



Universidad Nacional Autónoma de México  
Licenciatura en Ciencias de la Tierra



**Identificación y caracterización de microplásticos en sedimentos y organismos de cuatro lagunas costeras de Veracruz, México**

TESIS

Que para obtener el grado de:  
Licenciado en Ciencias de la Tierra  
presenta:

**David León Núñez**

Tutor Principal:

**Dr. Alfonso Vázquez Botello**

Miembros del jurado:

**Dra. Guadalupe Judith De la Lanza Espino**  
Instituto de Biología, UNAM

**Dr. Arturo Garcia Borquez**  
Escuela de Física y Matemáticas, IPN

**Mtra. Zoyla Graciela Castillo Rodriguez**  
Instituto de Ciencias del Mar y Limnología, UNAM

**Dra. María Guadalupe Ponce Vélez**  
Instituto de Ciencias del Mar y Limnología, UNAM

**Dra. Elsa Arellano Torres**  
Facultad de Ciencias, UNAM

**Mtra. Ingrid Alejandra Kohn Ledezma**  
Facultad de Ciencias, UNAM

Ciudad Universitaria, Cd. Mx., 2022



Universidad Nacional  
Autónoma de México



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

## Índice

<b>Glosario de siglas</b>	<b>1</b>
<b>Resumen</b>	<b>2</b>
<b>Abstract</b>	<b>3</b>
<b>Introducción</b>	<b>4</b>
<b>Hipótesis</b>	<b>7</b>
<b>Justificación</b>	<b>7</b>
<b>Antecedentes</b>	<b>7</b>
<b>Objetivo</b>	<b>8</b>
<b>Zonas de estudio</b>	<b>8</b>
<b>Importancia de las zonas de estudio</b>	
<b>Laguna de Mandinga</b>	<b>10</b>
<b>Laguna de Tampamachoco</b>	<b>12</b>
<b>Laguna de Alvarado</b>	<b>13</b>
<b>Laguna Verde</b>	<b>14</b>
<b>Muestreo y método</b>	<b>16</b>
<b>Resultados</b>	
<b>Sedimentos superficiales</b>	<b>22</b>
<b><i>Crassostrea virginica</i></b>	<b>24</b>
<b>Imágenes de MEB</b>	<b>25</b>
<b>Espectrometría IR</b>	<b>26</b>
<b>Discusión</b>	
<b>Ingreso de microplásticos</b>	<b>28</b>
<b>Degradación de microplásticos</b>	<b>31</b>
<b>Fragmentación de microplásticos</b>	<b>32</b>
<b>Consumo de microplásticos</b>	<b>35</b>
<b>Contaminantes y aditivos de los microplásticos</b>	<b>38</b>
<b>Conclusiones</b>	<b>41</b>
<b>Recomendaciones</b>	<b>42</b>
<b>Bibliografía</b>	<b>43</b>
<b>Apéndice</b>	<b>50</b>

## **Glosario de siglas**

DDT: Dicloro difenil tricloroetano

PBDE: Polibromodifenil éteres

PE: Poliestireno

PET: Polietileno tereftalato

PP: Polipropileno

BPC: Bifenilos Policlorados

COP: Contaminantes orgánicos persistentes

HAP: Hidrocarburos Aromáticos Policíclicos

MEB: Microscopia electrónica de barrido

MOD: Materia orgánica disuelta

IR: Espectrometría Infrarroja

PTAR: Planta de tratamiento de aguas residuales

PVC: Polivinil Cloruro

RSU: Residuos sólidos urbanos

UV: Ultravioleta

## Resumen

Las lagunas costeras del Golfo de México cuentan con una gran importancia económica y pesquera. Entre estas se encuentran las lagunas del estado de Veracruz, México. Dichos cuerpos de agua están contaminados con Residuos Sólidos Urbanos (RSU) y descargas de aguas residuales, originados en las zonas urbanas de México. Lo anterior mencionado puede dar paso a la formación de microplásticos, lo cual es un riesgo para la salud humana. Este es el primer estudio en donde se analizan microplásticos en sedimentos y moluscos del estado de Veracruz, y será un antecedente a futuros trabajos. El objetivo fue determinar la presencia y características de los microplásticos en sedimentos superficiales, y moluscos bivalvos de la especie *Crassostrea virginica*, de las lagunas de Mandinga, Tampamachoco, Alvarado y Laguna Verde del estado de Veracruz, México. El método utilizado consistió en el tamizado de los sedimentos, la digestión de los tejidos de *Crassostrea virginica*, y la aplicación de la técnica de flotación para la extracción de los microplásticos. Estos se analizaron utilizando un microscopio estereoscópico, y se les aplicó la técnica analítica de Microscopia Electrónica de Barrido (MEB), así como Espectrometría Infrarroja (IR). Tanto en los sedimentos como en el tejido de *Crassostrea virginica* se reporta una presencia superior de microplásticos en forma de fibra que de partículas. La laguna de Alvarado cuenta con mayor manifestación de microplásticos, y la laguna de Mandinga es más variable en cuanto a fracciones. Las imágenes de MEB muestran distintas marcas de degradación en la superficie de varios microplásticos. La Espectrometría IR confirma la presencia de los polímeros polipropileno y acrílico. Los microplásticos fibrosos de polipropileno se originan de descargas de aguas residuales, así como del desgaste en seco de textiles. Los fragmentos de microplásticos, y el polímero acrílico, proceden de los residuos sólidos urbanos (RSU) producidos en la zona costera de Veracruz. La presencia de fibras plásticas dentro de los sedimentos se debe a la agregación de algas en su superficie. La degradación se debe al proceso de meteorización oxidativa y a la agregación de algas. Esto se observa en la banda de  $1700\text{ cm}^{-1}$  del espectro IR del polipropileno, la cual corresponde al grupo carbonilo  $\alpha$ . La salinidad, el oxígeno disuelto y las altas temperaturas de las lagunas son factores fisicoquímicos que la propician. El tamaño de partícula  $0.25\text{ mm}$  ( $2\Phi$ ) es más fácil de transportar con respecto a los de mayor magnitud, y las fracciones menores se formaron por degradación y fragmentación. La degradación no es tan avanzada como para que los tamaños menores sean los de mayor presencia. Las primeras tres lagunas, al ser de tipo Ahogado, favorece movimientos turbulentos provocados por el viento para que los microplásticos se fragmenten. Las mayores velocidades del viento son para la laguna de Alvarado y la de mandinga. Las microfibras, en especial las del tamaño de  $2.00\ \Phi$ , tienen mayor potencial de ser bioacumuladas. Los organismos bentónicos se ven afectados por las fibrosidades de plástico del sedimento, y los pelágicos por su resuspensión. Las lagunas de Alvarado y Mandinga tienen mayor potencial de incorporar mayores tipos de fracciones de microplásticos a los organismos de su red trófica. *Crassostrea virginica*, al ser un organismo filtrador, tiene mayores posibilidades de incorporar microplásticos. Los microplásticos contienen aditivos, los cuales pueden ser lixiviados a los cuerpos de agua en cuestión. Las marcas de degradación en las superficie encontradas pueden permitir la adición de contaminantes. En las lagunas del estudio hay presencias tóxicas de Cr, Ni y Pb. Igualmente, en laguna Verde y laguna de Tampamachoco se encontraron concentraciones de BPC y HAP. Es probable que dichos contaminantes se encuentren adheridos a las marcas antes mencionadas. Los textiles sintéticos son la fuente más peligrosa de microplásticos para los ecosistemas acuáticos. Le sigue el aumento de plástico de un solo uso. Las lagunas de Alvarado y Mandinga tienen un serio problema de contaminación por microplásticos, ya que sus condiciones ambientales favorecen mayormente su impacto en sus redes tróficas. *Crassostrea virginica* es un recurso pesqueros de alto riesgo para la salud humana debido a su consumo.

Palabras clave:

Microplástico, polietileno, *Crassostrea*, laguna, bioacumulación.

Abstract

The coastal lagoons of the Gulf of Mexico are contaminated with Urban Solid Waste (USW) and sewage discharges from urban areas of Mexico, including Veracruz. Microplastics are found in these wastes. The coastal lagoons of Mexico are ecosystems of great ecological and fishing importance, but if they are subject to contamination, it is possible to find the presence of microplastics. This can cause risks to human health. This is the first study in which microplastics are analyzed in sediments and mollusks in the state of Veracruz, and it will be a precedent for future studies that cover more areas of this topic. The objective was to determine the presence and characteristics of microplastics in surface sediments, and bivalve mollusks of the species *Crassostrea virginica*, which come from the Mandinga, Tampamachoco, Alvarado and Laguna Verde lagoons, localized at the state of Veracruz, Mexico. The method used consisted of sieving the sediments, digestion of the *Crassostrea virginica* tissue, and the application of the flotation technique for the extraction of microplastics. These were analyzed using a stereoscopic microscope, and they were applied analytical techniques of Scanning Electron Microscopy (SEM) and Infrared Spectrometry (IR) to them. Both in the sediments and in the tissue of *Crassostrea virginica* of all lagoons, it's reported a greater presence of microplastics in form of fibers than which in form of particles. At the Alvarado lagoon is found the greatest presence of microplastics, and the Mandinga lagoon is the one with the greatest variability of fractions. The SEM images show different degradation marks on the surface of different microplastics, both microfibers and particles. IR spectrometry confirms the presence of polypropylene and acrylic polymers. Polypropylene microfibers come from sewage discharges, as well as dry wear of textiles. The microplastic fragments, and the acrylic polymer, come from USW produced by the villages near of the coastal zone of Veracruz. The presence of microfibers within the sediments is due to the aggregation of algae on their surface, which increases their density. The degradation is due to the aerobic and anaerobic factors like oxidative weathering process and the aggregation of algae. This is observed in the  $1700\text{ cm}^{-1}$  band of the IR spectrum of polypropylene, which corresponds to the carbonyl group a, which only appears in degrading propylene. Salinity, dissolved oxygen and the high temperatures of the lagoons are physicochemical factors that promote that process. The  $2.00\ \Phi$  size microfibers is easier to transport in comparison to which with larger sizes, and the smaller fractions were formed by degradation and fragmentation. The degradation is not so advanced for the smaller sizes are the ones with the greatest presence. Microfibers, especially those of the size of  $2.00\ \Phi$ , have the greatest potential to be bioaccumulated by the lagoon organisms. Benthic organisms are affected by the microfibers in the sediment, and pelagic organisms by their re-suspension. The Alvarado and Mandinga lagoons have a greater potential to incorporate more types of microplastic fractions into the organisms of their food web. Due to *Crassostrea virginica*, is one of the greatest filtering organisms, has too much possibilities of incorporating microplastics into their organism. Microplastics contain additives, which can be leached to the environment and the degradation marks allow the addition of contaminants on their surface. In the lagoons of the study there are toxic presences of Cr, Ni and Pb. Similarly, in Laguna Verde and Laguna de Tampamachoco concentrations of PCBs and PAHs were found. These contaminants are likely to be attached to the aforementioned markings. Synthetic textiles are the primary source of microplastics for aquatic ecosystems. It is followed in importance by the increase in the use of disposable plastics. The Alvarado and Mandinga lagoons have a serious problem of contamination by microplastics, and their environmental conditions facilitate their impact in terms of contamination within their trophic networks. *Crassostrea virginica* is a high risk fishery resource, due to when its consumed by humans, like people which is near to the lagoons of this study, it can cause a public health problem.

Keywords:

Microplastics. Polyethylene, *Crassostrea*, lagoon, bioaccumulation.

## Introducción

El Golfo de México es un sistema ambiental de los más valiosos y ricos del planeta Tierra, el cual cuenta con una gran diversidad de ambientes costeros templados, subtropicales y tropicales. El Golfo presenta una extensión de tan solo  $1.6 \times 10^6$  de  $\text{km}^2$ , con un volumen de cerca de  $2.3 \times 10^6$   $\text{km}^3$  de agua. En él suceden una serie de procesos físicos, químicos y biológicos (tales como corrientes oceánicas, giros ciclónicos y anticiclónicos), convirtiéndola en una de las cuencas más importantes de aguas protegidas de la América Neotropical (Toledo *et al.*, 2014).

Dentro de los ambientes litorales del Golfo de México, se encuentran las zonas costeras que son definidas como una interfase tierra-mar. En la zona costera existe una interacción entre el medio marino y terrestre, los cuales entran en contacto a través del litoral y presentan fenómenos físico-químicos, geológicos, atmosféricos, biológicos y socioculturales (Ortiz-Lozano, 2010). El ancho de la zona costera es variable dependiendo de la naturaleza del medio ambiente y las divisiones políticas aunque pocas veces corresponde a unidades políticas o de planificación existentes (Lavalle *et al.*, 2011).

La zona costera de México se encuentra dentro del mar territorial políticamente reconocido, cubriendo una extensión de  $430,000 \text{ km}^2$  aproximadamente, de los cuales  $7,828 \text{ km}$  corresponden a estados costeros del Océano Pacífico y Golfo de California mientras que  $3,294 \text{ km}$  corresponden a estados del Golfo de México y el Mar Caribe (Lara-Lara *et al.*, 200). La segunda zona comprende los estados de Tamaulipas, Veracruz, Tabasco, Campeche, Yucatán y Quintana Roo (Cabrera, 2003). En esta última se encuentran una gran diversidad de hábitats de alta productividad e interconexión tales como bahías, deltas, pastos marinos, arrecifes de coral, y lagunas costeras y estuarios (Caso *et al.*, 2004).

La mayoría de los sistemas costeros del Golfo de México, son alimentados por un río relativamente permanente, que en el caso de las lagunas han recibido el nombre de sistemas fluvio-lagunares o estuarino-lagunares (Lara-Lara *et al.*, 2008). Alrededor de 38 sistemas fluviales, entre los cuales se destacan el sistema Grijalva-Usumacinta, el Río Papaloapan, Río Coatzacoalcos y el Río Pánuco, que descargan alrededor de  $31.6 \times 10^6 \text{ kg s}^{-1}$  de agua dulce, y acarrear alrededor de 775 millones de toneladas de detritos y alrededor de  $2.08 \times 10^{11} \text{ kg}$  de material disuelto (Toledo *et al.*, 2014).

Actualmente, los ecosistemas costeros se encuentran bajo un fuerte impacto antropogénico, como consecuencia de las tendencias demográficas de crecimiento (Caso *et al.*, 2004). Los sistemas fluviales, al acarrear material terrestre hacia la costa y el océano, es el medio del transporte de la basura generada por la actividad humana (Moncada, 2018).

Mientras más se urbanizan los asentamientos litorales, más se vinculan al sector de servicios, tal como el comercio, hospedaje o bienes de consumo (Fraga, 2006). Los estados costeros del Golfo de México han tenido una alteración urbana significativa en el último siglo. Se prevé que para el 2025, 40% de la población nacional vivirá bajo la influencia marina y costera. Ejemplo de ello se puede observar en el desarrollo del corredor turístico Veracruz-Boca del Río (Benitez *et al.*, 2014). Lo anterior, incluye la generación de una amplia gama de desechos tóxicos (Toledo *et al.*, 2014), entre los que se encuentran los Residuos Sólidos Urbanos (RSU), y de descarga de aguas residuales.

La contaminación por RSU se debe a su mala disposición, es decir, su manejo sin la infraestructura o métodos que eviten la contaminación del agua, aire o suelo (Castañedo y Pérez, 2015). Ejemplo de ello son las fugas y lixiviación en sus sitios de almacenamiento (terrenos, bodegas, ductos, rellenos sanitarios, entre otros) o en zonas de actividades productivas (en donde se puede contaminar a los productos resultado de esas actividades, tales como cosechas o productos pesqueros), así como los derrames accidentales durante su tratamiento (Toledo *et al.*, 2014).

La descarga de aguas residuales debe su generación al uso doméstico, industrial, agrícola y pecuario. Las sustancias dentro de las aguas residuales pueden estar disueltas, suspendidas o en estado coloidal, y ser de naturaleza inorgánica u orgánica. Las aguas residuales sin tratamiento dispuestas en los sistemas fluviales, provoca la contaminación de los cuerpos de agua receptores, tal como las lagunas costeras (SEMARNAT, 2014) Esto se debe a que son incapaces de absorber y neutralizar los contaminantes, con lo que pierde sus condiciones naturales. La capacidad de sustentar vida acuática disminuye, por lo que se pierde la integridad de los ecosistemas (Rodríguez, 2017). Para el 2014, México, Jalisco, Hidalgo, Puebla, Tlaxcala y Veracruz mantenían los mayores puntos de descargas de aguas residuales sin tratamiento (INEGI, 2014).

Del contenido de los RSU se sabe que más del 85% son plásticos. Los plásticos se identifican como el conjunto de materiales sintéticos formados a partir de polímeros de moléculas orgánicas obtenidas de materias primas como la celulosa, carbón, gas natural o petróleo, entre otros. El plástico se puede deformar hasta conseguir la forma deseada a través de extrusión, moldeado o hilado (Díaz, 2012). De acuerdo con la organización ambientalista Greenpeace (2019), el mercado de plásticos se encuentra dominado por polímeros tales como el polipropileno, poliéster termoplástico (PET), policloruro de vinilo (PVC), polietileno, entre otros.

Los plásticos son descargados a los ríos a través de las aguas residuales, así como por el manejo incorrecto de RSU, y finalmente son transportados hacia la zona costera (Fig. 1). Al acumularse en las costas, se ven sujetos tanto a factores bióticos como abióticos. Los primeros agentes incluyen a la radiación solar, el movimiento de las mareas, la salinidad, la fricción con la arena y la temperatura. Los segundos tienen como ejemplo a la formación de biopelículas (Álvarez-Zeferino, 2017).

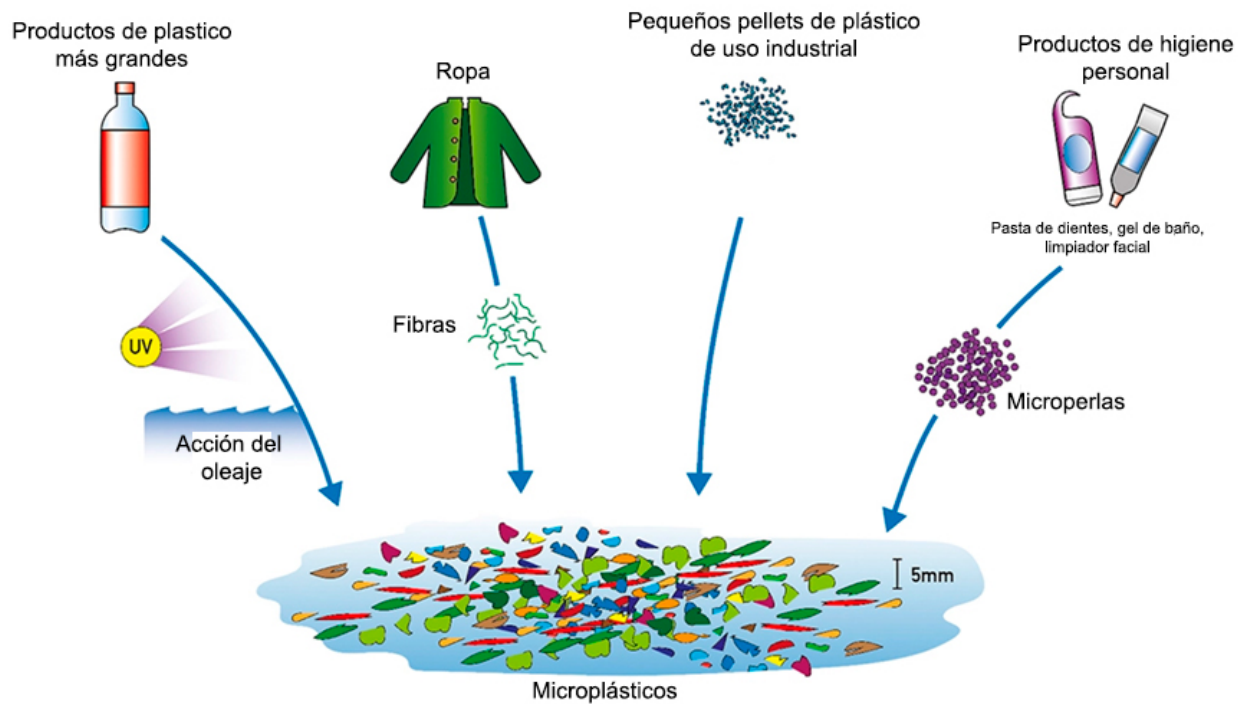
La existencia de plástico en los sistemas costeros conlleva a la generación de microplásticos, los cuales consisten en fragmentos de plástico, que abarcan tamaños comprendidos entre <10 mm hasta <1 mm (Cole *et al.*, 2011). Los microplásticos se encuentran en los sedimentos, la columna de agua y en los organismos. Se dividen en:

**Primarios:** Son partículas fabricadas originalmente con el tamaño de un microplástico, las cuales son utilizadas en cosméticos, fármacos y medios de ráfagas de aire.

**Secundarios:** Son generados a partir de la desintegración de un macroplástico, los cuales dentro del ambiente acuático son propensos a fragmentarse en pedazos más pequeños.

Figura 1. Fuentes de microplástico tanto de tipo primario como secundario. Modificado de Encounter Edu (2018)





presencia de microplásticos en el océano abierto fue expuesta en la década de 1970. Estos contaminantes se ubican y dispersan dentro del ambiente marino, con el potencial de dañar a la biota. El daño a los organismos se da principalmente porque los plásticos se encuentran biodisponibles a través de la red alimenticia, produciendo un impacto negativo sobre especies de importancia pesquera dentro de los sistemas fluvio-lagunares. La composición y área superficial relativamente grande de los microplásticos los hace propensos a adherir metales y contaminantes orgánicos del medio, y a lixiviar sus plastificantes. Los microplásticos cuentan con un potencial de bioacumulación en los moluscos bivalvos, crustáceos y en varias especies de peces de los sistemas fluvio-lagunares (Elias, 2015). Uno de los organismos más afectados por la presencia de microplásticos en el ambiente costero son los ostiones, debido a que se alimentan a través de la filtración de agua. Por ejemplo, un ostión adulto es capaz de filtrar 1.5 galones de agua en una hora aproximadamente (Weis, 2015). Al exponerse directamente a los contaminantes del agua, los ostiones son agentes de biomonitorio e indicadores de contaminación ambiental local así como de salud del sistema por tener la capacidad de limpiarla (Laws, 2013). Debido a que se reportó recientemente la presencia de microplásticos en columna de agua y sedimentos, los ostiones tienen el potencial de acumular contaminantes, así como transferirlos a través de la red trófica.

Por otro lado, los ostiones significan un riesgo potencial, ya que son consumidos por los seres humanos (Li *et al.*, 2018). Y al ser especies comerciales, los ostiones pueden provocar efectos negativos sobre las persona que los consumen, ya que generalmente a los microplásticos se les asocia con la presencia de bisfenol A (un conocido perturbador endócrino) así como de otros contaminantes (tanto orgánicos como metales) (Carbery *et al.*, 2018).

## Hipótesis

Si la zona costera del estado de Veracruz se ve sujeta a la presión antropogénica, tal como descargas de aguas residuales y el mal manejo de los residuos sólidos urbanos (RSU), es posible encontrar la presencia de microplásticos en las lagunas costeras (Alvarado, Mandinga, Tampamachoco y Laguna Verde) y en sus diferentes compartimentos: agua, sedimentos y organismos.

Si los microplásticos se fragmentan gradualmente, es posible encontrar tamaños de partículas similares a los de aquellos que son consumidos por diferentes organismos dentro de la red trófica de las lagunas costeras. Por lo tanto, los tamaños de las partículas encontradas en sedimentos y los tamaños de las partículas ingeridas por los organismos se podrían relacionar para inferir una posible ingesta por diferentes organismos dentro de la red.

## Justificación

Las lagunas costeras del estado de Veracruz son áreas de gran importancia ecológica y pesquera, y son el sustento de las diversas comunidades de pescadores ribereños que las habitan. Sin embargo, las lagunas costeras se encuentran sometidas a fuentes de contaminación que implican el ingreso de microplásticos, tanto de tipo primario como secundario, y a las descargas de aguas residuales no controladas. Las descargas residuales pueden producir un impacto negativo sobre la gran diversidad de organismos, tales como moluscos, peces y crustáceos, así como sobre los estadios juveniles de diferentes especies marinas que aquí se desarrollan.

Debido al consumo de especies provenientes de áreas expuestas a los microplásticos y sus contaminantes asociados, tal como *Crassostrea virginica*, es posible que existan riesgos en la salud humana, lo que implica un problema de salud pública. Además, puede implicar un problema económico para las personas que se dedican a su comercialización.

## Antecedentes.

En los últimos años, los estudios sobre microplásticos con los que se cuentan en las costas de la República Mexicana incluyen aquel realizado por Gómez (2016). Aquí se evaluó la influencia de microplásticos de polivinil cloruro (PVC), y flouranteno en dos especies del Caribe Mexicano: *Eupolymnia rullieri* (*Annelida Polychaeta*) e *Isonogmun alatus* (*Mollusca, Bivalvia*). En *I. Alattus* existe una relación entre el aumento de microplásticos en el medio y el consumo de alimento. También provocó un aumento en su respiración. Igualmente, se hizo conteos de microplásticos en el sedimento de la zona costera de Puerto Morelos. Se obtuvieron valores relativamente altos (55.67 micropartículas/kg de arena).

De igual forma, se realizaron investigaciones en las costas del Océano Pacífico, tal como el publicado por Piñón *et al.* (2018). En dicho artículo se menciona que se hizo muestro de arena para investigar la presencia, distribución de microplásticos en playas de la Península de Baja California, México, así como su espectroscopia y morfología. Se reportó que la fibra fue el microplástico más abundante encontrado en las muestras. Igualmente, los principales polímeros identificados fueron poliacrílico, poliacrilamida, tereftalato de polietileno, poliésteres y nailon.

En la zona costera del Golfo de México se reporta el escrito de Di Mauro (2018). En dicho escrito se caracterizaron microplásticos en aguas de la plataforma continental frente a la costa de Luisiana, en el norte del Golfo de México. Las concentraciones de microplásticos fueron mayores que las abundancias de todos menos cuatro de los cinco taxones más abundantes de

las redes de bongo. Esos mismos fueron estadísticamente similares a las abundancias de los taxones más numerosos de las redes de Neuston. Los tamaños de los microplásticos y el zooplancton se superponen, lo que sugiere la posibilidad de confusión con las presas naturales.

En el área de la costa del estado de Veracruz se cuenta con la investigación de Sánchez-Hernández (2018). Aquí se reportó la longitud, el número, el color y la forma de los microplásticos presentes en peces comerciales, agua y sedimento del estuario de Tecolutla, Veracruz. Como conclusión se llegó a que en todas las épocas climáticas existen microplásticos en organismos, agua y sedimento.

Sin embargo, en las lagunas costeras consideradas en este trabajo (laguna de Mandinga, Alvarado, Tampamachoco y Laguna Verde) no existen estudios previos sobre la presencia de microplásticos en sedimentos y organismos. El presente escrito es el primero en donde se realiza el análisis de microplásticos en sedimentos de lagunas costeras para el estado de Veracruz a partir de su tamizado y la obtención de diferentes fracciones. Igualmente, es pionero en la zona ya descrita, así como en realizar el análisis de microplásticos de moluscos bivalvos de la especie *Crassostrea virginica*. El presente será un antecedente a futuras investigaciones sobre microplásticos que ayude a observar la evolución de la contaminación y su bioacumulación en ostiones de lagunas costeras del estado de Veracruz.

## Objetivos

### Objetivo general

Evaluar la presencia de microplásticos presentes en sedimentos superficiales, así como en los moluscos bivalvos de la especie *Crassostrea virginica*, de las lagunas de Mandinga, Tampamachoco, Alvarado y Laguna Verde del estado de Veracruz, México.

### Objetivos particulares

- Identificar la presencia y características de microplásticos en sedimentos superficiales de la laguna de Mandinga, Tampamachoco, Alvarado y Laguna Verde, Veracruz.
- Identificar la presencia de microplásticos en tejido y conchas de moluscos bivalvos de la especie *Crassostrea virginica* obtenidos tanto de la laguna de Mandinga como en la laguna de Alvarado, Veracruz.
- Identificar las marcas de degradación de las muestras de microplásticos encontrados.
- Identificar los polímeros que conforman a las diferentes partículas de microplásticos.

### Zonas de estudio

Las zonas de estudio se encuentran en la costa del estado de Veracruz, México. Al ser lagunas costeras, son cuerpos de agua salobre poco profundos, los cuales se encuentran separados del mar por alguna barrera, pero mantienen una conexión hacia el océano abierto (Kennish *et al.*, 2010). Se encuentran localizadas en una latitud norte de entre 18° 43' y 21° 04', y una longitud oeste de entre 92° 17' y 95° 42'. El clima de este lugar se encuentra entre cálido subhúmedo y húmedo. La provincia fisiográfica de los sitios de estudio es de tipo llanura costera (CONABIO, 2009). A continuación se describe cada una de las lagunas de sur a norte.

## **Laguna de Mandinga**

Se localiza en el estado de Veracruz, entre los 19° 00' y 19° 06' de latitud norte y los meridianos 96° 02' y 96° 06' de longitud oeste. El sistema lagunar tiene una orientación norte-sur en tanto que la costa cercana adopta una dirección noroeste-sureste, conformando la punta de Antón Lizardo. Hacia el noroeste las lagunas se separan del mar por una barrera de dunas. Tomando en cuenta los tres cuerpos lagunares del total del sistema lagunar de Mandinga (i.e., Mandinga grande, Mandinga y el Conchal), el área total del sistema lagunar corresponde a  $2.108 \times 10^7$  m<sup>2</sup>. La laguna está asociada al río Jamapa, el cual nace con los deshielos del Pico de Orizaba, recorre 150 km. Esta laguna corre de oeste a este y recibe varios afluentes de los ríos Huatusco, Cotaxtla y Totolapan, para finalmente desembocar en el Golfo de México (Lara-Domínguez *et al.*, 2009). Los centros poblados más cercanos son el municipio de Boca del Río, así como el pueblo de Mandinga, en el estado de Veracruz, México. Para el año 2010, la población de municipio antes nombrado ascendía a 138, 058 personas (INEGI, 2014)<sup>4</sup>( el uso de superíndices en algunas citas se aclara en la sección de referencias).

## **Laguna de Tampamachoco**

Esta laguna se localiza en la llanura costera del estado de Veracruz, a 9 km al noroeste de la ciudad de Tuxpan. Se encuentra ubicada entre los 20° 57"- 21° 04" de latitud septentrional y los 97° 19" - 97° 23" de longitud occidental. El área está limitada al norte por la Sierra Otontepec, al sur por la Sierra de Papantla y al poniente por la Sierra Madre Oriental, en las porciones de Huayacocotla y Chicontepec (Departamento de pesca, 1977). La laguna es de forma alargada y paralela a la línea de costa, con longitud de 10.6 km y anchura máxima de 2.7 km. Ocupa un área de 15 km<sup>2</sup>, aproximadamente. Está separada del mar por la barra de Galindo, al norte se comunica con la laguna de Tamiahua por un canal, con el mar a través de la boca de Galindo de origen artificial y al sur se comunica con el río Tuxpan por medio de un estero (Mendoza-Díaz *et al.*, 2010). El municipio más próximo a esta laguna corresponde a la ciudad de Tuxpan, Veracruz, que para el 2010 contaba con una población de 143 362 personas (INEGI, 2014)<sup>5</sup>.

## **Laguna de Alvarado**

La laguna de Alvarado se localiza entre los 18° 43' y 18° 52' de latitud norte y los 95° 42' y 95° 57' de longitud oeste. Se encuentra localizada en la porción suroccidental del Golfo de México, al sudeste del estado de Veracruz. (De la Lanza *et al.*, 1999). La comunicación con el mar se da a través de la "Boca Camaronera", ubicada en el extremo noroeste, y de la boca de Alvarado, ubicada al noreste (Cruz, 2005). El sistema Lagunar de Alvarado se compone de cuatro cuerpos lagunares: Alvarado, Buen País, Camaronera y Tlalixcoyan, lo que resulta en un área total de  $8.06 \times 10^7$  m (Ruiz *et al.*, 2014). El sistema lagunar está asociado con el río Papaloapan, cuya cuenca cubre una extensión aproximada de 39, 189 km<sup>2</sup> se extiende por los estados de Oaxaca, Puebla y Veracruz y recorre un total de 445 km. El pueblo de Alvarado es la población más cercana y de influencia de la laguna, que para el año 2010 contaba con una población de 51,955 personas (INEGI, 2014)<sup>3</sup>.

## **Laguna Verde**

La laguna se encuentra ubicada a una latitud. 20°00' a 19°01'48" y a una longitud 96°29'24" a 95°48'36". Al sur colinda con la Central Nucleoeléctrica Laguna Verde. Cuenta con una superficie de  $3.657 \times 10^9$  km<sup>2</sup> (CONABIO, 2009). La laguna en cuestión no se encuentra conectada mediante afluentes ya sea fluviales o mareales, lo que la hace una cuenca

endorreica (Basáñez, 2018). La laguna se encuentra dentro del municipio de Alto de Lucero Gutiérrez Barrios, Veracruz, cuya población para el año 2010 ascendía a 28,017 personas (INEGI, 2014)<sup>2</sup>.

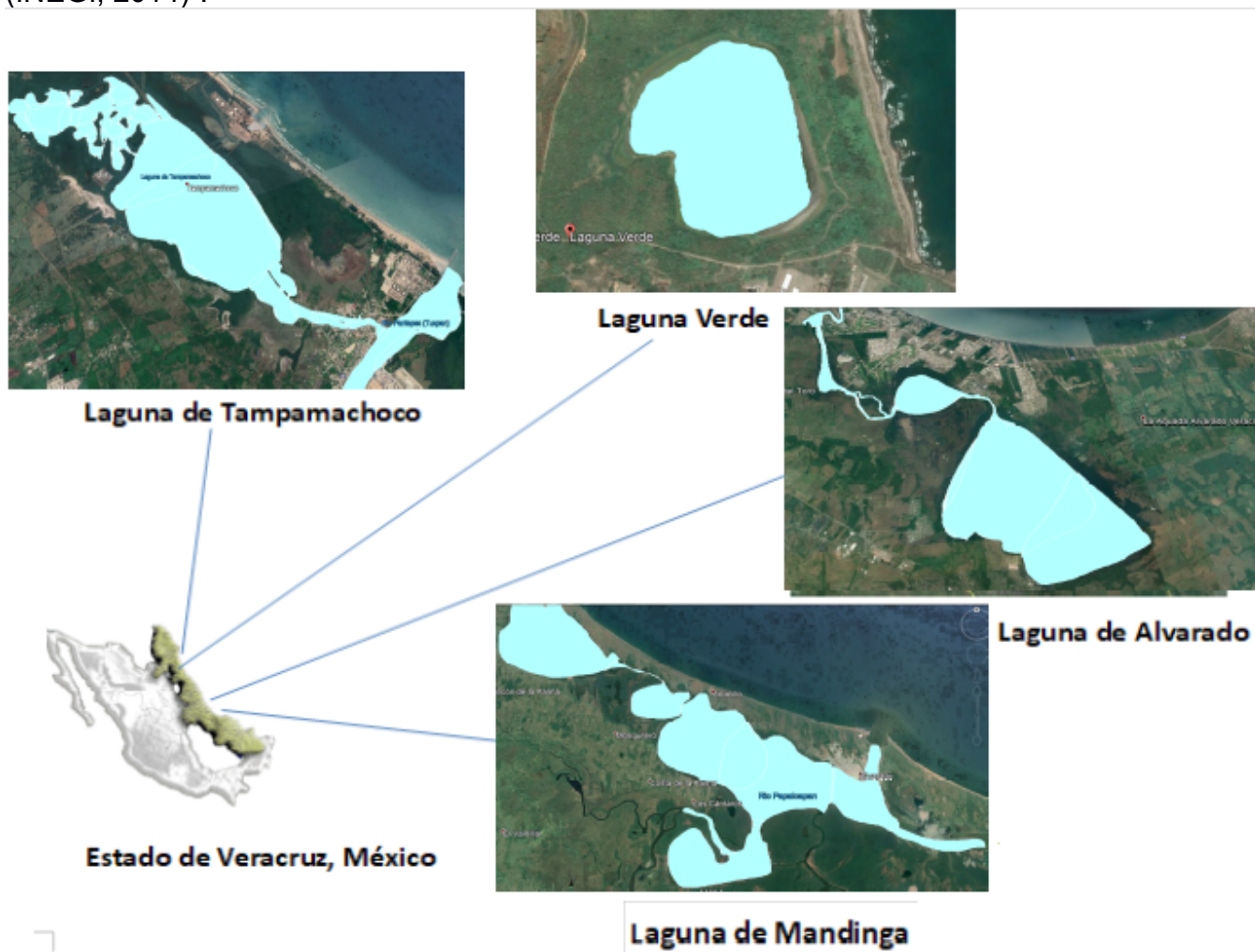


Figura 2. Lagunas costeras del estado de Veracruz utilizadas como zona de estudio. Figura de elaboración propia.

### Importancia de las zonas de estudio

A continuación se menciona la importancia ecológica, económica, social y los impactos que sufren las cuatro lagunas del área de estudio. Enseguida se hablará de cuáles son los recursos y servicios ecosistémicos, la población y el capital económico que se pueden ver afectados por la presencia de microplásticos dentro de las lagunas en cuestión. De igual forma, se expondrán las afectaciones que sufren las lagunas para dar una idea de la repercusión general que genera la presencia de microplásticos, así como la posible relación que haya con los agentes estresantes de estos ecosistemas.

#### Laguna de Mandinga

Importancia ecológica:

El manglar del sistema lagunar de Mandinga debe su importancia a que es una zona de alimentación, refugio, reproducción y anidación de especies de peces y crustáceo. Las lagunas costeras brindan sustrato para el desarrollo de especies bentónicas, funcionan como trampa de sedimentos, ayudan a la carga y recarga del manto freático, y favorecen el mantenimiento de la calidad del agua. Adicionalmente facilitan la regulación y se consideran áreas de amortiguamiento ante el impacto de huracanes y norte. Entre las especies de mangle que destacan se cuenta con *Rhizophora mangle*, *Avicennia germinans* y *Laguncularia racemosa*, las cuales se encuentran bajo la categoría de amenazadas en la Norma Oficial Mexicana: Protección ambiental-Especies nativas de México de flora y fauna silvestres (Norma Oficial Mexicana 059, 2010). La laguna de Mandinga es zona de alimentación y anidación para especies de aves, y se considera hábitat para la crianza de camarón (Lara-Domínguez *et al.*, 2009).

#### Importancia social:

El sistema lagunar de Mandinga se encuentra dentro de los límites del municipio de Alvarado, Ver., del cual algunas de sus localidades forman parte del área de estudio. El municipio de Alvarado en el 2005 registró una población de 48,178 habitantes, para el 2010 registró una población de 51,955 habitantes y con una densidad de población de 62.9 habitantes/km<sup>2</sup>, lo que representa un aumento del 7.26 % entre los años 2005 y 2010 (SEFIPLAN, 2018)<sup>3</sup>.

De acuerdo con Lara-Domínguez (2009), no existe población en el área del manglar, pero en la zona de influencia habitan 21,370 personas. El número total de localidades en la zona de influencia del manglar es de 91.

#### Importancia económica:

En la zona aledaña al sistema lagunar se realizan actividades agrícolas, tales como el cultivo y cosecha de maíz, chile, mango, piña y caña de azúcar. Los tipos de ganados encontrados son: bovino, el porcino, el caprino, el ovino o lanar y aves de corral. Existen más de 600 pescadores de 15 cooperativas y 67 pesqueras que se benefician por la pesca de la zona de Mandinga y río Jamapa, de las cuales ocho cooperativas se encuentran establecidas en el Sistema Lagunar de Mandinga. Entre las sociedades destacan la Sociedad Cooperativa Pescadores Unidos de Mandinga, la Fraternidad de Mandinga con 21 socios que cuenta con 36 hectáreas de cultivo de ostión en la Laguna de Mandinga y la Soc. Cooperativa de Pescadores de Mandinga y Matoza S.C.L. (SAGARPA, 2012).

En el municipio de Boca del Río, muy cercana al sistema Lagunar de Mandinga, se han establecido industrias entre las que se hallan 165 microempresas, 36 pequeñas empresas y 11 medianas. En la zona destacan las industrias empacadoras de cítricos, fabricación de tubos de concreto, productos químicos y elaboración de concreto premezclado. La estructura económica del municipio de Boca del Río refleja una economía moderna, basada mayoritariamente en el sector servicios, y que tiene márgenes de crecimiento relevantes. En el municipio de Alvarado la población que se dedica a actividades del sector terciario representa el 47.5 %, este sector tiene una importante participación en la economía dado el gran número de profesores y personal docente. El 65 % de la población económicamente activa vive en el municipio de Medellín de Bravo. (Carrillo, 2016).

De igual forma, y como lo expone Carrillo (2016), el comercio es la actividad que más se desarrolla en los municipios de Veracruz y Boca del Río. En la zona de Paso del Toro y La Laguna, en el municipio de Medellín de Bravo, se comercializa en forma directa los productos.

El turismo tiene un gran potencial debido a la gran cantidad de restaurantes alrededor de la laguna. En ella se ofrecen paseos en lancha, y los principales atractivos turísticos son: la iglesia de la cabecera municipal de Medellín y la Laguna y Monte del Castillo, que cuenta con un gran potencial ecoturístico tanto en el área gastronómica como en actividades acuáticas.

Impactos antropogénicos:

La laguna de Mandinga se ve impactada directamente por la tala de manglar y por los asentamientos irregulares sobre este. Sin embargo se ve afectada indirectamente por los cambios en el uso de suelo favoreciendo la ganadería, el desarrollo urbano, y las descargas de drenaje de la zona conurbada de Boca del Río. Asimismo, se ve dañada por contaminación de residuos sólidos, agroquímicos y fertilizantes, daño por embarcaciones, desarrollo industrial (Puerto de Veracruz), impactos ambientales por producción y exploración petrolera, alto grado de fragmentación en el área, cambios en la densidad de poblaciones, impactos por turismo en el área, construcción de caminos y alteración del flujo hidrológico. De igual forma, se encuentra amenazada por la deforestación, la caza furtiva, la introducción de especies exóticas (tilapia), la pesca intensiva y el turismo (CONABIO, 2009).

### Laguna de Tampamachoco

Importancia ecológica:

La importancia de este sitio radica en poseer uno de los manglares mejor conservados de la Provincia Biogeográfica del Golfo de México, con aproximadamente 3,500 ha de manglares de 8-15 m de altura. En ella se registran 179 especies de peces, lo que convierte a este humedal en uno de los ambientes más ricos en especies de peces de las costas del Atlántico. Además, entre las especies bajo protección especial se incluyen a la serpiente zolcuete o cantil (*Agkistrodon bilineatus*), el carpintero pico plata (*Campephilus guatemalensis*), la iguana espinosa del Golfo (*Ctenosaura acanthura*) y la mariposa monarca (*Danaus plexippus*). Tampamachoco forma parte de los manglares del Río Tuxpan, los cuales pertenecen a la Región Terrestre Prioritaria 103 (Laguna de Tamiahua), y al sitio Ramsar 1602 (Manglares y Humedales de Tuxpan). Entre las especies de manglar aquí presentes las más abundantes son *Avicennia germinans* y *Rhizophora mangle* (Basáñez, 2005).

Importancia social:

Para el 2017, el municipio de Tuxpan contaba con una población de 152,501 en total, cuya tasa de crecimiento media es de 2.58%. De este total, la población rural es de 34,944, la urbana de 108,41, y la población indígena asciende a 5,928. La población cuenta con 1,603 fuentes de abastecimiento de agua, así como 4 sistemas de drenaje y alcantarillado. Los hogares con sistemas de drenaje son 41,919 y con agua entubada 37,572 (SEFIPLAN, 2018).

Importancia económica:

El municipio de Tuxpan se conoce más por su carácter industrial y portuario, además de permitir las inversiones nacionales y extranjeras. Existen varias refresquerías, restaurantes, cafeterías, neverías, entre otros. La agricultura continúa siendo una actividad de gran importancia en Tuxpan, así como en muchas otras partes de la República Mexicana. La ganadería forma parte del sector primario y se enfoca en el cuidado y alimentación de animales, entre los principales se encuentran los cerdos, vacas, pollos, borregos, abejas, etc., de los cuales se aprovechan sus derivados. En la zona del puerto se manejan mercancías principales como por ejemplo la carga general que lleva placas de acero, varilla, bobinas de

acero, aluminio, equipo de perforación, alimento balanceado para cerdo y ganado vacuno, así como granel agrícola con trigo, maíz, sorgo y destilado de grano. Además se comercia el granel mineral de fosfato diamónico, fosfonitrato, sulfato de amonio, grava y urea, y dentro de los energéticos se encuentran el gas propano y butano (Municipios, 2019).

#### Impactos antropogénicos:

Los principales impactos que sufre la laguna de Tampamachoco son la tala de manglar, los daños ocasionados por embarcaciones petroleras, la contaminación por derrames de petróleo, descargas de aguas residuales, impactos por actividades pesqueras y turísticas, sobreexplotación pesquera, dragados, cambios de uso de suelo por implementación de agricultura y actividades industriales, construcción de caminos, crecimiento portuario y urbano, desecación, proyectos urbanos e industriales, avance de la frontera pecuaria, agrícola, urbana e industrial, entre otros.

Por otro lado, la Planta Termoeléctrica Presidente Adolfo López Mateos de la Comisión Federal de Electricidad se encuentra en el municipio de Tuxpan, Veracruz, y posee una gran influencia para la laguna. Precisamente a un costado de la boca del río se descarga el gran caudal del Río Tuxpan al Golfo de México. La combustión realizada por esta planta contiene actualmente 1.5 a 2 % (15,000 a 20,000 ppm) de peso en azufre, lo que significa que las emisiones de los gases que generan son de aproximadamente 201,000 toneladas de ácido sulfhídrico al año (Álvarez, 2012).

### **Laguna de Alvarado**

#### Importancia ecológica:

Tal como es mostrado en Botello *et al.*, (2011), la laguna de Alvarado cuenta con la superficie de inundación más grande del estado de Veracruz y se considera uno de los principales ecosistemas de la zona de inundación. La laguna se estima como el tercer humedal de mayor extensión en México, siendo uno de los más importantes para el estado de Veracruz, uno de los más productivos del Golfo de México, además de resguardo de alimento y reproducción para diferentes poblaciones de peces y crustáceos existentes.

El río Papaloapan realiza su descarga en la Laguna de Alvarado. Proporciona el mayor aporte de agua dulce, con 44 829 mm<sup>3</sup> por año, lo que representa el 42.28% para Veracruz. La llanura de inundación formada durante la estación de lluvias representa un gran vaso de almacenamiento (Botello *et al.*, 2011).

Las zonas húmedas de la región de Alvarado conforman una de las áreas con mayor importancia con respecto a la biodiversidad y en extensión del estado, considerada como el tercero en extensión. Los humedales se encuentran entre las áreas de mayor diversidad de aves tanto acuáticas como terrestres, relacionado con la cantidad de hábitats presentes, tal como la selva baja, manglares, pastizales inundables y acuáticos, y sabaleras. Por lo anterior se pueden encontrar especies tanto residentes como migratorias (Botello *et al.*, 2011).

#### Importancia social:

Hasta el 2017, la población total corresponde a 55,061 habitantes, en donde en la localidad de Alvarado se encuentran 23,128. Entre 2010-2015 la tasa de crecimiento fue de 0.39. La población rural asciende a 22,824 y la urbana a 29,131. Hasta el 2015 la población infantil es de 11,362, joven y adulta de 35,575, y de la tercera edad de 5,962. En cuanto a la salud pública, 92,210 personas cuentan con servicios médicos, mientras que 28,330 cuentan con



seguro popular. Existen 13 sistemas de drenaje y alcantarillado, los cuales se encuentran en 8 localidades a lo largo del municipio de Alvarado (CEIEG, 2016).

#### Importancia económica:

La población económicamente activa asciende a 19,957 personas, con lo que la tasa de participación económica es de 45.4%, con lo que la producción bruta total para el año 2013 corresponde a 2, 319,823 millones de pesos. Los principales cultivos agrícolas son piña, pastos y caña de azúcar. La ganadería se compone de la crianza de bovinos, porcinos, ovinos, caprinos y guajolotes (SEFIPLAN 2018)<sup>2</sup>.

En el Sistema Lagunar de Alvarado (SLA), del cual pertenece la laguna de Alvarado, la pesca abarca recursos dulceacuícolas tales como la almeja, mojarra, ostión, jaibas, langostinos camarón, chucumite, robalo, lebrancha la naca, entre otros (Botello *et al.*, 2017), siendo una de sus actividades económicas más importantes.

#### Impacto antropogénico

Los habitantes padecen un grave problema de exposición tóxica, debido a que este territorio es el último depósito de residuos contaminantes, los cuales son generados cuenca arriba y afectan de manera indirecta al sistema lagunar y a sus residentes (Botello *et al.*, 2017).

En general, los desechos generados por actividades dentro y fuera del municipio se deben a la contaminación de cuerpos de agua por industrias cercanas tales como: ingenios, papeleras, cerveceras, alcoholeras, o como resultado del mal manejo de residuos sólidos, agroquímicos o desechos ganaderos. Además se suma el problema de la invasión de los humedales debido a la expansión por el aumento de la población no regulado. Lo anterior conlleva a que existan pérdidas de ecosistemas, desaparición de la vegetación natural para preparar territorios con propósitos agrícolas, así como la reducción de espacios acuáticos para la reproducción de especies nativas y que junto con la sobreexplotación del recurso, disminuyen en potencial (CONABIO, 2009).

### Laguna Verde

#### Importancia ecológica

Cuenta con una gran diversidad de organismos, entre los que se encuentran: moluscos, poliquetos, equinodermos, crustáceos, peces, tortugas, aves, mamíferos marinos, manglares, tulares, carrizales, popales. Posee un corredor migratorio de aves rapaces y es un refugio de camarones y peces. Presenta endemismo de peces (*Cathorops* spp, *Centropomus poeyi*, *Gobionellus claytoni*, *Citharichthys abbotti*), moluscos (*Crassostrea virginica*) y plantas (*Amaranthus greggii*, *Florestina tripteris*, *Palafoxia linderii*, *Anfitecna tuxtlenensis*, *Chamaecrista* spp, *Hyperbaena jacomulcensis*, *Trachypodon gouilnii*, *Citharoxylum ellpiticum*, *Dioon edule*). La laguna es parte del área natural protegida conocida como Arrecifes Veracruzanos (CONABIO, 2009).

#### Importancia social:

Para el año 2015, el municipio de Alto Lucero de Gutiérrez Barrios, el cual se encuentra cerca de Laguna Verde, contaba con una población de 28,993 personas. Con respecto al año 2010, existe un aumento de 0.67 % en la población de este municipio. Para el año 2015 existían 19,716 personas en situación de pobreza, de la cual 2,796 personas se encontraban en pobreza extrema, y 3,589 personas en este municipio eran analfabetas. En cuanto a servicios

de seguridad médica, 21,538 personas hacen uso de servicios médicos, siendo los del instituto mexicano del seguro social (IMSS) en su mayoría. Para el año 2016, existían 40 sistemas de drenaje y alcantarillado en este municipio (SEFIPLAN, 2018)<sup>1</sup>.

#### Importancia económica:

La Laguna Verde es una zona turística importante y hotelera (Puerto de Veracruz, Villa Rica y Chachalacas). Igualmente, en esta laguna se realiza pesca organizada en cooperativas, con explotación de ostión, jaiba y lisa. En esta zona se realiza actividad petrolera, industrial y urbana (CONABIO, 2009).

#### Impactos antropogénicos:

Los principales impactos que amenazan a Laguna Verde se deben a la modificación del entorno, dada por la tala de manglar, dragado, lo que provoca que exista alteración de cuencas con cambios hidrológicos e influencias de la planta nucleoeléctrica. Igualmente, la laguna sufre la contaminación, ya sea por petróleo, aguas residuales, agroquímicos, fertilizantes, desechos industriales y aguas negras. Además se hace uso de los recursos pesqueros, habiendo una presión de este sector sobre el ostión y robalo, aunado a la existencia de la pesca ilegal. El sector turístico también ejerce presión sobre arrecifes coralinos (CONABIO, 2009).

## Muestreo y método

La colecta de los sedimentos superficiales se realizó por medio de una draga Van Veen de acero inoxidable y recubrimiento epóxico de 4L de capacidad. La red de estaciones se estableció de acuerdo a las diferentes morfologías, influencia fluvial y mareal de las lagunas del presente estudio, así como los poblados asentados en las márgenes y sus posibles descargas (Figs. 3 – 6). Las muestras colectadas de sedimento se guardaron en bolsas de plástico para su transporte al laboratorio de contaminación marina, perteneciente al Instituto de Ciencias del Mar y Limnología, UNAM.

### LAGUNA DE MANDINGA:

La colecta se realizó en abril del 2018 cubriendo una red de 8 estaciones de colecta.



Figura 6. Zonas de muestreo de sedimentos superficiales de Laguna de Mandinga. Figura de elaboración propia.

## LAGUNA DE ALVARADO

La colecta se realizó en agosto del 2015, y corresponde a la época de lluvias, en una red de 9 estaciones.



Figura 4. Zonas de muestreo de sedimentos superficiales de Laguna de Alvarado. Figura de elaboración propia.

## LAGUNA DE TAMPAMACHOCO

La colecta se realizó en julio del 2012, y corresponde a la época de lluvias del 2012, en una red de 9 estaciones, ubicadas tanto en la laguna como en el río Tuxpan a fin cubrir el río y la laguna.



Figura 5. Zonas de muestreo de sedimentos superficiales de Laguna de Tampamachoco. Figura de elaboración propia.

## LAGUNA VERDE

La colecta se realizó en febrero del 2012, en una red de 4 estaciones.

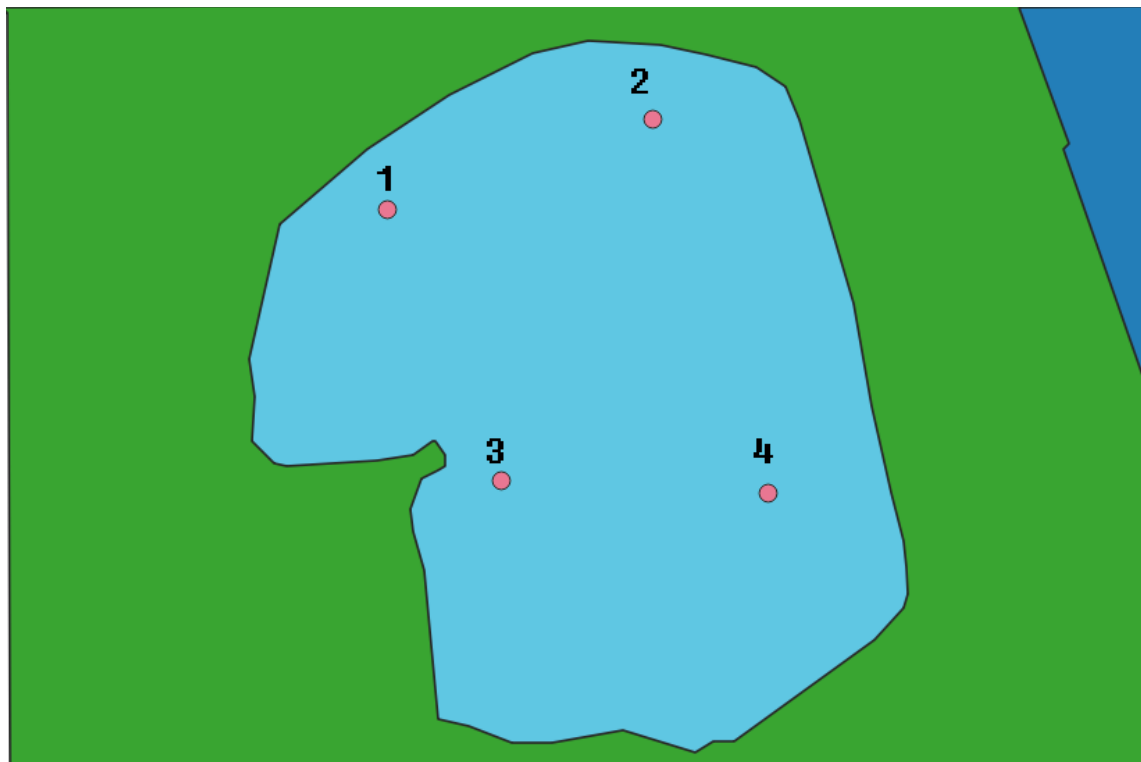


Figura 3. Zonas de muestreo de sedimentos superficiales de Laguna Verde. Figura de elaboración propia.

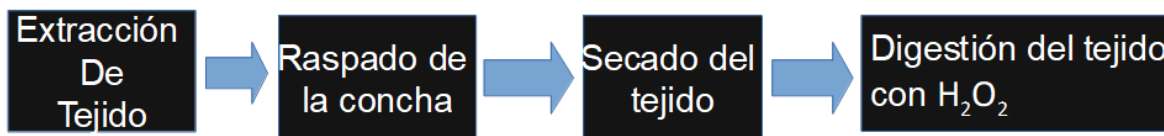
## Método

El método descrito a continuación se construyó a partir de revisar la tesis de Gómez (2016) para el muestreo y análisis de microplásticos en sedimentos, así como del artículo de Li *et al.* (2015) para la parte correspondiente al muestreo y análisis de microplásticos en moluscos *Crassostrea virginica* (figura 7).

### 1. Sedimentos



### 2. *Crassostrea Virginica*



### 3. Ambos tipos de muestras

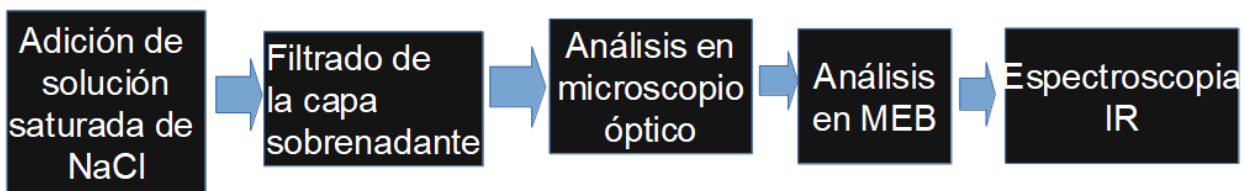


Figura 7. Método utilizado para el análisis de microplásticos en sedimentos y *Crassostrea virginica*. Figura de elaboración propia.

### Muestras de sedimentos superficiales

Para el tratamiento de los sedimentos a partir de la selección de las muestras se utilizó la técnica descrita por Gómez-Hernández (2016).

- Búsqueda bibliográfica sobre plásticos y microplásticos:

El punto de inicio fue la consulta de información bibliográfica acerca de plásticos y microplásticos para la obtención de criterios de forma, tamaño y color de los microplásticos. Esto se hizo para identificar a los microplásticos encontrados, así como de sus posibles fuentes de aporte.

- Selección de las muestras:

Las bolsas plásticas que se utilizaron contuvieron entre ocho y diecinueve muestras provenientes de los puntos de muestreo de la laguna de Mandinga, Tampamachoco, Alvarado y Laguna Verde.

- Secado de las muestras

Las muestras sedimentarias se colocaron en recipientes de vidrio y se dejaron secar dentro de un horno a una temperatura de 65°C durante 24 horas.

- Eliminación de la materia orgánica

Una vez secas las muestras, se vaciaron en vasos de precipitado y se les agregó peróxido de hidrógeno al 5% para eliminar la materia orgánica, luego se dejaron secar por segunda vez en un horno a 65°C durante 24 horas.

- Tamizado y separación de las muestras

Los sedimentos secos se seleccionaron por tamaño empleando un agitador automático, utilizando una serie de 8 tamices de diferentes tamaños de poro, en el intervalo de  $-2.25 \Phi$  hasta  $4.00 \Phi$  (y guardando el residuo sedimentario conocido como PAN una vez terminado el tamizado). La letra  $\Phi$  (phi) indica el tamaño de los poros en la malla de cada uno de los tamices usados, los cuales se pueden consultar en el **apéndice**. Los sedimentos seleccionados se guardaron y se separaron en bolsas de papel marcadas tanto con el número de estación como con el número de tamiz. Las muestras de estaciones con poca cantidad de sedimento no se tamizaron para evitar pérdidas entre los diferentes tamices.

- Separación por flotación

Se realizó la separación de las partículas de microplásticos, por flotación utilizando una mezcla saturada de agua salina (0.2 g/ml). La mezcla salina se preparó disolviendo 200 g de NaCl en un litro de agua. La solución fue agitada constantemente para lograr una disolución completa. Posteriormente se vaciaron las muestras y solución en recipientes extendidos, dejándolas en reposo durante 24 horas.

#### Muestreo del molusco *Crassostrea virginica*

Para el tratamiento de los ejemplares de *Crassostrea virginica* se utilizó la técnica descrita por Li *et al.* (2018).

- Selección de las muestras

Para la identificación en moluscos bivalvos de la especie *Crassostrea virginica*, se seleccionaron 20 individuos provenientes de las laguna de Mandinga y la Laguna de Alvarado, obtenidos a partir de su compra a pescadores locales.

- Apertura de las ostiones y extracción del tejido

Cada organismo colectado se abrió desde el borde interior de la concha, teniendo cuidado de no fragmentarlo, para poder extraer el tejido completo.

- Secado de los tejidos y las conchas

Posteriormente los organismos abiertos se colocaron en papel aluminio y se dejaron secar en un horno a 65°C durante 24 horas. Se realizó un procedimiento de secado en horno similar para las conchas.

- Digestión de los tejidos

Se colocaron los tejidos completos en vasos de precipitado, a los cuales se les añadió peróxido de hidrógeno al 5%. Luego se colocaron en una parrilla de calefacción hasta que se disolvieron todos los tejidos.



- Separación por flotación

Para las muestras de moluscos el procedimiento fue similar al utilizado para las muestras sedimentarias, donde se vació la solución salina sobre la solución que contenía el tejido al terminar la digestión, dejando reposar durante 24 horas hasta la formación de la capa sobrenadante, la cual se recuperó por pipeteo, se recolectó en filtros y se dejó secar durante 24 horas a temperatura ambiente.

- Raspado de las conchas de los *Crassostrea virginica*.

Para verificar la existencia de microplásticos en las conchas de los moluscos, se raspó su interior sobre vidrios de reloj y se envolvieron en papel aluminio para su posterior análisis.

El mismo análisis e identificación de microplásticos se realizó para ambos tipos de muestra, como se describe a continuación:

- Análisis e identificación de microplásticos

Tanto los filtros secos como los vidrios de reloj se analizaron al microscopio óptico para la descripción de los microplásticos presentes, precisando sobre parámetros como la forma y el color. Así mismo, se recolectaron varios fragmentos de microplásticos, los cuales fueron separados de acuerdo al criterio de forma y color. Posteriormente se analizaron los microplásticos a través de las técnicas de microscopía electrónica de barrido (MEB) para la identificación de marcas de procesos de degradación, así como espectrometría infrarroja (IR) para la caracterización de los microplásticos y de esta manera poder identificar el polímero que los conforma.

## Resultados

A continuación, se muestran las gráficas e imágenes obtenidos a partir de las muestras de los sedimentos de la laguna de Mandinga, Tampamachoco, Alvarado y Laguna Verde, así como también los resultados de los tejidos de *Crassostrea virginica* colectados en las lagunas de Mandinga y Alvarado.

### Sedimentos superficiales

A partir del análisis de la forma y mediante la comparación con imágenes de referencia obtenidas de Li *et al.* (2018) se reportó la presencia de microplásticos únicamente de tipo secundario. Los microplásticos secundarios consistieron tanto en microfibras como en partículas (Fig. 8). Estos cuentan con diferentes colores, y en ellos se encuentra una mayor presencia de fibras que de partículas para todas las lagunas. En la figura 9 se muestra una gráfica comparativa de la presencia de los diferentes tipos de fracciones de microplásticos en los sedimentos de cada una de las lagunas consideradas en el presente estudio.

A

B

Figura 8. Ejemplo de microplásticos en forma de fibra (A) y en forma de partículas (B), donde ambas corresponden a microplásticos de tipos secundarios. La fotografía A corresponde a una microfibra de la laguna de Alvarado y fotografía B a un microplástico de la laguna de Tampamachoco.

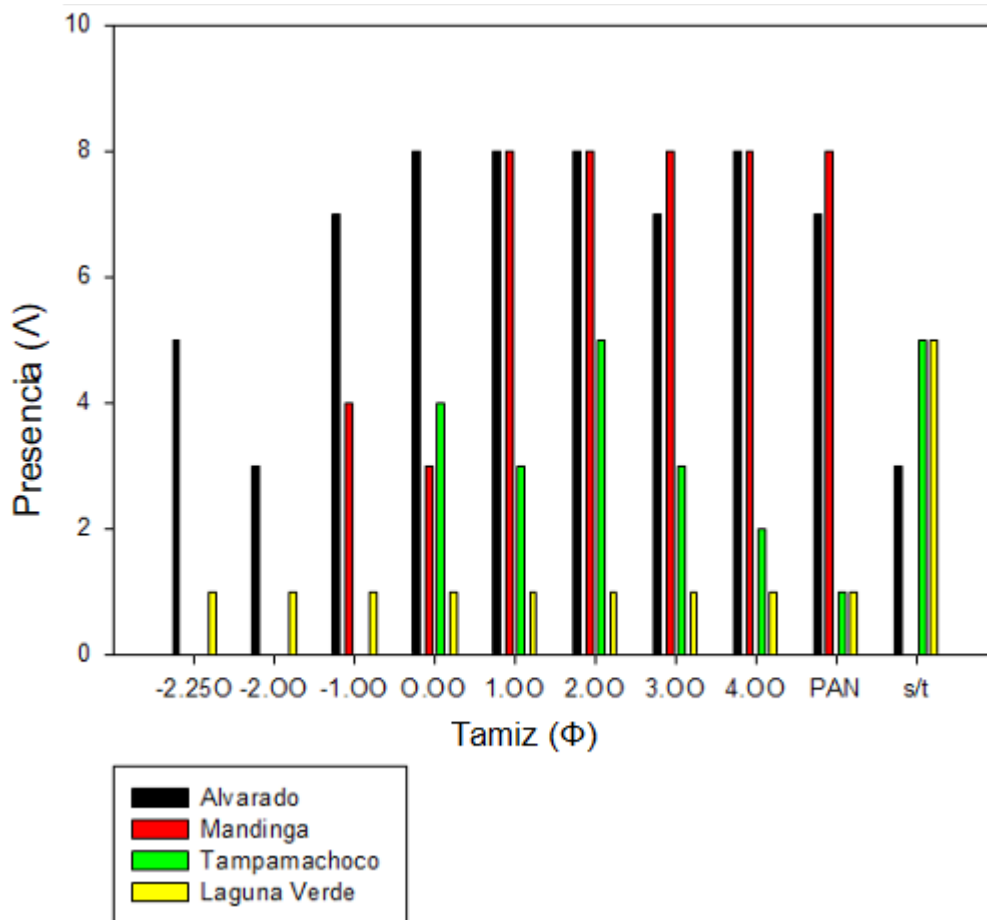
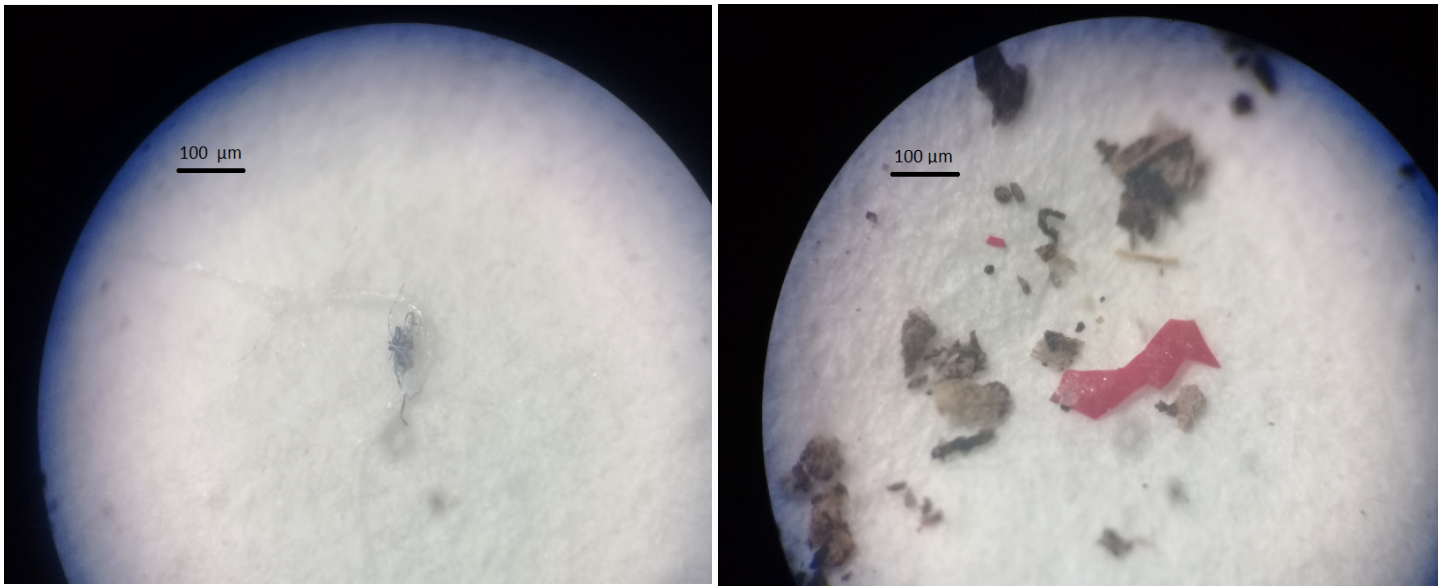


Figura 9. Presencia de microplástico por cada tamaño de tamiz ( $\Lambda$ ) de las lagunas de este estudio. S/t se refiere a los sedimentos no tamizados en donde se encontró presencia de microplásticos, y  $\Phi$  hace referencia a la escala utilizada para los tamaños de mallas de los tamices.

En los sedimentos de todas las lagunas analizadas en este estudio existe la presencia de microplásticos con tamaños muy variables, dado que se encontró en la mayoría de los tamaños de tamiz.

La presencia de microplásticos es el número de estaciones en donde se reportó la presencia de microplásticos de determinado tamaño de tamiz, representado por la letra  $\Lambda$  (lambda). En las tablas del apéndice se observa que la presencia de microplástico se marca como un 1, mientras que la ausencia de microplásticos como 0. Por ejemplo, en la laguna de Mandinga se reportaron 5 estaciones con presencia de microplásticos para el tamaño de tamiz -1.00  $\Phi$ , por lo que  $\Lambda$  es igual a 5. De entre todas las lagunas del estudio, la laguna de Alvarado es la que cuenta con mayor  $\Lambda$  en la mayoría de tamaños de tamiz. Le siguen en  $\Lambda$  la laguna de Mandinga, laguna de Tampamachoco, y por último laguna Verde (Fig. 8).

En cuanto a la variabilidad de fracciones, es decir, la cantidad de fracciones encontradas en los sedimentos de cada estación de las lagunas costeras del estudio, la laguna de Mandinga es donde se hallaron microplásticos en todos los tamaños (i.e. correspondientes tamaños de tamiz entre 4.75 mm hasta  $< 0.0625$  mm), en todas sus estaciones de muestreo. Lo anterior indica una mayor variabilidad de tamaños de microplásticos.

En la laguna de Alvarado, también se observó un alto grado de fragmentación en todas las estaciones cuyo sedimento se pudo tamizar (debido a que hubo muestras en las que no era conveniente utilizar este proceso). La estación 1-A fue la única dentro de todos los análisis que cuenta con presencia de partículas de microplásticos en todos los tamaños de los tamices. Las estaciones subsecuentes, muestran un grado de fragmentación similar al de la laguna de Mandinga. Hay más microplásticos de menor tamaño, excepto en la estación en donde existe ausencia de microplásticos de algunos de estos tamaños. Las estaciones así como la cuantificación de presencia de microplásticos se pueden consultar en el apéndice.

En Tampamachoco, se encontró una menor variedad de tamaños con respecto a las lagunas anteriores. Hay mayor cantidad de fragmentos de menor tamaño en la estación E4 con fragmentos de menor tamaño. En la estación E3 hay una menor cantidad de fragmentos de menor tamaño. En la estación E8 y E9 se encontró poca cantidad de fragmentos con tamaños intermedios.

Laguna Verde presenta también un número de fracciones considerables, ya que de las 9 fracciones se encontraron microplástico en 6 de ellas, la mayoría de pequeño tamaño, lo que indica que han sido muy degradadas.

### ***Crassostrea virginica***

Se reportó la presencia de fibras de microplásticos principalmente, en el tejido y en el interior de las conchas, especialmente en los ejemplares de las lagunas de Mandinga y Alvarado (figura 10).

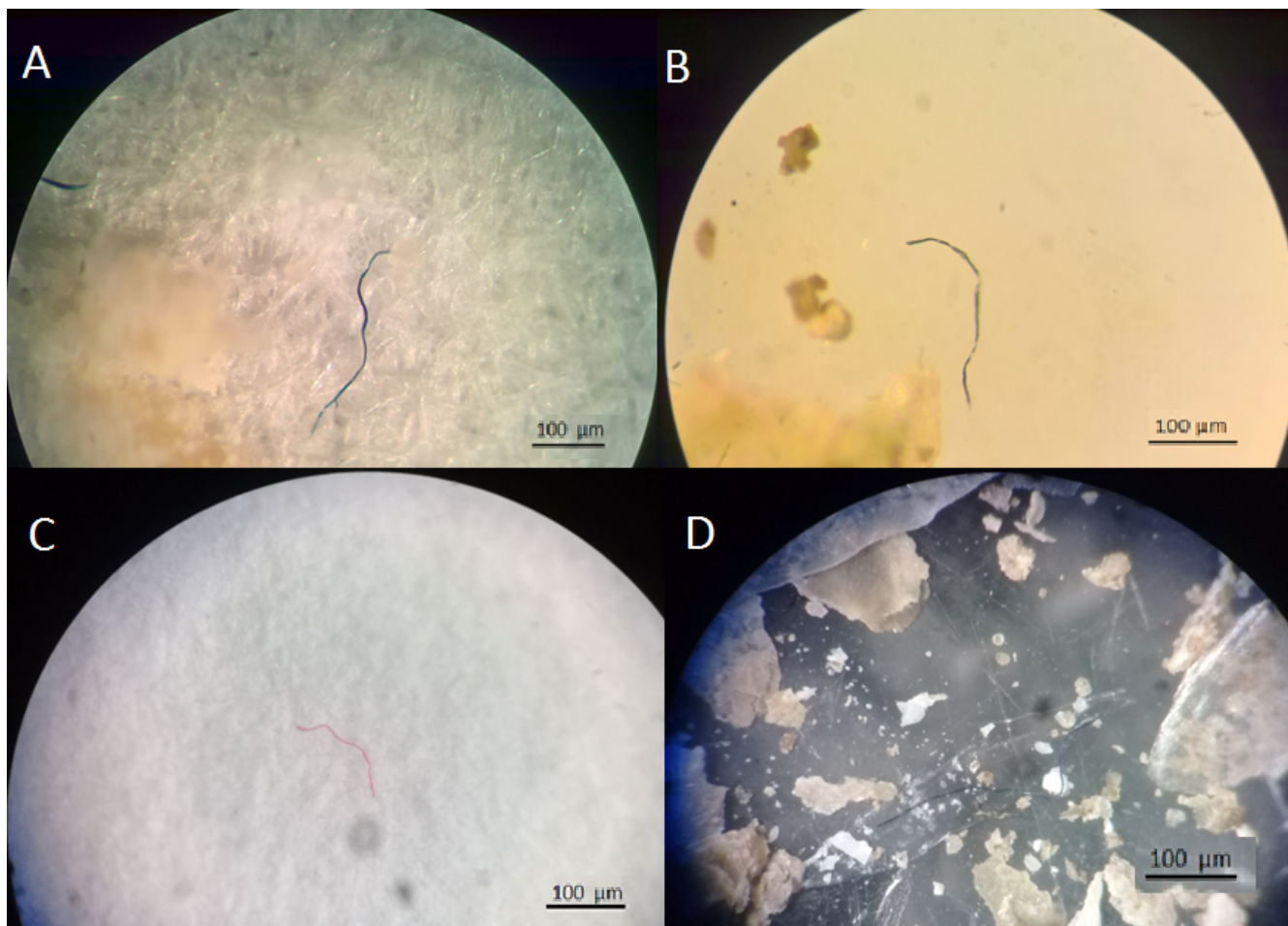
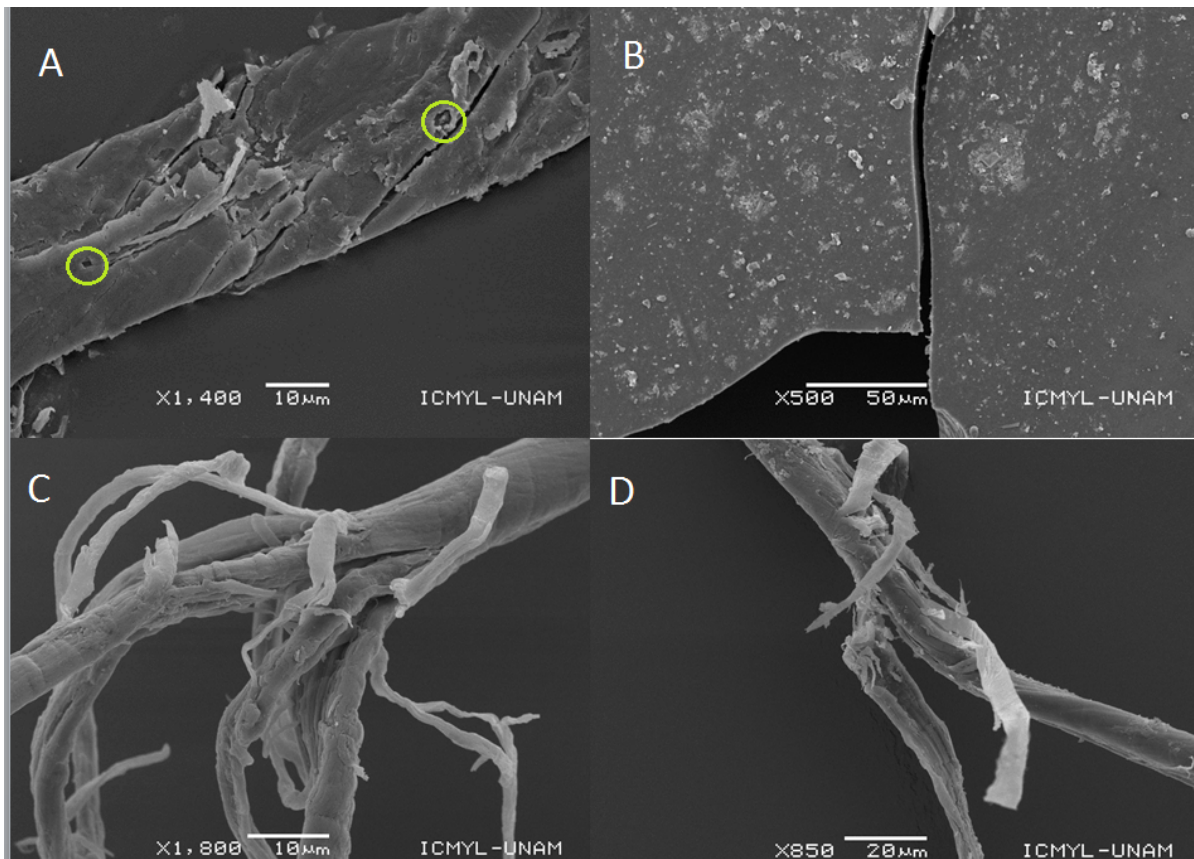


Figura 10. Fibras de microplástico obtenidas de tejidos (A y C), y conchas (B y D), provenientes de la Laguna de Mandinga (A y B), y Laguna de Alvarado (C y D).

### Imágenes de MEB

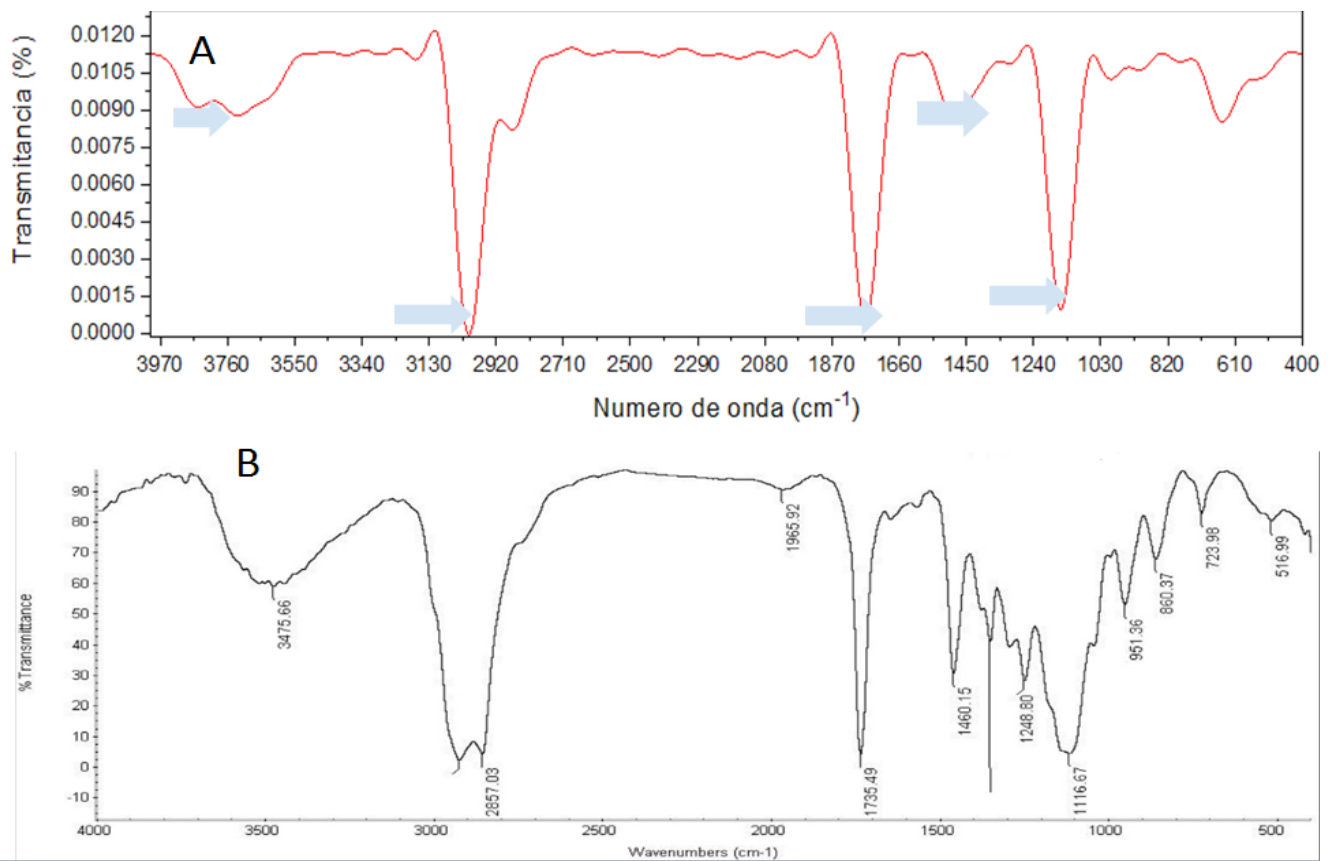
Exactamente 123 imágenes de microscopía electrónica de barrido (MEB) fueron tomadas en 24 muestras de microplástico, tanto de sedimentos superficiales como de *Crassostrea virginica*. Se eligieron 4 con fines ilustrativos (figura 11). Las imágenes muestran diferentes marcas de degradación, lo cual ya ha sido reportado previamente. A partir de la comparación con el trabajo de Wang *et al.* (2017) se observa degradación en forma de fracturas. A partir de la comparación de lo reportado por Fries *et al.* (2013) se reportan desprendimientos en las fibras. Y a partir de la comparación con el trabajo de Tollinsky *et al.* (2015) se observa la formación de poros en la superficie de las partículas de microplástico. Estas últimas marcas de degradación solo se encontraron en partículas provenientes de sedimentos de la laguna de Alvarado (figura 11 A).



**Figura 11.** Imágenes de MEB obtenidas de muestras de microplásticos de la laguna de Alvarado(A), laguna Verde (B), laguna de Tampamachoco (C) y laguna de Mandinga (D). En la imagen A se observan pequeñas porosidades encerradas en círculos verdes.

### **Espectrometría infrarroja (IR)**

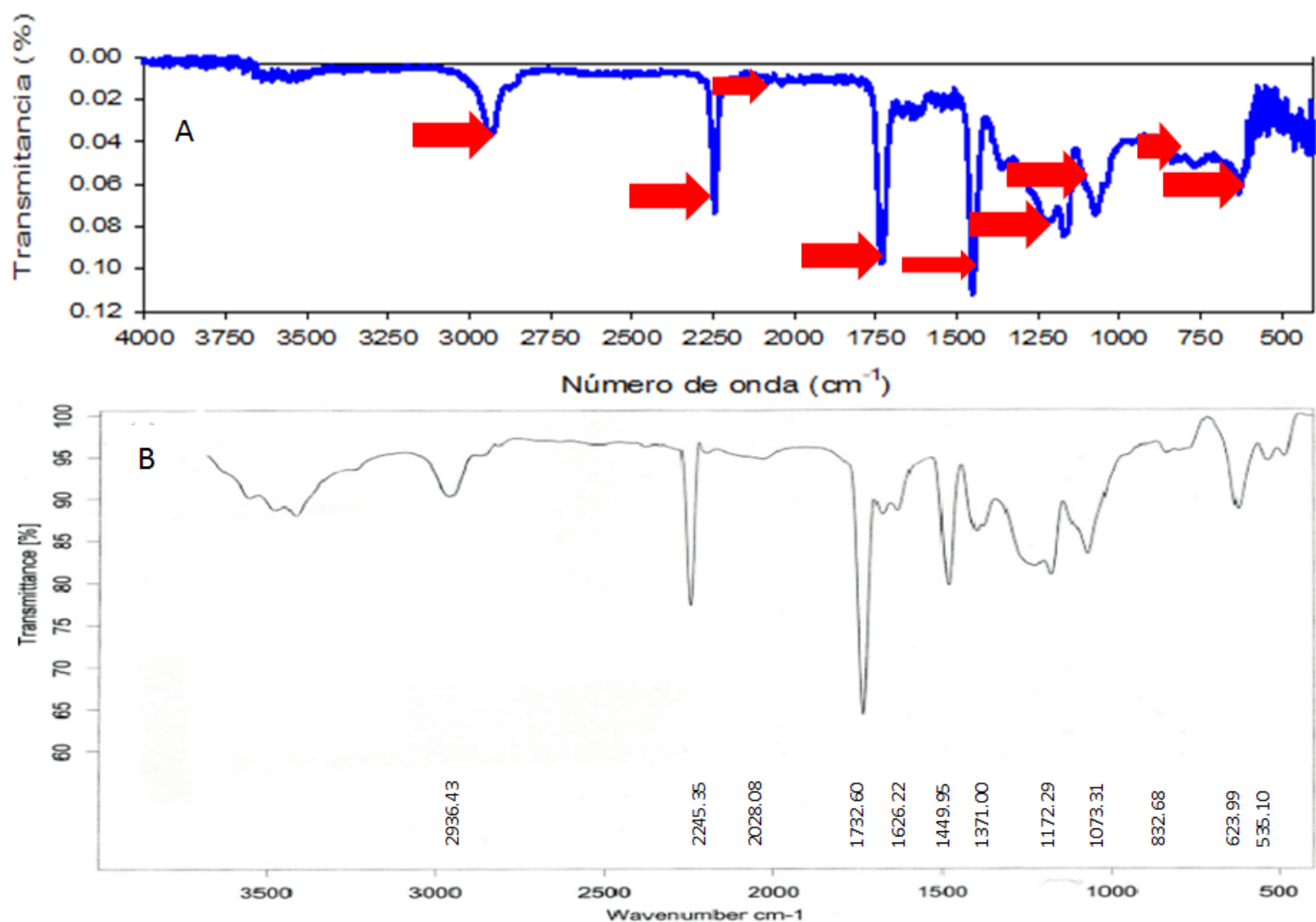
La espectrometría IR es una técnica analítica en la cual se le aplica radiación infrarroja a un compuesto para observar el movimiento de los enlaces de carbono. A través de un gráfico se observa el número de onda respecto a la absorbancia o transmitancia, el cual es conocido como espectrograma. Las bandas o picos de absorbancia o transmitancia observados en el espectrograma son únicos para cada sustancia y son utilizados para su identificación (Weininger y Stermitz, 1988).



**Figura 12.** Espectrograma obtenido de diferentes muestras de microplásticos provenientes de las cuatro zonas de estudio y espectrograma del polipropileno reportado por Al-Sabagh (2015) (A y B). Las bandas de absorción coincidentes entre ambos espectros se encuentran señaladas con flechas azules.

A partir de la comparación de las bandas de los espectros IR obtenidos de las muestras de microplástico de este estudio, y de acuerdo a lo reportado por Al-Sabagh (2015), reportamos la presencia del polímero polipropileno (Fig. 12). Las bandas de absorción coincidentes entre ambos espectros corresponden a los números de onda  $3,369.31\text{ cm}^{-1}$ ,  $2,920.58\text{ cm}^{-1}$ ,  $1,734.36\text{ cm}^{-1}$ ,  $1,458.48\text{ cm}^{-1}$  y  $1,116.67\text{ cm}^{-1}$ . De igual forma, se reporta la presencia del polímero acrílico (Fig. 13), el cual conforma la partícula verde de microplástico utilizada para la obtención del espectro IR, debido a la similitud en las bandas de absorción con el espectro mostrado en el artículo de Hassani *et al.* (2012), cuyos números de onda coinciden con a  $2936.43\text{ cm}^{-1}$ ,  $2244.35\text{ cm}^{-1}$ ,  $2028.08\text{ cm}^{-1}$ ,  $1732.5\text{ cm}^{-1}$ ,  $1449.95\text{ cm}^{-1}$ ,  $1172.29\text{ cm}^{-1}$ ,  $1073.31\text{ cm}^{-1}$ ,  $832.68\text{ cm}^{-1}$ , y  $623.99\text{ cm}^{-1}$ .

**Figura 13.** Espectrograma obtenido de una muestra de microplástico proveniente de laguna de Tampamachoco y espectrograma de acrílico obtenido de Hassani *et al.*, (2012) (A y B). Las bandas de absorción coincidentes entre ambos espectros se encuentran señaladas con flechas rojas en (A).



## Discusión

### Ingreso de microplásticos

Todos los microplásticos encontrados dentro de las muestras tanto sedimentarias como en los ejemplares de *Crassostrea virginica* fueron de tipo secundario, siendo más abundantes las que presentan forma de fibras que las partículas.

La presencia del polímero polipropileno como compuesto que conforma la microfibrilla analizada se observa en los espectrogramas de la figura 12. La presencia de esta forma sugiere que proviene de las descargas durante el lavado de las prendas de vestir (Sarria-Villa *et al.*, 2016). Esto se debe a que el polipropileno es un material comúnmente utilizado para la manufactura de textiles sintéticos, el cual se desprende con facilidad durante el lavado (Science History Institute, 2019).

El ingreso básico de microfibrillas al ambiente costero se debe su transporte dentro de aguas residuales, las cuales pueden terminar tanto en plantas de tratamiento de aguas residuales (PTAR), como en sitios importantes de aporte de aguas residuales sin tratamiento (INEGI, 2014)<sup>1</sup>. Parte de las descargas de las PTAR, así como las aguas residuales sin tratamiento se descargan en los sistemas fluviales, los cuales las transportan hacia ecosistemas costeros, como lagunas (Benítez *et al.*, 2014). Debido a lo anterior se sugiere que las microfibrillas encontradas en las lagunas estudiadas deben su ingreso principalmente a las descargas

domésticas de aguas residuales desde los pueblos y ciudades cercanas a la zona costera de Veracruz, así como a las descargas de aguas tratadas de las PTAR de Veracruz (SEMARNAT, 2016).

El municipio de Boca del Río, en el año 2014, reportó la presencia de un punto de descarga de aguas residuales dentro del río Jamapa, que es el principal aporte de agua dulce de la laguna de Mandinga. En el municipio de Alvarado (relacionado con la laguna de Alvarado), hasta el año 2014 existieron 10 puntos de descarga de aguas residuales dentro de ríos o arroyos. Dado que el sistema lagunar de Alvarado, al igual que Mandinga, es un sistema fluvio- lagunar, tiene aportes de varios ríos, por lo que es afectada por el contenido de aguas residuales al ser de los últimos sitios de disposición de la corriente costera. En el municipio de Tuxpan (relacionado a la laguna de Tampamachoco), existen conexiones de la laguna con el río Tuxpan, lo que implica dos fuentes importantes de entrada de aguas residuales hacia el sistema fluvial, y por ende fibras de microplásticos (INEGI, 2014)<sup>5</sup>.

De igual forma, las plantas de tratamiento de aguas residuales (PTAR) con frecuencia no pueden remover el total de las fibras presentes en aguas sometidas a este proceso, pudiendo liberarlas a ríos, lagos y el océano, durante sus descargas. De acuerdo con datos del INEGI (2014)<sup>1</sup> en el municipio de Alvarado (relacionado a la laguna de Alvarado) existen 2 PTAR, en Boca del Río (relacionado al río Jamapa, uno de los aportes de agua de la laguna de Mandinga) existen 5, y en el municipio de Tuxpan hay 5 (relacionado con la laguna de Tampamachoco), lo que significa otra fuente de aporte de microfibras a las lagunas costeras del presente estudio. Sin embargo, Vázquez (2019) menciona que muchas de las PTAR tienen una eficiencia de 96% al remover las fibras sintéticas, por lo que no necesariamente son la fuente primordial de aporte de fibras.

Por otro lado, una segunda fuente de aporte de microplásticos en forma de fibra se debe a la desintegración en seco de textiles, dado el desgaste ocasionado por fricción durante su uso cotidiano. Las fibras son transportadas por el viento debido a su baja densidad, y depositadas dentro de los cuerpos de agua a través de la lluvia. (Vázquez, 2019). De hecho, dado que también se han encontrado microfibras en la nieve, estudios relacionados mencionan que estas microfibras pudieron haber actuado como núcleos de condensación de las gotas de nieve (Cookson, 2019).

El mecanismo básico de formación de gotas de lluvia, así como de nieve, depende de la existencia de humedad atmosférica, temperaturas bajo del punto de rocío, y la presencia de partículas higroscópicas o bien, otras superficies que actúen como núcleos de condensación del vapor de agua, dando paso a la formación de gotas de agua o nieve (Olcina, 2013).

Si el mecanismo de precipitación de la lluvia y la nieve es similar, con la diferencia de la temperatura que hace que una sea líquida o sólida, se tiene que otro mecanismo por el cual los microplásticos pueden llegar hacia las lagunas a partir de aire es a través de ser núcleos de condensación. Dicho lo anterior, los sistemas lagunares del presente estudio también se ven expuestos al aporte de microfibras a través de la atmósfera.

La presencia de fragmentos de microplásticos también puede deberse a la desintegración de macroplásticos, los cuales se encuentran dentro de la basura o residuos sólidos urbanos (RSU). De acuerdo con Rosado *et al.* (2018), cuando la vida útil del plástico ha terminado, el plástico forma parte de los RSU. Debido a su mala gestión (la cual incluye la recolección, transporte y disposición final de los desechos) los RSU se han convertido en el material exógeno más frecuente en el océano. El acrílico (figura 13) se utiliza en la fabricación de



diferentes utensilios tales como vasos, cucharas, placas, entre otros. Muchas de estos al ser desechados forman parte de los RSU, por lo que estos implican una fuente de aporte de este material.

En la región **Golfo Sur**, donde se ubica el municipio de Alvarado, de acuerdo con PEPGIRS (2016), se generan 1'577,644 kg/día de desechos, de los cuales 90 000 kg/diarios son recolectados en el municipio. En la región centro norte, donde se encuentra el municipio de Boca del Río, se generan 2'747,325 kg/diarios, de los cuales 187 510 kg/día corresponden a la cantidad generada en Boca del Río. Por último, en la región centro, que incluye el municipio de Alto Lucero de Gutiérrez Barrios, se generan 987,748 kg/día, de los cuales 10 000 kg/día se generan en ese municipio. Por lo tanto, podemos decir que existe una generación muy grande de RSU en estado de Veracruz, lo cual significa una fuente de contaminación importante para las áreas costeras.

A pesar de lo anterior dicho, los fragmentos de plástico son menos abundantes que las microfibras debido a que existe un menor aporte de macroplásticos hacia las lagunas en comparación a las microfibras. Pese a que existe un gran aporte de RSU, el servicio de recolección en los municipios relacionados a las lagunas es eficiente. En comparación con las fibras de microplástico, la cantidad de RSU no recolectada es muy poca, y de menor impacto en las lagunas. De igual forma, las microfibras son muy fáciles de desprender, transportar y depositarse, lo cual explica que haya mayor abundancia de microfibras de plástico, tanto en las fracciones sedimentarias como en los tejidos de ostión.

Los servicios de recolección de basura de los municipios más cercanos a las lagunas de este estudio son eficientes, y cubren casi el 100% de la recolección. Por ejemplo Alvarado cubre el 95% de recolección, Boca del río el 85% y Tuxpan el 95%. Aunque la recolección en los municipios es buena, también presenta deficiencias, tanto a nivel municipal como privado. Entre las deficiencias destacan: la falta o escaso desarrollo de planes, programas, estudios y proyectos, cuando se llega a presentar operación en sitios de disposición final, ésta es incorrecta, ocasionando amontonamiento de residuos, insuficiente o nulo mantenimiento preventivo, entre otros. De igual forma, Tuxpan y Boca del Río tienen sitios de disposición final. En Boca del Río, hasta el 2013, el relleno sanitario se manejó como un tiradero a cielo abierto, mientras que el relleno sanitario de Tuxpan "pitayo" opera de manera correcta. Sin embargo, como lo menciona Sarria-Villa *et al* (2016) las áreas de rellenos sanitarios contienen diferentes tipos de productos plásticos, los cuales tienen el potencial para contribuir con microplásticos al ambiente. Entonces aunque el servicio de recolección de RSU es considerablemente eficiente pero aún es una fuente de aporte de desechos, y por lo tanto de microplásticos acarreados dentro de los sistemas lagunares. Ahora bien, dadas las condiciones lagunares de luz, salinidad, oxígeno disuelto, actividad orgánica e hidrodinámica, se potencia su fragmentación.

La presencia de microplásticos dentro de los sedimentos se explica tanto por su hundimiento, dado por la densidad de los materiales fragmentados, así como por la actividad orgánica que ocurre sobre estos. De acuerdo con Setälä *et al.* (2018) los organismos bentónicos son susceptibles a consumir plásticos más densos, incluido el polietileno tereftalato (PET) y PVC, lo que indica que, debido a su densidad, se espera que éstos sean los polímeros encontrados dentro de los sedimentos en primera instancia. Por otro lado, la agregación de material orgánico, como el recubrimiento por algas, puede remover los microplásticos de menor densidad resuspendiéndolos hacia el sedimento, en donde son incorporados y concentrados, lo que aumenta su tasa de hundimiento. Lo anterior, aunado a que hay una relación entre la abundancia de microplástico con el contenido orgánico y de fracción fina facilita que los

microplásticos se agregan en las zonas de depósito (Everaert *et al*, 2018). Esto justifica la entrada de microplásticos conformados por polímeros menos densos dentro de los sedimentos.

La Laguna Verde no posee aporte de algún río u otro cuerpo de agua. En vista de lo anterior mencionado, el único ingreso posible de microfibras hacia este cuerpo de agua es a través del aire. Debido a que se encuentran microplásticos en este fluido, son utilizados como núcleos de condensación en la lluvia (Cookson, 2019).

### **Degradación de microplásticos**

Las imágenes de MEB obtenidas (Fig. 11) muestran marcas, las cuales aparecen de diferentes formas. A partir de la comparación de las imágenes de MEB con lo reportado en diferentes trabajos mencionados a continuación, se sabe que las marcas visibles en las muestras de microplásticos seleccionadas pertenecen a marcas de degradación. De acuerdo con la comparación de la figura 11 A con el trabajo de Wang *et al* (2017) las marcas se presentan como fracturas. A partir de la comparación de las figuras 11 C y D con lo reportado por Fries *et al.*, (2013) las marcas son de desprendimientos en las fibras. Y a partir de la comparación de la figura 11 B con lo reportado por Tollinsky *et al.*, (2015), observamos poros en las partículas de microplásticos en la laguna de Alvarado.

El proceso básico de formación de microplásticos secundarios dentro de un sistema acuático consiste en la exposición de un plástico más grande a la radiación ultravioleta (UV), con lo cual los plásticos son fotodegradados, es decir, existe la degradación de la matriz del polímero por la incidencia de la luz solar, lo cual conlleva a la ruptura de sus enlaces (Cole *et al.*, 2011). Los microplásticos en forma de fibra así como las partículas, dentro de las zonas de estudio, se ven sometidos al proceso conocido como meteorización oxidativa, en donde se ven sometidos a la radiación UV solar y magnificado por factores fisicoquímicos y (ej. salinidad, temperatura y oxígeno disuelto) y biológicos (ej. colonización microbiana). Estos factores en conjunto potencian los efectos de esa radiación, aumentando así el nivel de degradación (Carbery *et al.* 2018).

El proceso de degradación se puede observar en el espectro infrarrojo del polipropileno (figura 12), ya que existe la presencia de una banda de absorción alrededor del número de onda de  $1700\text{ cm}^{-1}$ . De acuerdo con Longo *et al.* (2011) esta banda se encuentra ausente en el espectro IR del polipropileno sin alteración ambiental, y corresponde al grupo carbonilo a, presente en los procesos de degradación oxidativa.

Por tanto, las imágenes de MEB concuerdan con los procesos de degradación que ocurren dentro de las lagunas. Los microplásticos, al ser incididos por la radiación UV en la superficie, sufren el proceso de fotooxidación, pero debido a que en la parte superficial de la laguna existe el desarrollo de algas fotosintéticas, los microplásticos sufren agregación de algas en la superficie y pasan por el proceso de biodegradación. La degradación aumenta la densidad de la partícula plástica y provoca su hundimiento hacia los sedimentos, lo que sugiere que esos microplásticos eran flotantes sobre la superficie de las lagunas.

En todas las lagunas de la zona de estudio, existe una alta la incidencia de radiación solar, favoreciendo así la degradación de los microplásticos presentes. La salinidad para la mayoría de las lagunas es polihalina, dado que hay varias temporadas de altas y bajas concentraciones. En las temporadas altas se puede favorecer la degradación, por lo que es posible que las marcas de degradación encontradas correspondan a un período de alta salinidad.

El oxígeno disuelto se encuentra dentro de niveles promedios de adecuada saturación, aunque su sola presencia representa un factor que ayuda a potenciar los efectos de la radiación UV junto con la salinidad.

Las altas temperaturas (entre 25 a 40 °C), se presentan como un tercer factor que propicia la degradación de los microplásticos. Sin embargo, la salinidad en la laguna de Tampamachoco cambia de polihalina a euhalina (i.e. mayores a la mesohalina), por lo cual se esperaría una mayor presencia de marcas de degradación (Lara *et al.*, 2011). Las mismas condiciones se pueden mencionar para los fragmentos encontrados en laguna Verde. Aquí también se encontraron fragmentos degradados, tales como clastos con presencia de grietas.

Debido a que todos los textiles de los cuales se desprenden las microfibras están hechos con polímeros de baja densidad, el ingreso a los sedimentos analizados es posible debido a un mecanismo de transferencia de microplásticos desde las capas superficiales hacia los sedimentos a través de procesos de bioincrustación, tal como población por algas o bacterias, lo cual aumentan su densidad y provoca su hundimiento hacia los sedimentos (Kooi *et al.*, 2017). El proceso de población por algas y bacterias forma parte de los mecanismos que degradan a los microplásticos, por lo que las marcas encontradas también tienen posibilidad de haberse creado a partir de este proceso. Aunado a lo anterior, si los organismos consumen microplásticos cubiertos de algas, entonces una parte es ingerida mientras que otra parte se hunde en los sedimentos (Setälä *et al.*, 2018).

Carbery *et al.* (2018) menciona que las marcas de degradación de las partículas modifican su topografía superficial y cambian la química de su superficie, ya que al existir cambios en el área superficial se favorece así la capacidad de adherir contaminantes ambientales.

### **Fragmentación de microplásticos**

Al perder su integridad estructural, dada su degradación, los plásticos son cada vez más susceptibles a la fragmentación producida por abrasión, la acción de las olas y la turbulencia. Como las lagunas costeras son barreras hidrodinámicas (Lara-Lara, 2008), el movimiento de las aguas favorece su fragmentación en los diferentes tipos y tamaños de partículas.

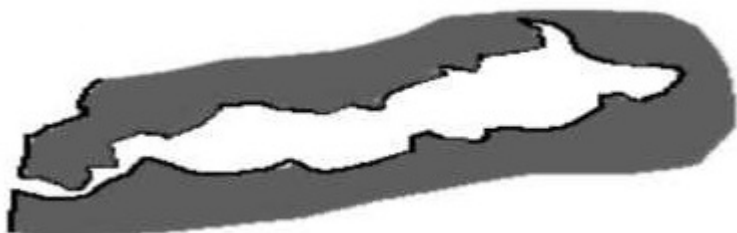
Se encontró que el tamaño de tamiz que frecuentemente presentaba mayor número de microplásticos en todas las lagunas del estudio fue el de 2.00  $\Phi$ , el cual es un tamaño intermedio dentro del intervalo de tamices utilizados.

El hecho de que exista un mayor número de microplásticos dentro de ese intervalo de tamaño se puede explicar si aludimos a que fueron aportados con ese tamaño desde las fuentes originales. Es decir, las descargas de agua, la atmósfera, y los RSU en menor medida. El tamaño de partícula 2.00  $\Phi$  es más fácil de transportar por su menor tamaño y densidad en comparación de los tamaños mayores de microplásticos. Las fracciones de microplásticos entonces seguramente se formaron por la degradación y fragmentación dentro de las lagunas.

Igualmente es posible que se haya realizado el muestreo durante un estadio intermedio de la fragmentación de microplásticos en cada laguna. Esto daría paso a que la degradación no haya estado tan avanzada como para que los tamaños menores hayan sido los de mayor presencia. Por lo tanto la degradación apenas se caracteriza por la mayoría de tamaños de 2.00  $\Phi$  al momento del muestreo en cada laguna. Solo sería posible conocer el estatus actual del tamaño de los microplásticos si se realizan nuevos muestreos en los mismos puntos dentro de las lagunas que en el presente estudio.

De acuerdo con Kjerfve *et al.* (1989), las lagunas de Mandinga, Alvarado y Tampamachoco cuentan con una morfología que las hacen propias del tipo Ahogada (Fig. 14), cuyas características y procesos hidrodinámicos son:

- Entrada única larga y estrecha, lo que disminuye la fuerza de marea aunque si presenta marea oscilante con la de la costa del océano.
- Oleaje de alta energía debido al esfuerzo del viento dominante.
- Transporte de sedimentos por la corriente litoral.



**Figura 14. Laguna de tipo choked. Modificado de Kjerfve *et al.* (1989)**

Por lo tanto, las tres lagunas citadas presentan las condiciones adecuadas para el desarrollo de turbulencia y resuspensión de los sedimentos, tal como el transporte de Ekman, que según Cole *et al.* (2011) es el mecanismo que provoca el fraccionamiento de los microplásticos. Sin embargo, éstos también pudieron ser previamente impactados por las variables fisicoquímicas (ej. radiación UV, temperatura, salinidad, oxígeno disuelto) así como por procesos de biodegradación.

En el presente estudio se pudo observar que en las lagunas de Tampamachoco y Laguna Verde existe menor variabilidad de tamaño de fracciones, lo cual implica un comportamiento hidrodinámico parecido, así como condiciones fisicoquímicas similares. Sin embargo, el comportamiento del viento no es el mismo para las lagunas del norte del estado de Veracruz (Tampamachoco y Laguna Verde), que para las de la zona centro (Mandinga y Alvarado).

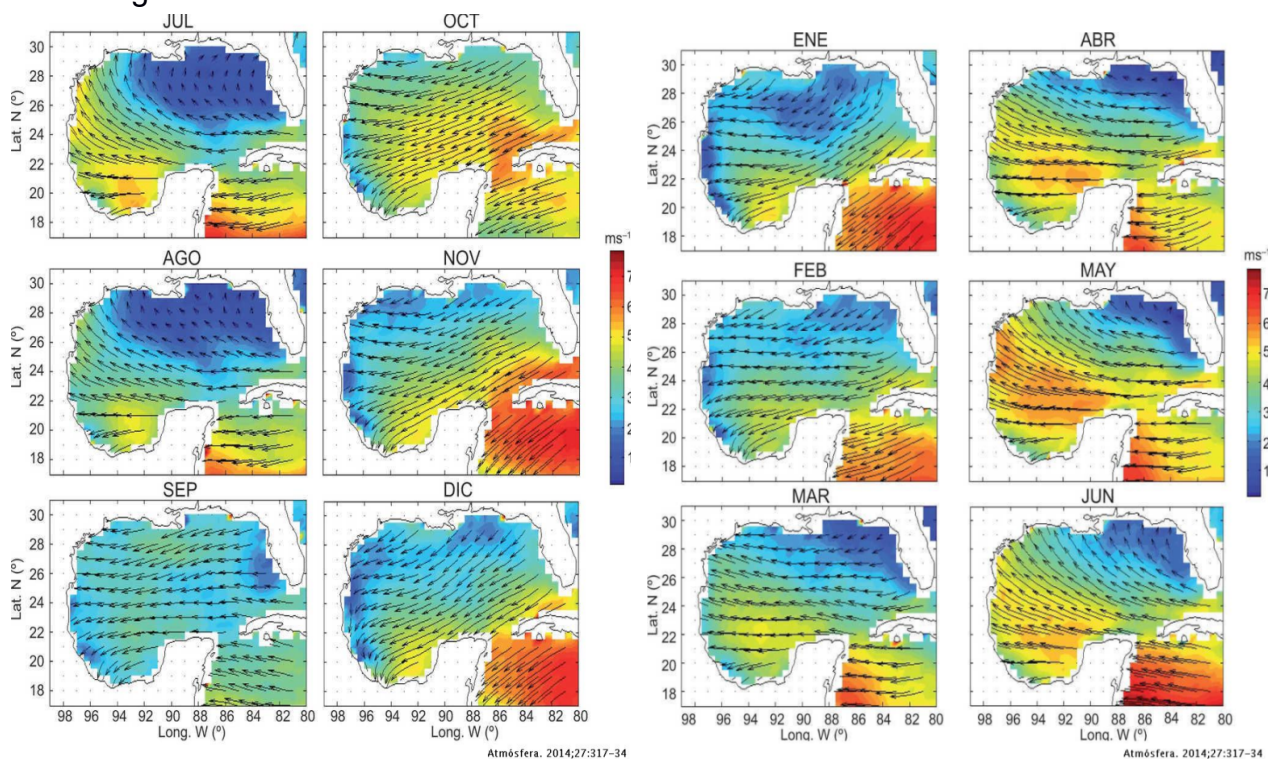
De acuerdo con Ramírez *et al.*, (2012) mediante un modelo numérico realizado para la laguna de Tampamachoco, se observa que los valores máximos de velocidad ocurren en el río Tuxpan, mientras que dentro de la laguna ocurre un descenso de la velocidad que puede llegar a cero. Aunado a lo anterior, se menciona que el viento es de baja frecuencia. Entonces esto implicaría un transporte más lento, un menor esfuerzo mecánico, y por lo tanto un menor grado de fragmentación.

En otro modelo del golfo de México, Zavala *et al.* (2014) reportaron la variabilidad estacional del viento, con base en datos de Qscat/ SeaWinds, en donde se muestra la velocidad escalar promedio (figura 15). En el modelo, las velocidades del viento son mayores en el centro que en el norte de la zona costera, como se observa en los contornos de colores del modelo. En laguna Verde el muestreo se realizó durante febrero de 2012, que es cuando la velocidad del viento es menor en la zona norte que en la zona centro. En la laguna de Tampamachoco el muestreo fue realizado durante julio del 2012 y se observa una ligera tendencia de mayor velocidad del viento en la zona centro (marcada con el color amarillo). En la laguna de Alvarado, el muestreo se hizo en agosto de 2015, y se observa que existen mayores velocidades que en la zona norte. En la laguna de Mandinga, el muestreo fue abril del 2018 y

se observa una ligera tendencia en la zona costera de vientos de mayor velocidad en la zona centro, y menores en la zona la norte (marcado como una ligera coloración azul en la costa en la Figura 15). Todo lo anterior, implica una mayor fricción del viento con la superficie de las lagunas de Alvarado y Mandinga, así como procesos de turbulencia mayores, lo cual sugiere una mayor fragmentación de los microplásticos que ya fueron previamente degradados. Cabe aclarar, que las condiciones ambientales, tales como el viento, temperatura, oxígeno disuelto, y salinidad pueden variar entre estaciones (Lara-Domínguez, 2009), lo cual implicaría que en las estaciones en donde la velocidad del viento es mayor en la zona norte del estado de Veracruz, existiría una mayor fragmentación de microplásticos, y una mayor variedad de tamaños. Aunado a lo anterior, se observa que no existen microplásticos de tamaños mayores en las lagunas de Tampamachoco y Laguna Verde.

En las Lagunas de Alvarado y Mandinga pese a que existe mayor degradación para el 2014 el número de puntos de descarga de aguas residuales fue de 1 en Boca del Rio, 10 en laguna de Alvarado, y en Alto Lucero Gutierrez Barrios no existe ninguno (INEGI, 2014)<sup>1</sup>. En Tuxpan existe 1 punto de descarga, por lo que el aporte parece ser igual a Boca del Rio, pero los fragmentos de mayor tamaño pudieron haber sido consumidos por peces por tener un tamaño de partícula similar al tamaño de su alimento. Y aunque no existan fracciones mayores en otros Tampamachoco y Laguna Verde, entonces la única explicación es que hayan sido consumidos previamente al momento del muestreo por peces capaces de consumir ese tipo de partículas.

Por otro lado, si existe mayor intensidad del viento en Alvarado y Mandinga al momento de su muestreo, es posible que el viento haya arrastrado prioritariamente partículas de microplástico, mientras que en laguna Verde y Tampamachoco, para el momento de muestreo, el viento probablemente tuvo una menor intensidad, con lo que las microfibras pudieron haber sido arrastradas a una menor tasa, lo cual implica un mayor aporte atmosférico en Alvarado y Mandinga.



**Figura 15. Variabilidad estacional de la velocidad de viento en el golfo de México. Obtenido de Zavala et al. (2014).**

## Consumo de microplásticos

De acuerdo con Kühn *et al.* (2018), los factores que determinan el consumo de microplásticos son la partícula por sí misma (forma, tamaño y densidad), la viscosidad del agua, y la filtración por parte del organismo. Sin embargo, Setälä *et al.* (2018) menciona que la absorción biológica depende principalmente del tamaño de la partícula en relación con las presas habituales dentro de la red trófica, mientras que la densidad de la partícula determina la posición en la columna de agua y, por lo tanto, la probabilidad de consumo por parte de un organismo.

En un principio, la presencia de microplásticos en los sedimentos, sólo debería afectar a la ingesta y efectos asociados a los organismos que tienen mayor contacto con este. Principalmente estamos hablando de organismos de tipo bentónico tales como los equinodermos poliquetos, crustáceos, bivalvos y peces demersales (Van Cauwenberghe *et al.*, 2015). De acuerdo a Carbery *et al.* (2018) las partículas se pueden resuspender a través de la bioturbación, tormentas o eventos de surgencia y sufrir cambios en sus características físicas, como el tamaño, la forma y la densidad. Por otro lado, como se observó en las imágenes de MEB, las fibras se encontraban degradadas, y de acuerdo a Lara (2011), la bioturbación puede provocar la fragmentación. Por lo que los fragmentos al ser más pequeños, podrían ser más fácilmente suspendidos y aprovechados dentro de la columna de agua por los organismos pelágicos, lo que también es importante tomar en cuenta.

Debido a la presencia de partículas que tienen el tamaño adecuado para ser consumidas por el zooplancton (200  $\mu\text{m}$ ), así como las partículas pertenecientes al PAN (< 60  $\mu\text{m}$ ), hacen posible que se hayan incorporado al zooplancton. De acuerdo a Wright *et al.* (2013) un factor clave que contribuye a la biodisponibilidad de los microplásticos es su tamaño pequeño, lo cual los hace disponibles para organismos de niveles tróficos inferiores, como el zooplancton. Los procesos de degradación, se relacionan con el aumento en la preferencia de consumo de microplásticos, ya que de acuerdo con Vroom *et al.* (2017) la agregación de algas hace más atractivos los fragmentos para ser consumidos por parte de crustáceos del zooplancton, como los copépodos. En un diagrama mostrado por Carbery *et al.*, (2018), se observa un modelo de red trófica con los diferentes tipos de tamaños de partículas que pueden consumir diferentes especies, muchos de los cuales guardan similitud en tamaño con diferentes especies de peces, crustáceos y moluscos presentes en las lagunas de este estudio. La figura 16, muestra que los microplásticos de todos los tamaños reportados en el presente trabajo, tienen el potencial de ser ingeridos por todos los organismos de una red trófica (ya sean bentónicos o pelágicos) dada su forma de alimentación habitual, y propiciando su bioacumulación. Ejemplo de esto, es la presencia de especies de organismos planctívoros de niveles tróficos mayores, lo que también significa un consumo de microplásticos. De acuerdo con Wright (2015), los planctívoros de niveles tróficos más altos podrían ingerir pasivamente microplásticos durante el comportamiento normal de alimentación o confundir las partículas de microplásticos con una

presa

natural.

			ESPECIES				
(Φ)	(mm)	μm					
-2.25	4.75	4750	Peces (depredadores tope)	Siluriformes (pez gato)	Peces		<i>Callinectes sapidus</i> (jaiba)
-2.00	4	4000					
-1.00	2	2000					
0.00	1	1000					
1.00	0.5	500					
			Zooplankton				
2.00	0.25	250					
	0.2	200					
	0.18	180					
	0.13	130					
3.00	0.125	125					
4.00	0.062	65					

Figura 16. Relación de las diferentes especies que existen dentro de las redes tróficas de las cuatro lagunas de estudio, con el tamaño de partículas que puede consumir. Figura de elaboración propia

Setälä *et al.*, (2018) menciona que dentro de los microplásticos con un mayor potencial de bioacumulación están las microfibras las cuales son acumuladas en el tracto digestivo, por lo que se espera que las diferentes especies de peces, crustáceos y moluscos presenten una mayor cantidad de fibras. Debido a que el tamaño de microplástico más abundante encontrado corresponde a aquel de 2.00 Φ, las especies capaces de consumir partículas dentro de ese tamaño son las que tienen mayor potencial de consumir y acumular ese tamaño de microplásticos, y al ser consumidas, transferirlo a otras especies. De acuerdo con la figura 16, esto corresponde a los peces de menor nivel trófico, así como los peces depredadores. Un ejemplo dentro de cada laguna corresponde a: *Dicentrarchus labrax* (Mandinga) (Aldeco *et al.*, 2015), *Bagre marinus* (Alvarado) (Botell *et al.*, 2017) *Caranx hippos* (Tampamachoco) (González *et al.*, 2012), y *Citharichthys abbotti* (Laguna Verde) (CONABIO, 2009). Cabe mencionar que las especies antes mencionadas tienen una gran importancia comercial y son consumidos por las poblaciones alrededor de los sitios de muestreo.

De acuerdo con Farrell y Nelson (2013) existe una transferencia trófica natural de microplásticos (0,5 mm y 8-10 mm, respectivamente) hacia el cangrejo (*C.maenas*) por consumo de mejillones (*M. edulis*) previamente expuestos a microplásticos. También reporta transferencia trófica de microplásticos del zooplancton a crustáceos *Mysis*, con el zooplancton expuesto a esferas de 10 mm. Dentro de las lagunas del estudio se cuenta con la presencia del camarón del género *Mysidopsis* (el cual junto con el camarón del género *Mysis* pertenece a la familia *Mysidae*), con la presencia de cangrejos de la especie *Callinectes sapidus*, y de muchas otras especies zooplanctívoras, por lo que es posible la existencia de procesos de biomagnificación de microplásticos a través de los diferentes niveles tróficos de las lagunas de este estudio.

La biomagnificación es un proceso en el que se aumente la concentración de algún contaminante (Peña *et al.*, 2018), debido a la transferencia trófica de niveles inferiores a los superiores (Kerigh *et al.*, 2008). En este caso se aplica a los microplásticos, así como a los aditivos y contaminantes adheridos.

La biomagnificación implica un riesgo para la salud humana, ya que de acuerdo a Carbery *et al.*, (2018), existe todo un proceso de biomagnificación, descrito a través de una cadena trófica básica. El proceso de la biomagnificación termina con la llegada de microplásticos al ser

humano, y comienza por la biocubierta del microplástico (que a su vez también provoca que parte de los microplásticos terminen en los sedimentos). Los organismos absorben contaminantes, y esta porción es consumida por copépodos (y zooplancton en general), los cuales son a su vez consumidos por organismos más grandes, como peces, y finalmente los peces son consumidos por los seres humanos. Aunado a eso, filtradores como *Crassostrea virginica* son importantes, porque al filtrar grandes cantidades de agua, y ser consumidos por el ser humano, también son un importante aporte de microplásticos a los humanos.

No obstante lo anterior, el aumento de microplásticos dentro de un organismo se ve más influido por el modo de alimentación que por el nivel trófico. Los filtradores son los que tienen mayor capacidad de ingerir microplásticos, y por lo tanto, los que van a tener mayor contenido en su interior (Miller *et al.*, 2020). De igual forma, Miller *et al.* (2020) comparó las concentraciones de microplásticos en diferentes niveles (numeradas de 1 a 4.9) dentro de la red trófica mencionada en su trabajo. La mayor cuantía de estos contaminantes se encontró dentro del nivel 2 de la red (donde se encuentran los filtradores), y en menor medida en los consumidores terciarios (nivel 3 al 3.9). En el escrito de Miller *et al.* (2020) se analizó a una gran especie filtradora: *Crassostrea virginica*, la misma especie utilizada en este estudio. Igualmente, y de acuerdo con Miller *et al.* (2020) en condiciones in situ los microplásticos ingeridos por un organismo no se retienen por completo dentro del siguiente nivel de la red. Al contrario, pueden ser expulsadas por parte de un depredador a través de las heces. Por lo anterior, no existe evidencia de que exista biomagnificación de partículas microplásticas.

Sin embargo, Carbery *et al.* (2018) describe diferentes situaciones en las que se reportaron proceso de transferencia trófica de micro contaminantes plásticos. Tanto en ambientes controlados como medios naturales se ha encontrado al menos una evidencia de que los consumidores primarios transfieren estas fracciones de polímero a sus depredadores. Muchos de los productores secundarios de las cuatro lagunas de este análisis son similares a los que se menciona en el artículo antes citado. Es decir, tienen la misma forma de alimentación y depredadores que reciban las partículas. Por lo tanto, es posible que exista este tipo de transferencia dentro de la red de alimentación de las lagunas de este texto.

Complementando lo anterior, existe la posibilidad de que los seres humanos pueden ingerir microplásticos al comer mariscos y pescados. Es de recordarse que para los cuerpos de agua aquí analizadas, *Crassostrea Virginica* es de los recursos pesqueros más importantes. Por lo tanto, su consumo puede implicar la ingesta de micropartículas de plástico, así como de contaminantes adquiridos de las lagunas.

La laguna de Alvarado y la de Mandinga, al poseer mayores niveles de fragmentación de los microplásticos, van a incorporarlos a una mayor variedad de organismos, ya sea moluscos, peces o crustáceos, pertenecientes a diferentes niveles de la red trófica existente. Existe una gran diversidad de especies anteriormente mencionadas dentro de las cuatro lagunas de estudio, las cuales se pueden ver afectadas por la acumulación por ingesta (Tampamachoco: 66 spp de moluscos, 14 spp de crustáceos y 176 spp de peces; Mandinga: 32 spp de moluscos y 89 spp de peces; Alvarado: 62 spp de moluscos, 32 spp de crustáceos y 89 spp de peces; Laguna Verde con variedad de moluscos, poliquetos, equinodermos, crustáceos, peces, tortugas) como sugieren Lara-Domínguez *et al.*, (2009), y la CONABIO (2009). Por lo tanto, el impacto en las especies por procesos de bioacumulación y biomagnificación dentro de estas dos zonas es mayor que en Tampamachoco y laguna Verde. La biodiversidad antes mencionada hace que estas zonas sean de alta importancia pesquera, de donde se extraen recursos importantes para el consumo y distribución dentro de la República Mexicana.



*Crassostrea virginica* se alimenta a través de filtración e ingestión de material particulado suspendida de la columna de agua (Guzmán *et al.*, 2007), por lo que tiene mayores posibilidades de incorporar partículas de microplástico. Debido a que existe una tendencia favorable a la presencia de fibras dentro de las lagunas costeras (Setälä *et al.*, 2018), *Crassostrea virginica* va a incorporar una mayor cantidad de fibras dentro de su tracto intestinal dado a que filtra grandes volúmenes de agua. Es posible que existan procesos de biomagnificación por el consumo de *Crassostrea virginica*, siendo un ejemplo de ello la laguna de Tampamachoco, la cual cuenta con depredadores de estos moluscos bivalvos tales como la especie de pez *Archosargus probatocephalus* y *Pogonias cromis*, y crustáceos de las especies *Cancer irroratus*, *Menippe mercenaria*, *Callinectes sapidus* y *Callinectes rathbunae* (Vidal *et al.* 2012).

Por otro lado, la larva “veliger” de *Crassostrea virginica* posee una porción llena de cilios conocida como el velo, el cual utiliza para la captura de partículas que utiliza como comida (Wallace *et al.*, 2008). Dada esta capacidad para capturar partículas, así como a que en este estadio aún no desarrolla las valvas características de los bivalvos, es de suponerse que los microplásticos logran quedarse adheridos a la larva, en la zona del velo y permanecen en la larva hasta el desarrollo de la concha. Lo anterior explicaría el por qué se encontraron microplásticos en el interior de las conchas.

### **Contaminantes y aditivos de microplásticos**

La presencia de fibras de microplástico involucra presencia de aditivos utilizados para su fabricación, lo cual al estar disponible para diferentes organismos dentro de la red trófica de los cuerpos lagunares. Dado que todas las lagunas del presente estudio muestran una gran diversidad de especies de peces, crustáceos y ostiones esto implica diferentes efectos tóxicos. Y aunado a que algunas de estas especies tienen una alta importancia económica y pesquera también implica un riesgo para la salud humana a partir de su consumo (Mishra *et al.*, 2019).

De acuerdo con Rochman (2015) los aditivos usualmente se encuentran anclados a la matriz del polímero (figura 17), lo que implica que los mecanismos que contribuyen al impacto químico de las microfibras en el medio ambiente incluyen la lixiviación de los aditivos plásticos (Machado *et al.*, 2018). Algunos de los aditivos más peligrosos consisten en retardantes de llama bromados, compuestos polifluorados, triclosan, plastificantes de ftalato, estabilizadores de calor de plomo, así como formaldehídos, acetaldehidos, compuestos orgánicos volátiles, antioxidantes y colorantes (Rochman, 2015). Los polímeros reportados, tales como el polipropileno y acrílico, no se relacionan con la utilización de bisfenol A como aditivo, por lo que no significan una fuente de este contaminante a partir de su lixiviación para las lagunas de este estudio.

Por otro lado, las marcas de degradación en los microplásticos aumentan el área superficial, y con esto su capacidad de incorporar contaminantes tales como metales, los cuales son adsorbidos desde el agua (Fig. 17), así como contaminantes orgánicos persistentes (COP) (Wang *et al.*, 2017) tales como bifenilos policlorados (BPC), hidrocarburos poliaromáticos (HAP), DDT, entre otros (Smith, 2018).

En las lagunas del presente estudio existe la presencia de metales pesados. Las concentraciones reportadas de Cr, Ni y Pb por Guzmán *et al.* (2005), y Villanueva *et al.*, (2014) no son tan grandes como para producir efectos biológicos por si solos, pero por su existencia dentro de las lagunas hay la posibilidad de ser absorbidos en las superficies de los microplásticos debido a las marcas de degradación presentes en las microfibras y partículas encontradas en este estudio. Los metales adheridos a la superficie de los microplásticos, al ser

consumidos por especies dentro de las lagunas tienen mayor facilidad de ser bioacumulados y biomagnificados hasta llegar a ser consumidos en los poblados cercanos.

De igual forma, Piazza *et al.* (2008) reportan concentraciones para BPC y HAP en Laguna Verde, Botello *et al.* (2017) reportan concentraciones de plaguicidas organoclorados en la laguna de Alvarado. Villanueva *et al.* (2014) reportan concentraciones de HAP en la laguna de Tampamachoco, las mismas que, al igual que los metales, son capaces de ser absorbidos en la superficie de los microplásticos debido a las marcas de degradación.

Los microplásticos transportan en su superficie contaminante orgánica y metales. Al ser consumidos por algún organismo, también adquiere las sustancias adheridas en ellos. Sin embargo, el riesgo de consumir moléculas orgánicas y metálicas no es el mismo (Brennecke *et al.*, 2016).

Las micropartículas plásticas pueden adsorber todo tipo de metales, siempre y cuando cuenten con una biocapa superficial. Generalmente, esta adsorción no depende del tipo de polímero. La adherencia solamente depende del tiempo de exposición y de la existencia de una fuente de aporte de estos contaminantes (Rochman *et al.*, 2014). Al momento de la digestión por parte de algún organismo, la biocapa se deshace. Dado lo anterior, aumenta la biodisponibilidad de los metales y se pueden bioacumular con mayor facilidad. De acuerdo con Yarto (2007) una vez que se acumulan los metales en los tejidos es difícil eliminarlos.

Como se pudo evidenciar con las marcas de degradación ya mencionadas (Fig. 11), es posible que los fragmentos plásticos contaran con biocapas al momento de estar en el medio acuático. Esto se debe a que los cuerpos acuáticos de este trabajo poseen una alta productividad primaria. Lo antes mencionado propició que las algas se agreguen a la superficie de las partículas microplásticas. Además de lo anterior, en las lagunas costeras ya mencionadas se reporta presencia de diferentes metales pesados. Por lo anterior, se puede decir que los muchos de los organismos de las redes alimenticias de esta investigación poseen contaminantes metálicos en su interior.

Por otro lado, para los contaminantes orgánicos existen más factores que determinan que tan biodisponibles se encuentran al adherirse a una partícula. El polímero determina, en primera estancia, cuantas sustancias se pueden adherir y que tan fuertes son los enlaces con su superficie (Brennecke *et al.*, 2016).

La polaridad de la molécula orgánica también determina la adhesión, ya que las más hidrófobas son las que se anclan con mayor facilidad (Daughtery 2016). Los contaminantes encontrados en los sitios de este escrito, tales como el BFP o EL HAP, cuentan con esta característica. Por lo antes dicho se esperaría que hayan sido adsorbidas.

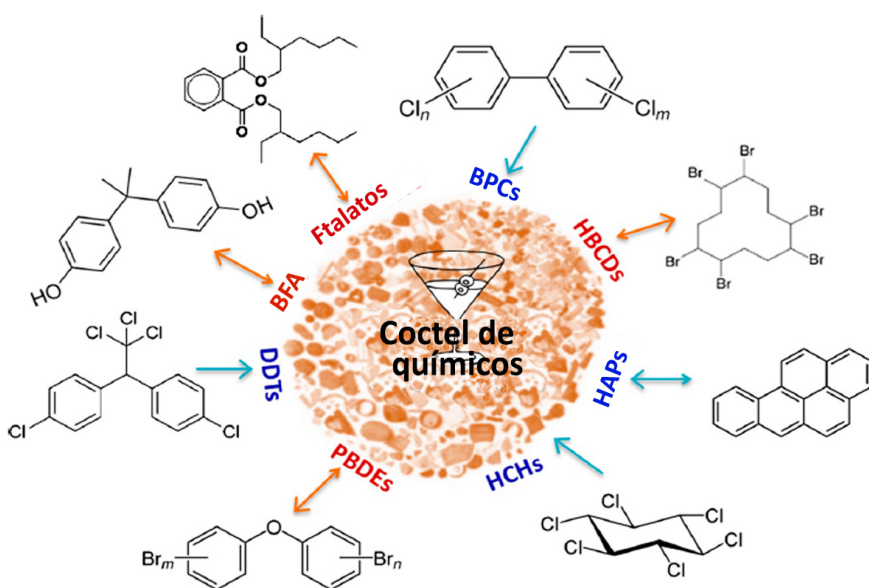
De igual forma Daughtery (2016), comparó las adsorciones de polipropileno con polietileno (pe). El primero mencionado adsorbe más contaminantes orgánicos y sus enlaces son más débiles. Por lo anterior se podría pensar que las moléculas ancladas a las microfibras encontradas en este estudio se liberarían más fácilmente dentro de algún organismo.

Sin embargo, la materia orgánica disuelta (MOD) puede alterar la polaridad de la superficie del polímero, lo cual favorece o inhibe la adsorción de contaminantes orgánicos. A mayor MOD existe menor adsorción de moléculas, y mayor fuerza del enlace en la superficie para aquellos contaminantes que si logren adherirse (Daughtery 2016). En las áreas de este trabajo, al ser zonas donde existe productividad primaria, existe mayor materia orgánica disuelta. Por esto mismo es posible que haya existido una menor cantidad de contaminantes orgánicos en las

superficies de las partículas. En adición a lo anterior, los enlaces de dichas sustancias son más fuertes, y su biodisponibilidad es menor.

Aunado a lo anterior, muchos organismos cuentan con la capacidad de modificar las mezclas de contaminantes que lleguen a su interior. Eso lo hacen a partir de procesos de biotransformación. Dependiendo de qué tan hidrófobos sean los productos de estos procesos, se pueden disolver en el agua o seguir retenidas en el ser vivo (Miller *et al.*, 2020). Los contaminantes orgánicos dentro de un organismo se degradan con mayor facilidad (según su hidrofobia) al momento de pasar a algún depredador. En vista de lo previamente mencionado, tampoco se pueden dar procesos de transferencia trófica (Miller *et al.*, 2020).

Existen más factores que afectan la adsorción de moléculas orgánicas que de metales, así como aquellos que dificultan su biodisponibilidad. Dado lo anterior, el riesgo de la adherencia de metales es mayor que la de moléculas orgánicas.



**Figura 17.** Contaminantes que se pueden encontrar adsorbidos a la superficie de un microplástico (letras azules), así como aditivos provenientes del mismo (letras rojas). Modificada de Hee *et al.*, 2018.

Los diferentes aditivos incluidos en los plásticos involucran diferentes efectos sobre especies pesquera (Rochman, 2015). El plastificante de ftalato BBP se encontró como extremadamente tóxico para los organismos acuáticos. Igualmente los retardantes de llama bromados incluyen efectos como trastornos del desarrollo del comportamiento neurológico, alteraciones de la hormona tiroidea, teratogenicidad y reducción del éxito del desove (Setälä *et al.*, 2018).

Los efectos de la absorción de contaminantes desde el medio ambiente se hacen evidentes en especies de peces, tal como lo reportado en un estudio en la alimentación por polietileno en pescados que se había desplegado en la Bahía de San Diego, California. Después de una exposición dietética de dos meses al plástico con una mezcla compleja de contaminantes prioritarios sorbidos (COP y metales), los peces sufrieron toxicidad hepática, incluido el agotamiento de glucógeno, lipidosis, muerte celular y promoción de tumores y mostraron signos de disrupción endocrina a través de cambios en la expresión génica y crecimiento anormal de células germinales en las gónadas (Rochman *et al.* 2013).

De acuerdo con Rochman (2015), existe biomagnificación de contaminantes, tales como los HAP provenientes del consumo del zooplancton hasta depredadores tope tales como peces. Sin embargo, los compuestos degradables como HAP y PBDE se biomagnifican menos en las presas debido a la degradación en la columna de agua, a la metabolización por parte del organismo, o por especies de presas más bajas en la red alimentaria marina (Setälä *et al.*, 2018). Lo anterior sugiere que no existe una biomagnificación tan grande para moléculas orgánicas pero los metales adsorbidos por microplásticos pueden ser fácilmente biomagnificados.

Siguiendo con lo anterior, de acuerdo con Henry *et al.* (2019), los ftalatos, presentes principalmente en las microfibras, conducen al cáncer de mama, daño del hígado, riñones e intestinos e infección de la sangre humana. También se prueba que los ftalatos, tienen efectos nocivos en el cuerpo humano, como el inicio temprano de la pubertad, la reducción del desarrollo del sistema reproductor masculino, la función alterada del sistema hormonal, los defectos genitales y reproductivos, los niveles de testosterona y la disminución del nivel de conteo de esperma. Además, las fibras cuentan con retardantes de llama, los cuales se han relacionado con trastornos de la tiroides, problemas de memoria y aprendizaje, retraso en el desarrollo mental y físico, menor coeficiente intelectual, pubertad temprana y reducción de la fertilidad (Tolinski *et al.*, 2015).

Henry *et al.* (2019) menciona que la investigación limitada y la evidencia observacional sugieren que los niveles actuales de exposición humana a microfibras de textiles sintéticos es poco probable que causen toxicidad grave, pero aún se desconocen los posibles impactos de la ingestión crónica a largo plazo.

## **Conclusiones**

Los microplásticos son problemas de alto impacto, debido a sus múltiples formas de contaminar. Este es uno de los asuntos de contaminación más severos ocasionados por el uso desmedido de plástico a manos del ser humano. No solo por lo anterior mencionado, sino porque no existe la gestión adecuada para tratar estos residuos. Estos contaminantes implican un problema de gran importancia e impacto tanto dentro de las lagunas costeras, como para los ecosistemas acuáticos en general.

Las microfibras son los microplástico de mayor riesgo. Aun no se le ha dado toda la importancia que ameritan, ni a sus fuentes de origen (textiles, redes de pescar, entre otros). Dada su volatilidad, y al contar con más vías de ingresar en cuerpos de agua, tiene mayor probabilidad de ser de los microplásticos que más se encuentren en algún ecosistema acuático.

Como lo demuestran las lagunas costeras de este estudio, siempre que exista algún cuerpo de agua cerca de algún centro urbano, tendrá todos los factores necesarios para contener microplásticos. Asimismo, a mayor intensificación de las causas generadoras, mayor podría ser la cantidad de microplásticos encontrados en estos ecosistemas.

Las lagunas de Alvarado y mandinga, al ser las que poseen mayor presencia de partículas de microplástico ( $\Lambda$ ) en la mayoría de los tamaños de tamiz, así como la mayor variabilidad de estos tamaños, son las que cuentan las condiciones ambientales propicias para fragmentar microplásticos a tamaños muy pequeños. Sin embargo, dado que se utilizaron muestras sedimentarias de un periodo estacional en específico, las condiciones ambientales pueden variar y la presencia de microplásticos entre lagunas también.

La presencia del polímero **polipropileno** evidencia que las prendas de vestir hechas a base de materiales sintéticos son una de las principales fuentes de microplásticos para los ecosistemas acuáticos. Aunado a lo anterior, la presencia del polímero **acrílico** muestra el riesgo que existe en el aumento en el uso de plástico en la vida cotidiana, muchos de los cuales son de un único uso, aunado a que la gestión no es totalmente eficiente como para evitar que terminen en la zona costera.

Los recursos ya mencionado de las áreas aquí analizadas podrían estar sujetos a procesos de bioacumulación y transferencia trófica. Esto a consecuencia de la presencia de microplásticos, así como de aditivos y posibles contaminantes adsorbidos por éstos. Dentro de esos contaminantes, existe mayor probabilidad de encontrar acumulación de metales pesados en los organismos. Por lo anterior, se puede asegurar que los recursos pesqueros de las lagunas de este estudio no son aptos para consumo humano.

Si llega a haber ingesta de algún ejemplar proveniente de las lagunas del presente estudio, se tienen todo el potencial para ocasionar algún problema de salud pública. Entre todas las especies que se puedan encontrar, una de las de mayor potencial de causar un problema de este tipo es *Crassostrea virginica*. Esto debido a su alta capacidad filtradora, y a su amplia comercialización tanto en Veracruz como en el resto de la república mexicana.

## **Recomendaciones**

En un futuro se sugiere la realización de un muestreo de sedimentos en las mismas lagunas costeras y para cada periodo estacional, para poder observar el comportamiento de la presencia de los diferentes tamaños de microplásticos en el curso de un año.

Aún falta mayor investigación en los campos de biomagnificación tanto de microplásticos como de sus aditivos y contaminantes, por lo que se recomienda realizar un estudio que describa los microplásticos obtenidos de organismos heterótrofos dentro las lagunas costeras del área de estudio, así como sus aditivos y posibles contaminantes adsorbidos.

Con la gestión adecuada de los residuos, así como las descargas, es posible que se reduzcan los aportes de macroplástico. De igual manera, para todo producto que se fabrique a partir de hilos de polímero, como las prendas de vestir, se necesitan mayor atención en cuanto a su proceso de fabricación.

## Referencias

Las referencias que incluyen un subíndice son aquellas que se escriben de la misma forma al momento de citarlas dentro del texto. Esto con el propósito de diferenciarlas entre sí.

- Al-Sabagh, A., Hassan, M., Dosouky, S., Nasser, N., Elsharaky, E., y Abdelhamid, M. (2015). Preparation of some thermal stable polymers based on diesters of polyethylene and polypropyleneoxides macro monomers to use as surfactants at high temperature and pressure. *Egyptian Journal of Petroleum*, 5.
- Aldeco, J., Cortéz, G., y Jurado, J. (2015). Adaptaciones culturales y económicas a cambios provocados por tala de mangle y deterioro pesquero en Mandinga, Veracruz. *Sociedades rurales, producción y medio ambiente*, 15, 146-148.
- Álvarez, C. (2012). Cementerio de manglares en Tuxpan, Veracruz. Obtenido el 26/09/19 de <https://carlosalvarezflores.com/cementerio-de-manglar-en-tuxpan-veracruz/>
- Álvarez-Zeferino J. C., Ojeda-Benítez S. and Vázquez, Morillas A. (2017). Residuos sólidos urbanos en una playa mexicana, implicaciones en la formación de microplásticos. Proceedings. VII Simposio Iberoamericano en Ingeniería de Residuos, Universidad de Cantabria, Santander, Spain. 13-14 June, 2017, pp. 390-395.
- Benitez, J.A., R.M. Cerón-Bretón, A. Roé-Sosa, B. Girón, y J. Rendón-Von-Ostern (2014). Impacto ambiental causado por el crecimiento poblacional y actividades económicas en el Golfo de México: uso del suelo y generaciones de desechos. 747-754. En A.V. Botello, J. Rendón von Ostern, J.A. Benitez y G. Gold-Bouchot. Golfo de México. Contaminación e impacto ambiental: diagnóstico y tendencias. UAC-UNAM-ICMYL, CINVESTAV-Unidad Mérida. 1176 p.
- Botello, A.V., De la Lanza, G., Villanueva, S. (2017). Monografía ambiental del Sistema Lagunar de Alvarado (SLA), Veracruz, México. LM editores, 120 p.
- Botello, A.V., Villanueva, S., Ponce, G. (2011). Tendencias de la contaminación en sedimentos de los sistemas lagunares del estado de Tabasco. En Ambiente, biología, sociedad, manejo y legislación de sistemas costeros mexicanos (359-360). México: Plaza y Valdes.
- Brennecke, D., Duarte, B., Paiva, F., Caçador, I., & Canning-Clode, J. (2016). Microplastics as vector for heavy metal

contamination from the marine environment. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 178, 189–195. <https://doi.org/10.1016/j.ecss.2015.12.003>.

- Cabrera,G.( 2003). Las regiones costeras / crecimiento y potencial demográfico. *DemoS*, vol 6. Universidad Nacional Autónoma de México, México, pp. 30.
- Carbery, M., O' Connor, W., y Thavamani, P. (2018). Trophic transfer of microplastics and mixed contaminants in the marine food. *Environment International*, 1-10.
- Caso,C., E.Ezcurra, e I. Pisanti (2004). Diagnóstico ambiental del Golfo de México. Instituto Nacional de Ecología: Volumen 1. pp 28-29.
- Carrillo, I. (2016). Propuesta de manejo del manglar del Sistema Lagunar. *UNIVERSIDAD VERACRUZANA: Facultad de Ciencias Biológicas y Agropecuarias*, 65-68.
- Cookson,C.(2019).High levels of microplastics found in fresh snow.Recuperado el 20 de diciembre de 2019 de <https://www.ft.com/content/ecf5bf52-bd21-11e9-b350-db00d509634e>
- Cole, M. L., Halsband, C., y Galloway, T.(2011). Microplastics as contaminants in the marine environment: A review. *Marine Pollution Bulletin*, 2588-2597.
- CONABIO (2009).Laguna Verde-Antón Lizardo. Obtenido el 20/04/19 de [http://www.conabio.gob.mx/conocimiento/regionalizacion/doctos/rmp\\_049.html](http://www.conabio.gob.mx/conocimiento/regionalizacion/doctos/rmp_049.html)
- Cruz, V. (2005). Independencia ecotrófica entre laguna de Alvarado, Veracruz, y la plataforma continental adyacente. Instituto Politécnico Nacional. México, 2005.
- Daughtery, M (2016). Adsorption of organic pollutants to microplastics: The effects of dissolved organic matter. Número de informe: 1. Illinois, EE.UU. Northwestern University.
- De la Lanza, G y H. Lozano Montes (1999). Comparación fisicoquímica de las lagunas de Alvarado y Términos. *Hidrobiológica*. Vol. 9.Pp 16.
- Departamento de pesca (1977). Monografía del Puerto de Tuxpan, Veracruz, 1977. 1-30 Pp.
- Elias, R. (2015). Mar de plástico: Una revisión del plástico en el mar. *Revista de investigación desarrollo pesquero*, 27, 84-85.

- Encounter Edu. (2018). Where do microplastics come from?. Obtenido el 20/03/2020 de <https://encounteredu.com/multimedia/images/sources-of-microplastics>.
- Fries, E., Dekiff, J. H., Willmeyer, J., Nuelle, M.-T., Ebert, M., y Remy, D. (2013). Identification of polymer types and additives in marine microplastic particles using pyrolysis-GC/MS and scanning electron microscopy. *Environmental Science: Processes & Impacts*, 15(10).
- González, C., De la Cruz, V., Salas Pérez, J. J., y Dominguez, C. (2012). Lista de los peces de Tuxpan, Veracruz, México. *Revista Científica UDO Agrícola*, 3(12), 677.
- Hassani, S., Abdouss, M., Mousavi, A., y Haji, A. (2012). Study of ion adsorption on micro and new nano acrylic fibers modified by ethanolamine. *5TH Texteh international conference*.
- Henry, B., Laitala, K., Grimstad, I. (2019). Microfibers from apparel and home textiles: Prospects for including microplastics in environmental sustainability assessment. *Science of the Total Environment*. 483-494.
- Hong, S. H., Shim, W. J., y Jang, M. (2018). Chemicals Associated With Marine Plastic Debris and Microplastics: Analyses and Contaminant Levels. 273. En Zeng, Eddy. *Microplastic Contamination in Aquatic Environment: An emerging matter of environmental urgency*. Elsevier. 424 pp.
- INEGI (2014)<sup>1</sup>. Medio ambiente: Agua. Obtenido el 21/09/17 de <https://www.inegi.org.mx/temas/agua/>.
- INEGI (2014)<sup>2</sup>. México en cifras: Alto Lucero de Gutierrez-Barrios, Veracruz de Ignacio de la Llave. Obtenido el 17/04/2020 de <https://www.inegi.org.mx/app/areasgeograficas/?ag=30>.
- INEGI (2014)<sup>3</sup>. México en cifras: Alvarado, Veracruz de Ignacio de la Llave. Obtenido el 17/04/2020 de <https://www.inegi.org.mx/app/areasgeograficas/?ag=30>.
- INEGI (2014)<sup>4</sup>. México en cifras: Boca del Rio, Veracruz de Ignacio de la Llave. Obtenido el 17/04/2020 de <https://www.inegi.org.mx/app/areasgeograficas/?ag=30>.
- INEGI (2014)<sup>5</sup>. México en cifras: Tuxpan, Veracruz de Ignacio de la Llave. Obtenido el 17/04/2020 de <https://www.inegi.org.mx/app/areasgeograficas/?ag=30>.
- Kennish, M. y H.W. Paerl (2010). Coastal Lagoons: Critical Habitats of Environmental Change. En Kennish, M. y H.W. Paerl. *Coastal Lagoons: Critical Habitats of Environmental Change*. CRC Press. 1 p.



- Kehrig, H. D. A., Seixas, T. G., Palermo, E. A., Baêta, A. P., Castelo-Branco, C. W., Malm, O., & Moreira, I. (2008). The relationships between mercury and selenium in plankton and fish from a tropical food web. *Environmental Science and Pollution Research*, 16(1), 10–24. <https://doi.org/10.1007/s11356-008-0038-8>.
- Kjerfve, B., y Magill, K. (1989). Geographic and hydrodynamic characteristics of shallow coastal lagoons. *Marine Geology*, 187-199.
- Kooi, M., van Hes, E., Scheffer, M., y Koelmans, A. (2017). Ups and Downs in the Ocean: Effects of Biofouling on Vertical Transport of Microplastics. *Environmental Science and Technology*, 7963–7971.
- Lara, A., Contreras, F., Castañeda, O., y Barba, E. (2011). Lagunas costeras y estuarios. En A. Lara, F. Contreras, O. Castañeda, y E. Barba, *La Biodiversidad en Veracruz un estudio de estado*, (pág. 305). Veracruz: CONABIO.
- Lara-Domínguez, A. L., J. López-Portillo, R. Martínez-González y A. D. Vázquez-Lule (2009). Caracterización del sitio de manglar Mandinga, en Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO). Sitios de manglar con relevancia biológica y con necesidades de rehabilitación ecológica. CONABIO. México, D.F.
- Lara-Lara *et al.* (2008). Los ecosistemas costeros, insulares y epicontinentales, en *Capital natural de México*, vol. 1: Conocimiento actual de la biodiversidad. Conabio, México, pp. 110.
- Lavallo, C., C. Rocha, C. Baranzelli, F. Batista (2011). *Coastal Zones: Policy alternatives impacts on European Coastal Zones 2000- 2050*. European Commission, pp. 15.
- Laws, E. (2013). Sentinel Applications for Monitoring Exposure. En E. Laws, *Environmental Toxicology* (pág. 511). Los Angeles: Springer.
- Longo, C., Savaris, M., Nichele, R., y Coulon, A. M. (2011). Degradation Study of Polypropylene (PP) and Bioriented Polypropylene (BOPP). *Materials Research*.
- Li, H., Sha, M., Lin, L., Xin, N., Rong, X., Hong, H., Yan, Y., Ming, G., Rittschof, D. (2018). Microplastics in oysters *Saccostrea cucullata* along the Pearl River Estuary, China. *Environmental Pollution*. 619-625.
- Machado A.A.S, C.W. Lau, J. Till, W.Kloas, A.Lehnman, R. Becker y M.C. Rilling (2018). Impacts of microplastics on the soil biophysical environment. *Environmental Science & Technology*. 52: 9656–9665.
- Mendoza-Díaz, F. (2010). Determinación de metales pesados, Cd, Cr, Cu y Pb en *Farfantepenaeus aztecus* (Ives, 1891) colectados en la laguna de Tampamachoco, Veracruz. 95 p. (Tesis de Maestría, Facultad de Ciencias Biológicas y Agropecuarias Universidad Veracruzana, México).
- Miller, M. E., Hamann, M., & Kroon, F. J. (2020). Bioaccumulation and biomagnification of microplastics in marine

organisms: A review and meta-analysis of current data. *PLOS ONE*, 15(10), e0240792. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0240792>.

- Mishra,S., Rath,C., y Prasad,A. (2019). Marine microfiber pollution: A review on present status and future challenges. *Marine Pollution Bulletin*.188-197.
- Moncada, M. (2018). *National Geographic* . Obtenido el 27/09/19 de Los diez ríos que más plástico vierten a los océanos del planeta: <https://www.nationalgeographic.es/medio-ambiente/2018/06/los-diez-rios-que-mas-plastico-vierten-los-oceanos-del-planeta>
- Municipios. (2019). Tuxpan. Obtenido el 27/09/19 de Información sobre Tuxpan: <http://www.municipios.mx/veracruz/tuxpan/>
- Olcina, J. (2013). Clasificación de las nubes: De Lamarck y Howard al atlas internacional de nubes. En A. Aberola (Ed.), *Clima, naturaleza y desastre: España e Hispanoamérica durante la Edad Moderna* (Primera ed., Vol. 1). Valencia, España: Universidad de Valencia.
- Ortiz-Lozano *et al.* (2010). Zona costera. Universidad Veracruzana: Repositorio Institucional. Primera edición, pp. 125.
- Peña, E. J., Cantera Kintz, J. R., & Muñoz, E. (2018). *Evaluación de la contaminación en Ecosistemas Acuáticos: Un estudio de caso en la laguna de Sonso, cuenca alta del Río Cauca* (1.<sup>a</sup> ed., Vol. 1) [Libro electrónico]. Programa Editorial de la Universidad del Valle. <https://doi.org/10.25100/peu.82>. Pp 294.
- Rochman CM, Hentschel BT, Teh SJ (2014) Long-Term Sorption of Metals Is Similar among Plastic Types: Implications for Plastic Debris in Aquatic Environments. *PLoS ONE* 9(1): e85433. doi:10.1371/journal.pone.0085433.
- Rochman,G (2015).The Complex Mixture, Fate and Toxicity of Chemicals Associated with Plastic Debris in the Marine Environment. En M.Bergman,L.Gutow y M. Klages. *Marine Anthropogenic Litter* (117-133). New York.
- Rodríguez,H. (2017).Las aguas residuales y sus efectos contaminantes. Obtenido el 25/09/19 de iAgua: <https://www.iagua.es/blogs/hector-rodriguez-pimentel/aguas-residuales-y-efectos-contaminantes>.

- Rosado-Piña, Nayely, M., Vázquez, A., Álvarez, J. C., Beltrán, M., y Ojeda, S. (2018). Caracterización de microplásticos y muestreo de residuos sólidos urbanos de la playa de Tuxpan, Veracruz. *Los residuos como recurso*. Tuxpan, Veracruz: Sociedad Mexicana de Ciencia y Tecnología Aplicada a Residuos Sólidos A.C.
- Sefiplan (2018)<sup>1</sup>. Cuadernillos municipales, 2018: Alto Lucero de Gutierrez Barrios. Veracruz: Secretaria de Finanzas y Planeación.
- Sefiplan (2018)<sup>2</sup>. Cuadernillos municipales, 2018: Alvarado. Veracruz: Secretaria de Finanzas y Planeación.
- Sefiplan (2018)<sup>3</sup>. Cuadernillos municipales, 2018: Boca del Rio. Veracruz: Secretaria de Finanzas y Planeación.
- Sefiplan (2018)<sup>4</sup>. Cuadernillos municipales, 2018: Tuxpan, Veracruz: Secretaria de Finanzas y Planeación.
- Semarnat (2014). Aguas residuales. Obtenido el 09/09/19 de Agua• Calidad: [https://apps1.semarnat.gob.mx:8443/dgeia/informe\\_resumen14/06\\_agua/6\\_2\\_3.html](https://apps1.semarnat.gob.mx:8443/dgeia/informe_resumen14/06_agua/6_2_3.html)
- Semarnat (2016). Informe de la Situación del Medio Ambiente en México. Compendio de Estadísticas Ambientales. Indicadores Clave, de Desempeño Ambiental y de Crecimiento Verde. Edición 2015. Semarnat. México.
- Setälä, O., Lehtiniemi, M., Coppock, R., y Cole, M. (2018). Microplastics in Marine Food Webs. En Zeng, E. *Microplastic Contamination in Aquatic Environments* (págs. 339-363). Elsevier.
- Science History Institute (2019). Conflicts in Chemistry: The Case of Plastics. Obtenido el 10/09/2019 de Science of Plastics: <https://www.sciencehistory.org/science-of-plastics>
- Smith, M., Love, D., Rochman, C., Neff, R. (2018). Microplastics in Seafood and the Implications for Human Health. *Current Environmental Health Reports*. 375-386.
- Toledo, A. (2014). Caracterización Ambiental del Golfo de México: Marco Conceptual. En Botello *et al.* Golfo de México, Contaminación e Impacto Ambiental: Diagnóstico y Tendencias. Tercera Edición. UAC, UNAM-ICMyL, unam-icmyl, CINVESTAV-Unidad Mérida. pp 1.
- Tolinski, M. (2015). Ultraviolet Light Protection and Stabilization. En M. Tolinski, *ADDITIVES FOR POLYOLEFINS: Getting the Most Out of Polypropylene, Polyethylene and TPO*. Elsevier.
- Van Cauwenberghe, L., Devriese, L. G., Robbens, J., y Janssen, C. R. (2015). Microplastics in sediments: A review of techniques, occurrence and effects. *Marine Environmental Research*, 5-17.
- Vázquez, G. (2019). Los microplásticos textiles (o la increíble historia de cómo tu suéter termina en el salero. *Ciencia*, 55-63.

- Vidal, C. (2012). Aspectos poblacionales del ostión americano *Crassostrea virginica* (Gmelin, 1791) en las lagunas de Tamiahua y Tampamachoco, Veracruz (periodo abril 2011 - marzo 2012). *Universidad Veracruzana: Facultad de Ciencias Biológicas y Agropecuarias*, 79.
- Villanueva-Fragoso, S., G. Ponce-Vélez, A. V. Botello, A. S. Sobrino-Figueroa, F. Rivera-Ramirez y C. Garcia-Ruelas (2014). Niveles de contaminación orgánica e inorgánica y toxicidad de los sedimentos del sistema lagunar de Tampamachoco (2009-2012). p 867-900. En Botello *et al.* Golfo de México, Contaminación e Impacto Ambiental: Diagnóstico y Tendencias.
- Tercera Edición. UAC, UNAM-ICMyL, unam-icmyl, CINVESTAV-Unidad Mérida. 1176 p.
- Vroom, R., Koelmans, A., Besseling, E., y Halsband, C. (2017). Aging of microplastics promotes their ingestion by marine zooplankton. *Environmental Pollution*, 987-996.
- Wang, Z., Wagner, J., Ghosal, S., Bedi, G., Wall, S. (2017). MEB/EDS and optical microscopy analyses of microplastics in ocean trawl and fish guts. *Science of the Total Environment*. 616–626.
- Weis, J. (2015). *Marine Pollution*. New York: Oxford University Press. 40.
- Wright, S. (2015). The potential for microplastics to cause harm in the marine. *Current Biology*, 41-60.
- Wright, S., Thompson, R., y Galloway, T. (2013). The physical impacts of microplastics on marine organisms: A review. *Environmental Pollution*, 483-492.
- Yarto, Mario (2007). Los efectos de la contaminación: el caso de las sustancias tóxicas persistentes. Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático. México. Primera edición.

**Apéndice. Tablas de presencia de microplásticos de las cuatro estaciones del estudio**

TABLA 1. Presencia de microplástico en las muestras sedimentarias de acuerdo al tamaño de tamiz y estación en sedimentos superficiales de la laguna de Mandinga (0 indica ausencia y 1 indica presencia de cantidades traza de 0-0.5 g).										
Tamiz			Estación							
(Φ)	(mm)	μm	E1	E2	E3	E4	E5	E6	E7	E8
-2.25	4.75	4750	0	0	0	0	0	0	0	0
-2.00	4	4000	0	0	0	0	0	0	0	0
-1.00	2	2000	1	1	1	1	0	0	1	0
0.00	1	1000	1	1	1	1	1	1	1	1
1.00	0.5	500	1	1	1	1	1	1	1	1
2.00	0.25	250	1	1	1	1	1	1	1	1
3.00	0.125	125	1	1	1	1	1	1	1	1
4.00	0.062	62	1	1	1	1	1	1	1	1
PAN	<0.062	< 62	1	1	1	1	1	1	1	1

**TABLA 2. Presencia de microplástico en las muestras sedimentarias de acuerdo al tamaño de tamiz y estación en sedimentos superficiales de la laguna de Alvarado (0 indica ausencia y 1 indica presencia de cantidades traza de 0-0.5 g).**

Tamiz		Estación									
(Φ)	(mm)	E1-A	E1-B	E2	E3	E4	E5	E5p	E6	E7	E8
-2.25	4.75	1	1	1	1	1	0	1	0	0	1
-2.00	4	1	0	0		1	0		0	0	
-1.00	2	1	1	1		1	0		1	1	
0.00	1	1	1	1		1	1		1	1	
1.00	0.5	1	1	1		1	1		1	1	
2.00	0.25	1	1	1		1	1		1	1	
3.00	0.125	1	1	1		0	1		1	1	
4.00	0.062	1	1	1		1	1		1	1	
PAN	<0.062	1	1	1		0	1	1	1	1	
S/t					1			1			1

**TABLA 3. Presencia de microplástico en las muestras sedimentarias de acuerdo al tamaño de tamiz y estación en sedimentos superficiales de la laguna de Tampamachoco (0 indica ausencia y 1 indica presencia de cantidades traza de 0-0.5 g).**

Tamiz		Estación									
(Φ)	(mm)	E1	E2	E2 R	E3 R	E4	E5	E7	E7 R	E8	E9
-2.25	4.75				0	0	0			0	0
-2.00	4				0	0	0			0	0
-1.00	2				0	0	0			0	0
0.00	1				0	1	1			1	1
1.00	0.5				1	1	0			0	1
2.00	0.25				1	1	1			1	1
3.00	0.125				1	1	1			1	0
4.00	0.062				1	1	0			0	1
PAN	<0.062				0	1	0			0	0
s/t		1	1	1				1	1		

**TABLA 4. Presencia de microplástico en las muestras sedimentarias de acuerdo al tamaño de tamiz y estación en sedimentos superficiales de Laguna Verde (0 indica ausencia y 1 indica presencia de cantidades traza de 0-0.5 g).**

Tamiz		Estación					
(Φ)	(mm)	Réplica 11	E2	E3	E4	D-2	Replica 3RM
-2.25	4.75	0					
-2.00	4	0					
-1.00	2	1					
0.00	1	1					
1.00	0.5	0					
2.00	0.25	1					
3.00	0.125	1					
4.00	0.062	1					
PAN	<0.06 2	1					
s/t			1	1	1	1	1