y un modelo reducido para generar un estadístico F permutado y un valor de p. Los análisis se realizaron con el software PRIMER 6 & PERMANOVA+ (Anderson *et al.* 2008).

Para determinar si existe efecto antropogénico (proxy) con el número de partículas ( $L^{-1}$ ) de MP en el área de estudio se realizaron dos regresiones lineales. Una regresión entre el número de partículas ( $L^{-1}$ ) de MP y el número de población del municipio y otra regresión entre el número de partículas ( $L^{-1}$ ) de MP y la distancia a la ciudad más cercana de cada sitio de muestreo. Los análisis se realizaron en el programa R (R Core Team 2013).

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### Abundancia de los microplásticos

Todas las muestras de agua subterránea colectadas contenían partículas de MP con una concentra-

ción mínima de 10 y máximo de 936 partículas  $L^{-1}$ , con media de  $102.8 \pm 210.8$  partículas  $L^{-1}$ . En muestras de agua subterránea obtenidas en pozos la abundancia media fue de  $42.7 \pm 37.3$  partículas  $L^{-1}$ , con concentración mínima de 10 partículas  $L^{-1}$  y máxima de 122 partículas  $L^{-1}$ . Mientras que, en cenotes, la abundancia media fue de  $233 \pm 356.4$  partículas  $L^{-1}$ . En general, los cenotes tuvieron las concentraciones más altas en comparación con los pozos (Tabla 1). Sin embargo, el análisis de PERMANOVA indicó que no existe diferencia significativa ( $F$  permutado = 1.3823;  $p = 0.247$ ) entre la abundancia de microplásticos (partículas  $L^{-1}$ ) en el agua entre pozos y cenotes. El que no existan diferencias en cuanto a la presencia de microplásticos en torno a que si el agua se encuentra en un pozo o en un cenote tiene su fundamento en que en toda la PY la única fuente de agua es subterránea (Bauer-Gottwein *et al.* 2010). La presencia de MP se ha relacionado con la urbanización, que es una de las variables fundamentales en la distribución espacial de MP en el agua de pozos y cenotes (Lin *et al.* 2022). Al respecto Laskar y Kumar (2019) mencionan que la contaminación plástica se origina principalmente en el área urbana y suburbana. Los resultados del presente estudio sugieren que los asentamientos humanos son posibles zonas de entrada de MP al agua subterránea, ya que se observa que las concentraciones de MP altas se ubican dentro o en las inmediaciones de poblaciones. En relación con la densidad poblacional se ha identificado una correlación positiva con la concentración de MP en cuerpos de agua (Ma *et al.* 2022). Se encontró una correlación positiva entre en el incremento del número de partículas ( $L^{-1}$ ) de MP tanto con el incremento de número de población del municipio y la distancia a la ciudad más cercana de cada sitio de muestreo, lo que reafirma lo encontrado por otros autores. Al realizar una espacialización de la información de los sitios con mayor concentración de MP y la densidad poblacional por municipio en el área de estudio, se manifiesta una tendencia directamente proporcional entre la concentración de MP y la densidad poblacional (individuos  $km^{-2}$ ), por lo que se confirma que las actividades an-

tropogénicas son la mayor fuente de MP en el acuífero de la PY, como se ha reportado en otros trabajos (Browne *et al.* 2011, Lin *et al.* 2022). Un factor que probablemente esté favoreciendo la presencia de MP en las muestras de agua subterránea colectadas es la vulnerabilidad intrínseca del sistema kárstico en la PY. Debido a que el sistema kárstico es heterogéneo, anisotrópico y presenta dolinas (llamados localmente cenotes), sumideros, hoyos, fisuras y fracturas (Molerio-Leon 2004, Antigüedad *et al.* 2007), estas geoformas se conectan directamente con el acuífero lo que propicia nula o mínima atenuación de contaminantes, entre ellos los emergentes como los MP, incrementando con ello la vulnerabilidad del agua subterránea e influyendo en cambios en las características del agua y una posible afectación de su calidad (Aguilar *et al.* 2016). Al respecto, Samandra *et al.* (2022) sugieren que los MP ingresan al sistema de aguas subterráneas por la alta permeabilidad del suelo. Así mismo, Panno *et al.* (2019) identificaron que la topografía kárstica permite el movimiento de MP con forma de fibras hacia los sistemas de flujo de agua subterránea y asociaron la fuente de origen a los efluentes sépticos circundantes a su zona de estudio e identificaron a las escorrentías superficiales como una fuente potencial de MP. Debido a que los cenotes (dolinas) generalmente son abiertos y promueven la conectividad entre el agua subterránea y la superficie, puede generar que muchos elementos como los MP lleguen de manera directa al agua subterránea. En la PY existen cenotes abiertos localizados dentro de las localidades y son conocidos como cenotes urbanos (CU). Estos cenotes debido a su característica de abiertos probablemente están mediando el ingreso directo de los MP al acuífero, ya que muchos de estos CU son utilizados como depósitos de basura (Arcega-Cabrera *et al.* 2021). Algunos cenotes cercanos a zonas arqueológicas, localidades o sitios turísticos son utilizados con fines recreativos (Reul *et al.* 2015), lo que podría favorecer a la contaminación por MP debido al desprendimiento de fibras sintéticas textiles de bañadores o por la fragmentación a largo plazo de plásticos como visores, aletas, entre otros.

**Tabla 1.** Concentración de microplásticos registrados en los sitios de muestreo.

Sitios de muestreo	Cuerpo de agua	Distancia a la ciudad más cercana (m)	Ciudad	No. Pobladores en la ciudad	Municipio	No. Pobladores en el municipio	Densidad de población por municipio (ind/km <sup>2</sup> )	Concentración de microplásticos (MP/L)
C1	Cenote	1519.2	Perto Aventura	22878	Solidaridad	333800	166	936
C2	Cenote	587.8	Leona Vicario	7028	Puerto Morelos	26921	26	146
P1	Pozo	3480.6	Cancún	888797	Benito Juárez	911503	979	122
C3	Cenote	1375.3	Perto Aventura	22878	Solidaridad	333800	166	248
P2	Pozo	1180.9	Tulum	33374	Tulum	46721	23	60
P3	Pozo	22058.3	Tizimín	52593	Panabá	7766	12	110
C4	Cenote	7723.7	Leona Vicario	7028	Puerto Morelos	26921	26	38
P4	Pozo	2940.3	Puerto Morelos	19205	Puerto Morelos	26921	26	85
P5	Pozo	30507.5	Tizimín	52593	Panabá	7766	12	65
P6	Pozo	3332.1	Tizimín	52593	Tizimín	80672	21	40
P7	Pozo	24546.7	Tizimín	52593	Sucilá	3971	13	40
C5	Cenote	8594.9	Leona Vicario	7028	Puerto Morelos	26921	26	20
C6	Cenote	15555.7	Puerto Morelos	19205	Puerto Morelos	26921	26	10
P8	Pozo	24546.7	Tizimín	52593	Sucilá	3971	13	20
P9	Pozo	33173.8	Tizimín	52593	Panabá	7766	12	20
P10	Pozo	1180.9	Tulum	33374	Tulum	46721	23	15
P11	Pozo	37861.7	Tizimín	52593	Panabá	7766	12	10
P12	Pozo	6031.7	Tizimín	52593	Tizimín	80672	21	10
P13	Pozo	15940.6	Tizimín	52593	Tizimín	80672	21	10

### Características morfológicas de los microplásticos

Las partículas de MP se presentaron en tres formas: fragmentos (formas irregulares), fibras y circulares o esféricas (Figura 2, Tabla 2), siendo las fibras la forma más abundante. En cuanto a la característica de color se registraron seis diferentes tipos de color: azul, negro, rojo, morado, rosa y blanco, este último fue el color más abundante en todas las partículas de MP con un 51.3% (Tabla 2). Solo las fibras fueron observadas en todos los sitios de muestreo y se presentaron en los seis colores (azul, negro, rojo, morado, rosa y blanco). Todos los fragmentos registrados presentaron forma irregular, en el caso de los cenotes se registraron los seis colores, mientras que en los pozos se registraron fragmentos de forma irregular de color azul, negro, morado y blanco. Las partículas circulares o esféricas solo representaron en el 1% de las muestras de MP y solo se presentaron de color rojo en los pozos y de color blanco en los cenotes. Se identificaron tres formas de microplásticos y la forma más abundante fue la fibra (94%). Algunos trabajos han reportado que las formas dominantes en aguas subterráneas suelen ser las fibras y pellets (circulares) (Harttman *et al.* 2019). Lo anterior, está acorde a lo encontrado por Panno

*et al.* (2019) donde todas las partículas de MP en el acuífero kárstico de Illinois fueron fibras. Por otra parte, en las aguas subterráneas y superficiales de la costa sur de la India, las fibras junto con las espumas representaron entre el 62 y 90% de MP en las muestras (Selvam *et al.* 2021). De acuerdo con los resultados obtenidos, la mayor presencia de fibras y en menor cantidad de formas circulares o esféricas, implica que podrían estar relacionadas con aguas residuales, ya que los MP de forma circulares o esféricas son altamente utilizados en artículos de cuidado personal o cosméticos (Guerranti *et al.* 2019). En contraste, las fibras están asociadas a aplicaciones textiles donde los procesos de lavandería doméstica pueden desprender fibras sintéticas. Estas, al ser partículas con un tamaño diminuto no son filtradas en las plantas de tratamiento y se vierten a través de las aguas residuales (Andrady 2011, Re 2019). Aunque los fragmentos fueron los que se reportaron en menor cantidad, estos suelen estar asociados a empaques y residuos plásticos (Chia *et al.* 2021) que tras su exposición a diferentes factores ambientales comienzan a fragmentarse, generando así MP secundarios.

Para el color, el blanco fue el más abundante en el presente estudio con 51.3%, esta misma tendencia también se ha visto en los trabajos realiza-

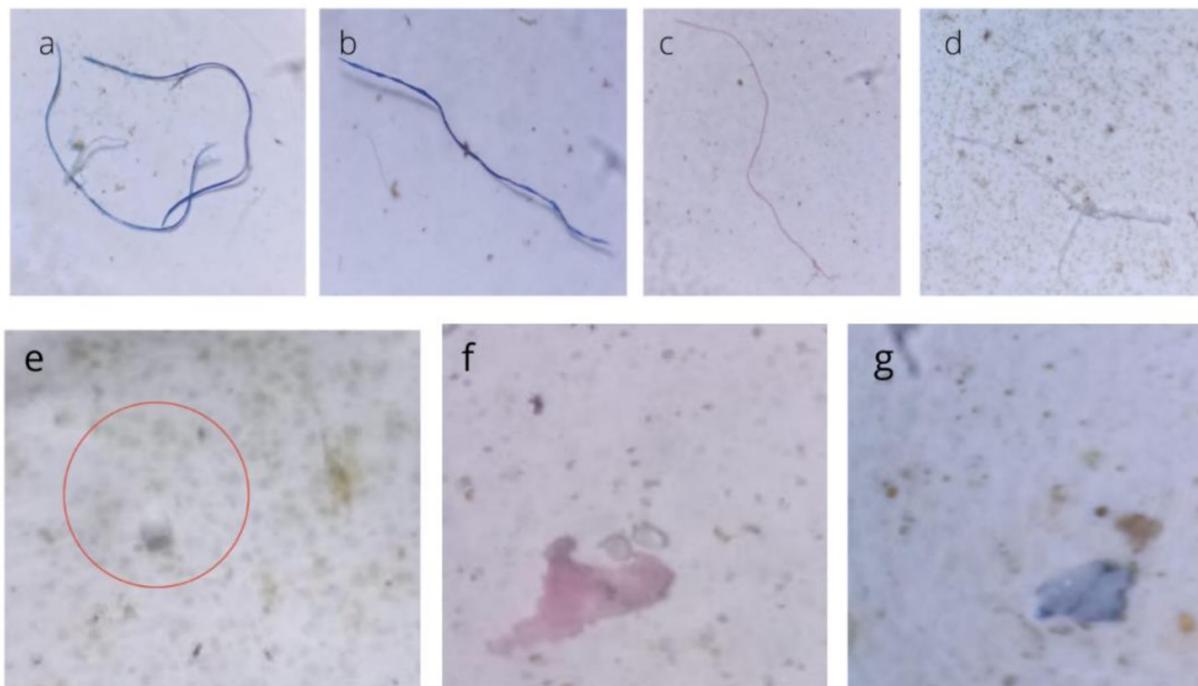


Figura 2. Diferentes formas y colores de microplásticos: a), b), c) y d) fibras; e) circulares o esféricas; f) y g) fragmentos.

Tabla 2. Formas y color de microplásticos registrados en los sitios de muestreo.

Sitios de muestreo	Cuerpo de agua	Concentración de microplásticos (MP/L)	Formas de microplásticos (%)				Color de microplásticos (%)				
			circulares o esféricas	Fibra	Fragmento	Blanco	Rosa	Rojo	Negro	Morado	Azul
C1	Cenote	936	0.0	96.6	3.4	59.0	0.9	1.7	0.0	0.0	38.5
C2	Cenote	146	2.7	93.2	4.1	56.2	0.0	2.7	9.6	0.0	31.5
P1	Pozo	122	0.0	93.4	6.6	36.1	3.3	1.6	1.6	6.6	50.8
C3	Cenote	248	0.0	100.0	0.0	61.3	0.0	3.2	6.5	3.2	25.8
P2	Pozo	60	0.0	100.0	0.0	46.7	0.0	6.7	3.3	3.3	40.0
P3	Pozo	110	0.0	77.3	22.7	81.8	0.0	0.0	4.5	4.5	9.1
C4	Cenote	38	0.0	89.5	10.5	36.8	0.0	0.0	15.8	5.3	42.1
P4	Pozo	85	5.9	88.2	5.9	17.6	0.0	5.9	5.9	5.9	64.7
P5	Pozo	65	0.0	100.0	0.0	30.8	0.0	0.0	7.7	0.0	61.5
P6	Pozo	40	0.0	100.0	0.0	62.5	0.0	12.5	0.0	0.0	25.0
P7	Pozo	40	0.0	100.0	0.0	62.5	0.0	0.0	0.0	0.0	37.5
C5	Cenote	20	0.0	100.0	0.0	75.0	0.0	0.0	0.0	0.0	25.0
C6	Cenote	10	0.0	40.0	60.0	20.0	0.0	0.0	0.0	20.0	60.0
P8	Pozo	20	0.0	100.0	0.0	75.0	0.0	0.0	0.0	0.0	25.0
P9	Pozo	20	0.0	100.0	0.0	25.0	0.0	0.0	25.0	0.0	50.0
P10	Pozo	15	0.0	66.7	33.3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	100.0
P11	Pozo	10	0.0	100.0	0.0	50.0	0.0	0.0	50.0	0.0	0.0
P12	Pozo	10	50.0	50.0	0.0	0.0	0.0	50.0	50.0	0.0	0.0
P13	Pozo	10	50.0	50.0	0.0	50.0	0.0	0.0	50.0	0.0	0.0
Total		2005	1.2	93.5	5.4	51.3	0.7	2.6	4.9	2.3	38.2

dos por Ma *et al.* (2022). Al respecto, Brarath *et al.* (2021) atribuyen la dominancia del color blanco en sus muestras al proceso de degradación y exposición a la intemperie que interviene durante un

largo periodo transformando los colores originales en blanco. Por lo cual, el color de los MP podría ser un indicador de la edad del polímero (Turner y Holmes 2011). Por otra parte, los MP blancos

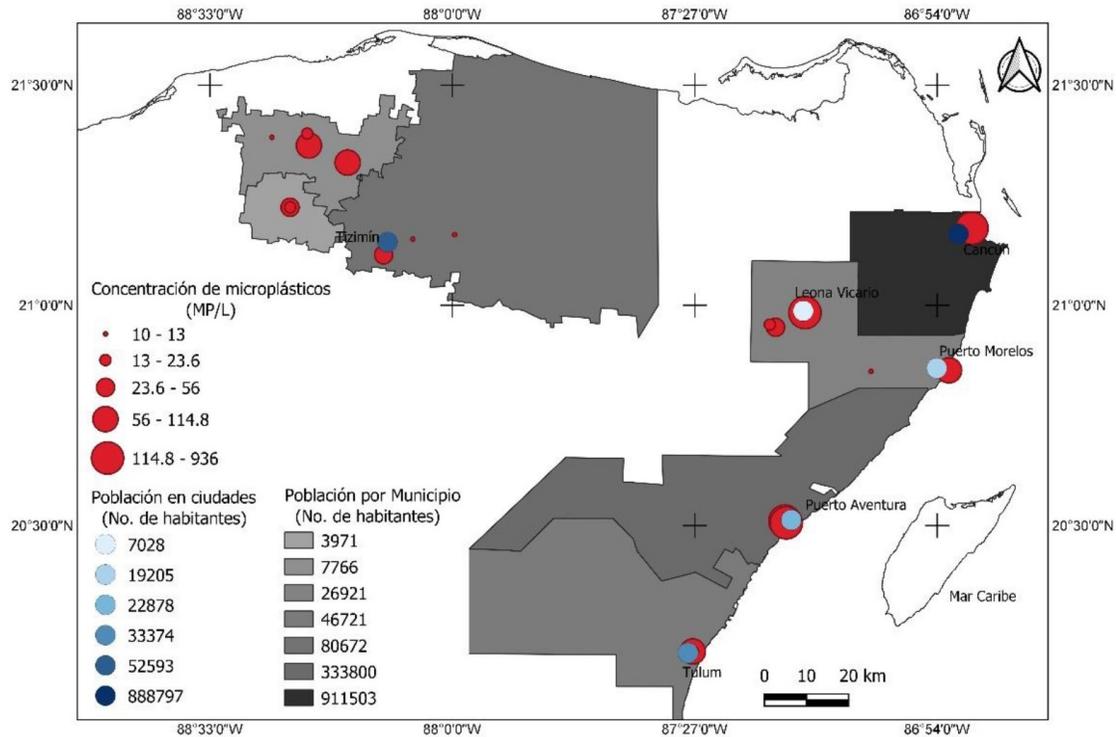


Figura 3. Concentración de microplásticos registrados en el acuífero de la península de Yucatán, México.

también pueden originarse de productos producidos originalmente de este color, como bolsas de plástico (Stolte *et al.* 2015). Además, se encontraron MP en una amplia gama de colores (azul, negro, rojo, morado y rosa), lo que indica que provienen de varias fuentes y productos (Zhou *et al.* 2020). Estos colores también han sido reportados en menores porcentajes por varios autores (Panno *et al.* 2019, Shruti *et al.* 2019, Brarath *et al.* 2021, Selvam *et al.* 2021).

### Relación entre actividades humanas y abundancia de microplásticos

En los sitios de muestreo que se ubicaban dentro de áreas urbanizadas o muy cercanas a estas se encontraron concentraciones mayores a 100 partículas  $L^{-1}$  (Figura 3). Los sitios que registraron concentraciones entre 10 y 20 partículas  $L^{-1}$  se encontraban un poco más retirados de asentamientos humanos. Las concentraciones mayores a 100 partículas  $L^{-1}$ , a excepción de los sitios C2 y P3 (Tabla 1), tienen una densidad poblacional mayor a 100 individuos· $km^2$ ;

mientras que los sitios de muestreo con concentraciones menores a 20 partículas  $L^{-1}$  tienen una densidad poblacional menor a 30 individuos· $km^2$ . Es importante señalar que los sitios C2 y P3 aunque se encuentran en municipios con una densidad menor a 30 individuos· $km^2$ , los dos sitios de muestreo se encuentran dentro de asentamientos poblacionales, el C2 se ubica dentro del poblado de Leona Vicario y el sitio P3 se encuentra a 4 500 m del poblado de Panabá (5 318 habitantes). Aunque el análisis de regresión indica una tendencia ( $p < 0.05$ ) en el incremento del número de partículas ( $L^{-1}$ ) de MP tanto con el incremento de número de población del municipio y la distancia a la ciudad más cercana de cada sitio de muestreo, los valores del coeficiente de correlación fueron de 0.21 y 0.29. Algunas de las fuentes potenciales que pueden proveer MP al agua subterránea de la PY, pueden ser la basura antropogénica, pozos de inyección (Re 2019), pozos de absorción, drenaje, fosas sépticas en malas condiciones (Panno *et al.* 2019), escurrimiento superficial

e infiltración (Samandra *et al.* 2022). La inyección directa de agua contaminada al sistema subterráneo puede ocurrir en los pozos de inyección de aguas negras. Algunas localidades de la PY aún no cuentan con drenaje, por lo que algunos hogares cuentan con fosas sépticas, las cuales al estar mal diseñadas pueden representar un alto riesgo de contaminación por MP. Para realizar un análisis de las posibles fuentes se debe tomar en cuenta la eliminación indiscriminada de plásticos, ya que, con el tiempo, tienen el potencial de degradarse en MP secundarios (Cole *et al.* 2011).

Se detecta la presencia de MP en el acuífero kárstico de la península de Yucatán, la mayor concentración se registró en cenotes cercanos a asentamientos urbanos como la ciudad de Cancún, Puerto Morelos y Leona Vicario. La fibra fue la más abundante y se encontraron en más del 90% de las muestras de agua, lo que sugiere que las posibles fuentes de origen de MP son efluentes de aguas residuales.

Los colores blanco y azul de las partículas de MP fueron los más abundantes (89.5%). Se encontró la presencia de MP en todas las muestras de agua subterránea evaluadas. El siguiente paso es caracterizar a que tipos de polímeros corresponden estos MP. El presente estudio aporta información de la presencia de MP en el agua subterránea. Es importante realizar más investigaciones que permitan identificar las principales fuentes de emisión.

### AGRADECIMIENTOS

Al Proyecto Cátedras CONACYT (2944: Modelación del ciclo del agua en la península de Yucatán) y del Proyecto CONACYT- CB 28604 (Línea de Agua Meteorica de la península de Yucatán). A la Quim. Daniela Ortega Camacho, M. en C. José Epigmenio Bautista García, M. en C. Jorge Carlos Peniche Pérez y al Dr. Wilberth Antonio Herrera Kao.

### LITERATURA CITADA

- Aguilar Y, Bautista F, Mendoza M, Frausto O, Ihl T, Delgado M (2016). IVAKY: Índice de la vulnerabilidad del acuífero kárstico yucateco a la contaminación. *Revista Mexicana de Ingeniería Química* 15: 913-933.
- Aguirre LV (1986) Aplicación de principios geoquímicos en la hidrología kárstica de la península de Yucatán. *Tecnología y Ciencias del Agua mayo-agosto*: 21-29.
- Anbumani S, Kakkar P (2018) Ecotoxicological effects of microplastics on biota: a review. *Environmental Science and Pollution Research* 25: 14373-14396
- Anderson MJ, Gorely RN, Clarke KR (2008) PERMANOVA+Primer: Guide to software and statistical methods. PRIMER-E Ltd. Plymouth. UK. 218p.
- Andrady AL (2011) Microplastics in the marine environment. *Marine Pollution Bulletin* 62: 1596-1605.
- Antigüedad I, Morales T, Uriarte JA (2007) Los acuíferos kársticos. *Casos del País Vasco. Enseñanza de las Ciencias de la Tierra* 15: 325-332.
- Arcega-Cabrera F, Sickman JO, Fargher L, Herrera-Silveira J, Lucero D, Ocegüera-Vargas I, Lamas-Cosío E, Robledo-Ardila PA (2021) Groundwater quality in the Yucatan Peninsula: Insights from stable isotope and metals analysis. *Groundwater* 59: 878-891.
- Bauer-Gottwein P, Gondwe BRN, Charvet G, Marín LE, Rebolledo-Vieyra M, Merediz-Alonso G (2010) Review: The Yucatan Peninsula karst aquifer, Mexico. *Hydrogeology Journal* 19: 507-524.
- Brarath K, Natesan U, Vaikunth R, Kumar P, Ruthra R, Srinivasalu S (2021) Spatial distribution of microplastic concentration around landfill sites and its potential risk on groundwater. *Chemosphere* 277: 1302633wee. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2021.130263.

- Browne MA, Crump P, Niven SJ, Teuten EL, Tonkin A, Galloway TS, Thompson RC (2011) Accumulation of microplastic on shorelines worldwide: sources and sinks. *Environmental Science & Technology* 45: 9175-9179.
- Chia RW, Lee JY, Kim H, Jang J (2021) Microplastic pollution in soil and groundwater: a review. *Environmental Chemistry Letters* 19: 4211-4224.
- Cole M, Lindeque P, Halsband C, Galloway TS (2011) Microplastics as contaminants in the marine environment: a review. *Marine Pollution Bulletin* 62: 2588-2597.
- CONAGUA (2012) Programa Hídrico Regional Visión 2030.-Región Hidrológico-Administrativa XII Península de Yucatán. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. México. 175p. <http://www.conagua.gob.mx/conagua07/publicaciones/publicaciones/9-sgp-17-12gn.pdf>. Fecha de consulta: 22 de diciembre de 2021.
- Duarte YA, Bautista F, Mendoza ME, Delgado C (2013) Vulnerabilidad y riesgo de contaminación de acuíferos kársticos. *Tropical and Subtropical Agroecosystems* 16: 243-263.
- Ganguly M, Ariya PA (2019) Ice nucleation of model nanoplastics and microplastics: a novel synthetic protocol and the influence of particle capping at diverse atmospheric environments. *ACS Earth and Space Chemistry* 3: 1729-1739.
- GESAMP (2015) Fate and effects of microplastics in the marine environment: a global assessment, ed. PJ Kershaw IMO/FAO/UNESCO-IOC/UNIDO/WMO/IAEA/UN/UNEP/UNDP Joint Group of Experts on the Scientific Aspects of Marine Environmental Protection, Rep. Stud.-GESAMP. 98p. <http://www.gesamp.org/publications/reports-and-studies-no-90>. Fecha de consulta: 11 de octubre de 2021.
- Guerranti C, Martellini T, Perra G, Scopetani C, Cincinelli A (2019) Microplastics in cosmetics: Environmental issues and needs for global bans. *Environmental Toxicology and Pharmacology* 68: 75-79.
- Huang J, Chen H, Zheng Y, Yang Y, Zhang Y, Gao B (2021) Microplastic pollution in soils and groundwater: Characteristics, analytical methods and impacts. *Chemical Engineering Journal* 425: 131870. DOI: 10.1016/j.cej.2021.131870.
- Hubp, JL, Quesado JF, Pereño RE (1992) Rasgos geomorfológicos mayores de la Península de Yucatán. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas* 10: 143-150.
- INEGI (2020) Resultados del Censo Nacional de Población y Vivienda 2020. Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática. <https://www.inegi.org.mx/programas/ccpv/2020/#Microdatos>. Fecha de consulta: 2 diciembre de 2021.
- Kim H, Lee JY (2020) Emerging concerns about microplastic pollution on groundwater in South Korea. *Sustainability* 12(13): 5275. DOI: 10.3390/su12135275.
- Kueny JA, Day MJ (2002) Designation of protected karstlands in Central America: A regional assessment. *Journal of Cave and Karst Studies* 64: 165-174.
- Laskar N, Kumar U (2019) Plastics and microplastics: A threat to environment. *Environmental Technology Innovation* 14: 100352. DOI: 10.1016/j.eti.2019.100352
- Li H, Lu X, Wang S, Zheng B, Xu Y (2021) Vertical migration of microplastics along soil profile under different crop root systems. *Environmental Pollution* 278: 116833. DOI: 10.1016/j.envpol.2021.116833.
- Lin CT, Chiu MC, Kuo MH (2022) A mini-review of strategies for quantifying anthropogenic activities in microplastic studies in aquatic environments. *Polymers* 14: 198. DOI: 10.3390/polym14010198.

- Luo Z, Zhu J, Yu L, Yin K (2021) Heavy metal remediation by nano zero-valent iron in the presence of microplastics in groundwater: Inhibition and induced promotion on aging effects. *Environmental Pollution* 287: 117628. DOI: 10.1016/j.envpol.2021.117628.
- Lusher AL, Welden NA, Sobral P, Cole M (2017) Sampling, isolating and identifying microplastics ingested by fish and invertebrates. *Analysis of Nanoplastics and Microplastics in Food* 9: 1346-1360.
- Ma M, Liu S, Su M, Wang C, Ying Z, Huo M, Lin Yi, Yang W (2022) Spatial distribution and potential sources of microplastics in the Songhua River flowing through urban centers in Northeast China. *Environmental Pollution* 292(B): 118384. DOI: 10.1016/j.envpol.2021.118384.
- Mattsson K, Jocic S, Doverbratt I, Hansson LA (2018) Nanoplastics in the aquatic environment. Microplastic contamination in aquatic environments. In: Eddy Y. Zeng (ed) *Microplastic contamination in aquatic environments*. Elsevier. pp: 379-399. DOI: 10.1016/B978-0-12-813747-5.00013-8.
- Mengatto Mateus Farias, Hanae Nagai Renata (2022) A first assessment of microplastic abundance in sandy beach sediments of the Paranaguá Estuarine Complex, South Brazil (RAMSAR site), *Marine Pollution Bulletin* 177: 113530. DOI: 10.1016/j.marpolbul.2022.113530.
- Molerio-Leon LF (2004) Indicadores de vulnerabilidad de acuíferos kársticos. *Ingeniería Hidráulica y Ambiental* XXV: 56-64.
- Panno SV, Kelly WR, Scott J, Zheng W, McNeish RE, Holm N, Hoellein TJ, Baranski EL (2019) Microplastic contamination in karst groundwater systems. *Groundwater* 57: 189-196.
- Pizzurro F, Recchi S, Nerone E, Salini R, Barile NB (2022) Accumulation evaluation of potential microplastic particles in *Mytilus galloprovincialis* from the Goro Sacca (Adriatic Sea, Italy). *Microplastics* 1: 303-318.
- Prata JC, da Costa JP, Duarte AC, Rocha-Santos T (2018) Methods for sampling and detection of microplastics in water and sediment: a critical review. *Trends in Analytical Chemistry* 110: 150-159.
- R Core Team (2013) R: A language and environment for statistical computing. Vienna, Austria: R Foundation for Statistical Computing. <http://www.R-project.org/>. Fecha de consulta: 15 abril de 2022.
- Re V (2019) Shedding light on the invisible: addressing the potential for groundwater contamination by plastic microfibers. *Hydrogeology Journal* 27: 2719-2727.
- Reul ALH, Febles-Patrón JL, Nava-Galindo VA (2015) La contaminación fecal en cenotes de interés turístico y recreacional del estado de Yucatán. *Ingeniería* 19: 169-175.
- Rillig MC, Bonkowski M (2018) Microplastics and soil protists: A call for research. *Environmental Pollution* 241: 1128-1131.
- Rodríguez MG, Crespo IO (2010) Formas kársticas comunes de los cenotes del Estado de Quintana Roo (México). *Revista Electrónica de Medioambiente* 9: 15-35.
- Rodríguez-Hernández AG, Chiodoni A, Bocchini S, Vazquez-Duhalt R (2020) 3D printer waste, a new source of nanoplastic pollutants. *Environmental Pollution* 267: 115609. DOI: 10.1016/j.envpol.2020.115609.
- Samandra S, Johnston JM, Jaeger JE, Symons B, Xie S, Currell M, Ellis AV, Clarke BO (2022) Microplastic contamination of an unconfined groundwater aquifer in Victoria, Australia. *Science of The Total Environment* 802: 149727. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2021.149727.
- Selvam S, Jesuraja K, Venkatramanan S, Roy PD, Kumari, VJ (2021) Hazardous microplastic characteristics and its role as a vector of heavy metal in groundwater and surface water of coastal south India. *Journal of Hazardous Materials* 402: 123786. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2020.123786.

- Shruti, VC, Jonathan MP, Rodriguez-Espinosa, PF, Rodríguez-González F (2019) Microplastics in freshwater sediments of atoyac river basin, puebla city, Mexico. *Science of the Total Environment* 654: 154-163.
- Stolte A, Forster S, Gerds G, Schubert H (2015) Microplastic concentrations in beach sediments along the German Baltic coast. *Marine Pollution Bulletin* 99: 216-229.
- Thompson RC, Moore CJ, Vom Saal FS, Swan S (2009) Plastics, the environment and human health: current consensus and future trends. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences* 364: 2153-2166.
- Turner A, Holmes L (2011) Occurrence, distribution and characteristics of beached plastic production pellets on the island of Malta (central Mediterranean). *Marine Pollution Bulletin* 62: 377-381.
- UNEP (2016) Marine plastic debris and microplastics - Global lessons and research to inspire action and guide policy change. United Nations Environment Programme. Nairobi. 252p. <https://wedocs.unep.org/20.500.11822/7720>. Fecha de consulta: 11 de octubre de 2021.