



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

**Características texturales y contaminación
por microplásticos de los sedimentos
costeros de la región de Salina Cruz, Oaxaca
en el Pacífico mexicano**

TESIS

Que para obtener el título de

Ingeniera Geóloga

P R E S E N T A

Nadia Alvarado Enciso

DIRECTOR DE TESIS

Dr. Armstrong Altrin Sam John Selvamony



Ciudad Universitaria, Cd. Mx., 2022

Dedicatoria

A mis padres que son una fuente inagotable de sabiduría, amor y apoyo; quienes, gracias a sus sacrificios realizados, me han brindado lo necesario para estudiar una licenciatura y desarrollarme como persona.

A mi hermano, en quien siempre podré tener un amigo para platicar, bromear, jugar o incluso discutir, tal como lo hemos hecho todos estos años.

A mi pareja por acompañarme a lo largo de mis años en la universidad y darme ese empujón necesario para seguir trabajando en las clases; además de creer en mí cuando ni siquiera yo era capaz de hacerlo.

Y, finalmente, a mis gatitos que estuvieron dándome su amor incondicional en mi etapa más baja de salud que tuve.

«Not a single one of us here today has done it alone. We are each a patchwork quilt of those who have loved us, those who have believed in our futures, those who showed us empathy and kindness or told us the truth even when it wasn't easy to hear. Those who told us we could do it when there was absolutely no proof of that.»

Taylor Swift to NYU graduates

2022

Agradecimientos

Agradezco la asistencia financiera proporcionada al Dr. John S. Armstrong Altrin S. del proyecto DGAPA-PAPIIT, número: IN107020 por el cual fue posible la recolección de muestras y el análisis de mineralogía, y del proyecto CONACyT, número: A1-S-21287 por el cual fue posible la realización del presente trabajo. Además de agradecer al Dr. Armstrong-Altrin S. John Selvamony por su guía y consejos dados para llevar a término este trabajo.

Le agradezco al proyecto institucional del Instituto de Ciencias de Mar y Limnología (ICML) n° 616, por las facilidades de transporte para la recolección de muestras en las playas del Golfo de México.

Agradezco al M. en C. Eduardo Alfredo Morales de la Garza, Ricardo Martínez Domínguez y Arturo Ronquillo Arvizu del ICML de la UNAM por ayudarme en la preparación de muestras para los análisis.

Gracias a la M. en C. Laura Elena Gómez Lizárraga, del Servicio Académico de Microscopía Electrónica de Barrido (SAMEB) en el Instituto de Ciencias del Mar y Limnología, y a la Dra. Selene Rubí Islas Sánchez, del Laboratorio Universitario de Caracterización Espectroscópica (LUCE) en el Instituto de Ciencias Aplicadas y Tecnología, por sus servicios prestados.

Le agradezco a mis compañeras de laboratorio, Edith Xiadani Castro Zárate e Itzamna Zaknite Flores Ocampo, por corregirme, ayudarme y asesorarme durante todo el proceso de separación, conteo y análisis composicional de microplásticos. También quiero agradecer a Mayte por guiarme al inicio de mi tesis. Además de darle las gracias a Mayla A. Ramos Vázquez, Bárbara Yanet Pérez, Héctor y Nathaly por su ayuda y por realizar el recolectado de muestra para que, con estas, se pudiera realizar el presente estudio.

Por último, a los miembros de mi jurado: Ing. José Teodoro Hernández Treviño, M. en I. Isabel Domínguez Trejo, Dr. David Alberto Salas de León y Dra. Mayumy Amparo Cabrera Ramírez, por su tiempo, ayuda y comentarios brindados con la finalidad de perfeccionar este trabajo; adicionalmente al Dr. Saúl Arciniega Esparza, profesor en el Programa Único de Especialización de Ingeniería en Agua Subterránea,

por su consejo y ayuda para cambiar el método de interpolación usado y, así, mejorar los valores estimados de microplásticos en el área estudiada.

Índice general

I. Introducción	1
Antecedentes	1
Sedimentos	1
Ambiente Sedimentario de Playa	5
Corrientes oceánicas	5
Plásticos	8
Presentación	31
Objetivo General	31
Objetivos Específicos	31
II. Área de Estudio	33
Localización	33
Actividades Sobresalientes y Contaminación en la Zona	33
Geología superficial	36
Hidrología y Clima	38
Corrientes de Viento y Marinas	40
III. Metodología	45
Muestras	45
Análisis Granulométrico y Análisis de Esfericidad y Redondez	45
Separación e Identificación de Microplásticos en las Muestras	48
Cuantificación y Clasificación de Microplásticos Encontrados	50
Toma de Fotografías en MEB y Análisis por Espectroscopia Infrarroja (IR) de Microplásticos	52
IV. Resultados y Discusión	55

Características Texturales de los Sedimentos	55
Microplásticos Encontrados	66
SAL CRUZ 01	67
SAL CRUZ 03	70
SAL CRUZ 05	73
SAL CRUZ 07	76
SAL CRUZ 09	79
SAL CRUZ 11	82
SAL CRUZ 13	85
SAL CRUZ 15	88
SAL CRUZ 17	91
Total de la zona costera de la bahía de Salina Cruz	94
Discusión	109
V. Conclusiones	113
Referencias	115

Índice de figuras

1.1. Diferentes tipos de distribución: leptocúrtica, mesocúrtica y platicúrtica	4
1.2. Esquema del movimiento de oleaje en la playa	6
1.3. Circulación oceánica en el mundo	7
1.4. Esquema ilustrativo relacionando la fuente de materia prima de los polímeros con sus aplicaciones	12
1.5. Gráfica de la producción anual de plásticos (1950-2015)	23
1.6. Gráfica de la producción global de plásticos primarios en 2015	25
1.7. Síntesis de la historia de plásticos	32
2.1. Ubicación de la playa Salina Cruz	34
2.2. Ubicación de las muestras analizadas de la zona costera de la bahía de Salina Cruz	35
2.3. Terrenos del sur de México	37
2.4. Mapa geológico de Salina Cruz (Oaxaca)	38
2.5. Aumento en el mapa geológico de la zona de interés	39
2.6. Mapa de la subcuenca hidrológica RH21Aa - Salina Cruz	40
2.7. Mapa de la subcuenca hidrológica RH21Aa - Salina Cruz adicionándole la geología	41
2.8. Mapa del sur México con líneas de corriente de viento	42
2.9. Mapa de México con dirección de oleaje	43
3.1. Ejemplo de charola usada durante el secado	46
3.2. Proceso de secado	46
3.3. Ejemplo del proceso de cuarteamiento de las muestras	47
3.4. Columna de tamices utilizados durante el análisis granulométrico	47
3.5. Escala visual de redondez y esfericidad según (Powers, 1953)	48
3.6. Clasificación de formas por su relación b/a y c/b (Zingg, 1935)	49
3.7. Fotografía de muestra colocada sobre placa de agitación magnética	50
3.8. Comparación de sedimento en suspensión antes y después del periodo de reposo	50
3.9. Reposo de filtro posterior al enjuague con agua desionizada	51
3.10. Proceso de secado de los filtros	51
3.11. Fotografía de microscopio con filtro para análisis	52
3.12. Fotografía de las partículas en suspensión recuperadas con el filtro	53
3.13. Ejemplo de caja Petri usada durante la separación de microplásticos	53
3.14. Microscopio trinocular utilizado para la toma de fotografías de los microplásticos	54
4.1. Fotografía de sedimento de la zona costera BSC (arena gruesa a muy gruesa)	64
4.2. Fotografía de sedimento de la zona costera BSC (arena media)	64
4.3. Fotografía de sedimento de la zona costera BSC (arena fina)	65
4.4. Fotografía de sedimento de la zona costera BSC (arena fina)	65
4.5. Fotografía de microplástico atrapado en minerales que presentaron magnetismo fuerte (Sal Cruz 13)	66
4.6. Gráficas de barras relacionando el color con la cantidad y la forma (incluyendo separación de colores) con la cantidad de los microplásticos (Sal Cruz 01)	68
4.7. Fotografías de microplásticos Sal Cruz 01	69

4.8. Gráficas de barras relacionando el color con la cantidad y la forma (incluyendo separación de colores) con la cantidad de los microplásticos (Sal Cruz 03)	71
4.9. Fotografías de microplásticos Sal Cruz 03	72
4.10. Gráficas de barras relacionando el color con la cantidad y la forma (incluyendo separación de colores) con la cantidad de los microplásticos (Sal Cruz 05)	74
4.11. Fotografías de microplásticos Sal Cruz 05	75
4.12. Gráficas de barras relacionando el color con la cantidad y la forma (incluyendo separación de colores) con la cantidad de los microplásticos (Sal Cruz 07)	77
4.13. Fotografías de microplásticos Sal Cruz 07	78
4.14. Gráficas de barras relacionando el color con la cantidad y la forma (incluyendo separación de colores) con la cantidad de los microplásticos (Sal Cruz 09)	80
4.15. Fotografías de microplásticos Sal Cruz 09	81
4.16. Gráficas de barras relacionando el color con la cantidad y la forma (incluyendo separación de colores) con la cantidad de los microplásticos (Sal Cruz 11)	83
4.17. Fotografías de microplásticos Sal Cruz 11	84
4.18. Gráficas de barras relacionando el color con la cantidad y la forma (incluyendo separación de colores) con la cantidad de los microplásticos (Sal Cruz 13)	86
4.19. Fotografías de microplásticos Sal Cruz 13	87
4.20. Gráficas de barras relacionando el color con la cantidad y la forma (incluyendo separación de colores) con la cantidad de los microplásticos (Sal Cruz 15)	89
4.21. Fotografías de microplásticos Sal Cruz 15	90
4.22. Gráficas de barras relacionando el color con la cantidad y la forma (incluyendo separación de colores) con la cantidad de los microplásticos (Sal Cruz 17)	92
4.23. Fotografías de microplásticos Sal Cruz 17	93
4.24. Gráfica de barras comparando las partículas de microplásticos presentes en las muestras por kg	94
4.25. Mapa ilustrativo de la abundancia de microplásticos presentes en la zona costera de la bahía de Salina Cruz	95
4.26. Gráfica de barras comparando los colores y la cantidad de microplásticos presentes en las muestras	96
4.27. Gráfica de barras comparando los colores y la cantidad de microplásticos presentes en las muestras, separando en secciones los colores	97
4.28. Gráfica circular del porcentaje de microplásticos por color en la playa	98
4.29. Gráfica de barras relacionando la forma con la cantidad de microplásticos de todas las muestras	99
4.30. Gráfica circular del porcentaje de microplásticos por forma en la playa	100
4.31. Fotografías de extremos y cuerpo de fibras en MEB	101
4.32. Fotografías de fibras en MEB	102
4.33. Fotografía de fibra con rotura en el centro en MEB	103
4.34. Fotografía de fragmentos en MEB	104
4.35. Fotografía de esferas en MEB	105
4.36. Fotografía de películas en MEB	105
4.37. Distribución de los tamaños de fibras (por color)	107
4.38. Distribución de los tamaños de fragmentos (por color) y esferas	108
4.39. Espectro fibras enredadas, verdes y negras	110

Índice de tablas

1.1. Interpretación del valor resultante en la desviación estándar	2
1.2. Interpretación de los valores del índice de asimetría relacionados con la curva de frecuencia . .	3
1.3. Interpretación del valor de curtosis	3
1.4. Clasificación de los ambientes de depósito	4
1.5. Termoplásticos y termoestables	10
1.6. Plásticos de base biológica	10
4.1. Resultados geoestadísticos de la muestra Sal Cruz 01	56
4.2. Resultados geoestadísticos de la muestra Sal Cruz 03	56
4.3. Resultados geoestadísticos de la muestra Sal Cruz 05	57
4.4. Resultados geoestadísticos de la muestra Sal Cruz 07	58
4.5. Resultados geoestadísticos de la muestra Sal Cruz 09	59
4.6. Resultados geoestadísticos de la muestra Sal Cruz 11	59
4.7. Resultados geoestadísticos de la muestra Sal Cruz 13	60
4.8. Resultados geoestadísticos de la muestra Sal Cruz 15	61
4.9. Resultados geoestadísticos de la muestra Sal Cruz 17	61
4.10. Resultados del conteo y clasificación de los microplásticos Sal Cruz 01	67
4.11. Resultados del conteo y clasificación de los microplásticos Sal Cruz 03	70
4.12. Resultados del conteo y clasificación de los microplásticos Sal Cruz 05	73
4.13. Resultados del conteo y clasificación de los microplásticos Sal Cruz 07	76
4.14. Resultados del conteo y clasificación de los microplásticos Sal Cruz 09	79
4.15. Resultados del conteo y clasificación de los microplásticos Sal Cruz 11	82
4.16. Resultados del conteo y clasificación de los microplásticos Sal Cruz 13	85
4.17. Resultados del conteo y clasificación de los microplásticos Sal Cruz 15	88
4.18. Resultados del conteo y clasificación de los microplásticos Sal Cruz 17	91

Capítulo I

Introducción

Antecedentes

Sedimentos

El sedimento se forma por la meteorización de la roca, su erosión y posterior transporte de las partículas resultantes; estas partículas se pueden desplazar por diferentes mecanismos de transporte como lo son: el agua, el hielo, el viento y la fuerza de gravedad; para finalmente realizar su depósito. Además de los sedimentos provenientes de rocas preexistentes, hay sedimentos formados por la precipitación a partir de una solución o por segregación biológica (arrecifes y estromatolitos), también, los restos de organismos como plantas y animales. Los sedimentos pueden ser analizados de forma cualitativa, al ser comparados visualmente con algunas imágenes de referencia donde se ejemplifica las relaciones de abundancia entre los diferentes tipos de grano que haya (p.ej. si se trata de imágenes muestra de los diferentes grados de selección, se mostrará cuan variados son los tamaños de las partículas); pero también hay una forma de analizar sedimentos de forma cuantitativa, y ésto se realiza al usar parámetros estadísticos como los propuestos por Folk & Ward.

Folk & Ward en 1957 propusieron sus parámetros estadísticos, aunque anteriormente ya había otra forma de medir estos parámetros, que tenían como finalidad poder ser usados de forma universal sin tomar en cuenta aspectos como la modalidad de los sedimentos. Para realizar el análisis cuantitativo del sedimento se necesita de: la media, la desviación estándar, el índice de asimetría y la curtosis gráfica. La moda se analiza de igual forma, pero ese análisis se puede realizar de forma manual con el histograma y observando las frecuencias de los diferentes tamaños; a continuación se detalla la forma de obtener los demás parámetros.

Media. La media propuesta por Folk & Ward (1957) busca poder medir todo tipo de muestras incluyendo aquellas que llegaran a ser bimodales o sesgadas. Para lograr que la fórmula funcionara en todos los casos, lo que hicieron fue dividir la muestra en tres partes y tomar la mediana de cada parte; ϕ_{16} corresponde a la

parte gruesa de los sedimentos, ϕ_{84} a la parte fina y ϕ_{50} a la parte media.

$$M_z = \frac{\phi_{16} + \phi_{50} + \phi_{84}}{3}$$

Desviación Estándar. La desviación estándar, utilizada para medir la clasificación de los sedimentos ([tabla 1.1](#)), usa tanto los datos centrales de la distribución como los datos de los extremos en la curva de distribución para que fuera más inclusiva y pudiera utilizarse en todos los casos.

$$\sigma_\phi = \frac{\phi_{84} - \phi_{16}}{4} + \frac{\phi_{95} - \phi_5}{6,6}$$

Tabla 1.1

Interpretación del valor resultante en la desviación estándar

Desviación estándar	Clasificación
$< 0.35 \phi$	Muy bien clasificado
0.35ϕ a 0.50ϕ	Bien clasificado
0.50ϕ a 0.71ϕ	Moderadamente bien clasificado
0.71ϕ a 1.00ϕ	Moderadamente clasificado
1.00ϕ a 2.00ϕ	Mal clasificado
2.00ϕ a 4.00ϕ	Muy mal clasificado
$> 4.00 \phi$	Extremadamente mal clasificado

Nota. Información tomada de Boggs ([2014](#)).

Índice de Asimetría. Nos permite saber si la curva de frecuencia del tamaño de las partículas es simétrico o asimétrica hacia el lado de las partículas finas o el de las gruesas; los valores de referencia son los presentes en la [tabla 1.2](#). Al igual que en el caso anterior, Folk & Ward ([1957](#)) juntaron en una sola fórmula la forma de tomar la asimetría para la parte central y la parte extremosa.

$$Sk_I = \frac{\phi_{16} + \phi_{84} - 2\phi_{50}}{2(\phi_{84} - \phi_{16})} + \frac{\phi_5 + \phi_{95} - 2\phi_{50}}{2(\phi_{95} - \phi_5)}$$

Curtosis. La curtosis, más que una característica geológica, es una variable estadística que muestra el grado de concentración de los datos, la frecuencia de los tamaños presentes (los datos centrales respecto a los extremos); también llamado medida de apuntamiento nos sirve para conocer la normalidad de nuestros datos (Arias-Madrid et al. [2012](#); Boggs, [2014](#); Folk y Ward, [1957](#)). Los valores de la [tabla 1.3](#) que están junto a su interpretación indica si hay muchos valores en la parte central (leptocúrtica), si tiene una distribución uniforme (platicúrtica) o si presenta una distribución más cercana a la normal (mesocúrtica); se puede observar de forma gráfica en la [figura 1.1](#).

Tabla 1.2

Interpretación de los valores del índice de asimetría relacionados con la forma de la curva de frecuencia

Índice de asimetría	
>+ 0.30	Muy asimétrica hacia las partículas finas
+ 0.30 a + 0.10	Asimétrica hacia las partículas finas
+ 0.10 a - 0.10	Simétrico
- 0.10 a - 0.30	Asimétrica hacia las partículas gruesas
<- 0.30	Muy asimétrica hacia las partículas gruesas

Nota. Información tomada de Boggs, 2014 (2014).

$$K_G = \frac{\phi_{95} - \phi_5}{2,44(\phi_{75} - \phi_{25})}$$

Tabla 1.3

Interpretación del valor resultante para la curtosis

Curtosis	
<0.67	Muy Platicúrtica
0.67 a 0.90	Platicúrtica
0.90 a 1.11	Mesocúrtica
1.11 a 1.50	Leptocúrtica
1.50 a 3.00	Muy leptocúrtica
>3.00	Extremadamente leptocúrtica

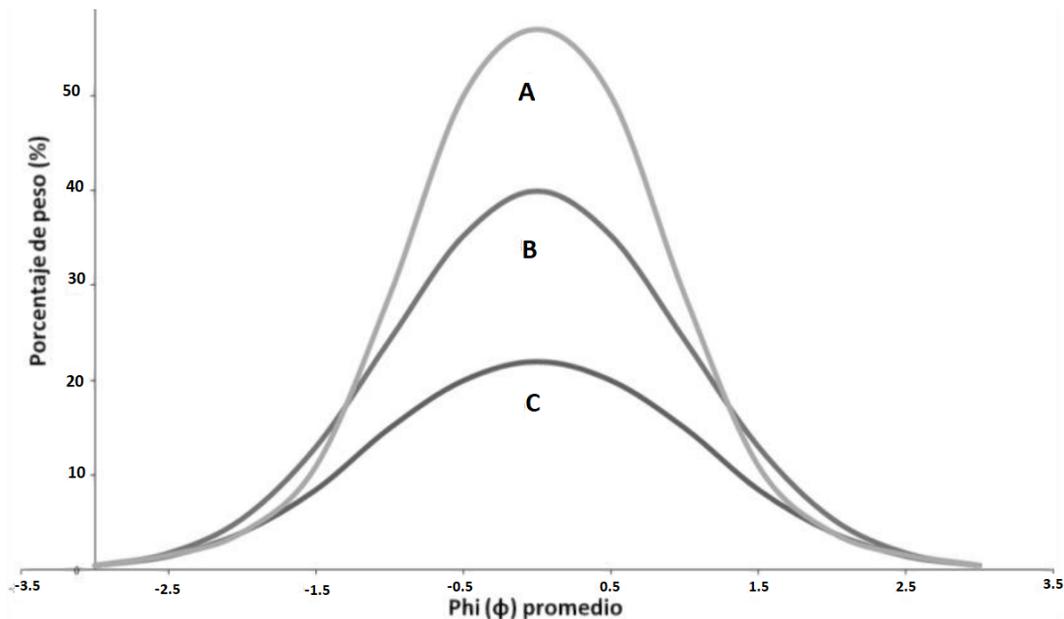
Nota. Información tomada de Folk y Ward, 1957.

Las características texturales obtenidas de los parámetros estadísticos calculados (clasificación y abundancia de tamaños) son, a veces, usados como referentes para determinar la zona donde se depositaron los sedimentos; ya que habrá diferentes procesos y condiciones específicas (físicas, químicas y biológicas) del mismo ambiente que determinarán la textura y otros aspectos de los sedimentos, como la disposición de éstos al momento del depósito. Estas zonas en las que puede suceder el depósito son los ambientes sedimentarios.

Los ambientes sedimentarios se clasifican en tres grandes entornos de depósito: continental, transicional y marino; estos entornos a su vez se dividen en ambientes como se observa en la **tabla 1.4**. El ambiente que nos interesa en este caso es la playa, que se encuentra en el entorno Transicional; conocer la dinámica que hay en este sitio nos ayudará a entender la procedencia de los sedimentos, junto con sus características texturales. Las características texturales de los sedimentos, como lo son: el tamaño de partícula, su forma, esfericidad y redondez, nos puede dar información sobre el transporte, y la energía de este último, que su-

Figura 1.1

Imagen comparativa de los diferentes tipos de distribución



Nota. Siendo *A* la correspondiente a una curva leptocúrtica, *B* a una mesocúrtica y *C* a platicúrtica (Arias-Madrid et al. 2012). Gráfica reproducida de *Análisis de Sedimentos Utilizando un Enfoque de la Programación Estructurada* (p. 61), de Arias-Madrid et al. 2012, TecnoLógicas, revista científica de acceso libre.

frieron las partículas; teniendo en cuenta que dependiendo de la competencia y estabilidad de los minerales involucrados pueden tardar más o menos en fragmentarse y redondearse la partícula.

Tabla 1.4

Clasificación de los ambientes de depósito

Entorno de depósito	Ambiente
Continental	Fluvial
	Desierto
	Lacustre
	Glacial
Transicional	Deltaico
	Playa/Isla de barrera
	Estuario/Lagunal
Marino	Planicie de marea
	Nerítico (plataforma continental)
	Oceánico (talud y cuenca profunda)

Nota. Tabla modificada de Boggs (2014).

Ambiente Sedimentario de Playa

La playa es uno de los ambientes más dinámicos propenso a sufrir modificaciones debido a los cambios estacionales y su formación está determinada, en mayor parte, por procesos marinos (principalmente el oleaje) y, en menor medida, por el transporte eólico (Boggs, 2014). La composición de los sedimentos en la playa puede llegar a variar, pero principalmente se compone de líticos y biogénicos en diferentes proporciones, determinados por la composición de los sedimentos aportados desde la fuente (Seibold y Berger, 2017). El transporte de sedimento puede darse desde aportes del continente, proveniente de las partes altas y se transporta por medio de los ríos, o desde el océano, que son acarreados por el oleaje (Jain, 2014; Seibold y Berger, 2017). Jain (2014) afirma que el transporte (del sedimento) realizado a lo largo de la playa producido por las olas, presenta el siguiente patrón: las olas entran a la playa en un determinado ángulo, moviendo la arena hacia arriba en la playa (en dirección perpendicular a las crestas de la ola entrante), y retroceden perpendicularmente a la línea de la costa debido a la gravedad, moviendo la arena hacia abajo en la playa en la misma dirección, produciendo un patrón de zigzag (figura 1.2). Los depósitos de las playas actuales se forman en la cara de la playa o en la orilla, que es la zona intermareal (desde el nivel medio de la marea baja hasta el nivel medio de la marea alta, y que corresponde a la zona de oleaje), además de que estos sedimentos están formados principalmente por arena fina y media, aunque también pueden incluir guijarros dispersos y capas de grava (Boggs, 2014).

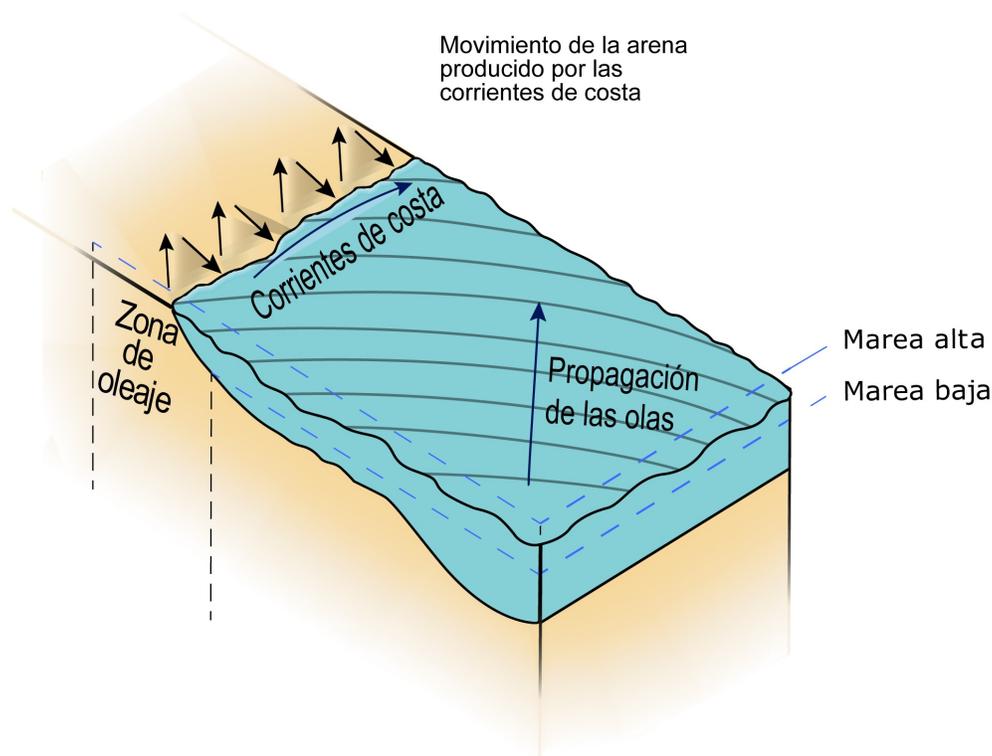
Como afirma Harris en 2020, las partículas de microplásticos comparten algunos atributos importantes de los sedimentos naturales: su transporte y su dispersión en entornos costeros siguen caminos similares (con las partículas más densas y de grano grueso depositadas cerca de la fuente), los plásticos de mayor tamaño en entornos costeros se descomponen rápidamente en partículas más pequeñas a través de la fractura mecánica durante el transporte de carga de fondo, y las partículas más finas y menos densas que permanecen en suspensión se depositan en el lecho marino en entornos de baja energía. Adicional a lo anterior, destaca que los entornos costeros presentan las concentraciones más elevadas de microplásticos, mientras que los entornos de plataforma y de aguas profundas presentan concentraciones más bajas. Y, finalmente, del total de microplásticos que se concentran en las playas, aproximadamente el 90% de las partículas pertenecen a aquellas que presentan forma de fibra.

Corrientes oceánicas

Las corrientes oceánicas son flujos continuos y dirigidos de agua oceánica que son generadas e influenciadas por diferentes factores, entre los que se encuentran: los vientos superficiales, la distribución y

Figura 1.2

Esquema del movimiento de oleaje en la playa



Nota. Imagen producida con el patrón de movimiento de las olas y la arena de Seibold y Berger, 2017.

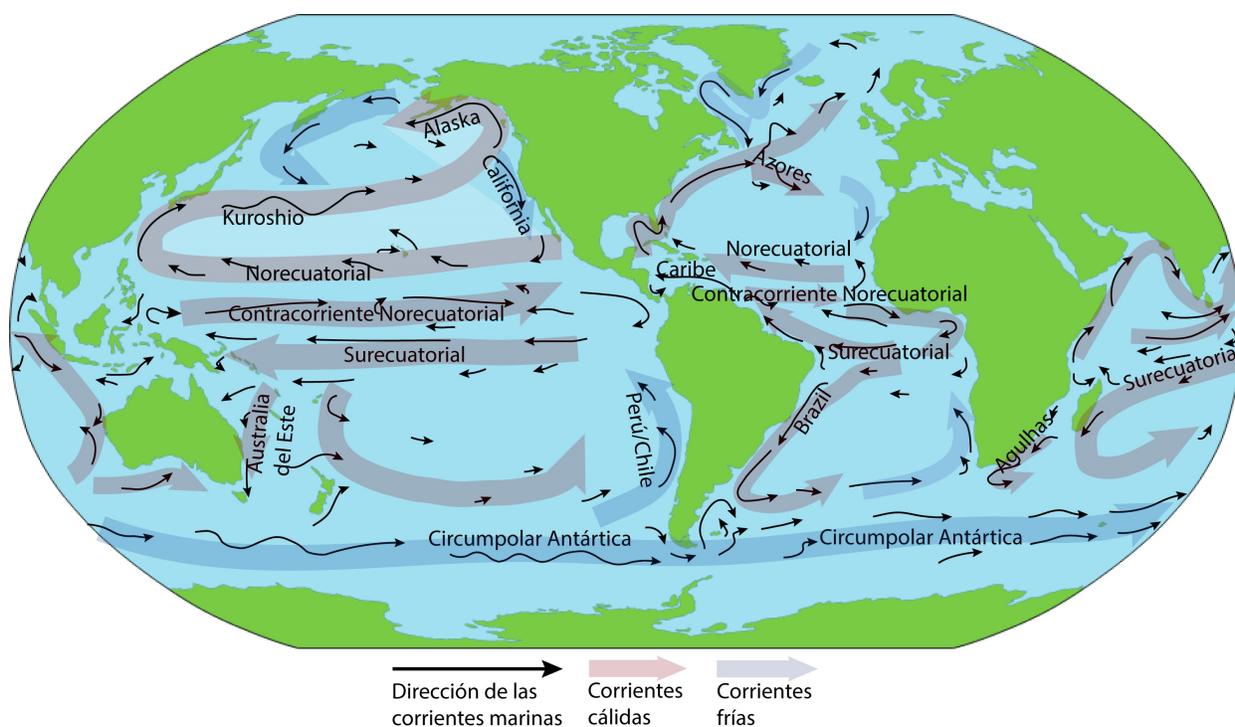
morfología de los continentes en la Tierra, el efecto Coriolis, la subida y bajada de las mareas, y la diferencia de densidades (provocada por variaciones de temperatura —termo— y salinidad —halina—, circulación termohalina) (Douglas, 2012; Jain, 2014; NOAA, Ocean Exploration, 2021, s.f.-a; Trujillo & Thurman, 2011).

Las corrientes superficiales se desarrollan a partir de la fricción entre el océano y el viento que sopla a través de su superficie, siguen de cerca el patrón de los principales cinturones de viento del mundo (Trujillo & Thurman, 2011). La distribución y morfología de los continentes influye en la dirección del flujo de las corrientes superficiales, ya que si no hubiera continentes en la Tierra, las corrientes superficiales generalmente seguirían los principales cinturones de viento del mundo (Douglas, 2012; Trujillo & Thurman, 2011). El efecto Coriolis afecta al camino de objetos en movimiento, debido a la rotación de la Tierra, provocando una tendencia a que los principales sistemas de corrientes en el hemisferio norte giren a la derecha, y a la izquierda en el hemisferio sur (Jain, 2014; NOAA, Ocean Exploration, s.f.-b). Las mareas crean corriente en los océanos a lo largo de la costa, siendo más fuerte al estar cerca de la costa, las cuales son causadas por la atracción gravitacional de la Luna y el Sol (Douglas, 2012; NOAA, Ocean Exploration, 2021). La circulación termohalina, impulsada por las diferencias de densidad en el agua, está influenciada por el calentamiento,

enfriamiento y salinización del agua, que produce diferencias de densidad regional dentro del océano (las aguas cálidas fluyen hacia el polo cerca de la superficie y posteriormente se convierte en agua fría que se hunde y fluye hacia el ecuador en el interior), y ocurren a niveles oceánicos profundos y poco profundos, estas corrientes se mueven mucho más lentamente que las corrientes de marea o de superficie (Jain, 2014; NOAA, Ocean Exploration, 2021). En la **figura 1.3** se muestran las principales corrientes superficiales, conducidas por el viento, del mundo.

Figura 1.3

Circulación oceánica en el mundo especificando por donde pasan las corrientes superficiales (cálidas y frías)



Nota. Imagen producida a partir de “Principales sistemas de corrientes oceánicas del mundo”, de Britannica, s.f., Encyclopædia Britannica <https://www.britannica.com/science/ocean-current#ref301646> y de “¿Cómo afecta el océano al clima y al tiempo en tierra?”, de NOAA, Ocean Exploration, s.f.-a, National Oceanic and Atmospheric Administration, Ocean Exploration <https://oceanexplorer.noaa.gov/facts/climate.html>.

Las corrientes oceánicas juegan un papel importante en la contaminación por plásticos en las costas y océanos. De acuerdo a su densidad y tamaño, al ingresar al océano, los plásticos pueden ser susceptibles al transporte por las corrientes marinas superficiales, por las profundas o pueden encontrarse en la columna de agua; además, las corrientes oceánicas facilitan la abrasión mecánica en objetos de plástico relativamente grandes provocando su fragmentación en pedazos más pequeños (Sheppard, 2019).

Plásticos

Los plásticos surgieron y se popularizaron por sus características especiales, tales como su durabilidad, flexibilidad, algunos con resistencia eléctrica y térmica. Estas cualidades los hicieron idóneas para prácticamente cualquier industria que los quisiera usar; un ejemplo es la industria automotriz donde hubo una sustitución de acero por plástico en la construcción de los automóviles para disminuir su peso y con ello la disminución en el consumo de combustibles. El uso de los plásticos fue creciendo con el tiempo, pero poco se sabía de lo que podía pasar si se les daba un uso desmedido, acompañado de la ausencia de la recolección y reciclaje de estos. Para entender la evolución de los plásticos, desde la creación de los primeros materiales plásticos, pasando por su proliferación de éstos en diferentes industrias, y hasta la creciente preocupación por la contaminación de los plásticos, se revisará la historia de los plásticos, culminando con resultados de algunos estudios referentes a la contaminación de microplásticos y su impacto en el ambiente a nivel mundial y en México, no sin antes profundizar en la clasificación de los plásticos.

Clasificación de los Plásticos

Aunque a veces se llegue a utilizar el término *plástico* y *polímero* como sinónimo, esto no es del todo correcto, ya que todos los plásticos son polímeros pero no todos los polímeros son plásticos; un ejemplo de polímero que no es plástico es nuestro ADN que es un polisacárido compuesto de muchas unidades de azúcar repetitivas (monosacáridos) (Crawford y Quinn, 2017; Góngora Pérez, 2014; Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, 2004; Painter y Coleman, 2008; Plastics Europe, 2020; Science Advice for Policy by European Academies —SAPEA—, 2019; United Nations Environment Programme —UNEP—, 2015). Algunos ejemplos de polímeros naturales comunes y los usos que se le pueden dar, citando a UNEP (2015), son:

- La quitina, proveniente de los exoesqueleto de crustáceos e insectos o de las paredes celulares de hongos, puede tener un uso médico, biomédico (celosías para tejidos en crecimiento) y en la agricultura.
- La lignina, obtenida desde las paredes celulares de las plantas, es usada en papel de periódico o en uso industrial (como dispersante, aditivo y materia prima).
- La celulosa tiene una ocurrencia natural en paredes celulares de plantas, muchas algas y las secreciones de algunas bacterias, comúnmente es usada en papel, celofán y rayón o como combustible (conversión en etanol celulósico).
- El poliéster, de la cutina en las cutículas de las plantas.

- La fibra proteica, como lo son la fibroína y la queratina, se encuentra en la lana y seda; el uso que tiene es en la ropa.

Los plásticos son un conjunto de materiales que están compuestos por polímeros que, junto a sus aditivos (plastificantes, colorantes, protección UV, antioxidantes, retardantes de llama, etc), los hacen únicos y versátiles para cualquier uso (Beltrán, 2011; Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, 2004; Plastics Europe, 2020; SAPEA, 2019; UNEP, 2015). Los polímeros son compuestos orgánicos conformados por grandes cadenas¹ (macromoléculas), y éstas últimas, a su vez, están conformadas por la repetición de moléculas individuales (monómeros), a base de carbono, que se encuentran interconectadas entre sí en forma secuencial (Crawford & Quinn, 2017; Góngora Pérez, 2014; Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, 2004; UNEP, 2015). Al proceso que se realiza para formar los polímeros, la unión de monómeros, se le conoce como *polimerización*; si en la cadena los monómeros son los mismos, se le llama *homopolímero*, en cambio, si se presenta una alternancia de diferentes monómeros se le nombra *copolímero* (Crawford & Quinn, 2017).

La clasificación de los plásticos puede variar de acuerdo a la fuente que se consulte, pero principalmente se tienen dos familias de polímeros en los que se les puede englobar: termoplásticos y termoestables (Recalde et al. 2019), esta clasificación corresponde a la presentada por Plastics Europe (2020). Los termoplásticos son la familia de plásticos que pueden fundirse al calentarse y endurecerse al enfriarse; estas características son reversibles, pues pueden recalentarse, remodelarse y enfriarse repetidamente. Por otro lado, los termoestables son aquellos que sufren un cambio químico al calentarse, una vez calentados y formados, estos plásticos no pueden volver a fundirse y reformarse. En la **tabla 1.5** se muestran ejemplos de plásticos pertenecientes a ambas familia.

Como plantea Kibria et al. en 2022, los polímeros sintéticos suelen fabricarse a partir de combustibles fósiles, pero cada vez se utiliza más la biomasa (por ejemplo, el maíz o los aceites vegetales); una vez sintetizado el polímero, las propiedades del material serán las mismas, sin importar el tipo de materia prima utilizada. A los plásticos derivados de biomasa se le conoce también como *plásticos de base biológica*, y la biomasa corresponde a residuos orgánicos o los cultivos cultivados específicamente para este fin. Una de las desventajas que presentan los autores, de este tipo de polímeros, es la diferencia de costos en la producción comparándolo con aquellos basados en combustibles fósiles, siendo, generalmente, los plásticos de base biológica los más costosos. Ejemplos de los plásticos de base biológica se encuentran en la **tabla 1.6**.

Si bien se pudiera pensar que los plásticos de base biológica son biodegradables, esto no es del todo

¹Se encuentran, generalmente, entre 10,000 y 100,000,000 monómeros por cadena en plásticos comerciales (Crawford & Quinn, 2017).

Tabla 1.5

Ejemplos de plásticos pertenecientes a los grupos: termoplásticos y termoestable

Termoplásticos	Termoestables
Poliétileno (PE)	Poliuretano (PU)
Polipropileno (PP)	Poliésteres insaturados
Cloruro de polivinilo (PVC)	Resinas epoxi
Tereftalato de polietileno (PET)	Resinas de melamina
Poliestireno (PS)	Ésteres de vinilo
Poliestireno expandido (EPS)	Silicona
Resina de acrilonitrilo butadieno estireno (ABS)	Resinas de fenol-formaldehído (PF)
Copolímero de estireno-acrilonitrilo (SAN)	Resinas de urea-formaldehído (UF)
Poliamidas (PA)	Resinas fenólicas
Policarbonato (PC)	Resinas acrílicas, etc.
Polimetacrilato de metilo (PMMA)	
Elastómeros termoplásticos (TPE)	
Poliarisulfona (PSU)	
Fluoropolímeros	
Polieteretercetona (PEEK)	
Polioximetileno (POM)	
Tereftalato de polibutileno (PBT)	
Alcohol etil vinil (EVOH), etc.	

Nota. Tabla creada con la información presentada por *Group of Experts on the Scientific Aspects of Marine Environmental Protection* (GESAMP), 2015, y *Plastics Europe*, 2020.

Tabla 1.6

Ejemplos de plásticos de base biológica

Polímero	Derivación	Aplicaciones
Celofán	Celulosa (madera, algodón, cáñamo)	Hojas - embalaje Capa base para cinta adhesiva Tubos de diálisis (Visking)
Quitosano	Quitina	Ingeniería de tejidos Cicatrización de heridas Entrega de medicamentos
Rayón	Celulosa (pulpa de madera)	Hilos - ropa

Nota. Tabla traducida de UNEP, 2015.

cierto, esto es porque no todos los plásticos de esta categoría cumplen con las características necesarias para serlo, y, por otro lado, hay algunos polímeros derivados de combustibles fósiles que pueden ser biodegradables. Para que los plásticos sean biodegradable, deben ser capaces de descomponerse parcial o totalmente, convirtiéndose en agua, CO₂, energía y nueva biomasa por la acción de microorganismos (bacterias y hongos) (Crawford & Quinn, 2017; Gibbens, 2018; UNEP, 2015).

Respecto a la clasificación que se le puede dar a los plásticos por su tamaño, no hay definiciones estándares para los límites y nombres que pueden recibir (variando de acuerdo a la fuente consultada),

llegando a aparecer términos como: nanoplásticos, microplásticos, mesoplásticos y macropásticos (Hartmann et al. 2019; Wainkwa Chia et al. 2021). Al enfocarse el presente trabajo en los microplásticos, se tomará la clasificación dada por NOAA (2015). Esta clasificación engloba, dentro de los microplásticos, a las partículas pequeñas de plástico con tamaños menores a 5.0 mm (siendo éste límite superior uno de los más repetidos en las diferentes clasificaciones). Los microplásticos, a su vez, se pueden clasificar en primarios o secundarios, basándose en su morfología/apariencia, la cual nos permite interpretar si las partículas fueron fabricadas originalmente para ser de ese tamaño (primario) o si han resultado de la descomposición de artículos más grandes (secundario) (GESAMP, 2015; Kibria et al. 2022). Los caminos que pueden seguir los polímeros de diferentes materias primas para ser microplásticos se muestran en la **figura 1.4**, creada originalmente por GESAMP, 2015 (p. 16).

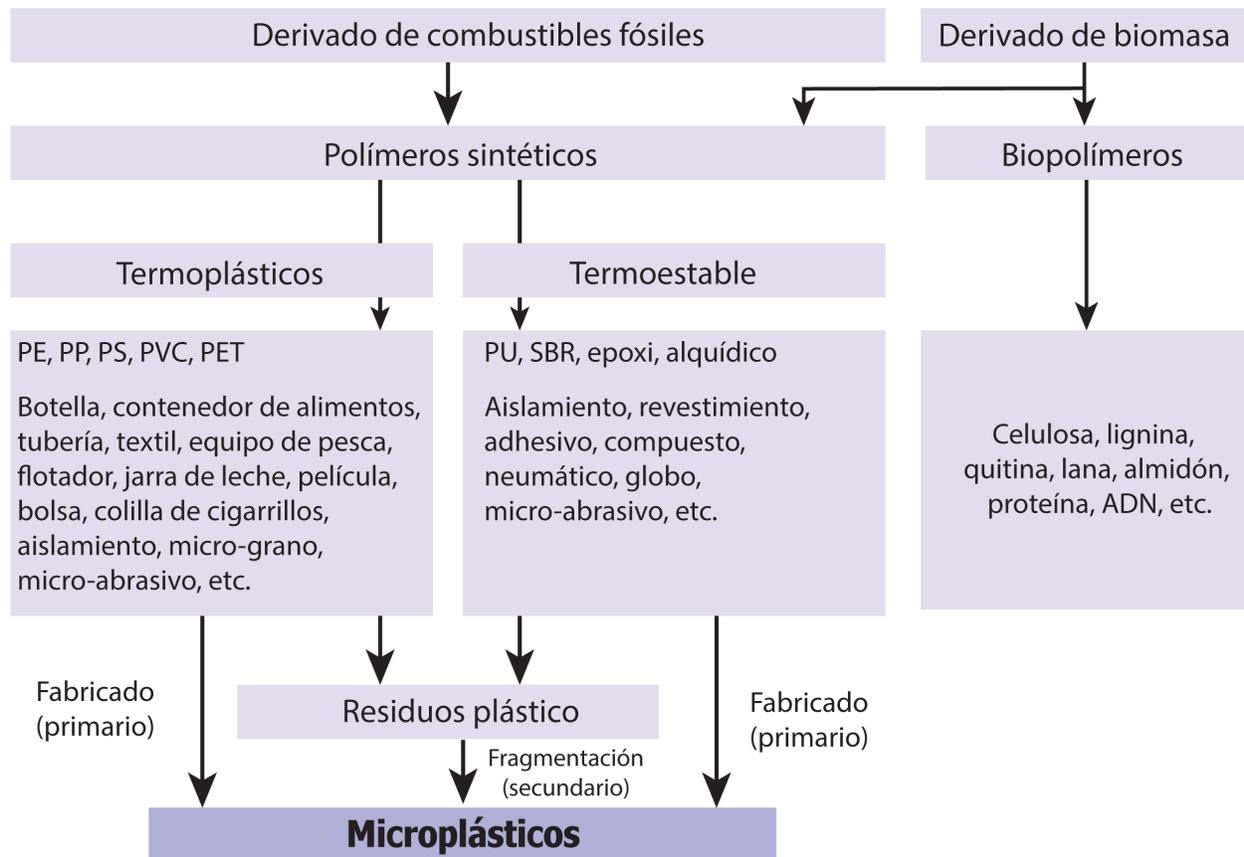
Los microplásticos primarios fueron fabricados específicamente en esas dimensiones para llevar a cabo una función específica, entre los que se incluyen partículas de polietileno (PE), polipropileno (PP) y poliestireno (PS), las cuales se encuentran en productos cosméticos y médicos. Mientras que los microplásticos secundarios se producen por el desgaste o fragmentación de objetos más grandes, tanto durante el uso como después de haberse introducido al medio ambiente; algunos ejemplos de estos microplásticos son las fibras (hechas principalmente de poliéster, acrílico y poliamida), erosión y fragmentación de artículos de basura más grandes, fragmentos (bolsas de plástico, botellas, neumáticos de coche) y películas (Akdogan & Guven, 2019; Kibria et al. 2022; SAPEA, 2019; UNEP, 2021). Los microplásticos que llegan al medio ambiente tienen diferentes fuentes, tal como los destaca Akdogan y Guven (2019), y caminos de recorrido, como lo afirma Bank y Hansson (2022). La escorrentía superficial de carreteras (transporta partículas de desgaste de neumáticos y carreteras), tierras agrícolas y áreas urbanas, es una fuente significativa de carga microplástica a las aguas superficiales; y las posibles fuentes de microplásticos en el aire incluyen fibras sintéticas de ropa y casas, césped artificial, rellenos sanitarios e incineración de desechos. Los caminos que pueden seguir los microplásticos son los siguientes: movimiento de microplásticos de las zonas urbanas a los ríos y lagos, la escorrentía de los ríos y su transporte al mar, así como la dispersión marina de microplásticos a través de las cuencas oceánicas y las capas oceánicas profundas.

Historia de los Plásticos

El primer atisbo de nuestro camino como sociedad hacia la producción de plásticos comienza con las civilizaciones mesoamericanas, de las cuales se tiene registro del aprovechamiento que le dieron al látex (savia

Figura 1.4

Esquema ilustrativo relacionando la fuente de materia prima de los polímeros con sus aplicaciones y los microplásticos



Nota. De acuerdo con lo afirmado por GESAMP (2015) los biopolímeros naturales pueden estar presentes en los océanos, ya que estos son menos preocupantes porque son generalmente biodegradables y son menos hidrofóbicos en comparación con los plásticos sintéticos. Esquema traducido de *Polymers and plastics - terminology and definitions* (p. 9), de UNEP, 2015.

del árbol de hule o caucho²) y de la utilización de un procedimiento similar a la vulcanización para realizar artefactos de hule (Crawford & Quinn, 2017; INAH, 2008; Latisnere-Barragán, s.f.). Desde las civilizaciones mesoamericanas, con la creación de objetos de hule, hasta las últimas cuatro décadas de la actualidad, con una creciente concientización por la acumulación de desechos plásticos en el medio ambiente y la búsqueda de soluciones a este problema creciente (provocando con ésto el desarrollo e introducción de plásticos biodegradables y de base biológica), se puede realizar una línea del tiempo en el que se divida la historia

²El caucho y hule se obtienen al procesar la savia de ciertos tipos de árboles pertenecientes a los géneros *Hevea*, *Castilloa*, *Manihot*, *Ficus* y *Landolphia* (Pulido-Sierra et al. 2012). La diferencia del caucho y el hule se relaciona a un tema regional: el término hule, proveniente de la palabra *olli* («Gran Diccionario Náhuatl», 2012), se utilizaba en la zona de México y Centroamérica; mientras que el caucho, término proveniente de la palabra *cautchuc*, era utilizado en la zona de Sudamérica (INAH, 2008; Latisnere-Barragán, s.f.; Pulido-Sierra et al. 2012).

de los plásticos en diferentes etapas de acuerdo a las sustancias dominantes de la época: la primera etapa corresponde a la utilización del caucho natural, que comprende desde el aprovechamiento del látex hasta el surgimiento del proceso de vulcanización, pasando por la introducción caucho natural, su utilización y la posterior experimentación que se realizaría en él; la segunda etapa abarca la época donde predominaron los celuloideos, comenzando con su predecesor, la Parkesina, y terminando con el crecimiento en la producción de artículos hechos con celuloide; y la última etapa se localiza cuando comienza la abundancia de polímeros semisintéticos y sintéticos, que va desde la producción de la Galalita (polímero semisintético) y de la Baquelita (primer material completamente sintético), hasta la actualidad. La síntesis de estas etapas se encuentra en la **figura 1.7**.

CAUCHO NATURAL. El uso y producción del caucho data de 1600 a. C. donde las culturas mesoamericanas lo usaban en la elaboración de pelotas, utilizadas en los juegos de pelota en toda Mesoamérica; también, para la creación de figurillas antropomorfas y de bandas anchas, estas últimas utilizadas en la formación de hachas para la unión de la piedra a su mango de madera (Latisnere-Barragán, *s.f.*; Tarkanian & Hosler, 2000). Los Olmecas fueron la primera cultura que utilizó el hule en su beneficio. Para la obtención del hule los Olmecas perforaban la corteza del árbol de hule (*Castilla Elástica*) recolectando el látex que emanaba de éste, también, se obtenía otro tipo de látex proveniente de una enredadera (*Ipomoea alba*), que contenía sulfuros, para mezclar ambos tipos de látex y, así, obtener un material que podían moldear y el cual mantendría la forma que le dieran (INAH, 2008; Larqué-Saavedra, 2016). Al haber azufre en uno de los látex, puede producirse algo parecido a la vulcanización que conocemos hoy, lo que ocurre es que “los átomos de azufre se entrelazan a las cadenas poliméricas de isoprenos del hule, convirtiendo el látex en un material duro y resistente. Mejorando así su uso y durabilidad” (INAH, 2008, párr. 5). Posteriormente, el explorador francés Charles Marie de la Condamine en 1736, durante una expedición en Sudamérica, se encuentra con el árbol de caucho natural (*Hevea brasiliensis*); ese mismo año llevará muestras de este árbol a Francia para su estudio, y donde surgiría el primer artículo científico del caucho que fue presentado en 1751 pero se terminaría publicando hasta 1755 (Crawford & Quinn, 2017; Latisnere-Barragán, *s.f.*). Mas no sería hasta 1818, cuando Charles Macintosh, James Syme y Thomas Hancock descubrieron que al diluir el caucho en nafta³ se podía aprovechar de diferente manera, que comenzaría la utilización del caucho de forma comercial (Latisnere-Barragán, *s.f.*). Desafortunadamente al utilizar el caucho natural en condiciones de temperatura extremas se estropeaba el material, a temperaturas muy bajas se volvía quebradizo y a temperaturas muy altas se tornaba pegajoso; por lo que Charles Goodyear en 1838, durante uno de sus experimentos dedicados a mejorar las características del caucho natural, mezcló caucho con azufre y como resultado obtuvo una

³La nafta es una sustancia derivada de la destilación del petróleo (Latisnere-Barragán, *s.f.*).

solución con las propiedades de firmeza y flexibilidad deseadas, sin las imperfecciones que presentaba el mismo caucho natural (Latisnere-Barragán, s.f.). Para 1843 se concede la primera patente de vulcanización del caucho natural a Thomas Hancock en Reino Unido, tras varios años de experimentación con caucho natural y azufre, y, únicamente 8 semanas después, en 1844 Charles Goodyear patenta de igual forma el proceso de vulcanización del caucho natural en Estados Unidos (Crawford & Quinn, 2017). Durante los siguientes años Goodyer lograría perfeccionar el proceso de vulcanización, y pasarían alrededor de 18 años hasta la aparición del siguiente material de interés (la Parkesina) (Crawford & Quinn, 2017).

CELULOIDES. En 1862, durante la segunda edición de la Gran Exposición Internacional decenal en el Reino Unido donde se mostraban los últimos avances científicos e ingenieriles de la época, se exhibió una sustancia llamada Parkesina⁴, en honor a su creador Alexander Parkes (Crawford & Quinn, 2017). La Parkesita fue expuesta como un material flexible, a pesar de ser una sustancia dura, podía ser moldeado, tallado y pintado; sus características la hicieron idónea para poder sustituir materiales como el marfil, utilizado en esa época para fabricar, entre otras cosas, bolas de billar (Crawford & Quinn, 2017). *Parkesine Co. Ltd*, formada por Parkes y el fabricante de textiles de caucho Daniel Spill, empieza a producir en masa de la Parkesina para fabricar, principalmente, artículos domésticos (manijas, peinetas y joyas) en 1866; pero en 1867, cuando *Parkesine Co. Ltd* inició la producción y venta de bolas de billar con Parkesina, los estándares prometidos a sus clientes no fueron cumplidos, debido al uso de celulosa de baja calidad y a la inflamabilidad original del material, provocando así su colapso en 1868 (Crawford & Quinn, 2017). Durante el año de 1869 ocurrieron 3 acontecimientos destacables: Spill fundó *Xylonite Company*, tras el colapso de *Parkesine Co. Ltd* el año anterior; el químico francés Paul Schützenberger introdujo el acetato de celulosa⁵ al reaccionar celulosa con anhídrido acético; y, por último, John Wesley Hyatt junto a su hermano Isaiah, en Estados Unidos, inventaron una nueva técnica para la fabricación de bolas de billar que utilizaba alcanfor y nitrocelulosa, basandose en el descubrimiento de la Parkesina (Crawford & Quinn, 2017). En 1870, durante una escasez de placas dentales de caucho causada por la incapacidad de satisfacer la gran demanda de caucho natural, los hermanos Hyatt comenzaron a producir placas dentales a base de nitrocelulosa tras formar *Albany Dental Plate Company* ese mismo año; dos años después cambiarían el nombre de su compañía por *Celluloid Manufacturing Company*, donde terminaría por llamarle celuloide a su material (Crawford & Quinn, 2017; Latisnere-Barragán, s.f.). Spill, posterior al colapso de *Xylonite Company* (1874) y a su trasladado hacia las nuevas instalaciones, formaría otra compañía que se convertiría, a partir de 1875, en *British Xylonite Company*, al asociarse con

⁴La Parkesina fue creada por la combinación de aceite vegetal o alcanfor (plastificante), piroxilina (nitrocelulosa con menos grupos nitro —NO₂—) y nitrobenzol o analina (disolvente) (Crawford & Quinn, 2017).

⁵El acetato de celulosa sería usado tiempo después en la producción de películas para la industria cinematográfica, además de usarse para producir fibras (Crawford & Quinn, 2017).

tres empresarios: Alexander MacKay, Ernest Leigh Bennet y Herbert Leigh Bennet (Crawford & Quinn, 2017). *British Xylonite Company* vendía productos (como manijas, adornos y joyas) elaborados con un material de mejor calidad que el usado en *Parkesine Co. Ltd*, ya que usaría una modificación propia de la Parkesine llamada Xilonita (Crawford & Quinn, 2017). Los hermanos Hyatt expandieron su negocio fuera de Estados Unidos en 1885, y decidieron asociarse con la empresa francesa *Compagnie Française du Celluloïd* para la producción y venta de cuellos y puños de celuloide en Francia; después, se asociaron con *British Xylonite Company* para introducir sus productos al Reino Unido, haciendo prosperar a ésta última debido a la popularidad que tuvieron estos productos en la clase media británica (Crawford & Quinn, 2017). Ya para 1898 *British Xylonite Company* había prosperado y expandido de forma rápida, provocando así un aumento en su catálogo de artículos domésticos cotidianos y un cambio de nombre, llamándose ahora *BX Plastics*, además la compañía continuaría con la producción y venta de sus artículos por los siguientes 100 años (Crawford & Quinn, 2017). Posterior al gran éxito que tuvieron los productos fabricados con celuloide, fueron descubiertos diferentes materiales de gran valor en la historia de los plásticos, comenzando con los plásticos de caseína; este tipo de plásticos deben su nombre a la proteína que se encuentra principalmente en la leche de vaca, la caseína, ya que son producidos a partir de ésta proteína (Crawford & Quinn, 2017).

PLÁSTICOS SEMISINTÉTICOS Y SINTÉTICOS. El inventor alemán Wilhelm Kricheldorf y el químico alemán Adolf Spitteler descubrieron, al juntar leche con formaldehído, al plástico de caseína en 1899, y el cuál patentarían, ese mismo año; el plástico de caseína sería comercializado bajo el nombre de Galalita y se produciría principalmente para la industria de botones (Crawford & Quinn, 2017). Los plásticos de caseína son considerados polímeros semisintéticos, pero sería hasta 1907, con la creación de la Baquelita⁶ por el químico belga Leo Hendrick Baekeland que se crearía un polímero completamente sintético y comercial (Crawford & Quinn, 2017; Painter & Coleman, 2008). En los años siguientes algunas empresas se dedicaron a fabricar los plásticos de caseína, pero hubo un polímero importante que se creó en diferentes años hasta llegar a las condiciones deseadas de flexibilidad, el cloruro de polivinilo o PVC (Crawford & Quinn, 2017).

El primer acercamiento que hubo a este polímero fue en 1835 cuando el químico y físico francés Henri Victor Regnault creó por primera vez el monómero cloruro de vinilo; pasarían 77 años (1912) hasta que se pudiera realizar la polimerización de este monómero, y sería realizado el mismo año por dos personas diferentes: el químico alemán Fritz Klatte y el químico orgánico ruso Ivan Ostromislensky; después, en 1926, el inventor estadounidense Waldo Lonsbury Semon, basándose en los descubrimientos que realizaron Klatte y Ostromislensky, pudo hacer un PVC más flexible y maleable al añadirle el plastificante fosforo de

⁶Plástico termoestable reticulado denominado anhídrido de polioxibencilmetilenglicol (Crawford & Quinn, 2017).

triclesilo (plastificante) (Crawford & Quinn, 2017; Fenollar Gimeno, 2011). Con el surgimiento PVC comenzó la industria del vinilo, y, debido a las características de estos materiales, lograron usarse como sustituto del caucho en esa época (Crawford & Quinn, 2017). Sin embargo, esto no sucedería hasta después del año 1928, cuando fue posible hacer uso de las ventajas de los copolímeros en la fabricación el PVC (Crawford & Quinn, 2017). Para su fabricación era necesario calentar a una temperatura alta la sustancia (160°C), el problema radicaba en que la temperatura máxima a la que se podía calentar la sustancia era de 20°C mayor (180°) a la necesaria para darle su flexibilidad al PVC; la solución llegó cuando se pudo bajar la temperatura necesaria para darle la flexibilidad al polímero, al añadirle otros tipos de monómeros y hacer un polímero compuesto por diferentes monómeros (copolímeros), y con ésta aumentó en gran nivel la producción del PVC, en países como Estados Unidos y Alemania (Crawford & Quinn, 2017).

Otro polímero que surgió por esa época fue el poliformaldehído (POM), en 1920 el químico alemán Hermann Staudinger y sus colegas lograron realizar la polimerización del formaldehído líquido al almacenarlo durante 24 horas a -80°C de tempera; aunque Staudinger logró hacer algunas películas y fibras con el POM formado, por su inestabilidad térmica no logró ser un material comercial para la época (Crawford & Quinn, 2017). También, ese mismo año Staudinger propuso, lo que sería más adelante las bases teóricas de la química de polímeros, el término macromolécula y la estructura de los polímeros (grandes cadenas —macromoléculas— de unidades pequeñas —monómeros— repetidas y unidas por enlaces covalentes) (Cauich Rodríguez, s.f.; Crawford & Quinn, 2017; Mijangos, 2020). En 1925 se comienza a trabajar en la polimerización del acetileno por parte del químico belga Julius Nieuwland, después, se le uniría el químico estadounidense Elmer Keizer Bolton para corregir la explosividad que presentaba el polímero formado al ser impactada; Nieuwland y Bolton lograrían solucionar el problema de explosividad pero surgiría otra inconveniencia, el polímero se desintegraba con la luz del sol (Crawford & Quinn, 2017). Ese mismo año el microbiólogo francés Maurice Lemoigne descubre la presencia del polímero biodegradable polihidroxibutirato (PHB) en el citoplasma de la bacteria *Bacillus megaterium* (Crawford & Quinn, 2017). El conglomerado estadounidense DuPont tendrá un papel importante los siguientes años para el desarrollo de nuevos polímeros. En 1928 un grupo pequeño de químicos orgánicos de la Estación Experimental de DuPont, a cargo del químico estadounidense Wallace Hume Carothers, comienza a trabajar en poliésteres; dos años después, Elmer Keizer Bolton comienza a trabajar en DuPont como director de investigación y cambia el enfoque de investigación previo para enfocarse en la polimerización del acetileno (Crawford & Quinn, 2017). Arnold Collins, perteneciente al grupo de investigación de Carothers, hizo un hallazgo, ese mismo año (1930), al obtener cloropreno mediante la reacción del gas de cloruro de hidrógeno y monovinil acetileno, y, al dejar reposarlo, se realizó la polimerización del cloropreno formando policloropreno, un material sólido; este po-

límero presentaba propiedades de elasticidad y rebotaba al ser arrojada hacia una superficie, y, por estas características, DuPont lo llamaría como caucho sintético dupreno pero más tarde se terminaría llamando neopreno (1937) y se convertiría en el material predilecto para la fabricación de trajes de buzo (Crawford & Quinn, 2017). Además de Arnold Collins, otro investigador, Julian Hill crea un polímero de poliéster con el que pudo hacer fibras delgadas y flexibles, aunque no fue posible comercializarlas, descubrió el proceso de estirado en frío y, en consecuencia, sentó las bases para la síntesis de fibras de nailon en años posteriores (Crawford & Quinn, 2017).

IG Farben, una empresa alemana, produjo comercialmente por primera vez el poliestireno en 1930, también, se sintetizó por primera vez el poliácridonitrilo (PAN) pero fue imposible seguir trabajando con este polímero ya que no encontraban la manera de disolverlos, los responsables de esta sintetización fueron los químicos alemanes Hans Fikentscher y Claus Heuck; sería hasta 1932 cuando el químico alemán Herbert Rein logra disolver al PAN en cloruro de bencilpiridinio (Crawford & Quinn, 2017). Regresando al año 1930, William Chalmers, un estudiante de investigación de posgrado en la Universidad McGill en Montreal (Canadá), logra realizar —mediante polimerización— el polimetacrilato de metilo (PMMA); ya para el siguiente año, las empresas Imperial Chemical Industries (ICI) en el Reino Unido y Röhm and Haas en Alemania comienzan a trabajar en el polímero creado por Chalmers en 1931, la primera se enfocaría en fabricar artículos moldeados del polímero, lo lograrían en 1934 al producir polvo de moldeo PMMA (Diakon) y láminas de PMMA (Perspex), y la segunda buscaría utilizar el polímero como sustituto del vidrio, lo lograrían en 1933 gracias a la elaboración de láminas del polimetacrilato de metilo (Plexiglas en Alemania y Oroglass en Estados Unidos) obtenido por los químicos alemanes Otto Röhm y Walter Baur (Crawford & Quinn, 2017). En 1932 fue creado el ácido poliláctico (PLA) por el químico escocés John William Crawford, y un año después, desarrolla la forma de sintetizar al PMMA de forma más económica, para que, así, logre ser producido de forma comercial a gran escala por parte de ICI; ese mismo año, 1933, surge el polietileno (PE), resultado de una investigación realizada por el químico orgánico británico Eric Fawcett y el químico físico británico Reginald Gibson (British Plastics Federation, 2014; Crawford & Quinn, 2017). Al siguiente año, 1934, el equipo de investigación de DuPont, a cargo de Carothers, crean al policaprolactona (PCL); ese mismo año, pero ahora en la empresa IG Farben, los químicos alemanes Fritz Schloffer y Otto Scherer realizan una investigación en la que reportaron la síntesis de policlorotrifluoroetileno (PCTFE) —el cual sería posteriormente comercializado por la empresa Hoechst AG—, policlorodifluoroetileno y polibromotrifluoroetileno, además de estudiarla formación de politetrafluoroetileno (PTFE), al realizar la polimerización de tetrafluoroetileno (TFE), pero fue inviable su producción debido a sus características (insoluble, inerte y repelente) (Crawford & Quinn, 2017). Para 1935, Wallace Carothers y su equipo de químicos dedicados a

la experimentación (usando aminas para la creación de fibras de poliamidas en lugar de poliésteres —como anteriormente lo hicieron—) en DuPont logran crear (al reaccionar ácido adípico con hexametildiamina) el nailon y producir, mediante el proceso de estiramiento en frío desarrollado por Hill (en 1930), fibras de nailon que serán comercializadas y su demanda se incrementaría durante la Segunda Guerra Mundial (British Plastics Federation, 2014; Crawford & Quinn, 2017; Latisnere-Barragán, *s.f.*; Science History Institute, 2017). Antes de que comenzara la Segunda Guerra Mundial, en 1937, el químico alemán Otto Bayer y sus colegas, quienes trabajaban en IG Farben, lograron formar el primer poliuretano, un material que se popularizaría mundialmente; además, en 1938 el químico estadounidense Roy Plunkett, mientras se encontraba trabajando en DuPont, descubre el politetrafluoroetileno (PTFE)⁷ y lo patenta en nombre de DuPont y seguirían trabajando en la sustancia para poder comercializarla; también, en 1938, inicia la producción industrial, en Estados Unidos, y surge el primer uso comercial de las fibras de nailon, se usaron como cerdas de cepillo de dientes para sustituir el pelo de jabalí o el de caballo que en ese entonces se usaba (British Plastics Federation, 2014; Crawford & Quinn, 2017; Mijangos, 2020).

Desde el inicio de la Segunda Guerra Mundial, 1939, se tuvo un incremento en el uso de los plásticos, principalmente en la milicia; tal como lo fueron el nailon, para la fabricación de uniformes, paracaídas y cuerdas, y el plexiglás (PMMA), utilizado para hacer las ventanas de los aviones de combate (British Plastics Federation, 2014; Crawford & Quinn, 2017; Latisnere-Barragán, *s.f.*). De acuerdo con Crawford y Quinn (2017), la producción mundial de materiales plásticos había alcanzado aproximadamente 300,000 toneladas al año. Además de los plásticos, antes mencionados, que fueron usados por la milicia, durante el desarrollo de la guerra, hubo otros materiales plásticos usados, por ejemplo, el uso de polietileno como aislante eléctrico en cables de los equipos de radar por parte de los británicos, otros polímeros nuevos que surgieron, como ocurrió con el tereftalato de polietileno (PET), y otro que resurgió, el PTFE (British Plastics Federation, 2014; Crawford & Quinn, 2017). El PET fue introducido por John Rex Whinfield y James Tennant Dickson en 1941; a partir del PET pudieron desarrollar la primera fibra de poliéster comercial (Terylene) (British Plastics Federation, 2014; Crawford & Quinn, 2017). El PTFE fue utilizado para el desarrollo de armas nucleares, ya que permitía el manejo de sustancias tóxicas y corrosivas por su resistencia a los ácidos, y para invisibilizar los proyectiles de proximidad, que se detonaban al pasar cerca del objetivo, de los radares (radar Doppler), esto debido a su característica de ser un aislante eléctrico; por otro lado, para 1943, DuPont, quienes tenían la patente del PTFE, comienzan la producción del polímero, en una planta piloto, para comercializarlo como “Teflón” (British Plastics Federation, 2014; Crawford & Quinn, 2017; Gorzelnik, *s.f.*). La guerra también facilitó la producción de polímeros fuera de sus países originarios, tal es el caso del

⁷Descubierto anteriormente en 1934 en Alemania por Fritz Schloffer y Otto Scherer (Crawford & Quinn, 2017)

polietileno, los británicos proporcionaron su método de fabricación del polietileno a los estadounidenses para poder satisfacer la gran demanda que había de este polímero (Crawford & Quinn, 2017). Como resultado de las investigaciones realizadas durante el desarrollo de la Segunda Guerra Mundial, cuando se buscaba la creación de un material a prueba de balas, se crea el acrilonitrilo butadieno estireno (ABS), termoplástico resistente al impacto, por el químico estadounidense Lawrence Daly, quien terminaría patentándolo en 1946 (Crawford & Quinn, 2017).

En los años cuarenta, posterior a la guerra, comenzó un aumento en el uso de productos plásticos de forma comercial; en Estados Unidos se introduce por primera vez envases de alimentos herméticos “Tupperware”, fabricado con polietileno de baja densidad (LDPE), por el inventor Earl Silas Tupper; de igual forma, Monsanto comienza la comercialización de un antitranspirante empaquetado en una botella de plástico, el cual fue desarrollado por el inventor Jules Montenier (British Plastics Federation, 2014; Crawford & Quinn, 2017; Geyer et al. 2017; Latisnere-Barragán, s.f.). Debido a la aceptación que tuvieron estos productos, comenzó un aumento en la utilización de botellas y contenedores de plástico comenzando, así, a sustituir los materiales de fabricación predeterminados (acero, madera, papel y vidrio) (Crawford & Quinn, 2017; Latisnere-Barragán, s.f.). Ya para 1948 el PVC se podía encontrar en diferentes variedades, como emulsión, suspensión y pasta, que lo hacían óptimo para ser utilizado como aislante eléctrico, impermeabilizante y tapicería; aparte de los usos en la construcción, el PVC se utilizó para la fabricación de los discos de larga duración (LP) de 12” (British Plastics Federation, 2014; Crawford & Quinn, 2017). Ese mismo año, se inventa el velcro por George de Mestral, quien lo terminaría patentando en 1955; y para finales de la década, en 1949, DuPont fabrica por primera vez la “Lycra”, una fibra completamente sintética a base de poliuretano (British Plastics Federation, 2014; Painter & Coleman, 2008).

Aunque el uso de los plásticos de forma comercial comenzó a aumentar para la década de los cuarenta (posterior a la Segunda Guerra Mundial), no sería hasta los cincuenta cuando comenzaría su producción y uso a gran escala, llegando a una producción anual de aproximadamente 2 millones de toneladas (Mt) presentando, así, un aumento cercano a 6.7 veces la producción que había a finales de la década de 1930 y principios de la década de 1940 (Crawford & Quinn, 2017; GESAMP, 2015; Geyer et al. 2017; Wainkwa Chia et al. 2021). En los años 50 aparece por primera vez la bolsa de polietileno; además de la bolsa de polietileno, hubo otros materiales que fueron surgiendo durante la década, tal es el caso del polipropileno cristalino que fue descubierto en 3 ocasiones diferentes en tiempos cercanos; en 1951 los químicos estadounidenses John Paul Hogan y Robert Banks realizaron la primera síntesis de éste, además que en investigaciones posteriores lograrían la síntesis del primer polietileno de alta densidad (HDPE); también, por esas fechas, el químico Alex Zletz logró obtener el polipropileno parcialmente cristalino, mientras trabajaba para la petrolera

estadounidense *Standard Oil*; de igual, en 1952, el químico alemán Karl Waldemar Ziegler al trabajar con el químico italiano Giulio Natta, mientras colaboraba con la compañía química italiana Montecatini, le informó del desarrollo que había hecho anteriormente sobre un catalizador⁸ para polimerizar el etileno a bajas presiones utilizando sales de cromo, titanio o circonio, y, basándose en él, Natta continuaría investigando a los catalizadores y terminaría por formar al polipropileno cristalino y a los catalizadores Ziegler-Natta⁹ (Crawford & Quinn, 2017; Liera Romero, s.f.; Montero Rodríguez & Mejía Barragán, 2018). Para 1953 Ziegler logra sintetizar, por primera vez, el polietileno de ultra alto peso molecular (UHMWPE); el cual poseía cadenas lineales extremadamente largas que alcanzaba un peso molecular de 10 a 100 veces mayor al HDPE; también, resultó ser resistente a productos químicos, con un bajo coeficiente de fricción, comparable al del PTFE, y poseían la mayor resistencia al impacto de cualquier termoplástico conocido en ese momento; además, por sus propiedades, el UHMWPE terminaría siendo usado en los implantes biomédicos (Crawford & Quinn, 2017). Ese mismo año, se logra sintetizar el policarbonato en dos diferentes lugares, con sólo una semana de diferencia; el primero fue en Alemania por el químico alemán Hermann Schnell, mientras se encontraba trabajando en la compañía alemana Bayer; y el siguiente lugar donde logró sintetizarse fue en Estados Unidos por parte del químico estadounidense Daniel Fox, mientras se encontraba trabajando en la empresa estadounidense General Electric Plastics (Crawford & Quinn, 2017). El siguiente año, 1954, la espuma aislante de poliestireno sería introducida por *Dow Chemical Co.*; en 1955 el investigador Jim White descubre fibras de polietileno en el laboratorio de investigación en DuPont (British Plastics Federation, 2014; Crawford & Quinn, 2017; Montero Rodríguez & Mejía Barragán, 2018).

Durante la siguiente mitad de la década de los cincuenta siguieron surgiendo nuevos polímeros y nuevos productos formados con ellos. En 1956 DuPont patenta la síntesis de polioximetileno de alto peso molecular (POM); también, en ese año, Allan Stuart Hay, mientras trabajaba en General Electric Plastics, sintetizó éter de polifenileno (PPE); además de que, casi al mismo tiempo, sale a la venta el Reliant Regal 111 en Reino Unido, el cual sería el primer éxito comercial de los coches con carrocería hecha completamente de plástico reforzado con fibra de vidrio (British Plastics Federation, 2014; Crawford & Quinn, 2017). El PPE (un termoplástico resistente a altas temperaturas) no podía ser procesado para su producción y su resistencia a las altas temperaturas disminuía con el tiempo, para corregir esto se le terminó mezclando con el poliestireno para facilitar su procesamiento y evitar el deterioro de su resistencia térmica (Crawford & Quinn, 2017). Al año siguiente ocurre la reinención del aro “Hula Hoop” por parte del inventor estadounidense Richard Knerr junto a su socio Arthur Melin producen un tubo de plástico circular construido a partir de un

⁸Sustancia usada para acelerar las reacciones químicas(Liera Romero, s.f.)

⁹A raíz de estos descubrimientos, Ziegler y Natta, recibirían el Premio Nobel de Química en 1963 por su trabajo realizado en polímeros (Crawford & Quinn, 2017; Liera Romero, s.f.)

material plástico (“Marlex”, nombre que le dio Phillips Petroleum al polietileno de alta densidad (HDPE) para comercializarlo), en ese momento los aros que había se hacían principalmente con bambú; simultáneamente comienza la producción de polipropileno por Montecatini usando los catalizadores Ziegler-Natta (British Plastics Federation, 2014; Crawford & Quinn, 2017). Ya para finales de los años 50, Lego patenta su forma de unir bloques y produce juguetes de acetato de celulosa (1958) que más tarde sería sustituido por ABS, además, se realiza la primera producción de policarbonatos por Bayer y General Electric, y, finalmente, en 1959 es presentada por Matell la muñeca Barbie en la Feria Internacional del Juguete en Estados Unidos y DuPont patenta la síntesis de un homopolímero polioximetileno (POM) que era termoestable y procesable (British Plastics Federation, 2014; Crawford & Quinn, 2017).

En la década de los sesenta hay un visible aumento en la industria del plástico (Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, 2004), esto se puede ver en la **figura 1.5** donde es apreciable un cambio de pendiente (aumento) en la curva de producción mundial de plásticos cuando llega a la década de 1960, ya que de acuerdo con Latisnere-Barragán (s.f.) se veía a los plásticos como “la elección correcta para sustituir productos naturales” (Historia, párr. 8). A inicios de la década la empresa de neumáticos Goodyear y Rubber Company comenzaron a utilizar mezclas de PVC y polietileno clorosulfonado (CSPE), este último era un caucho sintético desarrollado y producido por DuPont con el nombre de “Hypalon” (British Plastics Federation, 2014; Crawford & Quinn, 2017). Durante los siguientes años siguen las mezclas, el siguiente año la empresa automotriz estadounidense BorgWarner creó las primeras mezclas de acrilonitrilo butadieno estireno (ABS) con poliamida (PA), pero fue en 1962 cuando mezcla el ABS con α -metil estireno-co-acrilonitrilo y logra añadirle resistencia al calor a las propiedades del ABS (alta resistencia al impacto y buenas propiedades moldeables) (Crawford & Quinn, 2017). A la par que BorgWarner logra crear un material ABS resistente al calor, DuPont logra introducir al público en general la Lycra y, así, cambiar la industria textil; también, DuPont lanza al mercado películas y barnices de poliimida, debido a sus propiedades aislantes superiores se realizaría con éste la fabricación de la capa térmica micrometeoróide (TMG) de los trajes espaciales para astronauta (British Plastics Federation, 2014; Crawford & Quinn, 2017). La empresa estadounidense Celanese y la empresa alemana Hoechst AG comienzan a producir un copolímero de POM a base de óxido de metileno con el nombre comercial “Celcon”; estas empresas sólo podían producir el copolímero de POM, ya que DuPont había patentado el homopolímero de POM con anterioridad (Crawford & Quinn, 2017). Crawford y Quinn (2017) aclara que de los plásticos básicos que llegan a ser encontrados en el medio acuático actualmente, ya habían sido sintetizados y fabricados la mayoría para este momento. También menciona que anteriormente los plásticos no eran un buen sustituto para diferentes metales, la razón es que no poseían la resistencia necesaria, pero en 1963 se descubre que al mezclar el plástico con fibras de carbón se incrementa su rigidez

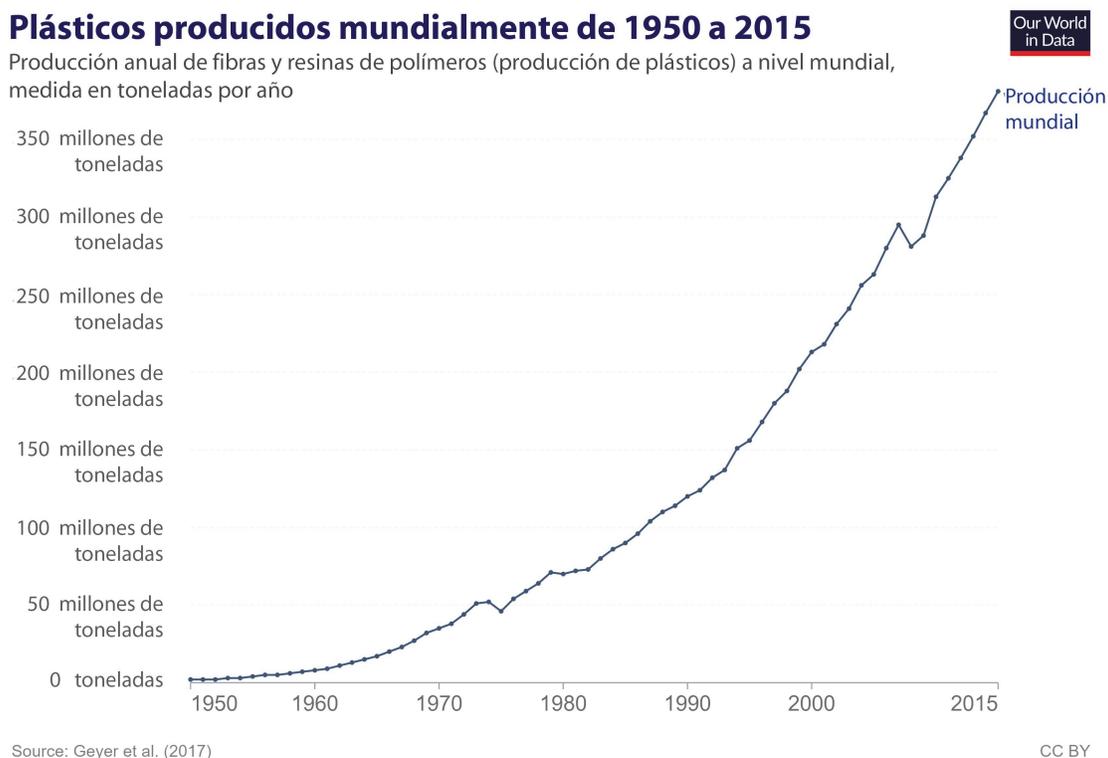
y su resistencia (comparable con algunos metales), a la par de que mantiene su característica de ser una sustancia ligera; esta mezcla fue desarrollada en el Royal Aircraft Establishment, un establecimiento de investigación en Reino Unido.

A mediados de la década de los sesentas (1965), Stephanie Kwolek (química estadounidense), quien trabajaba en DuPont para ese momento, creó una poliamida aromática a prueba de balas (poliparafenileno tereftalamida), la cual sería comercializada con el nombre de “Kevlar” y se utilizaría, primero, en neumáticos y, después, en prendas a prueba de balas y equipos militares (British Plastics Federation, 2014; Crawford & Quinn, 2017). Por el año de 1966, General Electric Plastics introduce al óxido de polifenileno (PPO), un termoplástico de altas temperaturas obtenido al mezclar éter de polifenileno (PPE) y poliestireno, que sería comercializado como “Noryl” y terminaría siendo usado como carcasa de la primera computadora Apple casi diez años después (Crawford & Quinn, 2017). Durante 1968, Crawford y Quinn (2017) apunta que se desarrollaron algunas mezclas de polímeros para mejorar las cualidades de los polímeros, como lo fue la mezcla de caucho butílico con tereftalato de polietileno (PET) y tereftalato de polibutileno (PBT) obteniendo como resultado buenas propiedades mecánicas y alta resistencia al impacto; por otra parte, un año después, es introducida la primera poliamida aromática amorfa por la empresa alemana Dynamit Nobel AG y se le conocería por el nombre de “Trogamid”, debido a sus características (transparencia, alta dureza mecánica, resistencia a productos químicos y a los rayos ultravioleta) fue utilizada, entre otras cosas, para los lentes de sol. También se menciona el desarrollo otro polímero por Wilbert Lee Gore y Robert W. Gore en 1969, el politetrafluoroetileno expandido (ePTFE), el cual era un tejido impermeable y transpirable; terminaría teniendo múltiples aplicaciones, pudiéndose usar en la confección de prendas y calzado para exteriores o hasta en el traje de los astronautas.

Comenzando la década de los setenta, según Crawford y Quinn (2017) y British Plastics Federation (2014), British Gas utiliza el polietileno de alta densidad (HDPE) en los nuevos tubos amarillos para la distribución de gas natural en el Reino Unido (1970), se introduce por primera vez las botellas de PET para bebidas (1973), es diseñado el primer teléfono celular por Martin Cooper (investigador y ejecutivo de Motorola) también en 1973, y la empresa británica ICI comienza a investigar la producción bacteriana eficiente del polihidroxibutirato (PHB —polímero biodegradable—) buscando una alternativa a los polímeros derivados del etileno, debido a un aumento en el precio del etileno durante la crisis mundial del petróleo en 1973. Coincidente con esta crisis mundial, a principios de la década comenzaron a reportarse por primera vez en la literatura científica, pequeños pedazos de plásticos (microplásticos) flotando en el océano (GESAMP, 2015), al igual que acumulaciones importantes en las costas, provocando el comienzo de la investigación sobre los microplásticos en ambientes marinos (Akdogan & Guven, 2019; UNEP, 2021; Xanthos & Walker, 2017);

Figura 1.5

Gráfica de la producción anual de plásticos desde 1950 hasta 2015, medida en toneladas



Nota. Gráfica reproducida y traducida de “Producción mundial de plásticos (millones de toneladas)”, de Ritchie y Roser, 2018, Our world in data <https://ourworldindata.org/plastic-pollution> (How much plastic does the world produce?), basándose en la información proporcionada por Geyer et al. 2017. CC BY 4.0

además de que algunos consumidores comienzan a preferir productos hechos con materiales más naturales (Montero Rodríguez & Mejía Barragán, 2018), provoca la primera caída en la producción de plásticos en el año 1975 (figura 1.5).

Pasando la primera mitad de la década, y la caída en la industria de los plásticos, Crawford y Quinn (2017) y British Plastics Federation (2014) enuncian que (a partir de 1976) la gran variedad de materiales plásticos se comienza a ver como el material más usado en el mundo. Además de que el resto de la década se introdujeron nuevos polímeros como el polieteretercetona (PEEK), sintetizado por la empresa ICI en 1977 y comercializado el siguiente año con el nombre de “Victrex” para su uso en entornos exigentes; una gama de termoplásticos ignífugos sin halógenos llamada “Xyron”, mezclas compuestas de éter de polifenileno modificado (mPPE) con cantidades variables de poliamida (PA), sulfuro de polifenileno (PPS), polipropileno (PP) y poliestireno (PS), desarrollada por la empresa japonesa Asahi Kasei Corporation en 1979 y sería usada posteriormente en el aislamiento de cables eléctricos. Igualmente, en 1977 Union Carbide Corporation (UCC)

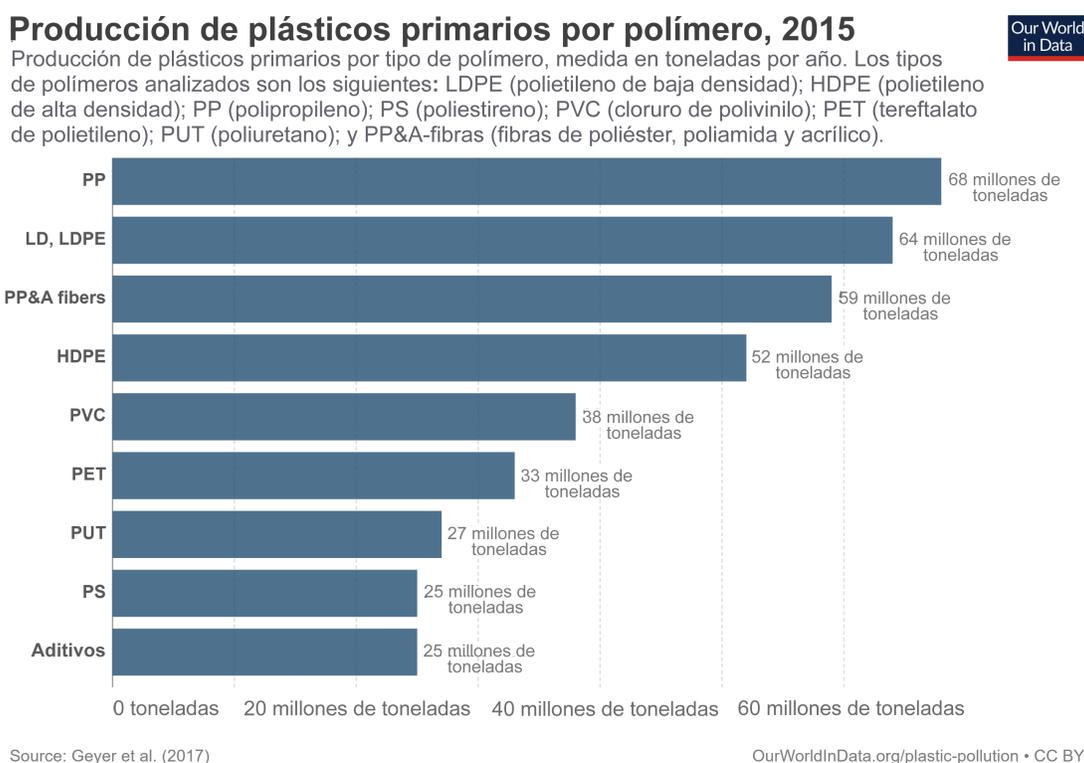
anuncia la formación de un nuevo tipo de polietileno (PE), el polietileno lineal de baja densidad (LLDPE), al modificar un proceso que usaba para la creación del polietileno de alta densidad (HDPE) (European Commission, 1995); pero no sería el único desarrollo que se tuvo del LLDPE, puesto que *Dow Chemical Co.* utilizaría un proceso diferente para la obtención del LLDPE, al igual que la empresa estadounidense Philips Petroleum crea al mismo tiempo dos formas diferentes del LLDPE (Crawford & Quinn, 2017; European Commission, 1995); Abbas-Abadi et al. (2012) afirma que fue durante esta década cuando UCC y *Dow Chemical Co.* comienzan a comercializar el LLDPE, mas no sería hasta el comienzo de la década siguiente cuando el uso del LLDPE empezaría a aumentar hasta llegar a abarcar un tercio del mercado total de los productos de PE a finales de la década de los ochenta (Hutley & Ouederni, 2016).

A comienzos de la siguiente década, en 1980, se lleva a cabo el reemplazamiento del cuerpo de metal por compuestos de fibra de carbón en los autos de carreras en la Fórmula 1, las ventajas que se tuvieron, entre otras, fueron: una mayor ligereza y dureza que el metal, y la descomposición de los compuestos de fibra de carbón en pequeños pedazos durante alguna colisión (provocando que la energía del impacto se disipara lejos del conductor) (Crawford & Quinn, 2017). El mismo año se realiza la primera producción a gran escala de polietileno de baja densidad (LDPE) (Crawford & Quinn, 2017) y del polietileno lineal de baja densidad (LLDPE) (British Plastics Federation, 2014); hasta 2015, el LDPE ocupaba el segundo lugar dentro de los polímeros con mayor producción en el mundo **figura 1.6**, siendo este tipo de polietileno la sustancia principal de la bolsa de plástico (Crawford & Quinn, 2017). También, en 1980, son introducidos los primeros tubos de alta presión azul de HDPE para el suministro de agua potable (Crawford & Quinn, 2017); mientras que en 1982 es implantado el primer corazón artificial, conocido como “Jarvic-7”, hecho de poliuretano (mayormente) y aluminio, comenzando el uso de partes plásticas como reemplazos dentro del cuerpo humano (British Plastics Federation, 2014; Crawford & Quinn, 2017). La empresa alemana BASF AG produce un poliacetileno que duplica la conductividad eléctrica del cobre en el año 1987 (British Plastics Federation, 2014), y, al año siguiente, introduce al polipirrol (PPy), una película con conductividad eléctrica que no se fundía y era resistente a disolventes, con el nombre de “Lutamer P160” (Crawford & Quinn, 2017). Para finales de la década, en 1988, se introducen los símbolos de reciclaje triangulares refiriéndose a los plásticos, y en 1989 son descubiertos los primeros polímeros emisores de luz en Cambridge (British Plastics Federation, 2014; Gilbert, 2017).

Para el comienzo de la década de los noventa, Crawford y Quinn (2017) afirma que ya hay una creciente concientización por la acumulación de deshechos plásticos en el medio ambiente, provocando así una acentuación en el desarrollo e introducción de plásticos biodegradables. En 1990, ICI lanza el primer plástico completamente biodegradable al mercado: el “Biopol” , un copolímero (polihidroxibutirato —PHB—

Figura 1.6

Gráfica de la producción global de plásticos primarios en 2015, medida en toneladas



Nota. El término *plásticos primarios* hace referencia a los plásticos que fueron fabricados desde materiales vírgenes. Gráfica reproducida y traducida de “Producción de plásticos primarios por tipo de polímero”, de Ritchie y Roser, 2018, Our world in data <https://ourworldindata.org/grapher/plastic-production-polymer>, basándose en la información proporcionada por Geyer et al. 2017. CC BY 4.0

y polihidroxivalerato —PHV—) (British Plastics Federation, 2014; Crawford & Quinn, 2017; Gilbert, 2017). La empresa estadounidense Amoco Corporation comienza la primera comercialización del Amodel (poliftalamida —PPA—) en 1991, siendo este material utilizado para reemplazar el metal en aplicaciones automotrices que van entre los rangos de 120-185°C debido a la rigidez que presentaba a altas temperaturas (mayores a las de las poliamidas estándares); en 1996, Monsanto, al adquirir patentes de ICI para la producción del Biopol, comienza a producir PHB a partir de bacterias; la empresa italiana Novamont compra las patentes de Warner-Lamberts, a nivel mundial, en 1997, esto lo llevaría a convertirse en el líder mundial en la fabricación y el suministro de plásticos biodegradables a base de almidón (usados posteriormente para la fabricación de bolsas, macetas, papelería de oficina, envases para alimentos y artículos de higiene); y la producción de poliéster biodegradable (“Eastar Bio”) a gran escala comenzaría en 1998 a cargo de la Compañía Americana Eastman (Crawford & Quinn, 2017). Ese mismo año, tuvo lugar la primera producción comercial del ácido

poliláctico polimérico biodegradable (PLA) con el nombre de “EcoPLA”, producido a partir de recursos naturales como maíz o remolacha azucarera (una subespecie del betabel —*Beta vulgaris* L.—) por la empresa estadounidense Cargill Dow Polymers LLC (Crawford & Quinn, 2017; Hanan Alipi & Mondragón Pichardo, 2009). Para finales de la década, 1999, inicia una creciente preocupación a nivel mundial por la posible toxicidad y los potenciales riesgos a la salud y medio ambiente del di(2-etilhexil)ftalato (DEHP —uno de los plastificantes utilizados en productos de cloruro de polivinilo, PVC—) (Bernard et al. 2014; Crawford & Quinn, 2017; dos Muchangos et al. 2019); este plastificante le daba mayor flexibilidad a los productos de PVC y correspondía al principal plastificante de los productos de PVC desde esta década hasta 2010 (Bernard et al. 2014; Health and Consumer Protection Directorate-General, European Commission, s.f.), y, principalmente, creó controversia el uso de este plastificante en los juguetes y dispositivos médicos de PVC que lo contenían (Bernard et al. 2014; Crawford & Quinn, 2017). dos Muchangos et al. (2019) y Bernard et al. (2014) mencionan la razón por la que hay liberación del DEHP en el medio, y es porque no está unido químicamente los ftalatos al PVC, y Caldwell (2012) nos proporciona las vías por las que se puede dar la exposición humana al DEHP, las cuales son: dérmica, oral, intravenosa y por respiración. Adicional a esta preocupación global por el DEHP, aparecieron una nueva serie de polímeros basados en etileno, propileno y estireno a finales de la década de los noventa (Gilbert, 2017).

Gilbert (2017) afirma que en lo que va del siglo XXI, se han desarrollado nuevos avances en plástico de base biológica, al igual que mejoras en los plásticos ya existentes (respecto a los métodos usados durante su producción, sus características y aditivos usados), además de tener una mayor consideración con los problemas relacionados con la salud, seguridad, sostenibilidad y reciclaje. El término *microplástico* sería acuñado por Thompson Richard Charles en 2004, el cual utilizó para referirse a plástico de tamaño más pequeño (Akanyange et al. 2022; Wainkwa Chia et al. 2021). Crawford y Quinn (2017) menciona eventos importantes relacionados con los plásticos para algunos años del siglo XXI, algunos de estos eventos se citan a continuación. En 2001 Metabolix (empresa estadounidense) adquiere las patentes que tenía Monsanto para la producción de Biopol, pero la diferencia es que comenzarían a investigar una forma de producir el Biopol a partir de plantas modificadas genéticamente; tres años después, Monsanto cambiaría, también, de enfoque respecto a la producción del PHB (polihidroxiбутirato), buscando producir el PHB a partir de plantas genéticamente modificadas; al final, Metabolix fue galardonado en 2005 con el *American Presidential Green Chemistry Challenge Award* por haber logrado el desarrollo, la producción eficiente y la comercialización exitosa de plásticos biodegradables de polihidroxialconato (PHA), incluyendo el PHB. La empresa petroquímica brasileña Braskem declara, en 2007, haber desarrollado un polímero de base biológica al poder obtener etileno a partir de la caña de azúcar brasileña, y, con este etileno, poder fabricar polietileno de alta densidad

(HDPE), al cual se le conocería en esa época como polietileno verde. En 2008 Airbus anunció su nuevo avión (A380) que estaba compuesto un 22 % de polímero reforzado con fibra de carbono (CFRP), comenzando con esto la carrera para construir aviones más ligeros, más fuertes y más eficientes en el consumo de combustible; al siguiente año, 2009, Boeing anuncia que su avión, el 787 Dreamliner, estaba compuesto por CFRP un 50 %, esto porque se había hecho su fuselaje con este material. Los científicos del Centro de Tecnologías Electroquímicas de España informaron en 2013 sobre la creación del primer polímero “autocicatrizante” sin necesidad de que se indujera, de forma externa, la reparación del material; en una demostración, al ser cortado por la mitad, el material logró fusionarse con una eficiencia de reparación del 97 % después de 2 horas, además de que podía ser estirado nuevamente sin presentar rotura. Para el siguiente año, IBM anuncia la creación de dos plásticos termoestables biodegradables (“Hydro” y “Titán”), aunque, generalmente, se considera a los plásticos termoestables irreversible (una vez curado de alguna forma, no es posible reciclarlos o reformarlos), estos plásticos creados son reversibles y se consideran una nueva clase de plásticos termoendurecibles.

Corcoran et al. (2014) documentaría por primera vez, también en 2014, un material endurecido compuesto por la aglutinación de roca y plástico derretido en la playa de Kamilo en Hawái, el “plastiglomerado”. A su vez dividiría en dos tipos diferentes a este nuevo material aglutinado: in situ y clástico. El plastiglomerado de tipo in situ se refiere a cuando se adhiere plástico al afloramiento rocoso, por otro lado, el tipo clástico es asignado a la combinación de roca (basalto en el caso de la playa Kimilo), granos de arena, corales, conchas, y residuos leñosos locales que fueron cementados con una matriz plástica. Por último, Corcoran et al. propone al plastiglomerado como un marcador global horizontal en el Antropoceno¹⁰.

Continuando con lo afirmado por Crawford y Quinn (2017), respecto a la carrera para construir aviones más ligeros, más fuertes y más eficientes en el consumo de combustible, Airbus anunció, en el año 2015, que su avión (A350 XWB) estaba compuesto en un 52 % (fuselaje y estructuras alares) por polímero reforzado con fibra de carbono. Finalmente, en 2016 ya se tenía una gran variedad de plásticos con diferentes propiedades que permitían ser usados prácticamente para cualquier fin; los había a prueba de balas, resistentes a disolventes y gases, y hasta se habían creado plásticos que eran capaces de autorrepararse (llegando a reparar agujeros de hasta 3 cm de diámetro). Otros plásticos que se tuvieron para la época fueron aquellos que eran capaces de conducir electricidad y de “(...) emitir luz bajo estimulaciones eléctricas” (Mora et al. 2011, p.200); estos polímeros conducían la electricidad en forma de diodos¹¹ orgánicos emisores de luz (OLED) (Crawford & Quinn, 2017).

¹⁰Crutzen y Stoermer (2000) propone el inicio del Antropoceno en la última parte del siglo XVIII, cercano al año de invención de la máquina de vapor por James Watt (1784), a partir del cual, de acuerdo los autores, los efectos globales de las actividades humanas se volvieron más visibles. En este periodo de tiempo, se obtuvieron datos, de los núcleos de hielo glacial, que mostraban un crecimiento en las concentraciones atmosféricas de varios gases de efecto invernadero, entre ellos el CO₂ y CH₄.

¹¹componentes electrónicos que permiten “la circulación de corriente entre sus terminales en un determinado sentido, mientras que la bloquea en el sentido contrario” (Schiavon, 2012).

De acuerdo con la información mostrada por Plastics Europe en 2017, 2019, 2020, los plásticos son una parte importante de la transición de Europa (comprendiendo a la Unión Europea y Reino Unido actualmente) desde una economía lineal a una circular y más eficiente. La economía circular y climáticamente neutral de los plásticos es un sistema en el que los plásticos se producen, convierten, utilizan y gestionan de forma sostenible; y así se fomenta el uso de materias primas circulares; se crean productos ecodiseñados para aumentar el contenido reciclado, también se facilita la reutilización y la reparación, al igual que la gestión de los residuos de plásticos para convertirlos en nuevos recursos para reducir el uso de las materias primas fósiles. Finalmente en 2016, la cantidad de residuos plásticos recogidos a través de sistemas oficiales en Europa, para su posterior reciclaje, superó a la cantidad de plásticos depositados en vertederos. Dos años después, en 2018, la Comisión Europea publica *A European Strategy for Plastics in a Circular Economy*, un enfoque de cuatro vertientes para hacer que el reciclaje sea rentable para las empresas, frenar los residuos de plástico, detener la basura en el mar e impulsar la inversión y la innovación; y a su vez Plastics Europe lanzó el programa *Plastics 2030*, siendo éste último un compromiso voluntario de los productores de materias primas para ayudar a aprovechar el potencial de los plásticos en una economía circular, y, entre otras finalidades, se busca la prevención de las fugas de plástico al medio ambiente y convertir los residuos plásticos en nuevos recursos. Pero, a diferencia del panorama favorable por los logros alcanzado en Europa, expuesto por Plastics Europe, SYSTEMIQ (2022) afirma que en 2020 el sistema europeo de plásticos es, aún, efectivamente lineal¹², ya que el 86 % de los residuos plásticos se eliminan, exportan o administran mal, y únicamente el 14 % de los residuos generados se recicla cada año, logrando satisfacer con éstos solamente un 8 % de la demanda de plástico (dadas las pérdidas de proceso y alguna sustitución de materiales no plásticos por plástico reciclado). Y la mayor parte del contenido reciclado se utiliza en aplicaciones plásticas con requisitos técnicos más bajos, como las fibras textiles o la construcción, lo que representa una pérdida de valor inherente. Crawford y Quinn (2017) explica esta pérdida de valor producida por el reciclaje en los plásticos. Un plástico reciclable típico sólo se puede reciclar unas 3 veces, ya que la fusión y remodelación repetida del plástico resulta en propiedades mecánicas disminuidas (pierde su flexibilidad y se vuelve quebradizo, se decolora o se vuelve translúcido -cuando era transparente-). Por último, la producción global de plásticos presentó una disminución en 2020 con respecto al año anterior, pasando de 368 millones en 2019 a 367 millones en 2020 (Plastics Europe, 2021); esta producción no incluye a los plásticos reciclados, a los tereftalato de polietileno (PET), a las poliamidas (PA), ni a las fibras de poliacrilatos.

¹²se analizaron los datos académicos y de la industria sobre los plásticos usados en el empaquetado, artículos para el hogar, construcción y automóvil

Estudios referentes a la contaminación de microplásticos y su impacto en el ambiente

Como se muestra en la historia de los plásticos, desde la década de los setenta (con los primeros reportes científicos sobre pedazos de plástico flotando en el océano) comenzó un aumento en la concientización respecto a la contaminación de desechos plásticos. Además, los avistamientos de estos desechos comenzarían a aumentar, pudiéndose encontrar en diferentes lugares como el aire, los suelos, el agua dulce y potable, los océanos y en productos alimenticios (SAPEA, 2019).

Conforme pasaron los años, comenzaron a aumentar los estudios para cuantificar y cualificar la contaminación de plásticos a nivel mundial, con el propósito de tener una idea clara de las proporciones de esta problemática creciente y entender el impacto de los plásticos en el medio ambiente y en los seres vivos. Usando únicamente la base de datos *Scopus*, los autores Henderson y Green (2020) resaltan un aumento desde 2011 de las publicaciones científicas, incluyendo artículos, revisiones y conferencias, sobre el tema de los microplásticos en general y en los alimentos. No obstante, Rodrigues et al. (2019), al realizar una búsqueda en diferentes sitios (*Scopus*, *ScienceDirect* y *Google Scholar*) desde el año 1975 hasta el 2019, afirman que los estudios referentes al impacto de partículas pequeñas de plásticos en el medio ambiente y la salud humana han ido en aumento desde 2014.

En los 164 estudios reportados por Rodrigues et al. (2019), los polímeros que se encontraron, más comúnmente, fueron el polietileno (PE), polipropileno (PP) y tereftalato de polietileno (PET)¹³, siendo encontrados en estudios en medio marino y sistemas de agua dulce; aunque los autores resaltan una posible subestimación en abundancia de polímeros que tienen alta densidad, al utilizar reactivos de baja densidad (cloruro de sodio). Y en cuanto a las fibras encontradas, principalmente estaban compuestas por poliamida (PA) o nylon y PET.

Akanyange et al. 2022, realizaron otro análisis de la literatura más relevante sobre artículos y estudios revisados por pares, que fueron publicados por organizaciones reconocidas e instituciones científicas que abordan la contaminación microplástica, considerando específicamente las fuentes, características, distribución y abundancia. Los estudios debían de centrarse en la presencia de microplásticos en el medio marino, el suelo y la atmósfera; adicionando aquellos estudios que incluían los alimentos y el agua potable. Sus principales motores de búsqueda utilizados fueron: *Google Scholar*, *ScienceDirect*, *Web of Science* y *PubMed*. Las publicaciones que fueron consideradas, eran aquellas que se escribieron en inglés y que habían sido publicadas antes de septiembre de 2021. El número total de estudios seleccionados fue de 219, siendo 130 los análisis cualitativo y 89 los cuantitativo. Dentro de estos últimos 89 estudios que abordaron el análisis cuantitativo de

¹³Estos polímeros pertenecen a los plásticos más producidos mundialmente [figura 1.6](#)

microplásticos, 31 publicaciones se concentraron en ambientes marinos, 22 estudios en la atmósfera, 11 en el suelo, 13 análisis en el agua potable y 12 en alimentos. Los años en que hubo menor cantidad de publicaciones comprenden desde 1975 hasta 2013, donde en todos los años el número total de publicaciones fue menor a 10, en la mayoría de los años fue incluso menor a cinco. Posterior al 2013, hay una tendencia positiva hasta el 2020, teniendo el año 2021 menor número de publicaciones que los años 2019 y 2020. Akanyange et al. (2022) divide los lugares en donde fueron publicados los estudios por regiones: África, Asia, Australia, Europa, Norteamérica, Sudamérica y Oceanía; la región con más publicaciones corresponde a Europa, seguida por Asia en segundo lugar y Norteamérica en tercer lugar. Dentro de las 31 publicaciones (análisis cuantitativo) que se centraron en ambientes marinos, los tipos de polímeros reportados, siendo el mayor el primero y el menor el último, fueron polietileno (PE), polipropileno (PP), poliestireno (PS), poliéster, poliamida (PA), cloruro de polivinilo (PVC), tereftalato de polietileno (PET), acrílico y, finalmente, rayón. Por último, también en el mismo tipo de publicación, las tres formas con mayor ocurrencia fueron las fibras, los fragmentos y los films.

Se realizó también una búsqueda de literatura científica por parte de Grillo et al. 2022, en la región de Latinoamérica y el Caribe, usando el motor de búsqueda *Google Scholar* en el periodo que comprende de abril a diciembre de 2021. Los autores seleccionaron 193 artículos, disponibles en español o inglés, que evaluaban la concentración de microplásticos en el agua, sedimentos o muestras de biota de ambientes terrestres o acuáticos (marinos, de agua dulce, polares o estuarinos). Los estudios realizados en ambientes terrestres equivalen sólo a un 5.1 % del total de artículos, siendo los menos estudiados, después le siguen los ecosistemas de estuario con un 13.6 % y los de agua dulce en un 18,2 %; por el contrario, los estudios realizados en ambientes marinos representan más de la mitad de los artículos que revisaron, comprendiendo el 63.1 % del total de publicaciones. Finalmente, dentro de los cuatro parámetros más usados en los estudios de microplásticos analizados fueron el número de unidades plásticas, el color, la forma y la composición química de los polímeros.

En cuanto a México, Alvarez-Zeferino et al. (2020) realizaron una investigación en playas mexicanas para lograr cuantificar y clasificar los microplásticos encontrados en ellas. Analizaron un total de 33 playas, localizándose nueve en el Golfo de México, dos en el Mar Caribe, seis en el Pacífico tropical, 13 en el Golfo de California y tres en el Pacífico noroeste. Los resultados que obtuvieron fueron, dentro de los tipos de microplásticos encontrados con mayor porcentaje (sumando un total de 92 %), fragmentos (rígidos y semirígidos), esponjas, fibras y films; y, respecto a los colores de microplásticos encontrados con mayor porcentaje (dando un total de 90 %), se encontraron el color blanco, verde, azul, amarillo, transparente y rojo. De los diferentes colores de microplásticos encontrados en playas con publicaciones internacionales, de acuerdo con los autores, predominan los colores negro, azul, verde y rojo. En cuanto a la composición química,

los más abundantes fueron polietileno (PE), polipropileno (PP) y poliestireno (PS). Para finalizar con lo que afirmaron los autores, no todas las regiones analizadas tienen actividades económicas iguales (turismo, pesca y extracción de petróleo e industria petroquímica), en general no hubo diferencias estadísticamente significativas en la concentración de microplásticos entre las regiones; y con esto sugieren la prevalencia de actividades terrestres como fuente primaria de microplásticos que llegan a las playas mexicanas.

Por último, en el estado de Oaxaca fue realizado un estudio por Retama et al. 2016, en donde reporta la presencia de microplásticos en playas turísticas ubicadas en la Bahía de Huatulco, al sur de México. En cuanto a los colores encontrados, el más abundante es el blanco, seguido por el negro, después el azul, luego el rojo y al final el pardo claro. Además de que los autores consideran que la fuente de materiales plásticos en estas playas tiene doble origen: a partir de efluentes terrestres y actividades turísticas.

Presentación

Objetivo General

El presente trabajo tiene como finalidad analizar las características texturales de los sedimentos de la playa Salina Cruz, Oaxaca, además de identificar, cuantificar y categorizar los microplásticos presentes en los sedimentos de acuerdo con su morfología, color y tamaño.

Objetivos Específicos

- Realizar un análisis granulométrico, de las muestras correspondientes a la playa de Salina Cruz, de forma cuantitativo.
- Separar los microplásticos del sedimento en las diferentes muestras de la playa Salina Cruz, por medio de diferencia de densidades.
- Cuantificar los microplásticos separados de las diferentes muestras con ayuda del microscopio; además de categorizarlos, simultáneamente, de acuerdo con su morfología (fibras, conjunto de fibras enredadas, esferas, gránulos, películas y espumas), tamaño (menor a 5 mm) y color, usando observaciones directas del microscopio y fotografías para mediciones más exactas.
- Analizar si hay alguna relación entre la abundancia de microplásticos con las características texturales de los sedimentos o con alguna zona en específico de la playa Salina Cruz.

Figura 1.7

Síntesis de la historia de plásticos



CAUCHO NATURAL

1600 a. C. Primer uso del caucho natural por culturas Mesoamericanas

1818 Uso del caucho de forma comercial por primera vez

1838 Descubrimiento de los beneficios de mezclar azufre y caucho natural (Goodyear)

1843 Patente del proceso de vulcanización del caucho natural en Reino Unido (Hancock) y en EE.UU.AA. (Goodyear) al siguiente año

CELULOIDES

1862 Presentación de la **Parkesita**, predecesor del celuloide, en Reino Unido

1869 Introducción del acetato de celulosa (Paul Schützenberger) y creación del celuloide (hermanos Hyatt)

POLÍMEROS SEMISINTÉTICOS Y SINTÉTICOS

1899 Descubrimiento de los plásticos de caseína, la **Galalita**

1907 Creación de la **Baquelita** (1º polímero completamente sintético y comercial)

1912 Formación del **PVC** (Fritz Klatte e Ivan Ostromislensky)

Década de 1930 Creación del neopreno (Arnold Collins), del PMMA (William Chalmers), del PLA (John William Crawford), del **PE** (Fawcett y Gibson), del PCL (Carothers y su equipo de investigadores), de fibras de **naílon** (Carothers y su equipo de investigadores), primera producción de forma comercial del **PS** (IG Farben), primera sintetización del PAN (Hans Fikentscher y Claus Heuck), y el descubrimiento del PTFE en EE.UU.AA. (Roy Plunkett)

Década de 1940 Desarrollo del PET (Whinfield y Dickson), patente del ABS (Lawrence Daly), invención del velcro (George de Mestral), fabricación de la **Lycra**, y comienzo de la utilización de botellas y contenedores de plástico, en lugar del acero, madera, papel y vidrio

Década de 1950 Aparición de la bolsa de **PE**; comienzo de la producción y uso masivo de los plásticos y proliferación en el uso de plásticos dentro de la industria del vestido (poliéster, la lycra y el naílon)

Década de 1960 Aumento en la industria de los plásticos e introducción de las botellas de **PET** para bebidas

Década de 1970 Primera caída en la producción de plásticos y el comienzo de la percepción de los plásticos como los materiales más usados en el mundo

Década de 1980 Introducción de los símbolos de reciclaje triangulares referente a los plásticos

Década de 1990 Creciente concientización por la acumulación de desechos plásticos en el medio ambiente, y lanzamiento del primer plástico completamente biodegradable (*Biopol*) al mercado por IC

S. XXI Desarrollo de nuevos avances en plásticos plásticos de base biológica, al igual que mejoras en los plásticos ya existentes (respecto a los métodos usados durante su producción, sus características y aditivos usados), y una mayor consideración con los problemas relacionados con la salud, seguridad, sostenibilidad y reciclaje

Nota. Polímeros: PVC=Cloruro de polivinilo, PMMA=Polimetacrilato de metilo, PLA=Ácido poliláctico, PE=Polietileno, PCL=Policaprolactona, PS=Poliestireno, PAN=Poliacrilonitrilo, PTFE=Politetrafluoroetileno, PET=Tereftalato de polietileno y ABS=Acrilonitrilo butadieno estireno. Los polímeros en negritas corresponde a los más reportados en microplásticos, como se ve en la sección *Estudios referentes a la contaminación de microplásticos y su impacto en el ambiente.*

Capítulo II

Área de Estudio

Localización

La zona costera de la bahía de Salina Cruz (BSC) se encuentra en el estado de Oaxaca, en el sur de México. Salina Cruz es un municipio, del estado antes mencionado, que colinda al norte y oeste con el municipio Santo Domingo Tehuantepec, al este con los municipios San Pedro Huilotepec y San Mateo del Mar, y al sur con el Océano Pacífico, específicamente el Golfo de Tehuantepec (**figura 2.1**).

Las muestras analizadas se encuentra entre la latitud $16^{\circ}10'8.43''N$ y $16^{\circ}9'59.42''N$, y la longitud $95^{\circ}11'1.63''W$ y $95^{\circ}10'19.90''W$. En la **figura 2.2** se puede ver una imagen satelital con las ubicaciones de las muestras en la zona costera.

Junto a la zona costera BSC, al NW, se encuentra un puerto artificial que lleva el mismo nombre (Dirección General Adjunta de Oceanografía, Hidrografía y Meteorología —DIGAOHM—, *s.f.-a*). El puerto Salina Cruz es considerado como uno de los puertos de altura que México posee, esto porque realiza actividades de exportación (DIGAOHM, *s.f.-b*).

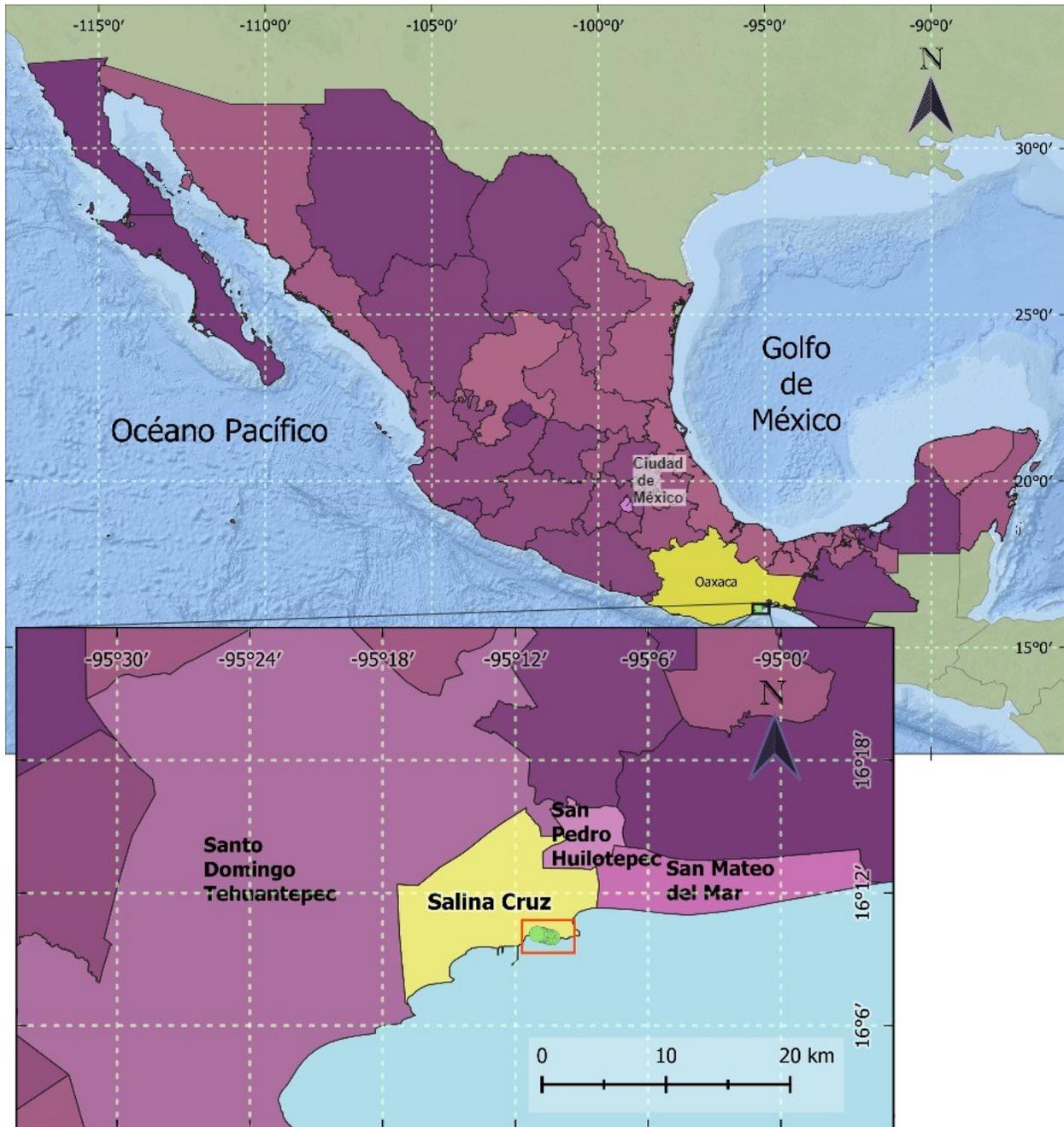
Actividades Sobresalientes y Contaminación en la Zona

El Golfo de Tehuantepec se encuentra al sur del Istmo de Tehuantepec (Fuentes Aguilar, 1983). La región del Istmo “ha sido considerada por las autoridades políticas y los poderes económicos como un espacio de frontera, enlace estratégico entre dos espacios económicos diferenciados: la cuenca del Pacífico Mesoamericano y el Caribe” (Comisión Nacional del Agua, 2020, p.5)

Salina Cruz es una zona de interés al haber explotación de sal (Salinas del Marqués), plantas industriales y pesqueras, una refinería de Petróleos Mexicanos, astilleros (construcción y reparación de buques) y un puerto (Fuentes Aguilar, 1983; González Macías, 2007; INEGI, 2004). El puerto es “estratégico para

Figura 2.1

Ubicación de la playa Salina Cruz

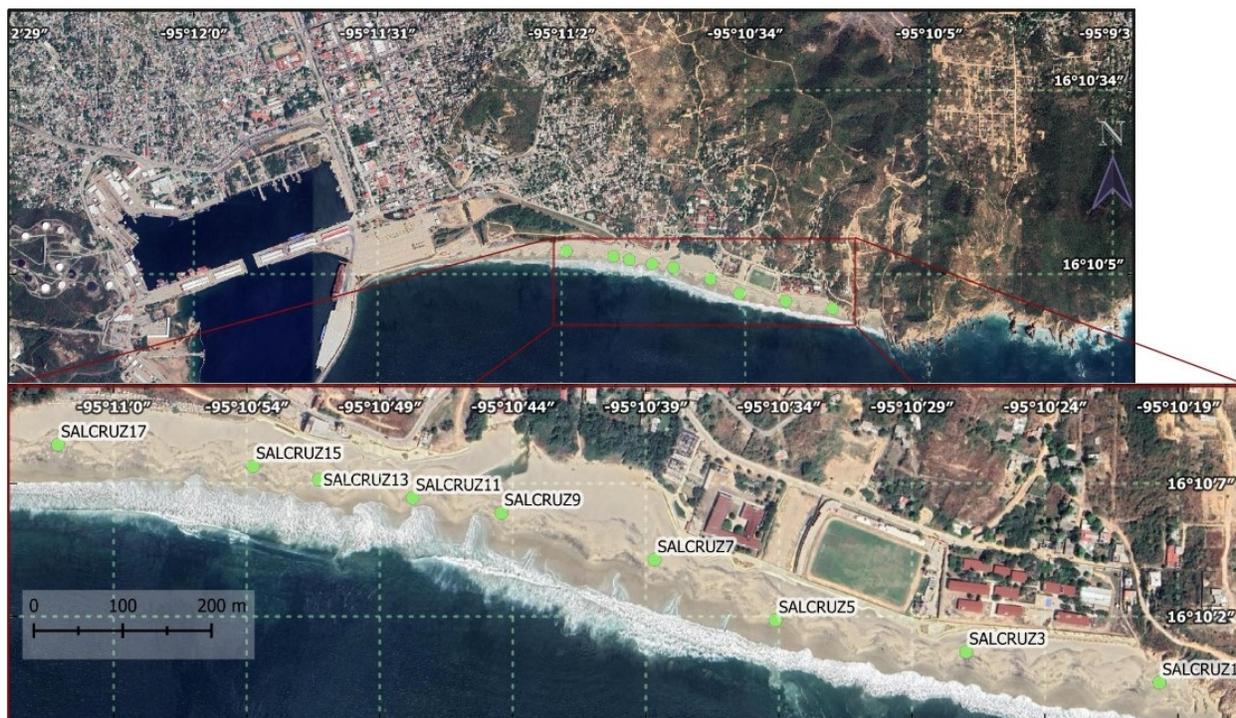


Nota. Dentro de Salina Cruz, marcado con un puntos verdes, se puede observar la ubicación de las muestras analizadas. Mapa elaborado con metadatos de INEGI: División política a nivel estatal (INEGI, 2016) y municipal de Oaxaca (INEGI, 2018); y con el relieve oceánico de Esri (2020) en QGIS.

la economía nacional” («Entorno de Mercado. Dinámica y composición de las actividades en el Puerto de Salina Cruz», 2018, párr. 1) al permitir el abasto de petróleo y derivados a lo largo del Pacífico mexicano, y

Figura 2.2

Ubicación de las muestras analizadas de la zona costera de la bahía de Salina Cruz



Nota. Imagen satelital adaptada de [Salina Cruz, Oaxaca], de Google, s.f., Google Earth https://earth.google.com/web/@16.1668107,-95.19965547,10.52883637a,15531.71058158d,35y,359.99969922h,0t,0r?utm_source=earth7&utm_campaign=vine&hl=en. Todos los derechos reservados 2022 por Google.

realizar importaciones y exportaciones desde el puerto y hacia Asia y el resto de América. También, “es el puerto pesquero más importante de la región ístmica” (González Macías, 2007, p. 19) donde se realiza pesca de altura del camarón.

González Macías (2007) establece a estas actividades portuarias, junto a la urbanización, como potenciales fuentes de contaminación al entorno marino. También señala que la acumulación de desechos y sustancias, con diferentes orígenes, se puede dar en el puerto por las actividades realizadas en la zona y la baja circulación del agua. Además, de acuerdo con lo afirmado por Fuentes Aguilar (1983), otras razones por las que se dan estas acumulaciones son la ausencia de un tratamiento adecuado de las aguas residuales y la falta de una buena disposición de desechos. Finalmente, dentro de los contaminantes reportados en el puerto de Salina Cruz, y zonas aledañas, se tienen: metales pesados e hidrocarburos (Fuentes Aguilar, 1983; Wilkinson et al. 2009).

Geología superficial

El estado de Oaxaca preserva, en su geología, diversos eventos tectónicos que ocurrieron en el pasado, y se caracteriza por sus complejos metamórficos e ígneos aflorantes, aunque de igual forma se encuentran rocas sedimentarias en el estado. Hernández Santana et al. (2009) nos mencionan que el basamento geológico de Oaxaca se puede dividir en grupos de acuerdo a su edad y composición: **A. Complejos metamórficos e intrusivos precámbricos** (Complejos Oaxaqueño y Guichicovi —Weber et al. 2002—) **B. Complejos metamórficos** (Complejo Acatlán), **intrusivos batolíticos** (Chiapas) y **sedimentarios plegados paleozoicos**. **C. Complejos metamórficos, intrusivos, sedimentarios y vulcano-sedimentarios mesozoicos** (Complejo Mazateco). **D. Complejos metamórficos e intrusivos mesozoicos** (Terreno Chatino). **E. Complejos sedimentarios plegados y subhorizontales de las cuencas terciario-cuaternarias superpuestas, y complejos intrusivos y extrusivos terciarios**. En la (figura 2.3) se muestra la localización de estos complejos ígneos y metamórficos que afloran en la superficie, al igual que los terrenos del sur de México.

INEGI (2004) señala que las rocas aflorantes en el estado de Oaxaca corresponden a rocas metamórficas (con edades que van del Precámbrico al Cenozoico), y rocas ígneas intrusivas y extrusivas (con edades variadas que abarcan del Paleozoico al Cenozoico); también hay unidades sedimentarias que comprenden desde el Paleozoico hasta el Cuaternario, y depósitos recientes correspondientes a los suelos.

En cuanto a la geología de Salina Cruz y sus alrededores, con base en la carta geológico-minera Juachitán (SGM, 2000), afloran rocas ígneas intrusivas, rocas metamórficas, rocas sedimentarias clásticas y calcáreas (figura 2.4); específicamente, en Salina Cruz podemos encontrar granodiorita, granito, arenas, y aluvión (figura 2.5).

Carranza-Edwards et al. (1988) afirman que dentro de las playas que estudiaron, las que se encontraban en la parte este del litoral de Oaxaca (las cuales comenzaban a partir de Salina Cruz), la mayoría de ellas recibe principalmente “aportes de sedimentos provenientes de rocas metamórficas del Paleozoico y del Precámbrico, rocas intrusivas y extrusivas félsicas del Terciario y suelos del Cuaternario” (p. 25). Y cuando realizaron el análisis granulométrico al sedimento, del total de playas estudiadas, la tendencia del litoral fue de: arenas medias, moderadamente bien clasificadas, simétricas y mesocúrticas. Además, Álvarez-Arellano y Gaitán-Morán (1994) proporcionan información sobre los tipos de sedimentos, de las playas que hay en Oaxaca y Chiapas, que son aportado por el drenaje de las cuencas hidrógráficas que llegan hasta el Pacífico; estos sedimentos “proviene de los afloramientos de gneisses e intrusivos silíceos, que se encuentran ampliamente distribuidos dentro las cuencas hidrográficas” (p. 24). Y Carranza-Edwards (1980), al analizar

Figura 2.3

Terrenos del sur de México

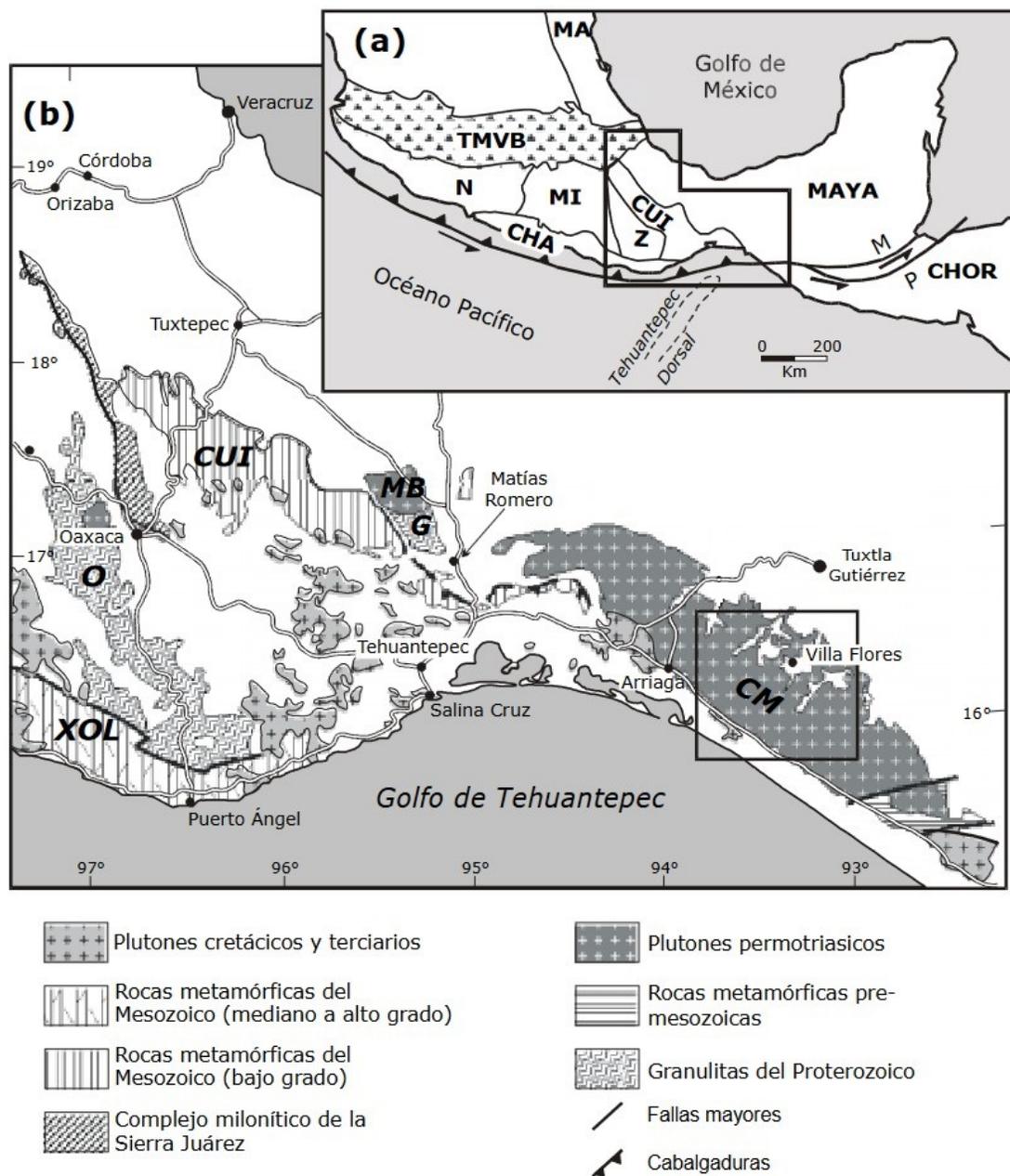
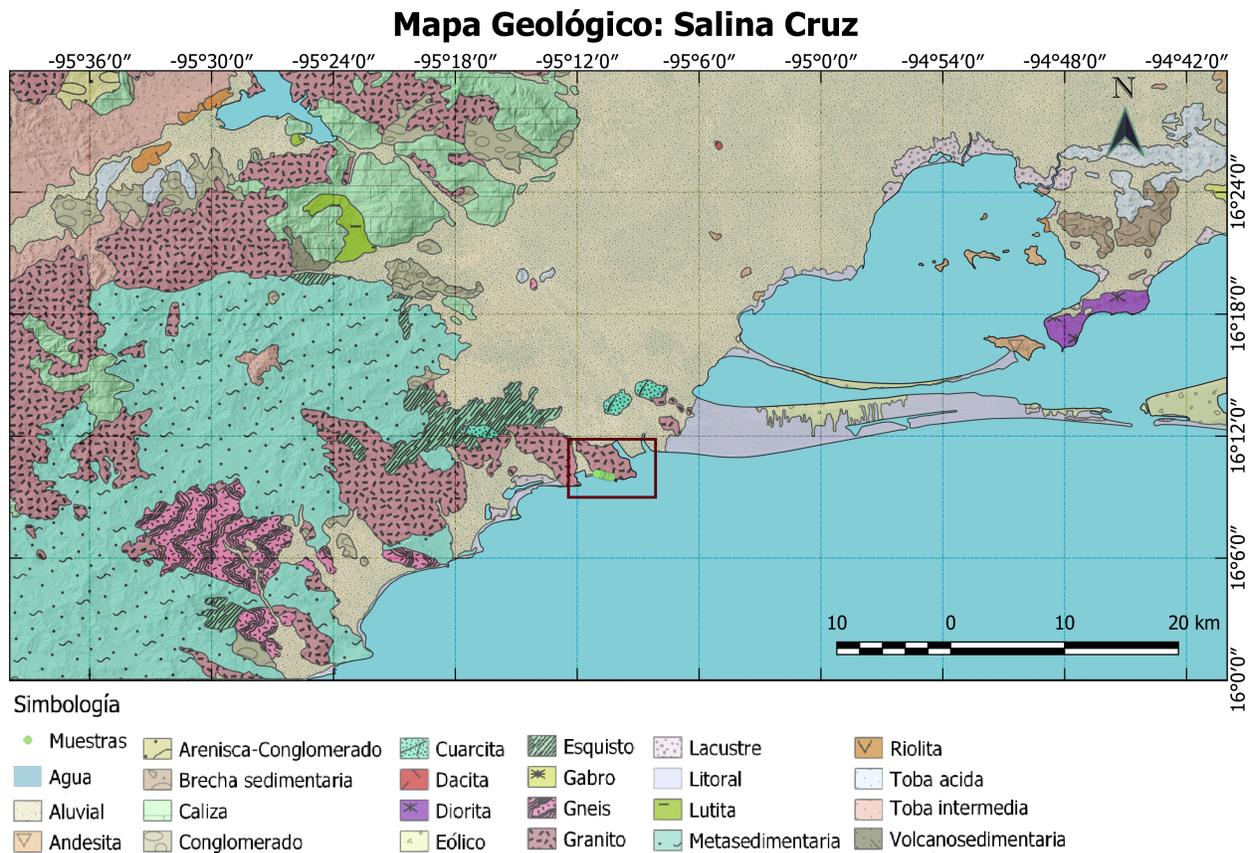


Figura 1. (a) Bosquejo de los límites de los terrenos del sur de México; CHA=Chatino, CHOR=Chortis, CUI=Cuicateco, MA=Maya, MI=Mixteco, N=Náhuatl; Z=Zapoteco (según Ortega-Gutiérrez et al., 1990); M,P = sistema de fallas Motagua-Polochic; TMVB = Cinturón volcánico transmexicano; - (b) mapa geológico ilustrando las rocas ígneas y metamórficas expuestas en el sur de México (modificado según Ortega-Gutiérrez et al., 1992); A = complejo Acatlán, CM = Macizo de Chiapas, CUI = terreno Cuicateco, G = complejo Guichicovi, MB = batolito de la Mixtequita, O = complejo Oaxaqueño, XOL = complejo Xolapa.

Nota. Imagen reproducida de *El descubrimiento de basamento metasedimentario en el macizo de Chiapas: la "Unidad La Sepultura"* (p. 3), de Weber et al. 2002, GEOS, boletín informativo de la Unión Geofísica Mexicana.

Figura 2.4

Mapa geológico de Salina Cruz, Oaxaca



Este mapa fue realizado con el conjunto de datos geológico vectoriales de INEGI, y se realizó con QGIS® 3.4.15 de código abierto.

Nota. En la parte central del mapa, en puntos de color verde, se observa la localización de las muestras analizadas como referencia. Para la realización del mapa de sombras y el mapa geológico (en QGIS® 3.4.15 de código abierto), se utilizaron los metadatos de INEGI (2021a, 2021b, 2021c, 2021d, 2021e, 2021f).

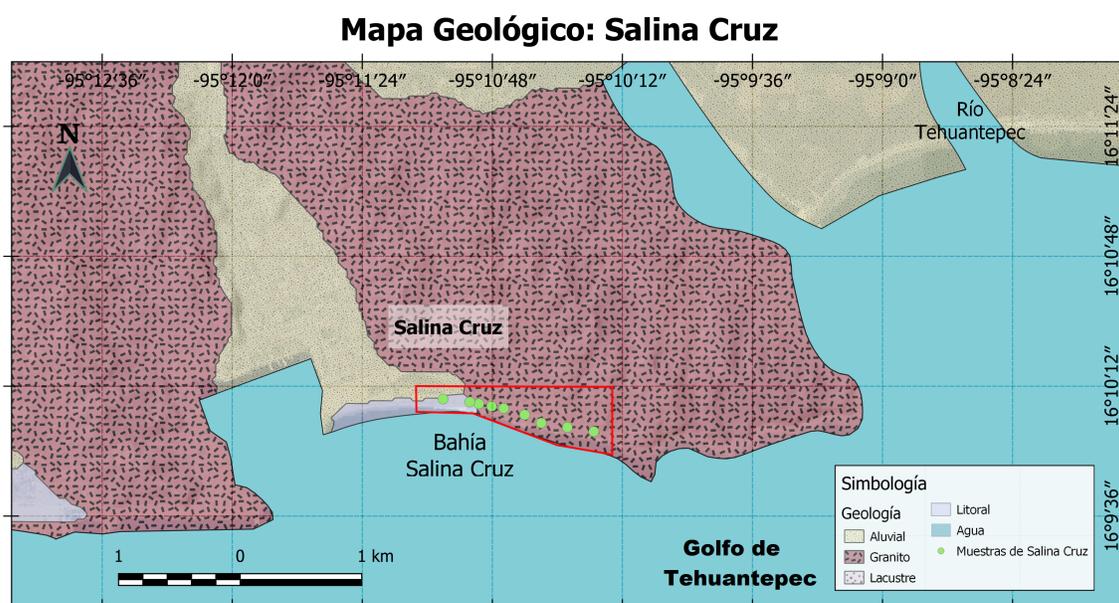
el sedimento de varios puntos de interés de la parte sur de la llanura costera del Istmo de Tehuantepec, hizo notar la presencia de minerales pesados en la zona (biotita, clorita, hornblenda, turmalina, magnetita, muscovita, monacita, circón, hiperstena, olivino, glaucófano, ilmenita y corindón entre otros); teniendo las mayores concentraciones en una de sus muestras que se ubicó en la playa de Salina Cruz.

Hidrología y Clima

Salina Cruz forma parte de los municipios que se encuentran en el acuífero Tehuantepec, en la Región Hidrológica No. 22 Tehuantepec, y en la subcuenca RH21Aa - Salina Cruz (figura 2.6). El acuífero es de tipo libre, y está constituido en la parte central por arenas, limos y gravas, por el otro lado, sus fronteras

Figura 2.5

Mapa Geológico ampliado para observar la geología de las zonas más cercanas a las muestras analizadas



Este mapa fue realizado con el conjunto de datos vectoriales de INEGI y CONAGUA, y se realizó con QGIS® 3.4.15 de código abierto.

que lo limitan están constituidos por rocas ígneas y metamórficas (Comisión Nacional del Agua, 2020).

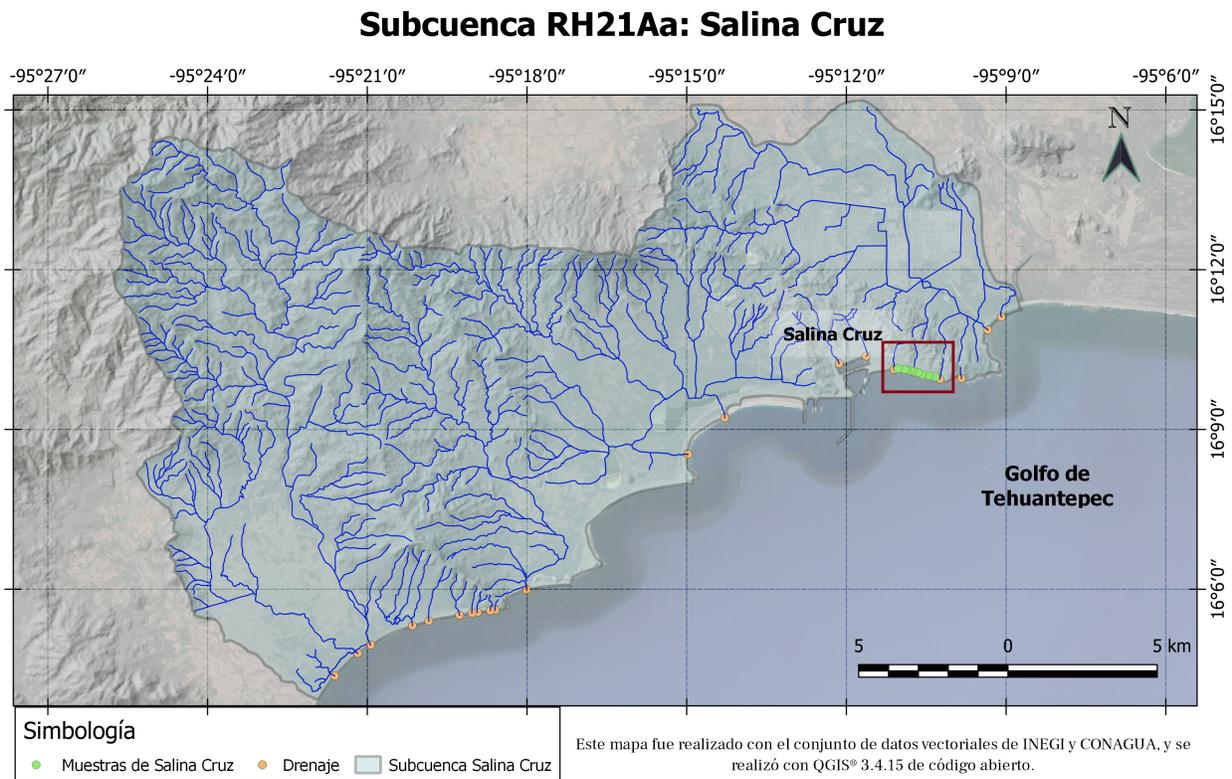
El río principal que pasa por la zona es el río de Tehuantepec, aunque no desemboca directamente en la zona costera BSC, hay escurrimientos registrados que pasan por granito y desembocan en la zona (figura 2.7). La erosión por oleaje, junto a estos escurrimientos descrito, aportan sedimento desde los granitos de la zona, coincidiendo con las afirmaciones de Álvarez-Arellano y Gaitán-Morán (1994) y Carranza-Edwards et al. (1988) sobre el aporte de sedimento proveniente de rocas ígneas intrusivas félsicas, en las playas de Oaxaca.

El clima de Oaxaca puede ser variado, según Elliot et al. (2004), va desde el tropical (presente en la costa) hasta el templado (en el interior del estado); y la temperatura anual varía desde los 12°C hasta 28°C, el rango de temperatura para la costa es de 26°C a 28°C. Mientras que en el acuífero, Comisión Nacional del Agua (2020) afirma que el “clima es caliente subhúmedo con lluvias en verano” (p.10) y la temperatura media es de 24.2°C.

Por último, la precipitación media anual del acuífero es de 901.5 mm, y de las costas de Oaxaca es de 700 mm. Y la temporada de lluvias normalmente empieza en abril y termina en octubre, teniendo los registros de mayor precipitación en los meses de junio a septiembre (Comisión Nacional del Agua, 2020; Elliot et al. 2004).

Figura 2.6

Mapa de la subcuenca Salina Cruz



Nota. Se observan los escurrimientos que se registraron en la cuenca (líneas de color azul), puntos en los que los escurrimientos llegan al mar (puntos anaranjados), y la localización de las muestras utilizadas (puntos color verde). Se utilizaron los datos vectoriales de INEGI (2010) para su realización.

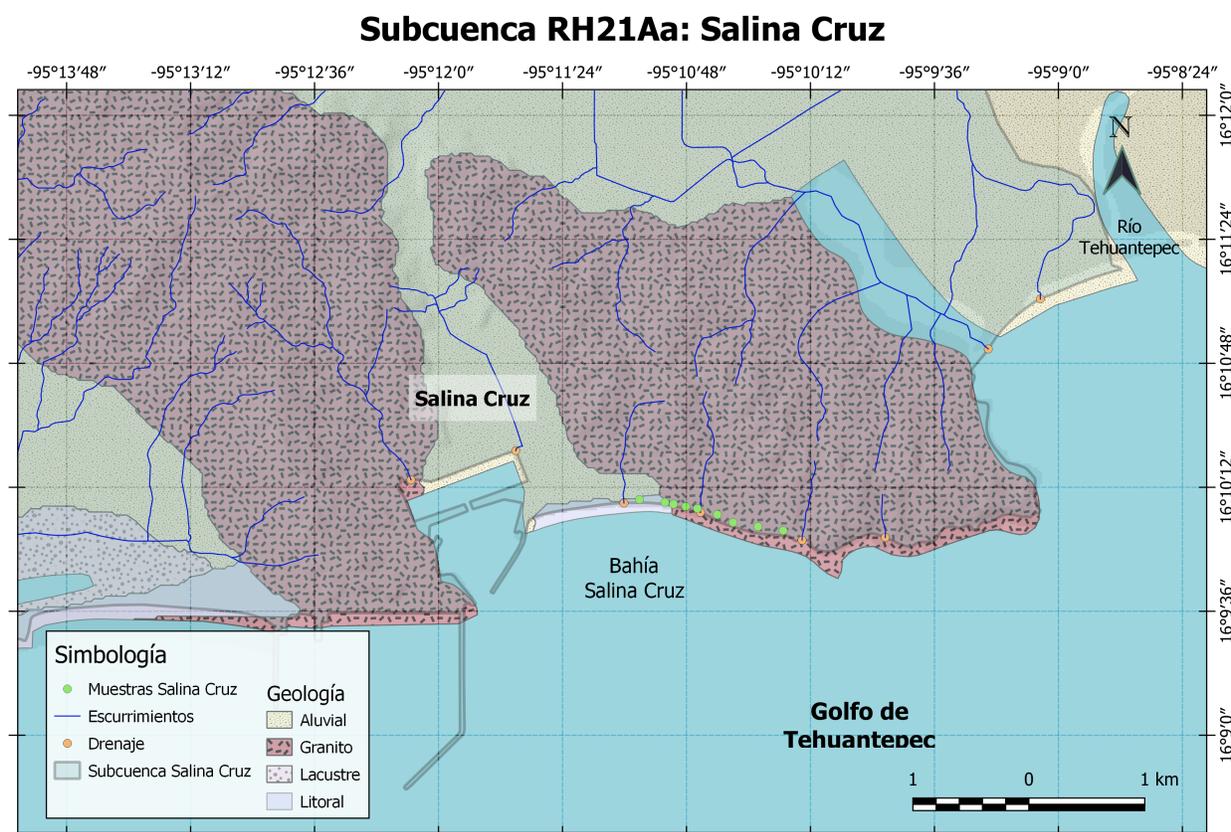
Corrientes de Viento y Marinas

La zona costera BSC se localiza en el Océano Pacífico Mexicano, específicamente en el Golfo de Tehuantepec. Respecto a la circulación oceánica, su patrón persistente del Golfo es en dirección de este a oeste, paralelo a la costa (Carranza-Edwards et al. 1988; Flores-Vidal et al. 2011; Ortiz Gallarza, 2007; Velázquez Muñoz, 2005; Velázquez-Muñoz et al. 2011). Además, la circulación superficial de éste puede ser afectada por corrientes de viento intensas, un ejemplo de esto son los vientos del norte, también conocidos como “tehuanos”. Estos fuertes vientos del norte se dan mayormente en invierno, cambia significativamente la dirección de las corrientes superficiales (DIGAOHM, s.f.-b; Flores-Vidal et al. 2011; Martínez Alcala, 2005; Roden, 1961; Velázquez-Muñoz et al. 2011).

Los tehuanos son vientos fuertes provenientes del norte, que pasan por el Istmo para poder llegar al Golfo de Tehuantepec, un ejemplo de la dirección y sentido que presentan estos vientos en la zona se tiene

Figura 2.7

Mapa de la subcuenca RH21Aa con aumento en la zona costera BSC, sobrepuesto con el mapa geológico de la zona



Nota. El mapa contiene los mismos detalles que contenía la **figura 2.6** pero se le añadió la geología para determinar la litología por la que atraviesan los escurrimientos antes de llegar a la zona costera BSC.

en la **figura 2.8**¹; estos vientos del norte provocan un movimiento de agua en la misma dirección (sureste) y sentido (contrario a la costa) del viento **figura 2.9a**² (Ortiz Gallarza, 2007; Roden, 1961). Posterior a un evento de vientos tehuanos, y al ya no ser afectada el agua por estos vientos, el agua fluye de nuevo dirección a la costa para regresar al estado inicial **figura 2.9b**. Estos cambios en el patrón de oleaje se aplican, también,

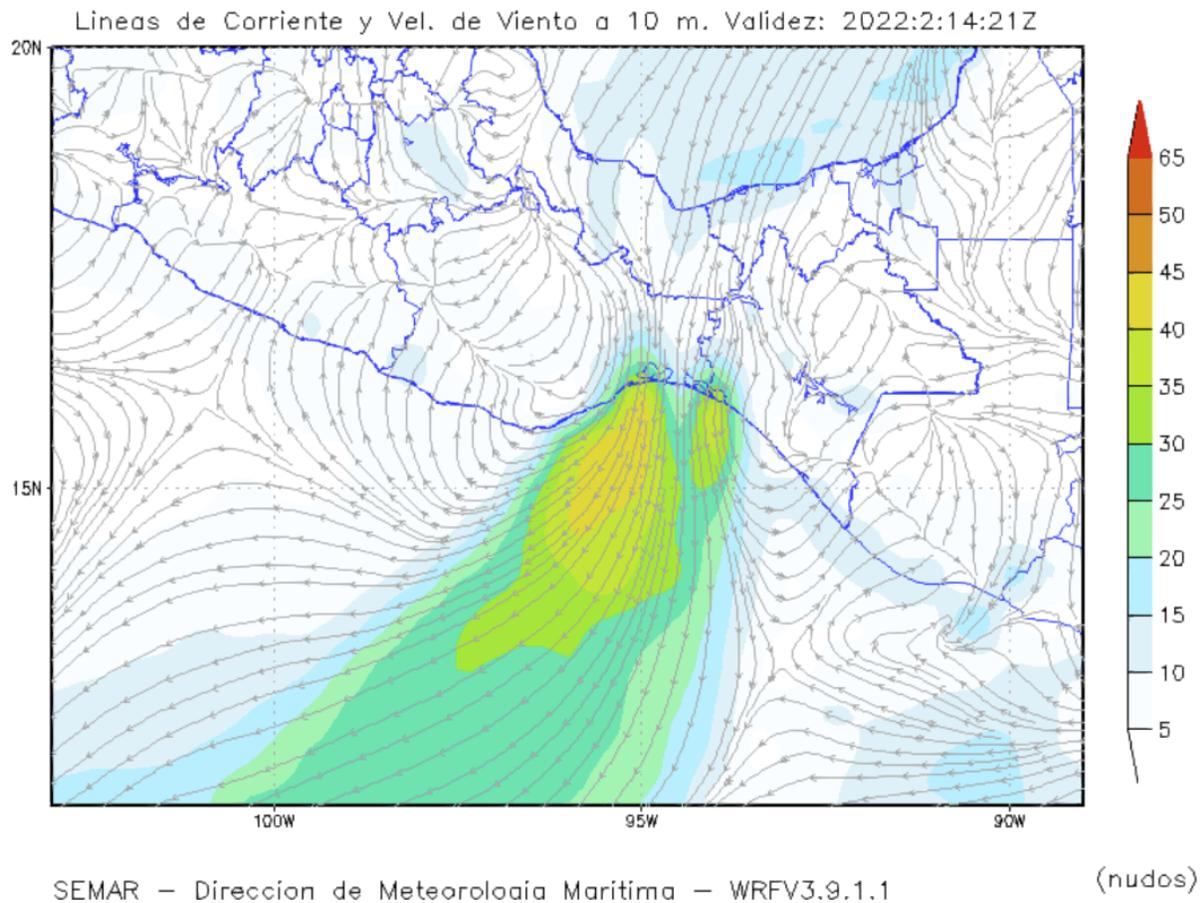
¹El modelo usado por Meteorología (s.f.-b) en la imagen para realizar las líneas de dirección y sentido del viento fue el Weather Research and Forecasting (WRF), es cual “es un modelo de predicción que fue diseñado para la investigación y la operatividad meteorológica. Este modelo muestra el posible comportamiento de las principales variables meteorológicas”; en este caso la variable representada en el mapa es el viento, su dirección y velocidad (nudos) (Meteorología, s.f.-b, sección *Modelo Atmosférico WRF*).

²El modelo utilizado en la elaboración de las imágenes con la predicción del oleaje, por parte de Meteorología (s.f.-b), corresponde al Wave Watch Versión III, este modelo “es un sistema integrado por un grupo de procesadores alimentadas por los datos de viento, hielo, temperatura superficial del mar y datos batimétricos, para realizar cálculos y predecir el tiempo a futuro de 120 horas en una malla que cubre el territorio nacional, y obtener como resultado, gráficos cada hora de los campos de viento, altura de la ola por mar de fondo, altura total de la ola y altura de la ola por viento” (Meteorología, s.f.-b, sección *Modelo de Oleaje WW3*).

a la bahía de Salina Cruz, tal como lo plantea DIGAOHM (s.f.-b) al explicar que la bahía está expuesta a los tehuanos (de los meses noviembre-marzo) y a vientos provenientes del sur (del mes de mayo a octubre), estos vientos del sur provocan un oleaje proveniente del sureste en la zona.

Figura 2.8

Mapa del sur México con líneas de corriente de viento y su velocidad (obtenidas por modelo de viento)

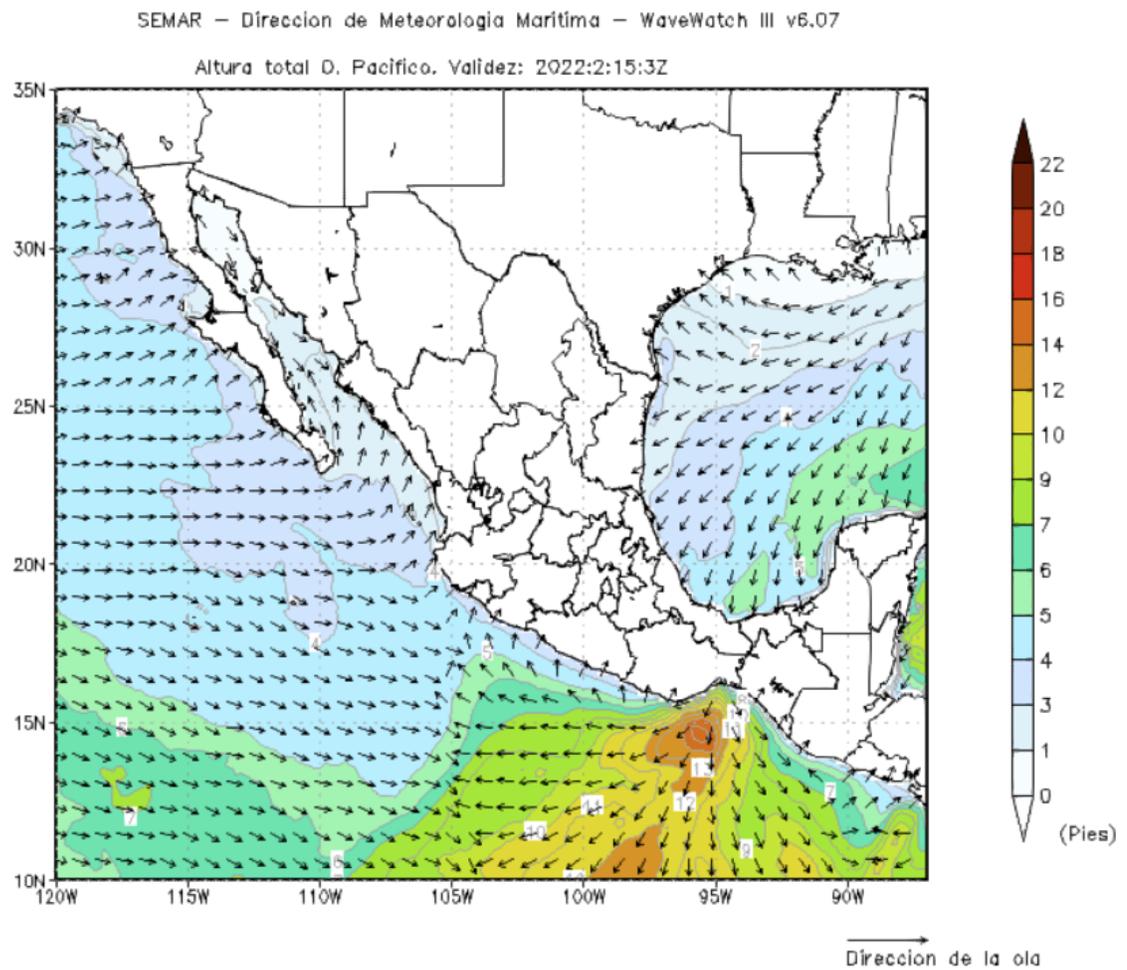


Nota. Imagen reproducida de *WRF - Viento (Golfo de Tehuantepec)*, de Meteorología, s.f.-b, Predicción Numérica del Tiempo https://meteorologia.semar.gob.mx/WRF/Gol_Tehua/lin_corriente.html.

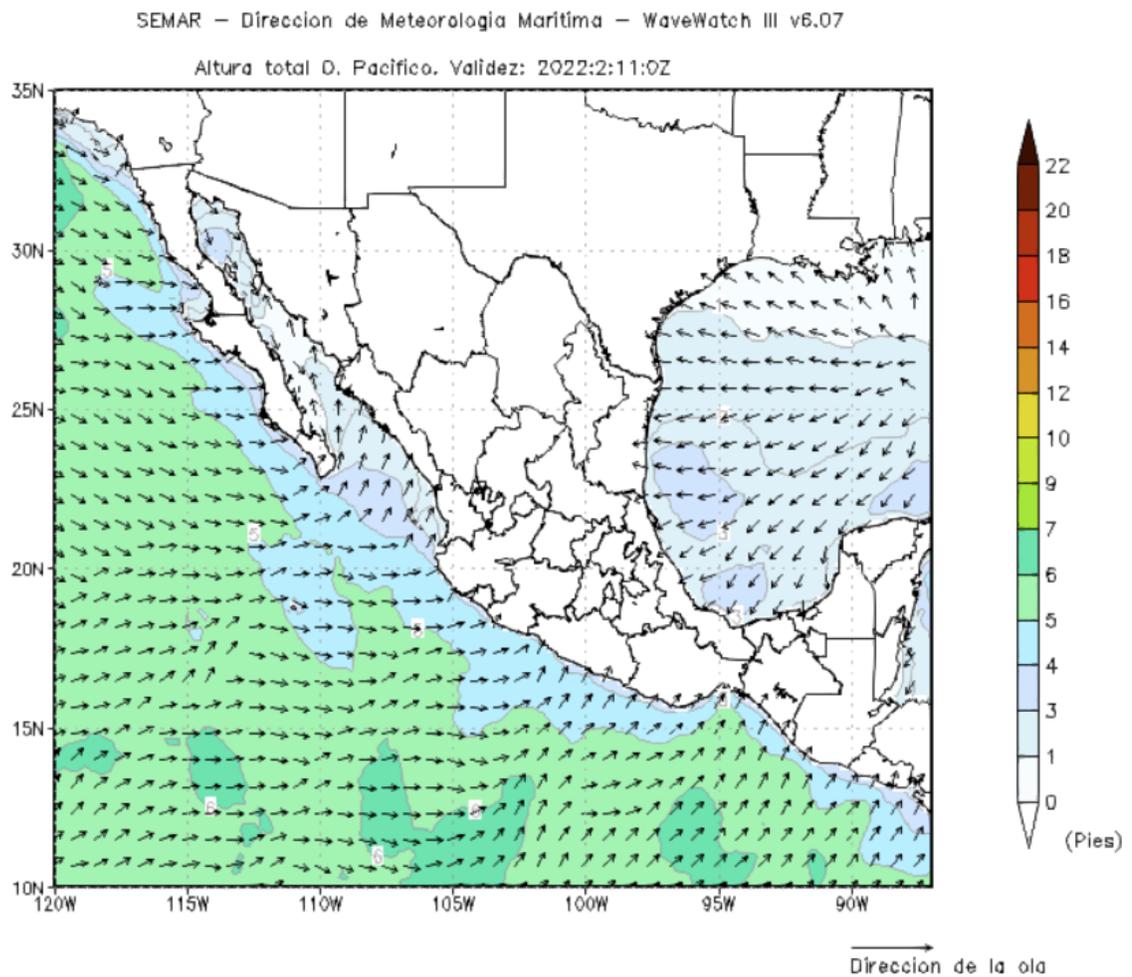
Figura 2.9

Mapa de México con dirección del oleaje y altura total de la ola en el Pacífico Mexicano (obtenidos por modelo de olas)

(a) Dirección que toman las olas durante un evento de vientos del norte en el Golfo de Tehuantepec



(b) Dirección que toman las olas posterior a un evento de vientos del norte en el Golfo de Tehuantepec



Nota. Imágenes reproducida de *WW3 - Total Height (Pacífico)*, de Meteorología, s.f.-b, Predicción Numérica del Tiempo https://meteorologia.semar.gob.mx/ww3/wave/pacifico/height_total/height_total.html.

Capítulo III

Metodología

La metodología que se siguió en el presente trabajo consistió en realizar una exhaustiva investigación bibliográfica sobre temas de interés para el trabajo, entre los que destacan los plásticos y las investigaciones que se han realizado sobre ellos; después, se efectuó el trabajo de laboratorio utilizando las muestras de sedimento de Salina Cruz, con las cuales se realizó primero un análisis granulométrico y textural del sedimento, posteriormente se procedió a realizar la separación de microplásticos para, después, hacer su cuantificación, clasificación, toma de fotografías y medición de los microplásticos encontrados, y, al final, se mandó a analizar la composición de algunos de ellos; por último se efectuó el análisis e interpretación de datos.

Muestras

Las muestras analizadas de Salina Cruz, Oaxaca, fueron proporcionadas por el Dr. Armstrong Altrin Sam John Selvamony su localización se mostró en la **figura 2.2**, recolectadas por Héctor y Nathaly en 2015.

Análisis Granulométrico y Análisis de Esfericidad y Redondez

Para poder efectuar el análisis granulométrico, fue necesario realizar un secado de las muestras; para poder llevar a cabo este último, primero se formaron charolas de aluminio en las que se vaciaron las muestras (**figura 3.1**), después se procedió a dejarlas debajo de focos que les proporcionaban energía calorífica. Se dejaron por abajo de esos focos durante 48 horas para que estuvieran completamente secos (**figura 3.2**).

Una vez que las muestras estuvieron secas, se procedió a obtener alícuotas de 35 g, o lo más cercano a esa cantidad, utilizando la balanza *Explorer Ohaus E1D120* que tiene una exactitud de 0.01 g. Para poder obtener estas alícuotas se realizaron cuarteos, las muestras se dividieron en cuatro partes iguales y se procedió a tomar dos extremos opuestos y apartarlos de los dos extremos restantes, y se repitió el proceso las veces que fuera necesario hasta llegar a los 35 g (**figura 3.3**). Cada alícuota fue tamizada utilizando tamices de:

Figura 3.1

Ejemplo de una de las charolas usadas durante el secado de las muestras



Nota. Las charolas se usaron para extender las muestras y, así, facilitar el proceso de secado.

Figura 3.2

Proceso de secado

(a) Colocación de muestras debajo de los focos



(b) Comienzo del secado de las muestras



-1, -0.75, -0.5, -0.25, +0.25, +1.0, +2.0, +2.5, +2.75, +3.25, +3.5 y +3.75 ϕ (figura 3.4), y se dejó por 15 minutos en el rottap para poder separar los sedimentos por tamaño.

Figura 3.3

Ejemplo del proceso de cuarteamiento

(a) Muestra



(b) Primera separación al cuartear la muestra



Figura 3.4

Columna de tamices utilizados para llevar a cabo el análisis granulométrico



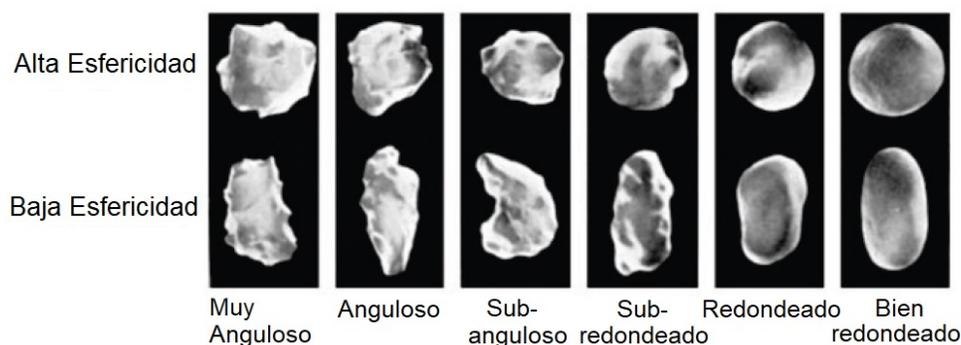
Se pesaron los sedimentos que quedaron atrapados en las diferentes mallas y, con estos pesos, poder sacar su porcentaje respecto al peso original. Para evitar la contaminación de las muestras, se limpió el material utilizado y el área de trabajo entre cada cambio de muestra.

Con los porcentajes de los diferentes tamices, se procedió a realizar el análisis de acuerdo con los parámetros estadísticos de Folk & Ward (1957), se realizó el cálculo con *GRADISTAT* (programa para el análisis del tamaño de partículas y donde se pueden obtener los parámetros de Estadísticos de Folk & Ward del sedimento tamizado, <http://www.kpal.co.uk/gradistat.html>) y se realizaron los histogramas con el programa *R* (programa para la estadística computacional y gráficas, <https://www.r-project.org/>).

Y para el análisis textural del sedimento (esfericidad y redondez), se utilizó el análisis cualitativo, tomando como referencia la escala de redondez cualitativa de Powers, M. C. (1953), mostrada en la **figura 3.5**; además, se realizó un análisis cualitativo de las diferentes formas del sedimento, usando las clases de formas según Zingg (1935) **figura 3.6**.

Figura 3.5

Escala visual de redondez y esfericidad (Powers, 1953)



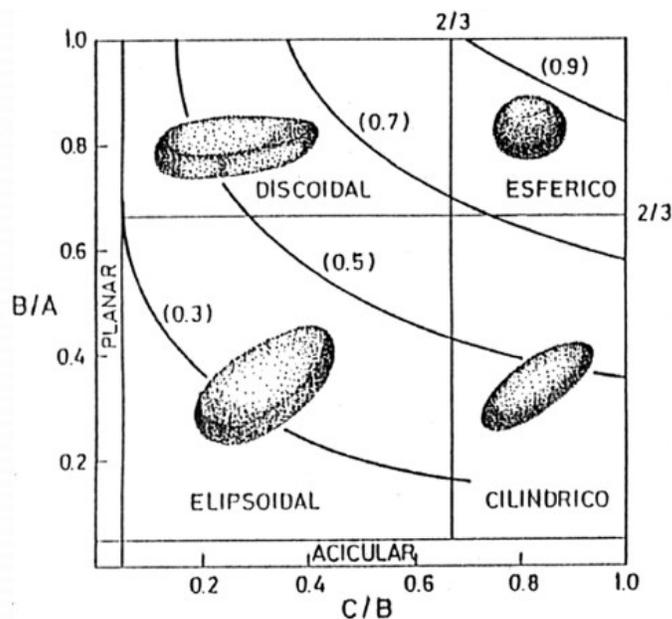
Nota. Imagen reproducida de *Particle shape quantities and measurement techniques: a review* (p. 181), de Rodríguez et al. 2013.

Separación e Identificación de Microplásticos en las Muestras

Para efectuar la separación de microplásticos se realizó por medio de una diferencia de densidades, de los microplásticos con la solución saturada usada. Para hacer la solución se utilizó 250 ml de agua desionizada y 115 g de sal de mesa, una vez disuelta la sal se comprobó con un densímetro que la solución concentrada tuviera una densidad de 1.2 g/cm³. Cuando la solución estuvo lista, se pesaron 50 g de la muestra de sedimentos que se vaciaron en un vaso de precipitados, el cual fue previamente llenado con 150 ml de solución; esta relación de 1:3 de los sedimentos y la solución, al igual que la densidad necesaria para la solución, se

Figura 3.6

Clasificación de formas por su relación b/a y c/b (Zingg, 1935)



Nota. Imagen reproducida de *Análisis geoarqueológico de los cambios ambientales y la ocupación de espacios, dentro del sitio arqueológico Nuevo Corinto (1 500 a.C. – 1 550 d.C.), Limón, Costa Rica* (p. 43), de Acevedo Peralta, 2016.

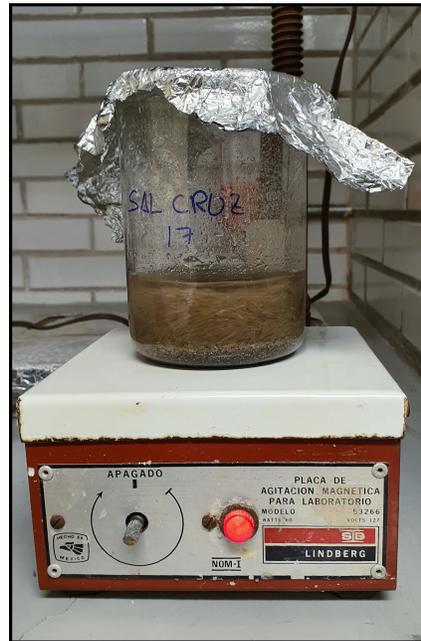
obtuvo del método de separación por densidad explicado en el libro *Microplastic Pollutants* (Crawford y Quinn, 2017). Se agitaron los sedimentos por 20 minutos, utilizando un agitador magnético (figura 3.7), para permitir que las partículas finas no se quedaran atrapadas al fondo, y con ellas los microplásticos; se dejó reposar por hasta 48 horas (figura 3.8), no se dejó más tiempo porque podría cristalizar la sal.

Pasando las horas del reposo de las muestras, se filtraron atrapando únicamente las partículas en suspensión; cuando ya se tenía la parte filtrada, se vertió agua desionizada (50 ml) en los bordes de los filtros para así concentrar los sedimentos y microplásticos atrapados, además de evitar que se cristalizara sal en los filtros (figura 3.9). En seguida se pusieron a secar los filtros por 24 horas (figura 3.10), al igual que se hizo con las muestras de sedimentos anteriormente para secarlas. Y una vez que estuvieron secas, se guardaron para no contaminarse.

En cuanto a la identificación de microplásticos, se utilizaron los filtros secos y se pusieron bajo el microscopio (figura 3.11).

Figura 3.7

Fotografía de una muestra en la placa de agitación magnética

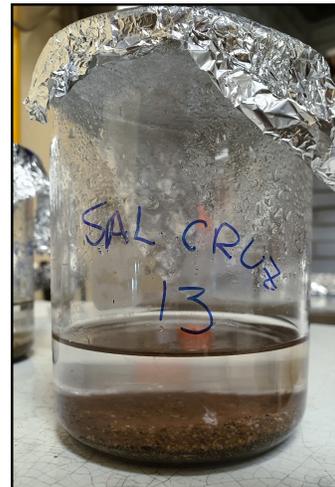
**Figura 3.8**

Comparación del sedimento en suspensión antes y después del periodo de reposo

(a) Muestra antes del periodo de reposo



(b) Muestra posterior al periodo de reposo

**Cuantificación y Clasificación de Microplásticos Encontrados**

Se procedió a cuantificar y clasificar los microplásticos que se llegaron a observar por su morfología y color. Para la morfología se usó como referencia la clasificación mostrada en Rochman et al. 2019, p. 705,

Figura 3.9

Reposo del filtro después de haber concentrado los sedimentos y microplásticos para filtrar el agua restante

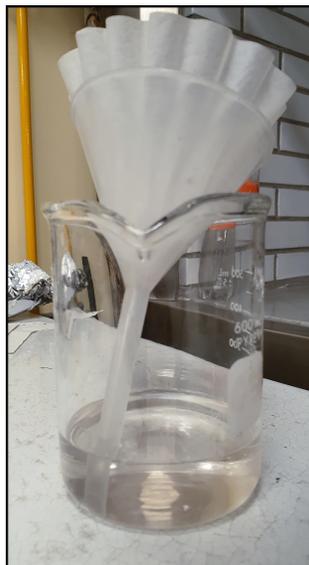


Figura 3.10

Proceso de secado de los filtros



donde se utilizan los siguientes términos: fibras, conjunto de fibras enredadas, esferas (tanto enteras como rotas), gránulos, películas y espumas. En cuanto se identificaba se anotó su morfología y color para después sumarlos y tener la cantidad de microplásticos presentes en las muestras. Después, se procedió a separar manualmente los microplásticos atrapados en los sedimentos (**figura 3.12**) con ayuda de unas pinzas para colocarlos en cajas Petri, perfectamente etiquetadas (**figura 3.13**), donde fueron guardados para su posterior toma de fotografías y medición.

Durante la toma de fotografía en el microscópico, fue utilizada la cámara *Nikon Digital Net Camera*

Figura 3.11

Fotografía ejemplificando la colocación de los filtros en el microscopio para identificación y cuantificación de microplásticos



DN100 (figura 3.14); además, en algunos casos, se fue cambiando el papel de fondo para que el color mostrado en la foto fuera lo más cercano al que se observaba en el microscopio. Después, se procedió a tomar el tamaños de los microplásticos para cada muestra mediante las fotografías que se les tomó a éstos, usando el programa *ImageJ* (programa de procesamiento y análisis de imágenes en Java de dominio público).

Toma de Fotografías en MEB y Análisis por Espectroscopia Infrarroja (IR) de Microplásticos

Además de las fotografías tomadas con la cámara *Nikon Digital Net Camera DN100*, se buscó obtener fotografías con mayor resolución para que fueran visibles algunos detalles de los microplásticos que antes no lo eran, y para lograr esto se utilizó el servicio de microscopía electrónica de barrido¹ localizado en el Instituto de Ciencias del Mar y Limnología. En los portamuestras proporcionados M. en C. Laura Elena Gómez Lizárraga, del Servicio Académico de Microscopía Electrónica de Barrido (SAMEB) <https://www.icmyl.unam.mx/es/servicios/servicio-academico-de-microscopia-electronica-de-barrido>, se colocaron diferentes morfologías de los microplásticos encontrados, y, después de llenar los portamuestras, le fueron entregados para realizar el tratamiento necesario de las muestras para su posterior toma de fotografías. El

¹En el microscopio electrónico de barrido son sustituidos la luz "por un haz de electrones y las lentes por electroimanes ", además de metalizar la superficie de las muestras para hacerla conductora («Microscopía Electrónica de Barrido (MEB)», 2020, párr. 2).

Figura 3.12

Fotografía de las partículas en suspensión recuperadas por medio del filtro



Nota. La escala mostrada en la fotografía es de 500 μ .

Figura 3.13

Ejemplo de las cajas Petri utilizadas durante la separación de microplásticos

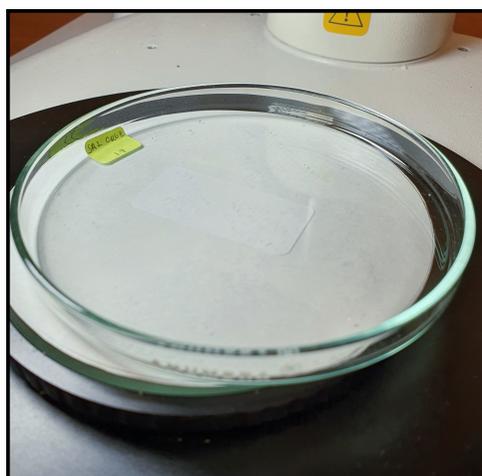


Figura 3.14

Microscopio trinocular que se utilizó durante la toma de fotografías de los microplásticos



tratamiento que se le dio, en este caso, fue recubrir la muestra con una capa de oro para volver a las muestras conductoras. Esta conductividad es necesaria para que, al ser barrida la muestra por un haz de electrones, reciba energía suficiente para que la muestra envíe electrones fuera de la muestra. Mediante detectores, se miden estos electrones para generar la imagen que, además de tener alta resolución, muestra su profundidad («Microscopía Electrónica de Barrido (MEB)», 2020; «Microscopía Electrónica de Barrido (MEB)», 2020).

Por último, se llevaron a analizar microplásticos, en su mayoría fibras de diferentes colores, con la Dra. Selene Rubí Islas Sánchez en el Laboratorio Universitario de Caracterización Espectroscópica (LUCE), del Instituto de Ciencias Aplicadas y Tecnología. La espectroscopia infrarroja (IR) utiliza la interacción que tienen las moléculas con la luz infrarroja (la vibración que provoca en ellas); siendo ésta la utilizada para obtener la composición de estos microplásticos. Dentro del campo de la caracterización de los microplásticos por espectroscopia IR, comúnmente, se utiliza el análisis con sistema Infrarrojo medio (*mid-Infrared —MIR— system*) (Renner et al. 2016). El espectro característico del MIR está comprendido entre los números de onda 400 a 4000 cm^{-1} , éste espectro se obtiene con la transformada de Fourier, después de obtenerlo, se realizan correcciones en el espectro, como son en la línea base, para poder compararse con bases de datos preexistentes; todo este proceso se realiza mediante programas especializados, en este caso se utilizó el software OMNIC. De los resultados procesados, solo se aceptaron aquellos cuyo espectro ajustó 70 % o más, y, adicionando análisis manual, aquellos que ajustaron de 60 a 70 %, tal como lo indica Crawford y Quinn, 2017, p. 247.

Capítulo IV

Resultados y Discusión

Primero se mostrarán los resultados de cada uno de los análisis granulométrico realizados en las diferentes muestras, para después nombrar las características predominantes en la zona costera BSC junto con la esfericidad y redondez del sedimento. En seguida se mostrarán los plásticos encontrados en cada muestra y, al igual que en el análisis de granulometría, se hará una generalización de los microplásticos para la zona costera al final. Finalmente se realizará la interpretación de estos resultados en la parte de discusión.

Características Texturales de los Sedimentos

SAL CRUZ 01

El sedimento analizado de la muestra Sal Cruz 01 corresponde a los sedimentos localizados al extremo este en la zona costera BSC, en comparación a las demás (**figura 2.2**). El grupo textural al que pertenece el sedimento de esta muestra es al de arena. Presenta una desviación estándar de 0.66ϕ , lo que significa que el sedimento está moderadamente bien clasificado. La muestra es unimodal, sólo tiene un tamaño de sedimento que presenta la mayor frecuencia y pertenece al tamaño 2ϕ , arena media (**tabla 4.1**). Además de ser el más frecuente, 2ϕ equivale al tamaño promedio del sedimento. La curva de frecuencia es simétrica, presenta valores cercanos al cero (0.036), no tiende a inclinarse hacia las partículas gruesas ni hacia las finas. La fracción gruesa del sedimento (arena muy gruesa+gránulo) pertenece solamente al 0.43 % de la muestra, mientras que, las arenas muy finas únicamente al 0.49 %. Y la concentración que presentan los valores del histograma es de tipo platicúrtica.

SAL CRUZ 03

En el sedimento analizado de Sal Cruz 03, el grupo textural al que pertenece es al de arenas. Su desviación estándar es de 0.57ϕ , correspondiente a una muestra moderadamente bien clasificada. El

Tabla 4.1

Resultados geoestadísticos, Sal Cruz 01

Muestra	Sal Cruz 01	Histograma
Clasificación	Moderadamente bien clasificada	
Grupo Textural	Arena	
Moda	Unimodal (<i>arena media</i>)	
Media	Arena media	
Asimetría	Simétrica	
Curtosis gráfica	Platicúrtica	
NOMBRE	Arena media moderadamente bien clasificada	

Tabla 4.2

Resultados geoestadísticos, Sal Cruz 03

Muestra	Sal Cruz 03	Histograma
Clasificación	Moderadamente bien clasificada	
Grupo Textural	Arena	
Moda	Unimodal (<i>arena media</i>)	
Media	Arena media	
Asimetría	Simétrica	
Curtosis gráfica	Platicúrtica	
NOMBRE	Arena media moderadamente bien clasificada	

sedimento es unimodal, siendo el tamaño 2ϕ , arena media, el más frecuente ([tabla 4.2](#)); además de coincidir con el tamaño promedio en el sedimento. La curva de frecuencia de los tamaños del sedimento es simétrica, el índice de asimetría es de -0.074 , ya que la curva no se inclina hacia ningún extremo. Las arenas muy finas son sólo el 0.08% del total analizado, y, en éste caso, no se registró fracción gruesa en el sedimento. Y la curtosis gráfica es de tipo platicúrtica.

SAL CRUZ 05

Del sedimento analizado de Sal Cruz 05, su grupo textural pertenece a la arena. Su desviación estándar tiene un valor de 0.58ϕ , valor que se localiza en el rango de los sedimentos moderadamente bien clasificados. Además, los sedimentos analizados tienen característica unimodal, teniendo como tamaño más frecuente a arena gruesa (tabla 4.3). Siendo, también, este tamaño de arena coincide con la media de la muestra. La simetría de la distribución del tamaño de partículas es de 0.18, siendo, así, asimétrica hacia las partículas finas. La fracción gruesa representa un 0.05 % y las arenas muy finas un 0.02 % del total analizado. La distribución de los tamaños es de tipo platicúrtica.

Tabla 4.3

Resultados geoestadísticos, Sal Cruz 05

Muestra	Sal Cruz 05	Histograma
Clasificación	Moderadamente bien clasificada	
Grupo Textural	Arena	
Moda	Unimodal (<i>arena gruesa</i>)	
Media	Arena gruesa	
Asimetría	Asimétrica hacia las partículas finas	
Curtosis gráfica	Platicúrtica	
NOMBRE	Arena gruesa moderadamente bien clasificada	

SAL CRUZ 07

El grupo textural al que pertenece la muestra Sal Cruz 07 es arena. La desviación estándar de la muestra es de 0.59ϕ , localizándose en el rango de moderadamente bien clasificada. El sedimento es de tipo unimodal con la a arena media como tamaño más frecuente y siendo, también, el promedio de tamaño de la muestra (tabla 4.4). La asimetría obtenida corresponde a simétrica, con un valor de 0.032. La fracción gruesa del sedimento es de 0.05 % y la parte de arena muy fina es de 0.39 % del sedimento total analizado. Y los tamaños, tienen una curtosis gráfica platicúrtica.

Tabla 4.4

Resultados geoestadísticos, Sal Cruz 07

Muestra	Sal Cruz 07	Histograma
Clasificación	Moderadamente bien clasificada	
Grupo Textural	Arena	
Moda	Unimodal (<i>arena media</i>)	
Media	Arena media	
Asimetría	Simétrica	
Curtosis gráfica	Platicúrtica	
NOMBRE	Arena media moderadamente bien clasificada	

SAL CRUZ 09

El sedimento analizado, de la muestra Sal Cruz 07, está en el grupo textural arena, y tiene a la arena media como valor más frecuente (unimodal) y como media de los tamaños ([tabla 4.5](#)). Se tiene una desviación estándar de 0.60ϕ , estando el sedimento moderadamente bien clasificado. El índice de asimetría tiene un valor de -0.09 , colocando a la muestra en el tipo simétrico. Además, su curtosis tiene un valor de 0.96 , correspondiendo al tipo mesocúrtica. La fracción gruesa del sedimento es del 0.05% y la porción de la arena muy fina es del 0.08% .

SAL CRUZ 11

La muestra analizada de Sal Cruz 11 está en el grupo de las arenas. Los sedimentos se encuentran moderadamente bien clasificados (desviación estándar de 0.53ϕ), y el tamaño más frecuente del sedimento, al igual que la media del tamaño, es la arena media (unimodal). La distribución de los tamaños del sedimento es simétrica, y la curtosis gráfica es leptocúrtica, presentando un valor de 1.13 ([tabla 4.6](#)). Del 100% de la muestra, el 0.02% corresponde a la fracción gruesa y el 0.48% a la arena muy fina.

Tabla 4.5

Resultados geoestadísticos, Sal Cruz 09

Muestra	Sal Cruz 09	Histograma
Clasificación	Moderadamente bien clasificada	
Grupo Textural	Arena	
Moda	Unimodal (<i>arena media</i>)	
Media	Arena media	
Asimetría	Simétrica	
Curtosis gráfica	Mesocúrtica	
NOMBRE	Arena media moderadamente bien clasificada	

Tabla 4.6

Resultados geoestadísticos, Sal Cruz 11

Muestra	Sal Cruz 11	Histograma
Clasificación	Moderadamente bien clasificada	
Grupo Textural	Arena	
Moda	Unimodal (<i>arena media</i>)	
Media	Arena media	
Asimetría	Simétrica	
Curtosis gráfica	Leptocúrtica	
NOMBRE	Arena media moderadamente bien clasificada	

SAL CRUZ 13

El sedimento de esta muestra se encuentra principalmente en el grupo de las arenas. La desviación estándar tiene el valor de 0.79ϕ , clasificando a la muestra como moderadamente clasificada. Las partículas que se presentaron con mayor frecuencia son las arenas medias (unimodal), siendo este tamaño el mismo del

tamaño promedio de las partículas (**tabla 4.7**). El índice de asimetría tiene un valor de 0.01, valor localizado en el rango la distribución simétrica, y la curtosis gráfica es del tipo mesocúrtica (teniendo un valor de 0.99). La fracción gruesa de la muestra equivale al 0.67% del total y la arena muy fina al 2.19%.

Tabla 4.7

Resultados geoestadísticos, Sal Cruz 13

Muestra	Sal Cruz 13	Histograma
Clasificación	Moderadamente clasificada	
Grupo Textural	Arena	
Moda	Unimodal (<i>arena media</i>)	
Media	Arena media	
Asimetría	Simétrica	
Curtosis gráfica	Mesocúrtica	
NOMBRE	Arena media moderadamente clasificada	

SAL CRUZ 15

El sedimento analizado de esta muestra también pertenece al grupo textural de las arenas. Estas arenas están moderadamente bien clasificadas, al presentar un valor de 0.68ϕ en la desviación estándar. El grupo de tamaños modal corresponde al de arena media (unimodal), coincidente con la media de los datos (**tabla 4.8**). Los tamaños de partícula tienen una distribución simétrica (valor de -0.1), y su curtosis gráfica lo pone en el tipo platicúrtica. La fracción gruesa del sedimento solamente representa el 0.63% del total de la muestra y la arena muy fina el 0.38%.

SAL CRUZ 17

El sedimento de la última muestra analizada, correspondiente a la muestra que se localiza al oeste y que está más próxima al puerto de Salina Cruz (**figura 2.2**). El sedimento de la muestra Sal Cruz 17, al igual que en las muestras anteriores, pertenece al grupo de las arenas, y se presentan moderadamente bien clasificadas (índice de clasificación=0.66). La arena media es tanto la media como el tamaño modal, siendo unimodal al tener solamente un tamaño que presenta mayor frecuencia (**tabla 4.9**). El índice de asimetría

Tabla 4.8

Resultados geoestadísticos, Sal Cruz 15

Muestra	Sal Cruz 15	Histograma
Clasificación	Moderadamente bien clasificada	
Grupo Textural	Arena	
Moda	Unimodal (<i>arena media</i>)	
Media	Arena media	
Asimetría	Simétrica	
Curtosis gráfica	Platicúrtica	
NOMBRE	Arena media moderadamente bien clasificada	

Tabla 4.9

Resultados geoestadísticos, Sal Cruz 17

Muestra	Sal Cruz 17	Histograma
Clasificación	Moderadamente bien clasificada	
Grupo Textural	Arena	
Moda	Unimodal (<i>arena media</i>)	
Media	Arena media	
Asimetría	Simétrica	
Curtosis gráfica	Mesocúrtica	
NOMBRE	Arena media moderadamente bien clasificada	

de la muestra es de 0.03ϕ , correspondiendo al tipo simétrico (coincidiendo con la mayoría de las muestras), y presenta una curtosis gráfica del tipo platicúrtica (siento el tipo se curtosis más repetido). La fracción gruesa del sedimento analizado (arena muy gruesa+gránulo) equivale únicamente al 0.02 % de la muestra, mientras que, las arenas muy finas sólo al 0.97 %.

Generalidades de las muestras

El área de estudio, localizado en la zona costera BSC, tiene sedimentos de tamaño arena en más del 99 % del total de las muestras; en la mayoría de estas no se tiene registro de tamaños mayores al de arena muy gruesa, salvo en Sal Cruz 01 y 07 (cuya fracción gruesa —que contiene partículas de tamaño gránulo— no rebasa el 0.5 % del total de sedimento analizado de cada muestra); y los tamaños inferiores a $+3.75\phi$, en donde se pudieran encontrar los tamaños limo y arcilla, tuvieron pesos de 0 g (aunque se tiene que tomar en cuenta la exactitud de la báscula que es de 0.01, donde, aunque hubieran algunas partículas de esos tamaños, no representaron el peso suficiente para ser registrado por la báscula). La arena media equivale a el tamaño promedio del sedimento de la zona estudiada, ya que es este tamaño el correspondiente a la media en la mayoría de las muestras (variando únicamente en la muestra Sal Cruz 05, donde su media fue la arena gruesa), además de ser, la arena media, el tamaño que se presentó en mayor frecuencia en casi la totalidad de las muestras (con excepción a Sal Cruz 05, donde la arena gruesa fue el tamaño más frecuente). El sedimento de la zona costera BSC está en general moderadamente bien clasificado, de todas las muestras, sólo una presentó su clasificación diferente a las demás, la muestra Sal Cruz 13 —moderadamente clasificada—. En cuanto al índice de asimetría, la distribución del tamaño de las partículas en el área estudiada es simétrica (ocho de las nueve muestras son simétricas, siendo Sal Cruz 05 la única muestra que es asimétrica hacia las partículas finas). Y, respecto a la curtosis, cinco de las nueve muestras son platicúrticas (Sal Cruz 01, 03, 05, 07, 15), otras tres muestras son mesocúrticas (Sal Cruz 09, 13, 17), y solamente una es leptocúrtica (Sal Cruz 11); si se hace el promedio aritmético de los valores obtenidos de la curtosis en cada muestra, se obtiene el valor de 0.90, valor que se encuentra en el límite entre platicúrtica y mesocúrtica. Con lo anterior el sedimento de la zona costera BSC recibe el nombre de Arena media moderadamente bien clasificada.

Esfericidad y redondez

La esfericidad y redondez de los sedimentos es afectada por los mecanismos y el tiempo de duración del transporte, al igual que la resistencia de los sedimentos. Se hizo un análisis del sedimento de la muestra Sal Cruz 09, este sedimento (que se localiza en la parte central de todas las muestras analizadas, **figura 2.2**) presenta las mismas características generalizadas del sedimento de la zona costera BSC. En las **figura 4.1**, **figura 4.2**, **figura 4.3** y **figura 4.4** se observa que los minerales más abundantes son el cuarzo y los feldespatos, y en menor medida minerales oscuros, rojizos, rosados, verdes y, aunque no se observa en las fotografías, mica negra. Los cuarzoes presentan dos morfologías mayormente esférica (alta esfericidad) y, en menor medida, ligeramente elongada que corresponde a la forma elipsoidal; siendo este el mineral que

presenta menor redondez (de subangular a subredondeada). Los feldespatos presentan principalmente dos morfologías, siendo la más abundante la morfología ligeramente elongada que corresponde al tipo elipsoidal (baja esfericidad), y la otra morfología es la esférica (alta esfericidad); los feldespatos pertenecen a los minerales que presentan mayor redondez (de redondeados a bien redondeados). La morfología de los minerales oscuros se presentan en dos grupos, uno que tiene alta esfericidad y otro que tiene baja esfericidad, el primer grupo presenta la morfología esférica (alta esfericidad), mientras que en el segundo grupo se encuentran las formas discoidal y elipsoidal (baja esfericidad); el grupo de alta esfericidad esta, mayormente, subredondeado y redondeado; y el grupo de baja esfericidad se encuentra redondeado. Los minerales rojizos presentan una alta esfericidad, teniendo forma esférica, y están subredondeados. En cuanto a los minerales rosados, están presentes mayormente en forma esférica (alta esfericidad), aunque también hay algunos con formas elongadas (baja esfericidad); la redondez de las formas esféricas están subredondeadas y las formas elongadas están redondeadas. Por otro lado, los minerales verdes tienen baja esfericidad, presentando formas elipsoidal y cilíndricas (siendo esta la más común), y ambas formas están subredondeadas. La mica negra está principalmente en forma discoidal y elipsoidal (baja esfericidad) y está subredondeada.

Aunque el cuarzo y los feldespatos se encuentra en prácticamente todos los tamaños del sedimento, se encuentran predominando los tamaños de partículas superiores al 2.5ϕ , y es en este rango de tamaños donde se encuentra cerca del 90 % de los sedimentos en todas las muestras. Por el contrario, los minerales oscuros pueden encontrarse en prácticamente todos los tamaños, pero es a partir de tamaños inferiores a 2.5ϕ donde comienza a aumentar su concentración; en la mayoría de las muestras estos tamaños no llegan ni al 10 % del total del sedimento, con excepción de las muestras: Sal Cruz 11, 13 y 17 (las cuales superan este 10 %), y, dentro de estas, la muestra Sal Cruz 13 presenta el mayor porcentaje de estos tamaños, correspondiendo a un 26.5 % del total de sedimento. Junto con el aumento de concentración de minerales oscuros, se tiene la presencia de los minerales rojizos, rosados, verdes y mica negra (se enlistaron en orden a su abundancia, siendo el primero el más abundante y el último el menor).

Con la abundancia de cada mineral en los diferentes tamaños y sus características morfológicas, se puede extrapolar a las del sedimento estas características. El sedimento de la playa, mayormente, tiene alta esfericidad (forma esférica), aunque, también, una gran parte del sedimento tiene baja esfericidad (forma elipsoidal), y con una baja porción de sedimentos con forma discoidal y cilíndrica, los cuales también tienen baja esfericidad. Y en su mayoría, el sedimento va de subredondeado a redondeado, pero también se presenta sedimento subangular y bien redondeado.

Figura 4.1

Fotografía donde se observan las esfericidad y redondez de diferentes partículas de tamaño arena gruesa a muy gruesa

**Figura 4.2**

Fotografía donde se observan las esfericidad y redondez de diferentes partículas de tamaño arena media

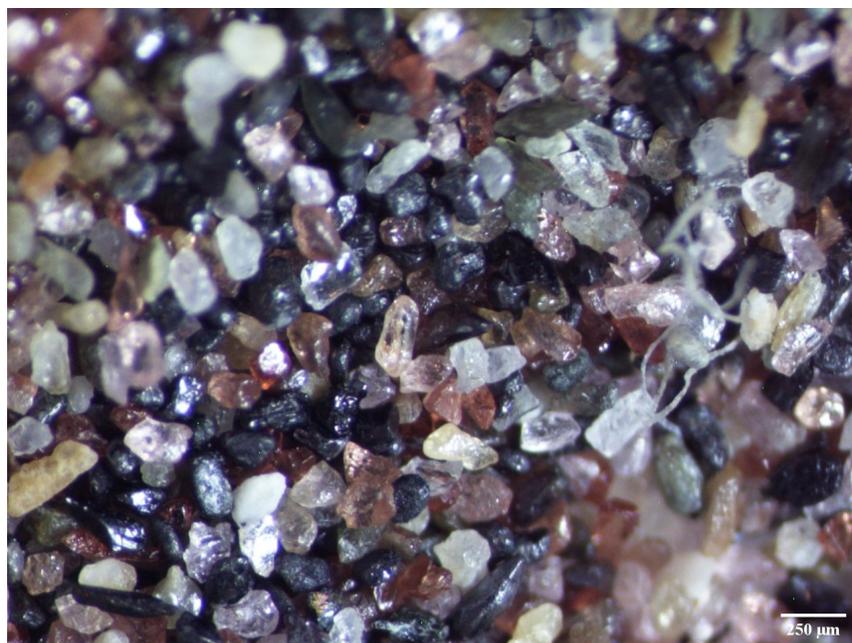


Figura 4.3

Fotografía donde se observan las esfericidad y redondez de diferentes partículas de tamaño arena fina (2.5ϕ)

**Figura 4.4**

Fotografía donde se observan las esfericidad y redondez de diferentes partículas de tamaño arena fina (3.0ϕ)

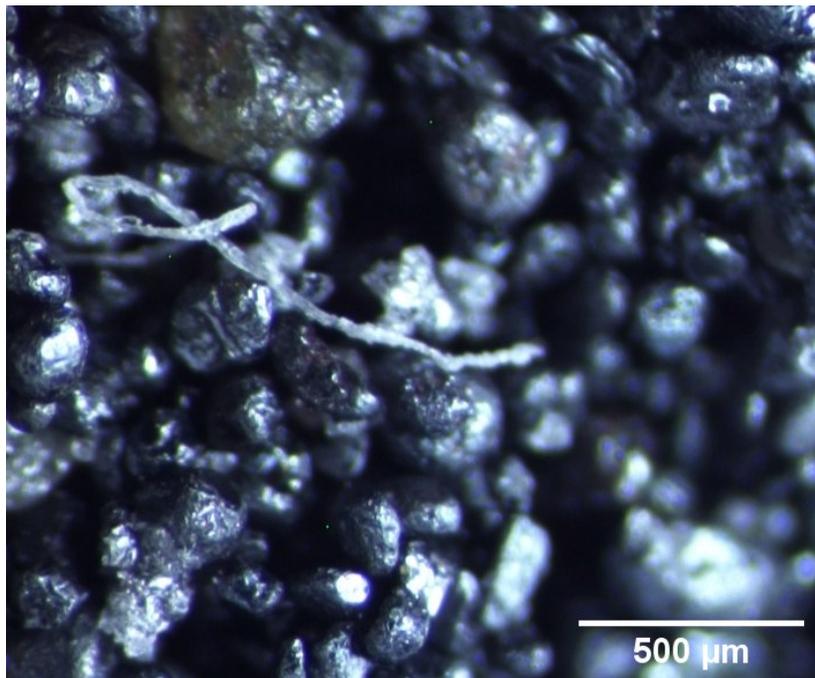


Microplásticos Encontrados

Durante la medición de los microplásticos, se midió sus longitudes (se tomó la distancia más larga de un extremo a otro, pasando por el centro, en el caso de los fragmentos, películas y gránulos) para obtener un promedio y reportarlo en cada muestra; al final se presenta la distribución de los tamaños obtenidos por color en las formas más abundantes. Es importante señalar que al utilizar la barra de agitación magnética en los sedimentos, no se tomó en cuenta los minerales que podría tener la muestra; fue hasta que se sacaba la barra de agitación donde se notaba una pequeña cantidad de minerales magnéticos pegados a la barra. Aunque en la mayoría no era una gran cantidad de sedimento extraído, fue en la muestra Sal Cruz 13 donde hubo una mayor cantidad de sedimento extraído. En estos sedimentos extraídos pudieron quedar atrapados algunos microplásticos como se observa en la **figura 4.5**.

Figura 4.5

Fotografía de microplástico incoloro en forma de fibra atrapado en minerales que presentaron magnetismo fuerte (Sal Cruz 13)



SAL CRUZ 01

Dentro de los colores presentes en la muestra Sal Cruz 01 (negro, azul, rojo, incoloro, pardo, multicolor, rosa, amarillo, verde y morado), el color dominante fue el negro, con 106 unidades, siguiéndole el azul, con 41, el rojo con 35 y el incoloro, con 13; mientras que los demás colores no superaron las 10 unidades, el conteo y la comparativa de microplásticos por color se puede ver en la **tabla 4.10** y **figura 4.6a**. En cuanto a las morfologías presentes, se tienen la fibra, el fragmento y las fibras enredadas; predominando las fibras, superando por más de 150 unidades a los fragmentos o fibras enredadas; siendo las fibras las que presentaron mayor variación de colores, siendo siete en total, los fragmentos se hallaron en 6 diferentes colores, y las fibras enredadas, al ser éstas de diferentes colores, se colocaron en multicolor (**figura 4.6b**). El promedio de las longitudes, la medición más larga de los microplásticos, varió de 47.84μ a 1648.64μ ; las fibras fueron las que presentaron los tamaños más grandes, mientras que los fragmentos hallados tuvieron los tamaños más pequeños.

El sedimento usado de la muestra Sal Cruz 01 fue de $36.82 g$. En ésta cantidad de sedimento se encontró un total de 211 microplásticos, y, al sacar la proporción de este número de microplásticos para un kilogramo de sedimento seco (kg^{-1} d.w.), se tiene un total de 5809.47 de partículas por kg. De los microplásticos encontrados, en la **figura 4.7** se muestran fotografía de algunos de las diferentes morfologías y colores.

Tabla 4.10

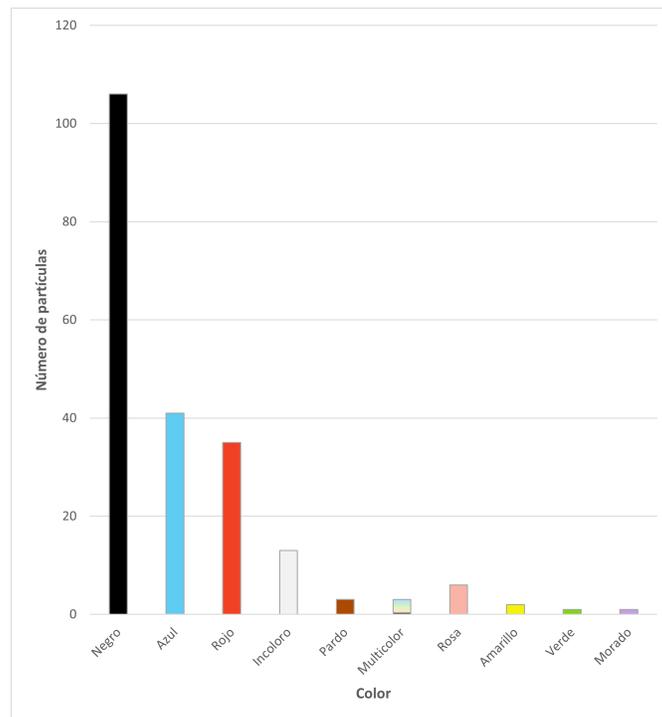
Resultados del conteo y clasificación de los microplásticos en la muestra Sal Cruz 01

Sal Cruz 01			
Color	Cantidad	Tipo	Medición promedio (μ)
Negro	106	Fibra	1648.64
Azul	41	Fibra y Fragmento	1368.45
Rojo	35	Fibra y Fragmento	1349.99
Incoloro	13	Fibra	1558.91
Pardo	3	Fibra y Fragmento	637.98
Multicolor	3	Fibra, Fibras Enredadas y Fragmento	671.98
Rosa	6	Fibra y Fragmento	869.31
Amarillo	2	Fragmento	102.47
Verde	1	Fragmento	108.59
Morado	1	Fragmento	47.84
Total		211	
Total por kg		5809.47	

Figura 4.6

Gráficas de barras relacionando el color con la cantidad y forma (incluyendo separación de colores) con la cantidad de los microplásticos presentes en la muestra Sal Cruz 01

(a) Gráfica del número de partículas contra el color



(b) Gráfica del número de partículas contra la forma

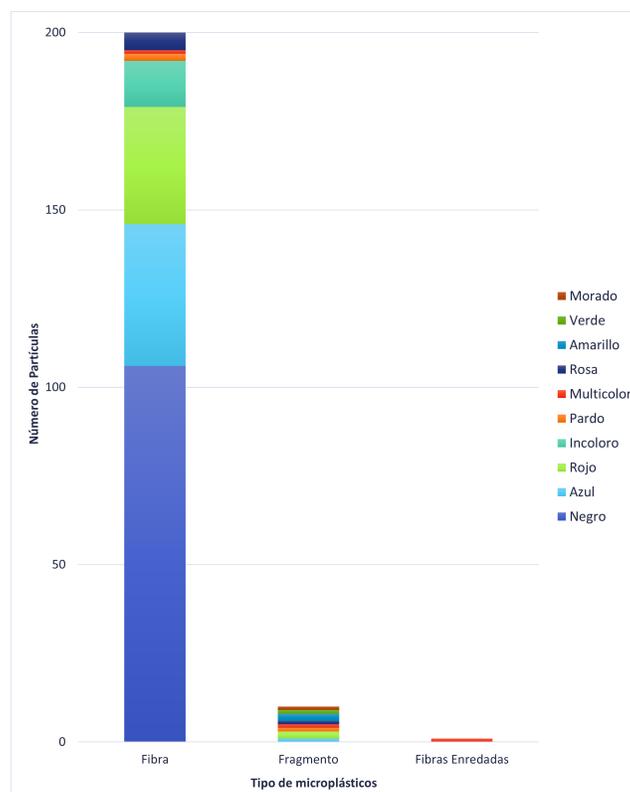
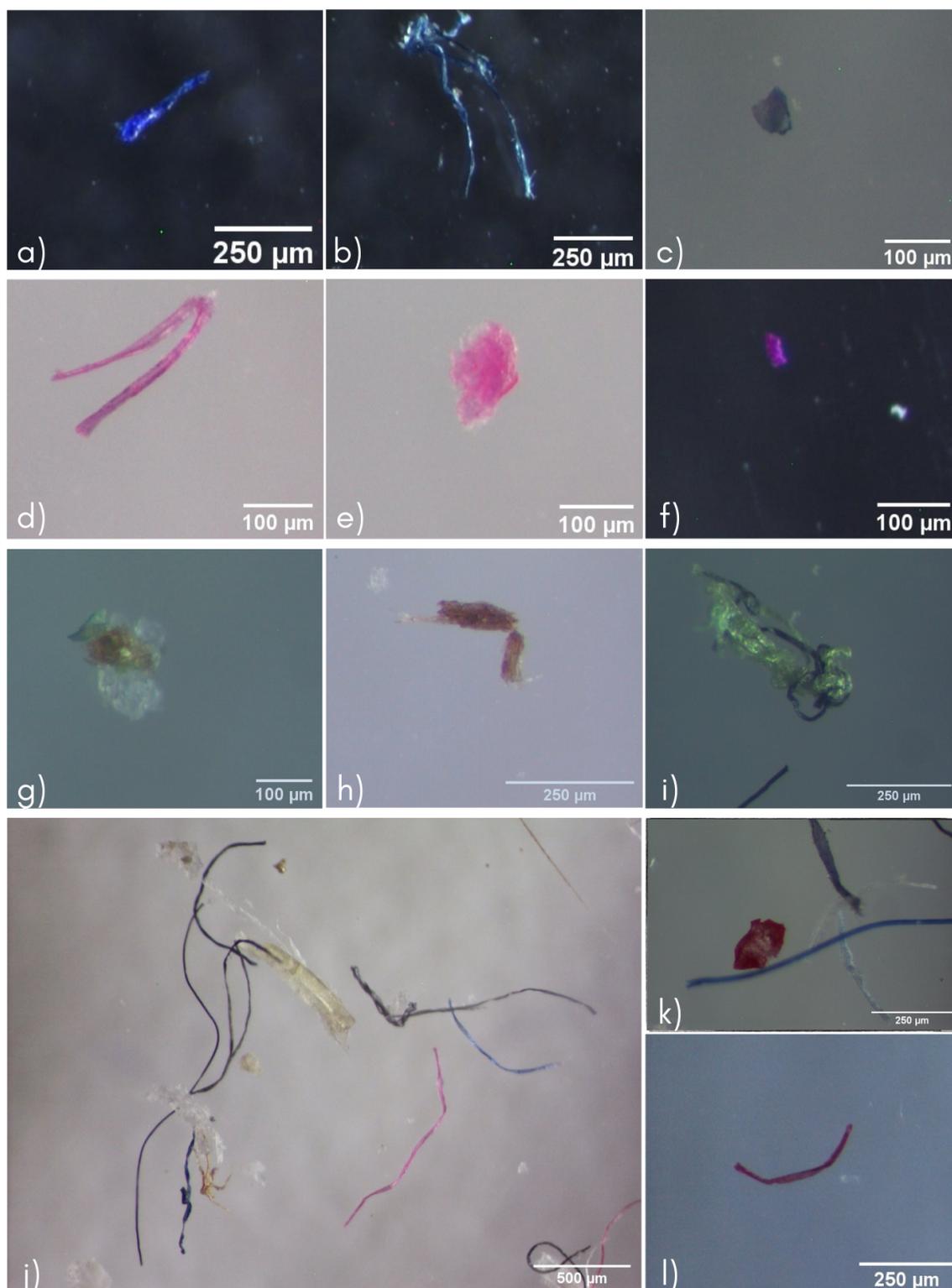


Figura 4.7

Fotografías de microplásticos encontrados en la muestra Sal Cruz 01



Nota. a) Fragmento azul; b) fibra azul; c) fragmento azul; d) fibra rosa; e) fragmento rosa; f) fragmento morado; g) fragmento verde y fragmento amarillo sobre grano de sal; h) fragmento pardo alargado con extremos irregulares; i) fibras enredadas de color verde y negro; j) fibras mayormente de color negro junto a otras de color: azul, rosa, rojo e incolor; k) fragmento rojo junto a fibras: azul, negra e incolora y l) fibra roja.

SAL CRUZ 03

De los microplásticos encontrados en la muestra Sal Cruz 03, los colores presentes son: negro, azul, rojo, incoloro, multicolor, amarillo, verde y morado; de éstos, los principales colores (los tres más abundantes) son el negro, con 45 partículas, el rojo, con 31, y el azul, con 13; el resto presenta menos de 10 microplásticos contados por color (**tabla 4.11** y **figura 4.8a**). El rango de tamaño promedio de los microplásticos va desde 98.46 μ , el cual corresponde a un fragmento multicolor, hasta 3210.59 μ , medida promedio de las fibras rojas. Las morfologías identificadas fueron cinco: fibra, fragmento, esfera, fibras enredadas y gránulos. El tipo de morfología presente en mayor número es la fibra, con más de 80 unidades menos, se localiza en segundo lugar de frecuencia al tipo fragmento y en tercero el tipo esfera, y los últimos lugares los ocupan el gránulo, con dos unidades, y las fibras enredadas, con una unidad. Las fibras se encuentra en cinco colores diferentes, los fragmentos en tres, y las esferas, gránulos y fibras enredadas en sólo un color (**figura 4.8b**).

El sedimento utilizado de la muestra Sal Cruz 03 fue de 37.76 g, encontrando un total de 105 microplásticos; haciendo que se tengan 2780.72 partículas por kilogramo de sedimento seco. Fotografía de algunos microplásticos encontrados en la **figura 4.9**.

Tabla 4.11

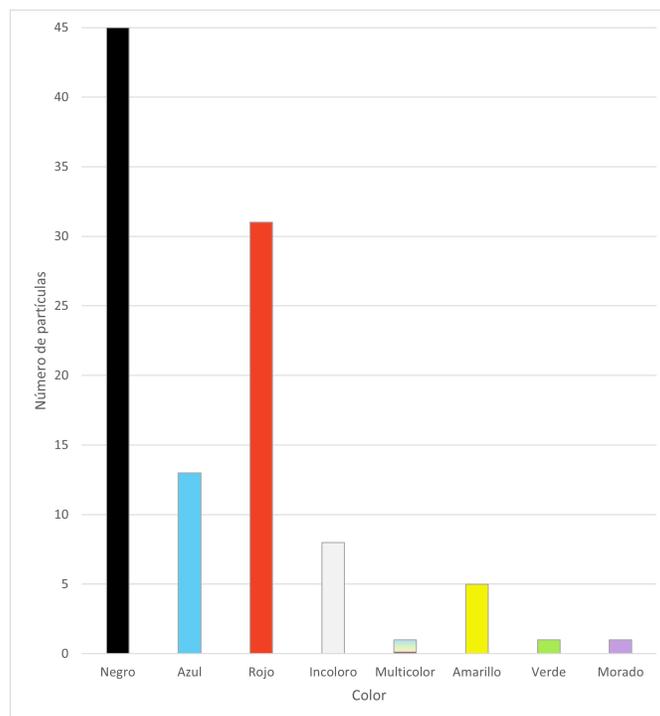
Resultados del conteo y clasificación de los microplásticos en la muestra Sal Cruz 03

Sal Cruz 03			
Color	Cantidad	Tipo	Medición promedio (μ)
Negro	45	Fibra y Fibras Enredadas	1898.01
Azul	13	Fibra y Fragmento	598.44
Rojo	31	Fibra	3210.59
Incoloro	8	Fibra	1232.55
Multicolor	1	Fragmento	98.46
Amarillo	5	Esfera y Gránulo	181.89
Verde	1	Fragmento	103.28
Morado	1	Fibra	671.43
Total		105	
Total por kg		2780.72	

Figura 4.8

Gráficas de barras relacionando el color con la cantidad y forma (incluyendo separación de colores) con la cantidad de los microplásticos presentes en la muestra Sal Cruz 03

(a) Gráfica del número de partículas contra el color



(b) Gráfica del número de partículas contra la forma

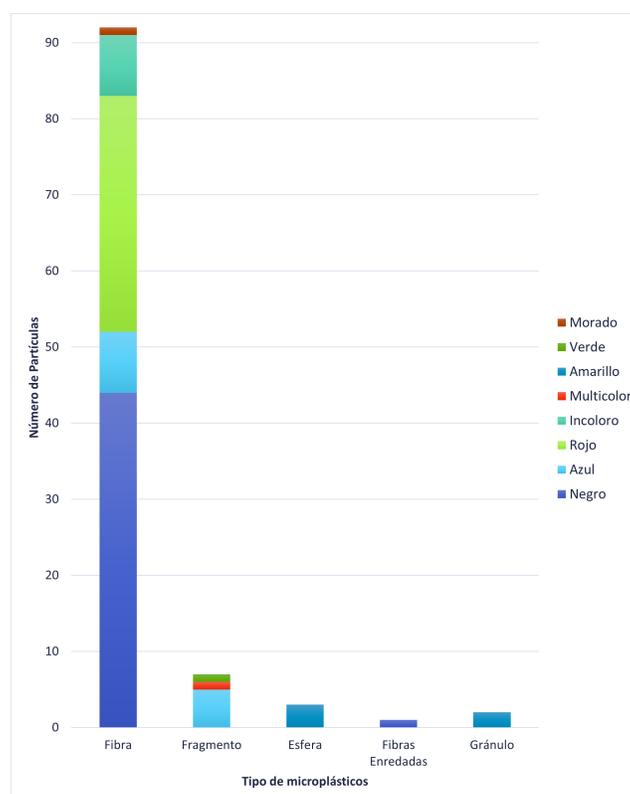
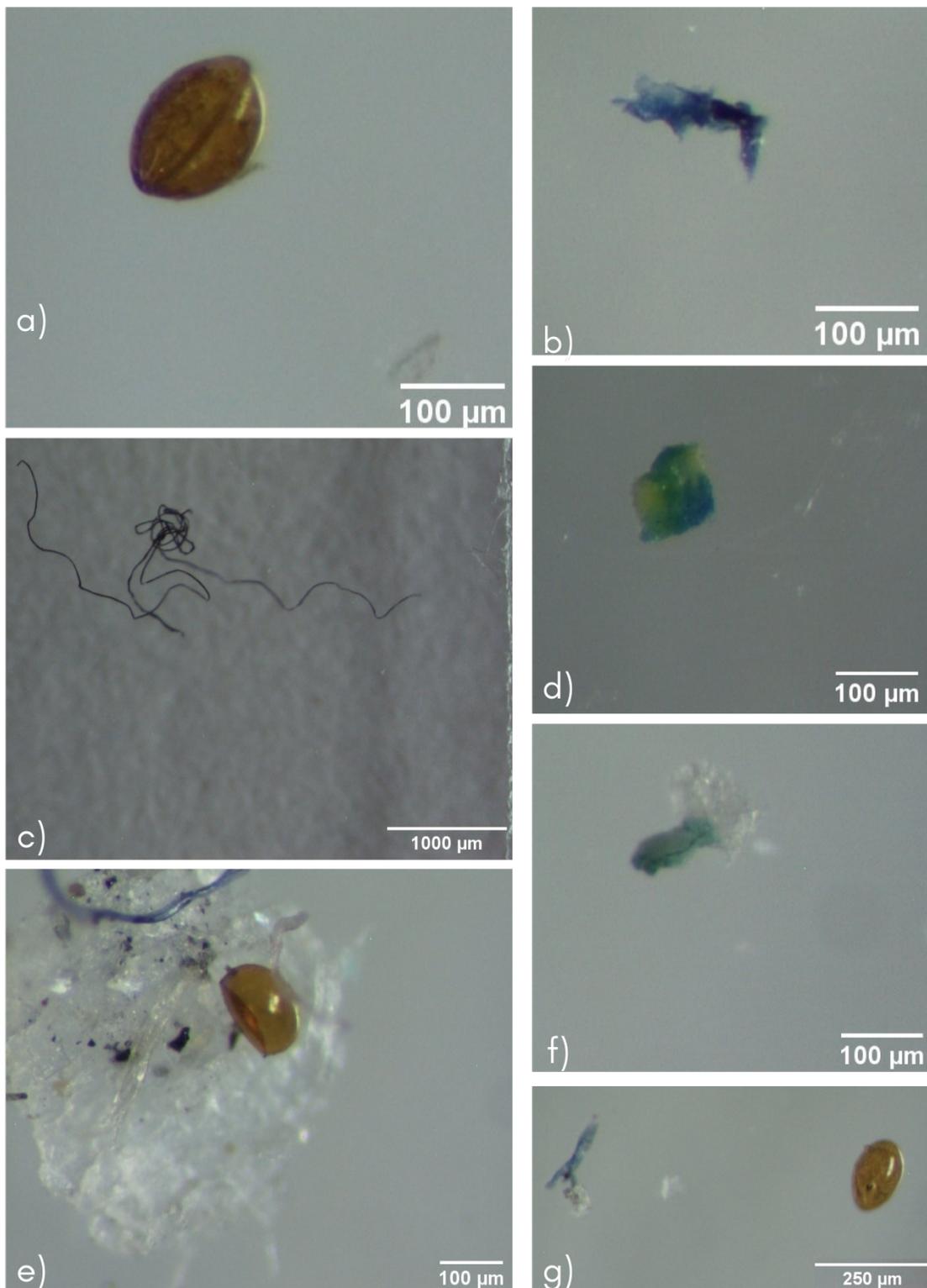


Figura 4.9

Fotografías de microplásticos encontrados en la muestra Sal Cruz 03



Nota. a) Gránulo amarillo; b) fragmento azul; c) fibras enredadas de color negro; d) fragmento multicolor con colores: azul, verde y amarillo; e) esfera amarilla junto a fibras incoloras y azul sobre grano de sal; f) fragmento verde y g) fibra azul junto a gránulo amarillo.

SAL CRUZ 05

En el sedimento analizado de la muestra Sal Cruz 05, se hallaron microplásticos de nueve colores diferentes, los cuales son: negro, azul, rojo, incoloro, multicolor, amarillo, verde, morado y pardo. El más abundante de estos es el negro con 64 partículas, seguido del rojo con 28, el azul con 19 y el incoloro con 17, y el resto de colores suman en total 10 microplásticos (**tabla 4.12** y **figura 4.10a**). Se encontraron cuatro diferentes morfologías: fibra, fragmento, esfera y película. De estas, la más abundante es la fibra, con un total de 126 partículas contadas, después se encuentra el fragmento, con únicamente ocho partículas, seguido de la esfera, con tres piezas y al final la película, con una sola partícula. La morfología con mayor variación de colores es la fibra, presente en siete colores diferentes, mientras que el fragmento solamente está en tres colores diferentes, y las formas que están en un sólo color son la esfera y película (**figura 4.10b**). De los promedios de las mediciones realizadas, los valores más elevados corresponden a las fibras, siendo 2082.14 μ el mayor (fibra color pardo) y el menor 147.84 μ (esferas amarillas).

Se utilizaron en total 36.97 g de sedimento durante el análisis, en donde se contaron un total de 138 microplásticos; lo que equivale a 3732.76 partículas por kilogramo de sedimento seco. En la **figura 4.11** se encuentran fotografía de los microplásticos encontrados en esta muestra.

Tabla 4.12

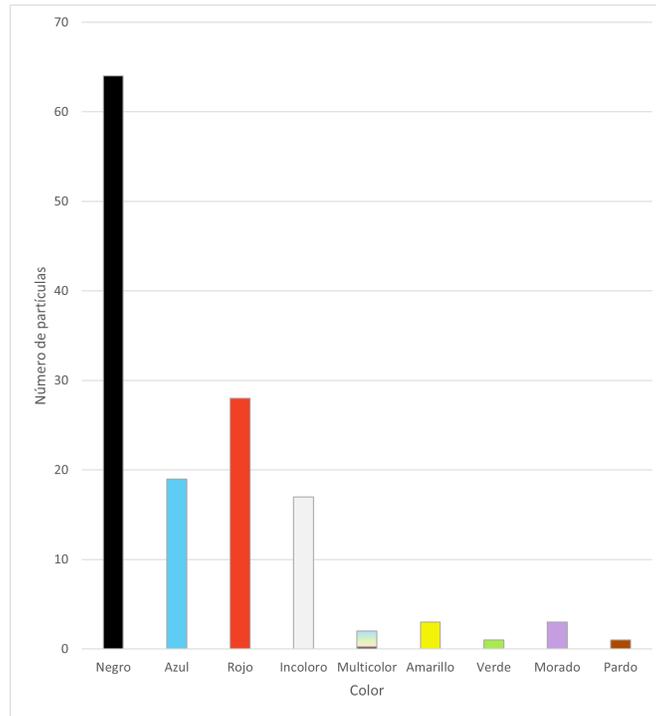
Resultados del conteo y clasificación de los microplásticos en la muestra Sal Cruz 05

Sal Cruz 05			
Color	Cantidad	Tipo	Medición promedio (μ)
Negro	64	Fibra	1812.19
Azul	19	Fibra	876.15
Rojo	28	Fibra y Fragmento	1531.24
Incoloro	17	Fibra y Película	1094.55
Multicolor	2	Fragmento	166.07
Amarillo	3	Esfera	147.84
Verde	1	Fibra	2015.25
Morado	3	Fibra y fragmento	486.28
Pardo	1	Fibra	2082.14
Total		138	
Total por kg		3732.76	

Figura 4.10

Gráficas de barras relacionando el color con la cantidad y forma (incluyendo separación de colores) con la cantidad de los microplásticos presentes en la muestra Sal Cruz 05

(a) Gráfica del número de partículas contra el color



(b) Gráfica del número de partículas contra la forma

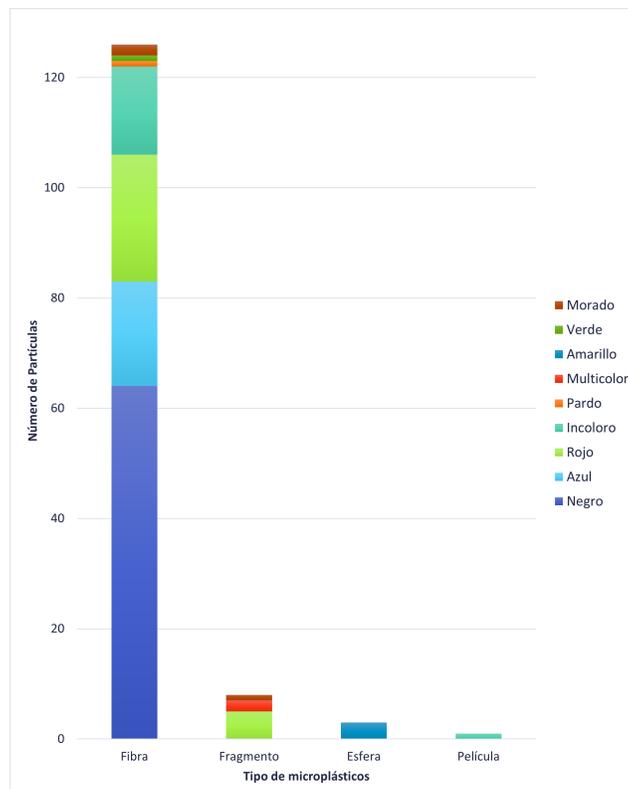
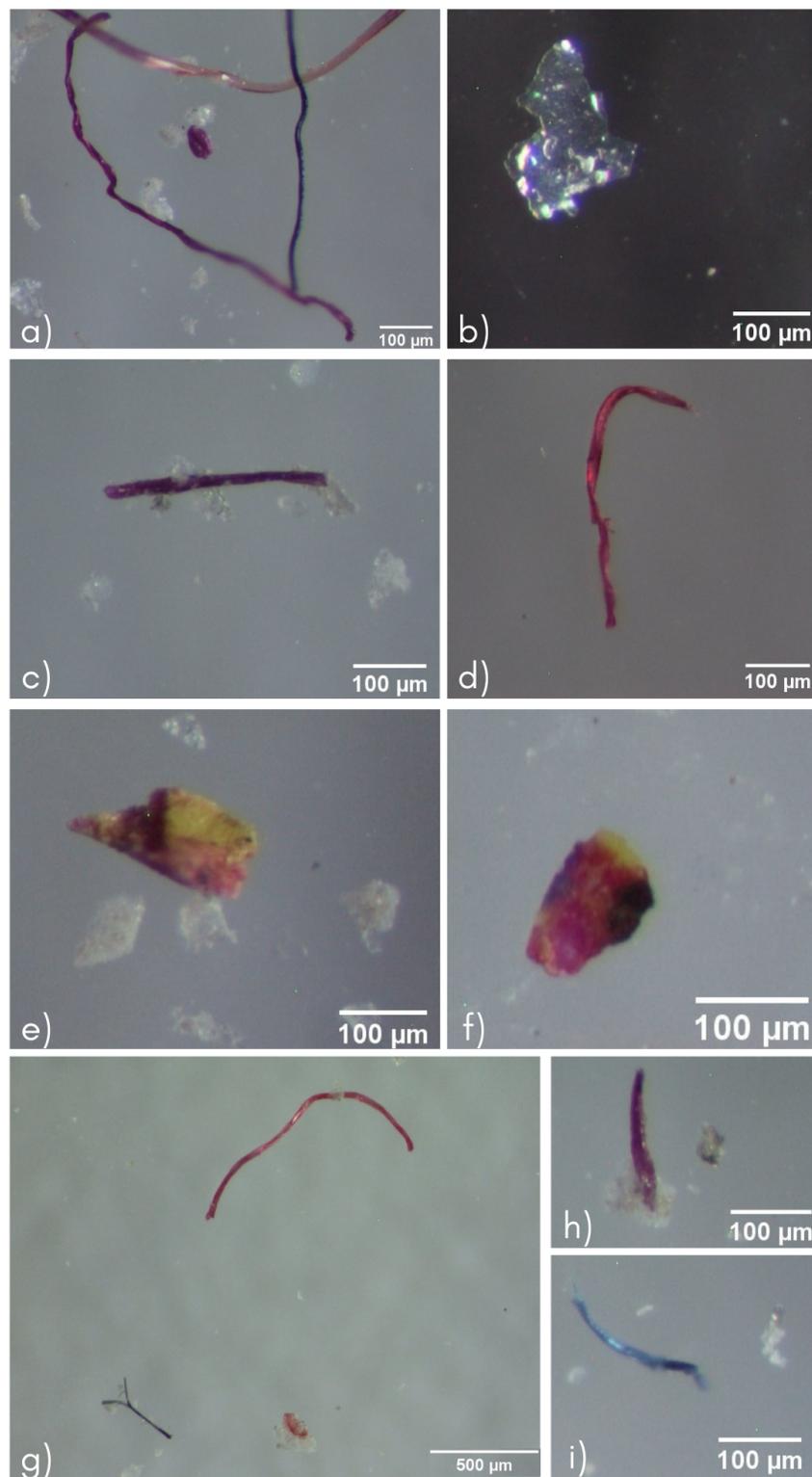


Figura 4.11

Fotografías de microplásticos encontrados en la muestra Sal Cruz 05



Nota. a) Fragmento morado localizado en el centro, rodeado de fibras de color morado, rojo y negro; b) película transparente; c) fibra morada d) fibra roja e) fragmento multicolor: naranja y amarillo; f) fragmento de color rojo, amarillo y negro; g) fibra roja en la parte superior, y fibra negra y fragmento rojo en la parte inferior; h) fragmento morado; i) fibra azul.

SAL CRUZ 07

En la muestra Sal Cruz 07 se encontraron seis colores diferentes, el negro, azul, rojo, incoloro, amarillo y pardo. El negro es el color más abundante dentro de estos microplásticos (67 unidades), el siguiente más abundante es el rojo, con 20 unidades, después el incoloro, con 17 unidades, luego el azul, con 11 unidades, seguido del amarillo, con cinco unidades, y finalmente el pardo, con una sola unidad (**tabla 4.13** y **figura 4.12a**). Se tienen cuatro morfologías diferentes de microplásticos en la muestra, estas son la fibra, esfera, película y fragmento. Las fibras suman un total de 115 partículas, las esferas son únicamente cuatro, las películas sólo dos y, finalmente, el fragmento solamente uno. Las fibras se encontraron en todos los colores hallados en la muestra, por otro lado las películas, esferas y fragmento se hallaron en un sólo color (**figura 4.12b**). Al estar presente la morfología tipo fibra en todas las variedades de color, provocó que el rango de tamaños fuera mayor a los anteriores; siendo el tamaño promedio más pequeño de 517.92μ (tamaño perteneciente al color amarillo donde están las esferas, cuyo tamaño promedio ronda entre los 140 y 150μ , **figura 4.38b**, pero también se encuentra una fibra de mayor tamaño que provoca este aumento en el tamaño promedio), y el más grande de 3556.58μ . Esta muestra pertenece a una de las que presentan menor variedad en color de microplásticos.

El sedimento utilizado para realizar este análisis tuvo un peso de $35.66 g$. En este sedimento se encontró 121 partículas en total, lo cual nos da un valor de 3393.16 partículas por kilogramo de sedimento seco. De los microplásticos encontrados, se muestran algunos en la **figura 4.13**.

Tabla 4.13

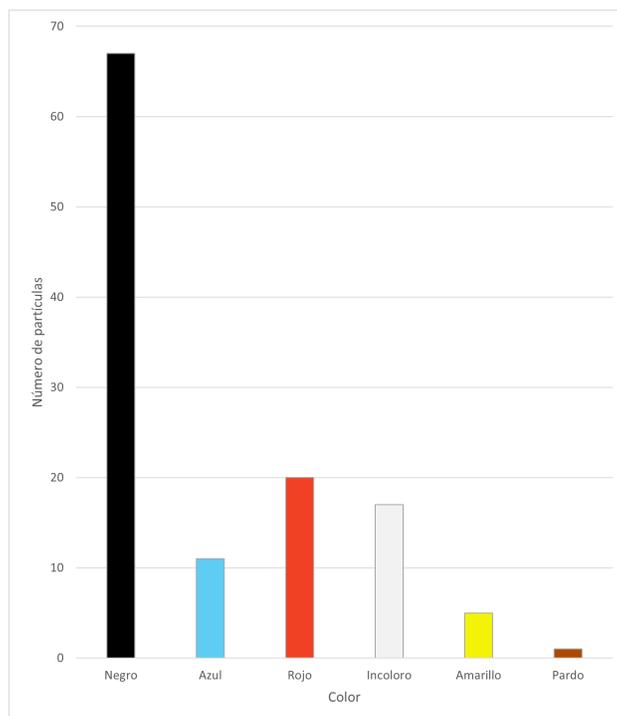
Resultados del conteo y clasificación de los microplásticos en la muestra Sal Cruz 07

Sal Cruz 07			
Color	Cantidad	Tipo	Medición promedio (μ)
Negro	67	Fibra	1754.00
Azul	11	Fibra y Fragmento	963.79
Rojo	20	Fibra	1736.31
Incoloro	17	Fibra y Película	1420.82
Amarillo	5	Fibra y Esfera	517.92
Pardo	1	Fibra	3556.58
Total	121		
Total por kg	3393.16		

Figura 4.12

Gráficas de barras relacionando el color con la cantidad y forma (incluyendo separación de colores) con la cantidad de los microplásticos presentes en la muestra Sal Cruz 07

(a) Gráfica del número de partículas contra el color



(b) Gráfica del número de partículas contra la forma

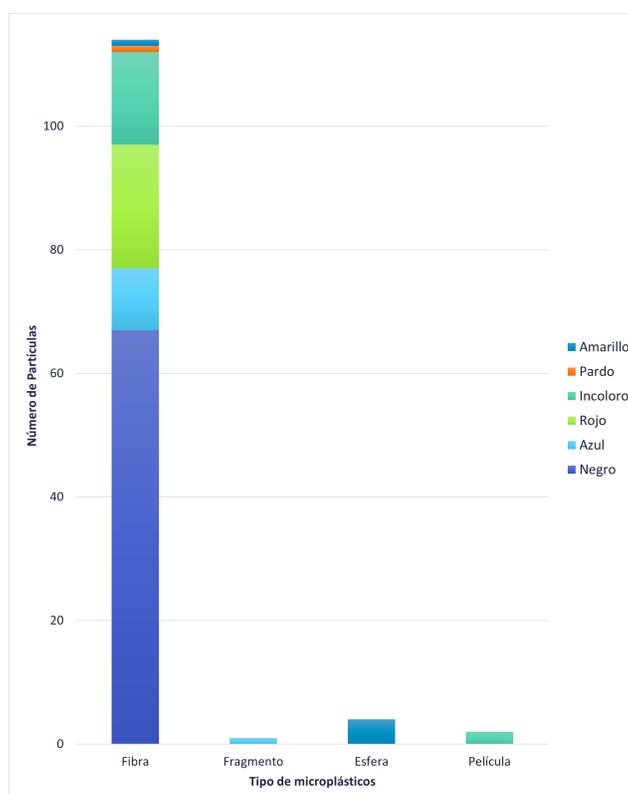
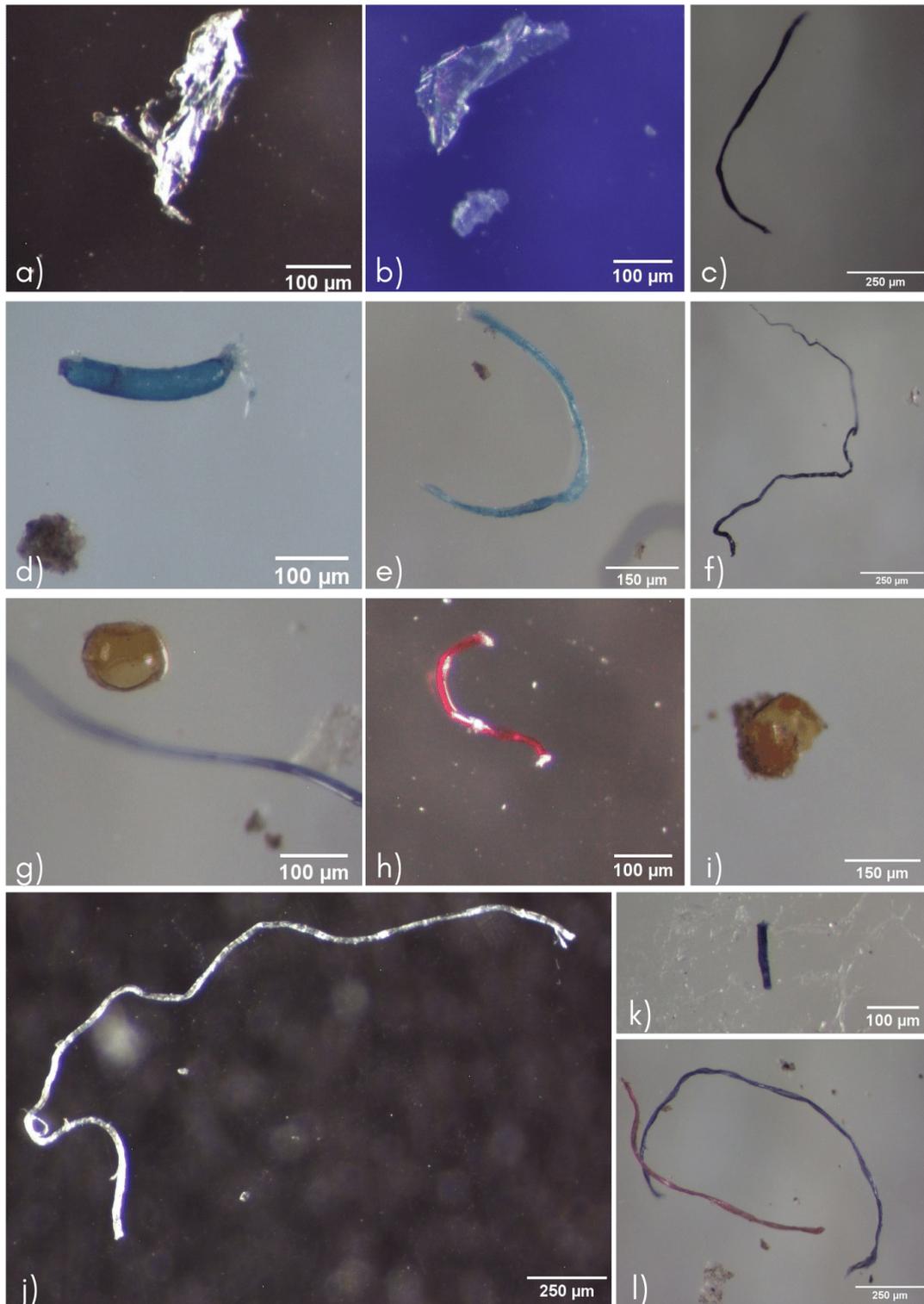


Figura 4.13

Fotografías de microplásticos encontrados en la muestra Sal Cruz 07



Nota. a y b) Películas incoloras; c) fibra negra; d) fragmento azul; e) fibra azul; f) fibra negra; g) esfera amarilla; h) fibra roja; i) esfera amarilla rota; j) fibra incolora k) fibra azul y l) fibra azul y roja

SAL CRUZ 09

En Sal Cruz 09 se encontraron una variedad de colores (seis), entre estos están el negro, azul, rojo, incoloro, amarillo y morado. De estos colores, su orden de abundancia es: en primer lugar el color negro (con poco menos del 50 % de las partículas encontradas), en segundo lugar el color rojo (con cerca de 25 % de los microplásticos encontrados), en tercer lugar el azul (con 12 unidades), en cuarto lugar están el amarillo y morado (con cuatro partículas cada uno), y por último el incoloro (con sólo 2 unidades) (**tabla 4.14** y **figura 4.14a**). Estos colores se presentaron en dos morfologías diferentes, la fibra y la esfera. El color amarillo se presenta únicamente en la forma de esfera, mientras que la fibra se encuentra en los demás colores restantes (**figura 4.14b**). Al tener una única forma en todos los colores, se pudo obtener un valor promedio de longitud para las diferentes morfologías en los diferentes colores; siendo las fibras rojas las que presentan un mayor valor con 2954.92 μ , y las esferas amarillas las que presentan un menor tamaño 176.36 μ . Sal Cruz 09 corresponde a la muestra que menor variedad en forma y color de microplásticos presenta.

De la muestra se pesaron un total de 36.32 g de sedimento seco, en el cual se cuantificaron 82 partículas de microplásticos en total; este valor equivale a 2257.71 partículas por kilogramo de sedimento seco. En la **figura 4.15** se muestran fotografías de los microplásticos encontrados.

Tabla 4.14

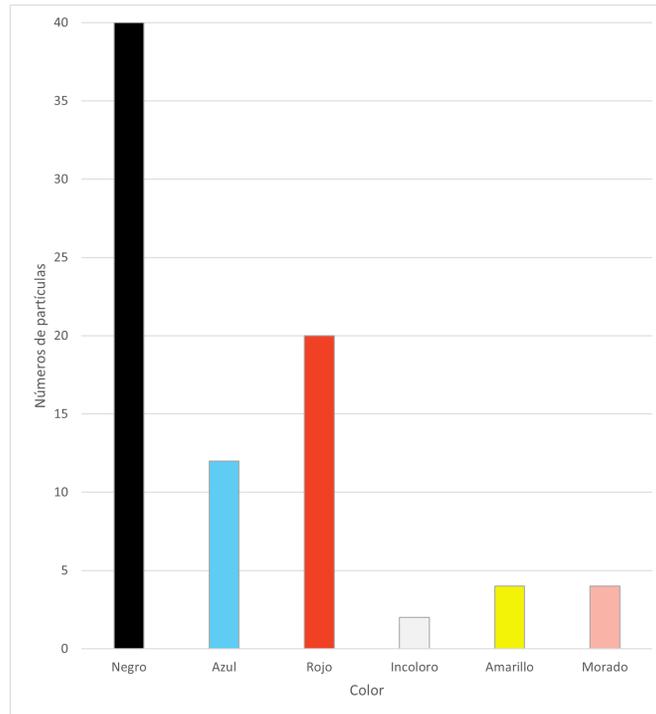
Resultados del conteo y clasificación de los microplásticos en la muestra Sal Cruz 09

Sal Cruz 09			
Color	Cantidad	Tipo	Medición promedio (μ)
Negro	40	Fibra	2262.03
Azul	12	Fibra	460.40
Rojo	20	Fibra	2954.92
Incoloro	2	Fibra	1639.33
Amarillo	4	Esfera	176.36
Morado	4	Fibra	649.82
Total	82		
Total por kg	2257.71		

Figura 4.14

Gráficas de barras relacionando el color con la cantidad y forma (incluyendo separación de colores) con la cantidad de los microplásticos presentes en la muestra Sal Cruz 09

(a) Gráfica del número de partículas contra el color



(b) Gráfica del número de partículas contra la forma

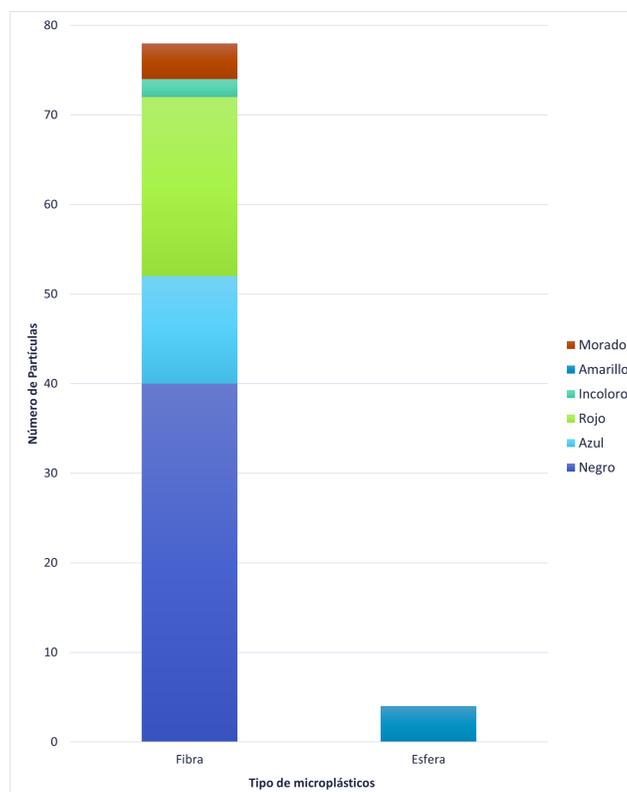
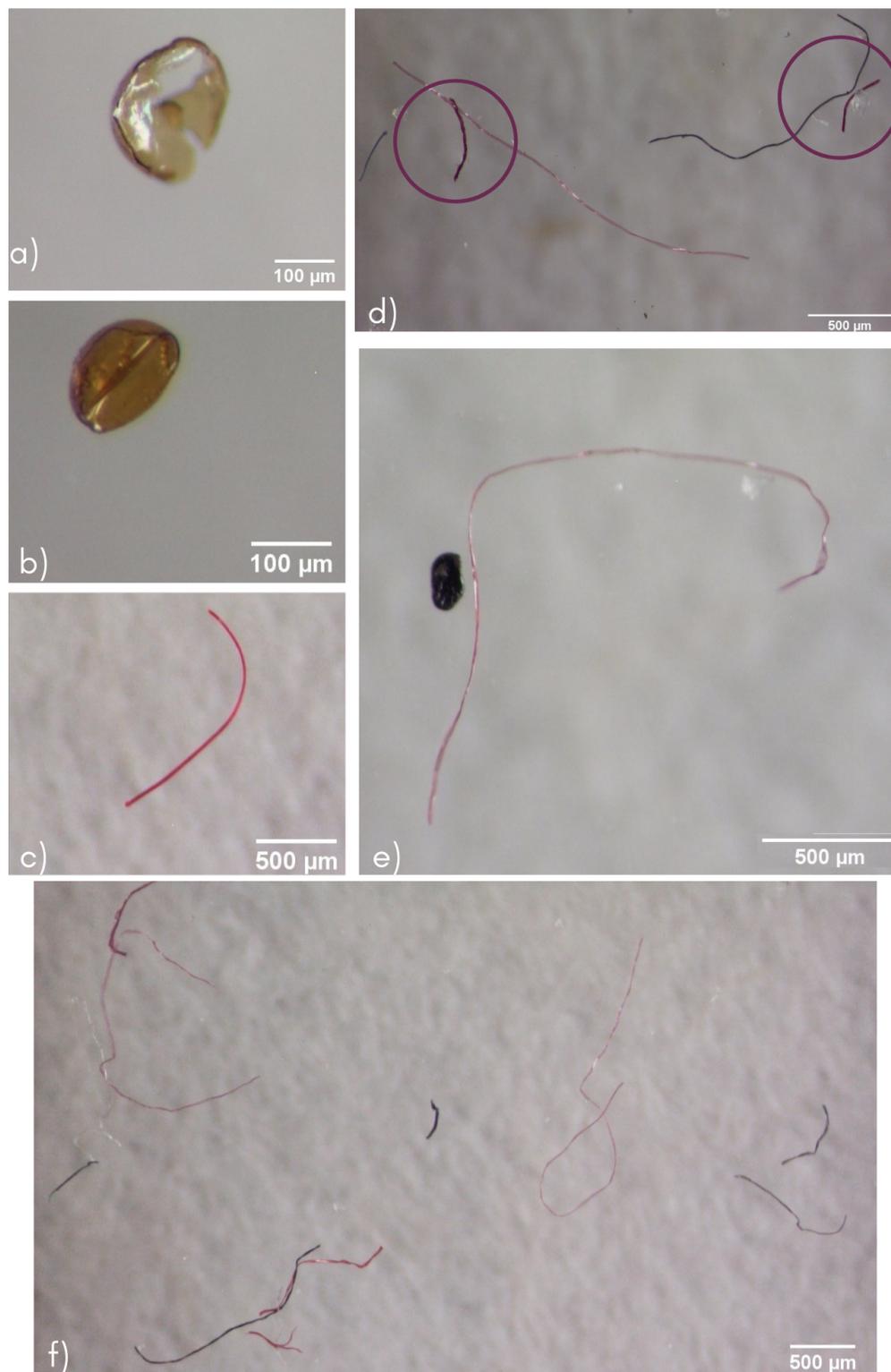


Figura 4.15

Fotografías de microplásticos encontrados en la muestra Sal Cruz 09



Nota. a) Mitad de una esfera amarilla; b) esfera doblada hacia adentro; c) fibra roja; d) fibras moradas encerradas en círculos, junto a fibras roja, negra (derecha) y azul (izquierda); e) fibra roja; f) fibras rojas junto a fibras negras y un a incolora localizada del lado izquierdo.

SAL CRUZ 11

El sedimento de Sal Cruz 11 contiene microplásticos de siete colores diferentes, los cuales son el negro, azul, rojo, incoloro, amarillo, multicolor y rosa. El color con mayor piezas cuantificadas es el negro con 32 piezas, seguido del azul con 13 piezas, después, el rojo con nueve, el incoloro con seis, el amarillo con cinco, y, finalmente, el rosa y multicolor con una pieza cada uno (**tabla 4.15** y **figura 4.16a**). Dentro de las morfologías encontradas únicamente se tienen tres: fibra, fragmento y esfera. La fibra es la más abundante en la muestra con 60 piezas y es, además, la morfología con mayor variación de color (cinco colores diferentes); le sigue, en abundancia, la esfera con cinco piezas (presente sólo en un color); y la morfología menos abundante es el fragmento, el cual se encuentra en dos colores diferentes, pero en cada color solamente se tiene una pieza de esta morfología (**figura 4.16b**). El rango de tamaños va desde 124.71 μ , tamaño promedio de las esferas amarillas, a 2268.67 μ , tamaño promedio de las fibras incoloras.

El sedimento pesado, utilizado para el análisis, es de 37.51 g, siendo encontrados, en este sedimento, un total de 67 partículas en total; lo que equivale a 1786.19 partículas por kilogramo de sedimento seco. **figura 4.17**, fotografías de algunos microplásticos encontrados en el sedimento.

Tabla 4.15

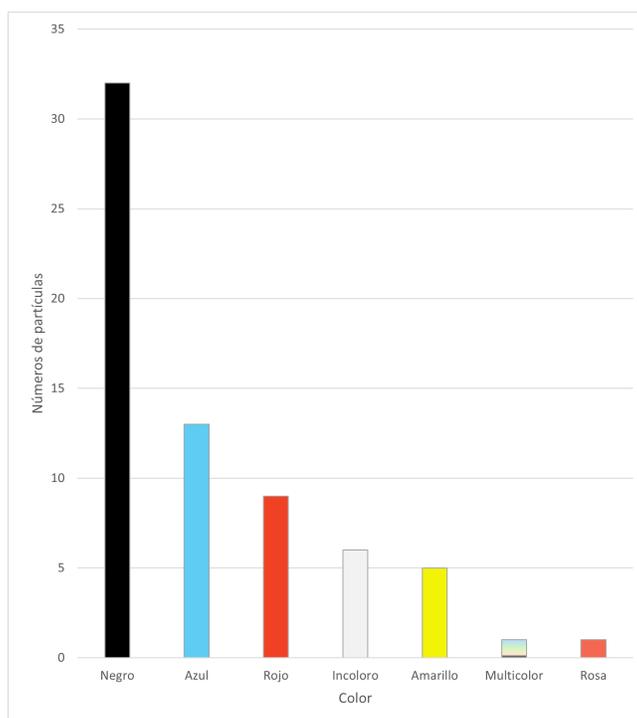
Resultados del conteo y clasificación de los microplásticos en la muestra Sal Cruz 11

Sal Cruz 11			
Color	Cantidad	Tipo	Medición promedio (μ)
Negro	32	Fibra	1258.69
Azul	13	Fibra	2149.38
Rojo	9	Fibra y Fragmento	1790.98
Rosa	1	Fibra	569.79
Incoloro	6	Fibra	2268.67
Multicolor	1	Fragmento	171.15
Amarillo	5	Esfera	124.71
Total	67		
Total por kg	1786.19		

Figura 4.16

Gráficas de barras relacionando el color con la cantidad y forma (incluyendo separación de colores) con la cantidad de los microplásticos presentes en la muestra Sal Cruz 11

(a) Gráfica del número de partículas contra el color



(b) Gráfica del número de partículas contra la forma

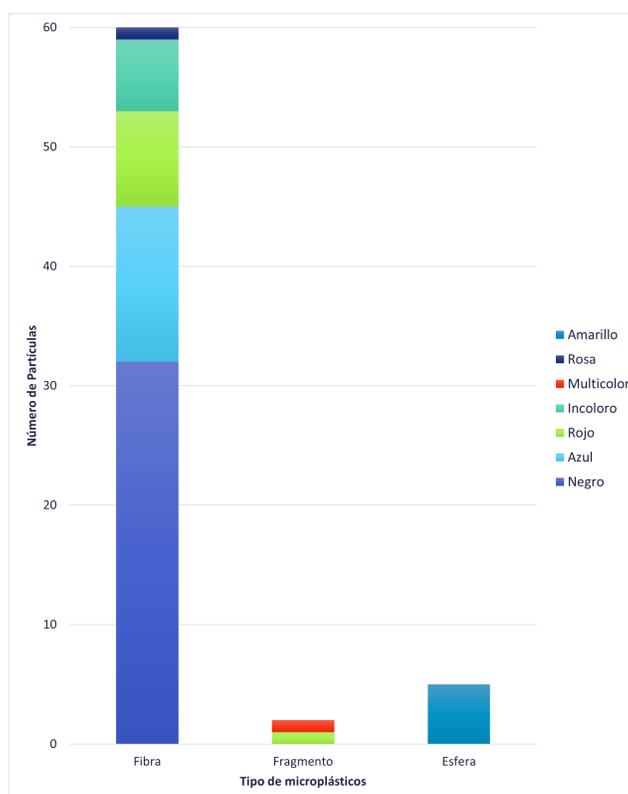
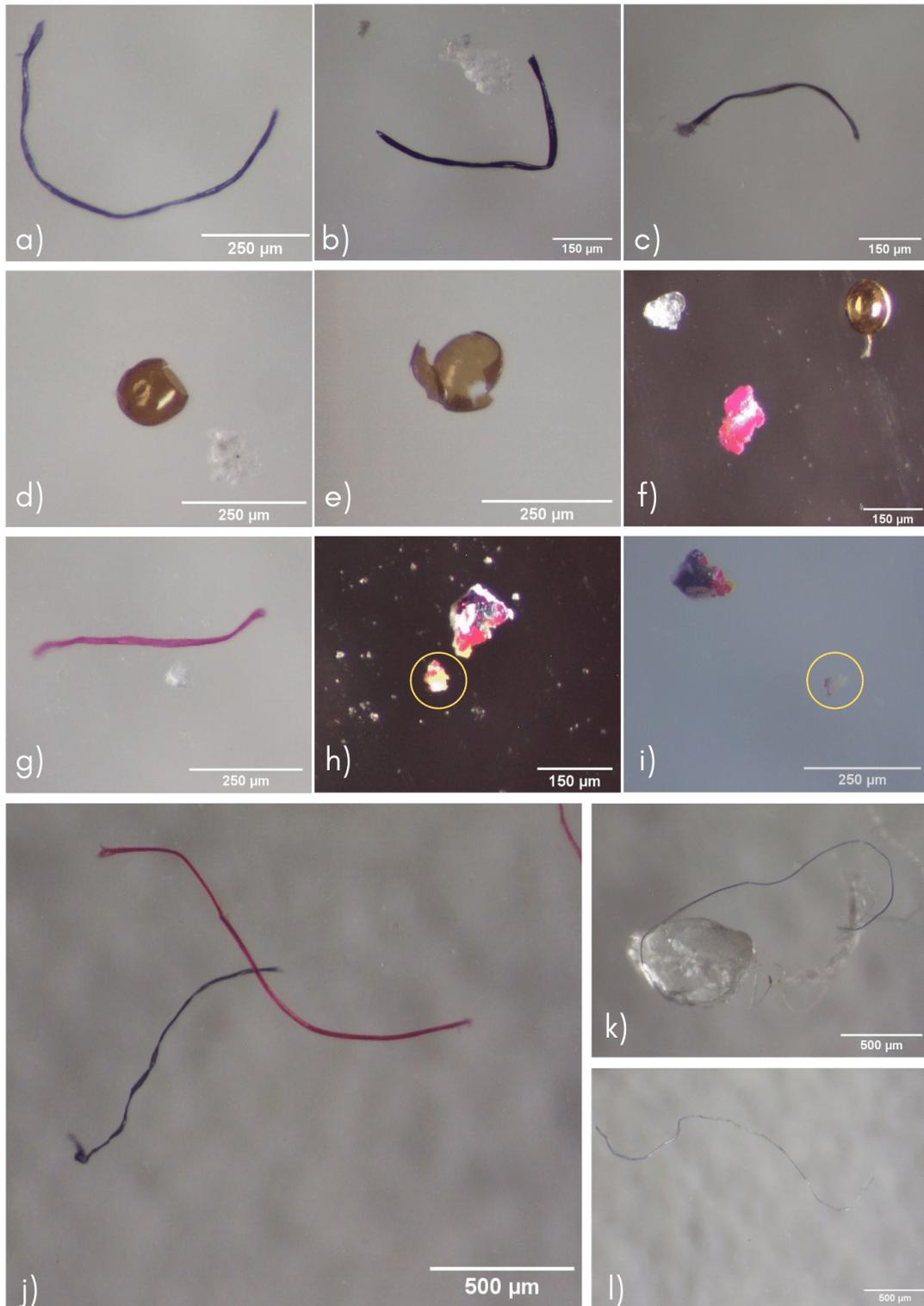


Figura 4.17

Fotografías de microplásticos encontrados en la muestra Sal Cruz 11



Nota. a) Fibra azul; b y c) fibras negras; d y e) esferas rotas; f) fragmento rojo junto a esfera amarilla; g) fibra rosa; h e i) fragmento partido en dos, encerrado en un círculo se encuentra la comparativa del como cambia de color de acuerdo al lado donde se ponga (en “h” presenta los colores del plástico y en “i” se ve de color blanco al voltearlo); j) fibra roja y negra; k y l) fibras azules.

SAL CRUZ 13

En el sedimento usado de la muestra Sal Cruz 13 se hallaron siete colores de microplásticos diferentes, los cuales son: negro, azul, rojo, incoloro, multicolor, rosa y amarillo. De estos colores el que se presenta con mayor frecuencia es el negro (con 42 unidades), después el incoloro (con 21 partículas), seguido del azul (con 14 piezas), continuando con el rojo (con 10 unidades), y finalizando con los colores que presentan menor cantidad de partículas: amarillo con seis, multicolor con tres y rosa igual con tres (**tabla 4.16** y **figura 4.18a**). En cuanto a las morfologías presentes, se tienen la fibra, el fragmento y la esfera. Dentro de estas morfologías presentes, la más abundante es la fibra, con un total de 90 partículas contadas, la segunda más abundante es la esfera, con únicamente seis partículas, y en tercer lugar se encuentra el fragmento, con tres sólo tres partículas; además, las fibras se presentaron en seis de los nueve colores diferentes de microplásticos hallados, mientras que los fragmentos solamente en dos colores diferentes y las esferas sólo en uno (**figura 4.18b**). Los tamaños promedios de los microplásticos variaron desde el valor menor, 147.08 μ (partículas amarillas), hasta el valor mayor, 1171.77 μ (partículas azules).

El sedimento usado tuvo un peso de 35.81 g, en el cual se contó un total de 99 partículas; y al pasar esta cantidad de partículas por 35.81 g a partículas por kilogramo da como resultado 2764.59 partículas por kilogramo de sedimento seco. Ejemplos de los microplásticos encontrados en la **figura 4.19**.

Tabla 4.16

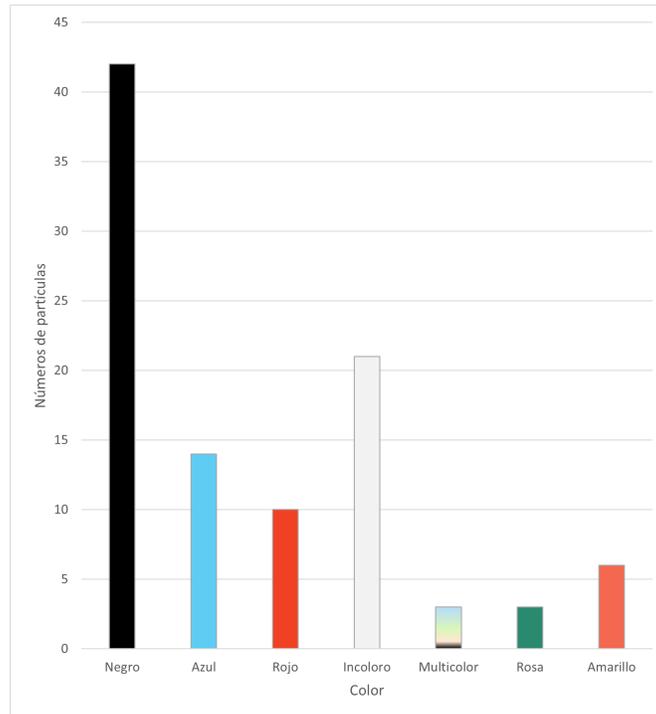
Resultados del conteo y clasificación de los microplásticos en la muestra Sal Cruz 13

Sal Cruz 13			
Color	Cantidad	Tipo	Medición promedio (μ)
Negro	42	Fibra	894.33
Azul	14	Fibra y Fragmento	1171.77
Rojo	10	Fibra	492.70
Incoloro	21	Fibra	912.88
Multicolor	3	Fibra	924.77
Rosa	3	Fibra y Fragmento	258.06
Amarillo	6	Esfera	147.08
Total		99	
Total por kg		2764.59	

Figura 4.18

Gráficas de barras relacionando el color con la cantidad y forma (incluyendo separación de colores) con la cantidad de los microplásticos presentes en la muestra Sal Cruz 13

(a) Gráfica del número de partículas contra el color



(b) Gráfica del número de partículas contra la forma

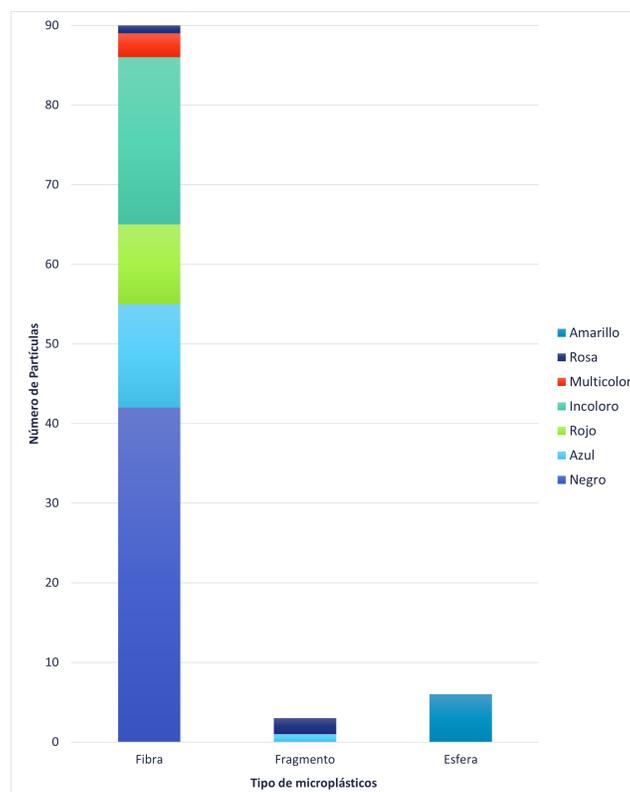
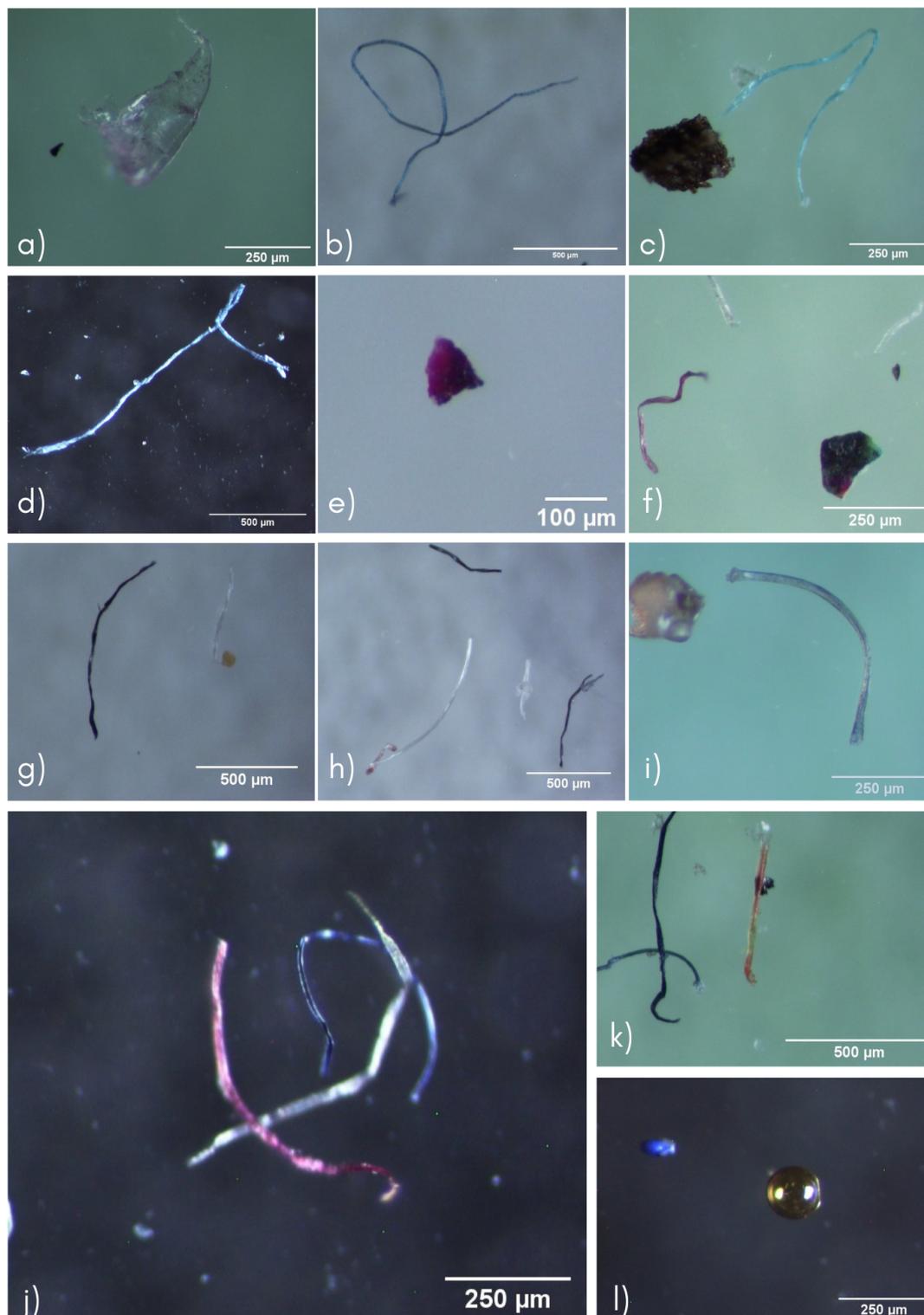


Figura 4.19

Fotografías de microplásticos encontrados en la muestra Sal Cruz 13



Nota. a) Fragmento rosa; b, c y d) fibras azules; e) fragmento rosa; f) fibra rosa junto a fibras incoloras; g) fibra negra junto a fibra incolora; h) fibras incoloras junto a fibras negras; i) fibra negra translúcida; j) fibra roja, incolora y azul; k) fibra multicolor (naranja y rojo) junto a una fibra negra y una azul; l) esfera amarilla con fragmento azul.

SAL CRUZ 15

Del sedimento analizado (Sal Cruz 15) se identificaron diez colores diferentes, los cuales fueron: negro, azul, rojo, incoloro, naranja, pardo, multicolor, verde, rosa y amarillo. Los colores que predominan, con una amplia diferencia, son el negro (con un total de 100 partículas), el incoloro (con 80 unidades), el azul (con 63 piezas) y el rojo (con 45 microplásticos); por otro lado, los colores que se encuentran en menor frecuencia son el rosa (nueve piezas), el pardo (seis partículas), el multicolor y naranja (cuatro unidades), y, por último, el verde y amarillo (dos microplásticos) (**tabla 4.17** y **figura 4.20a**). Las morfologías presentes en los microplásticos son dos: fibra y fragmento; siendo la primera la predominante, al estar presente en nueve de los 10 colores identificados, y la última, por otro lado, sólo se encontró en ocho microplásticos diferentes, estando estas ocho partículas divididas en cuatro colores diferentes (**figura 4.20b**). Las mediciones promedio de las partículas van de 172.89 μ (fragmentos amarillos) a 1788.66 μ (fibras multicolor). Esta muestra pertenece a una de las que presentan menor variedad en forma de microplásticos.

El peso del sedimento usado de la muestra fue de 36.52 g, en el que se encontró un total de 315 partículas; dando como resultado un total de 8625.41 partículas por kilogramo de sedimento seco al realizar la equivalencia. En la **figura 4.21** se muestran fotografía de algunos de las diferentes morfologías y colores de los microplásticos encontrados.

Tabla 4.17

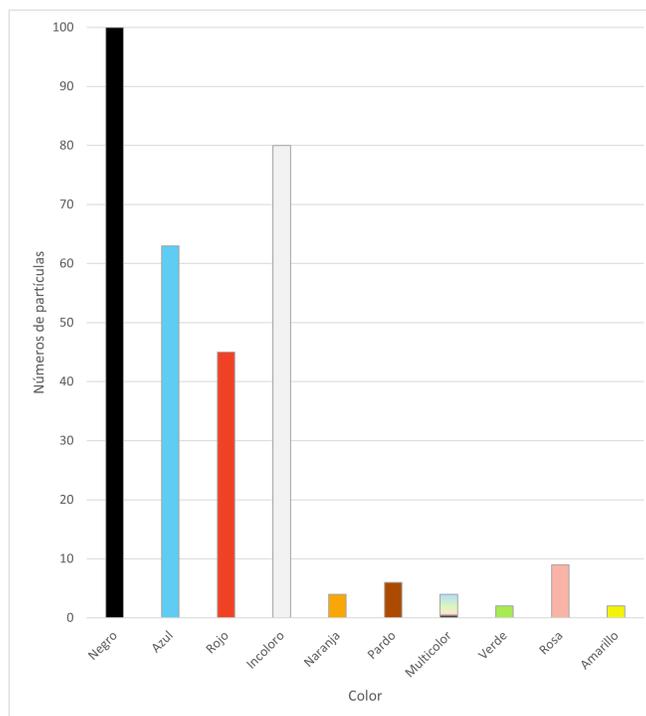
Resultados del conteo y clasificación de los microplásticos en la muestra Sal Cruz 15

Sal Cruz 15			
Color	Cantidad	Tipo	Medición promedio (μ)
Negro	100	Fibra	1048.16
Azul	63	Fibra y Fragmento	1411.76
Rojo	45	Fibra y Fragmento	1579.22
Incoloro	80	Fibra	1510.69
Naranja	4	Fibra	636.88
Pardo	6	Fibra	1393.69
Multicolor	4	Fibra	1788.66
Verde	2	Fibra y Fragmento	407.12
Rosa	9	Fibra	1005.14
Amarillo	2	Fragmento	172.89
Total		315	
Total por kg		8625.41	

Figura 4.20

Gráficas de barras relacionando el color con la cantidad y forma (incluyendo separación de colores) con la cantidad de los microplásticos presentes en la muestra Sal Cruz 15

(a) Gráfica del número de partículas contra el color



(b) Gráfica del número de partículas contra la forma

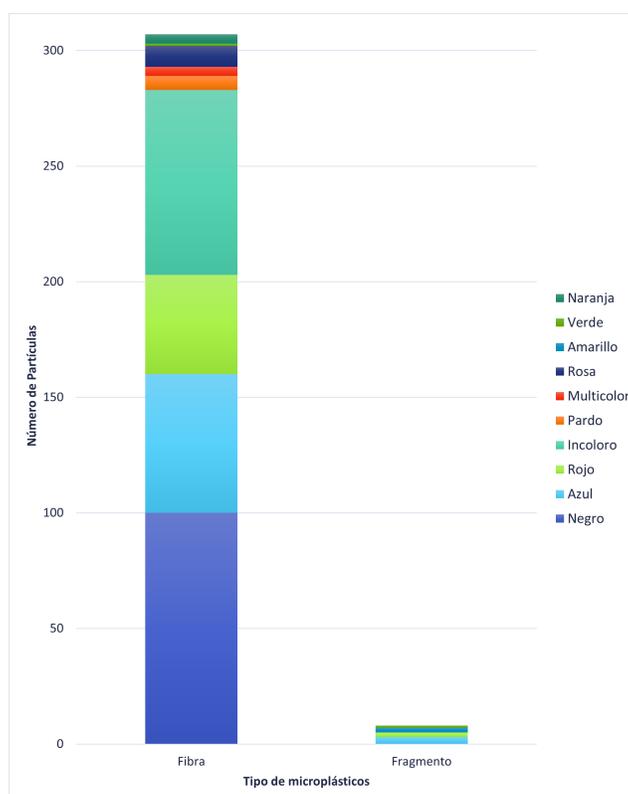
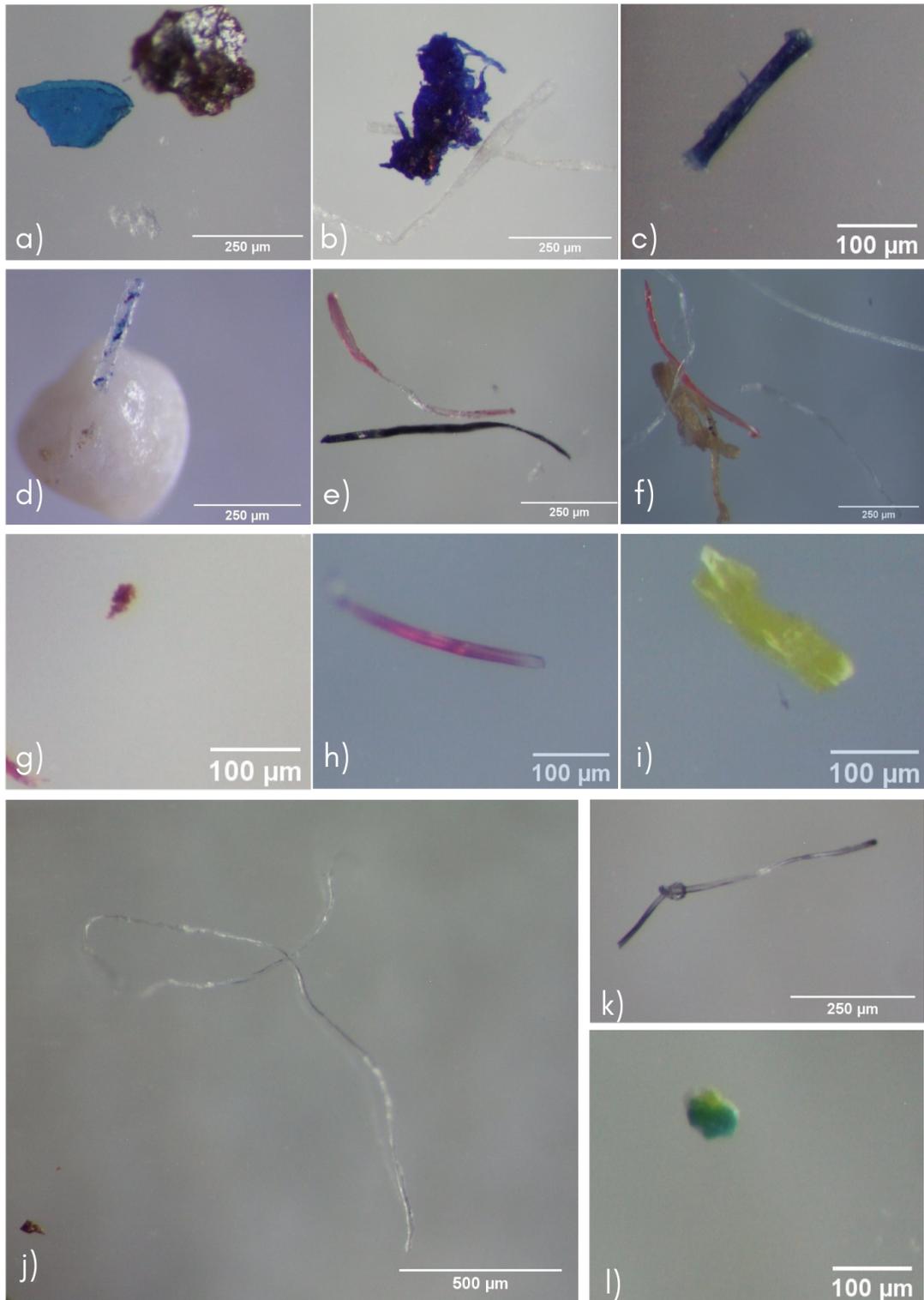


Figura 4.21

Fotografías de microplásticos encontrados en la muestra Sal Cruz 15



Nota. a y b) Fragmento azul; c) fibra azul; d) fibra multicolor (azul, morado e incoloro); e) fibra multicolor (rojo e incoloro) junto a fibra negra; f) fibra naranja junto a fibra parda; g) fragmento rojo; h) fibra roja; i) fragmento amarillo; j) fibra incolora; k) fibra multicolor (negro e incoloro) y l) fragmento verde.

SAL CRUZ 17

En el sedimento analizado de la muestra Sal Cruz 17, fueron hallados ocho colores diferentes de microplásticos: negro, azul, rojo, incoloro, morado, multicolor, rosa y amarillo. Siendo los colores más abundantes el negro y el incoloro, teniendo el primero 182 unidades y el segundo 121; los siguientes dos colores más abundantes son el rojo y el azul, con 45 y 37 partículas, respectivamente, y, por último, los colores con menor cantidad de partículas son el multicolor con cinco, el amarillo con cuatro, el morado con tres y el rosa con uno (**tabla 4.18** y **figura 4.22a**). En cuanto a las morfologías identificadas, se tienen un total del cinco diferentes, las cuales son; fibra, fragmento, esfera, fibras enredadas y películas. Las fibras predominan tanto en abundancia como en colores, ya que las 380 fibras encontradas se distribuyen en seis de los ocho colores presentes, por otra parte, los once fragmentos identificados se distribuyen sólo en tres colores diferentes, y, las cuatro esfera se encontraron en un sólo color (**figura 4.22b**). El rango de promedios del tamaño de microplásticos se encuentra entre 174.80μ , medición promedio de las esferas amarillas, y 1639.52μ , medición promedio de las fibras y fragmentos rojos.

El sedimento usado de la muestra Sal Cruz 17 fue de $35.39 g$, en el cual se tiene un total de 398 partículas, lo que equivale a 11246.11 partículas por kilogramo de sedimento seco. En la **figura 4.23** se encuentran fotografía de algunos de los microplásticos encontrados en esta muestra.

Tabla 4.18

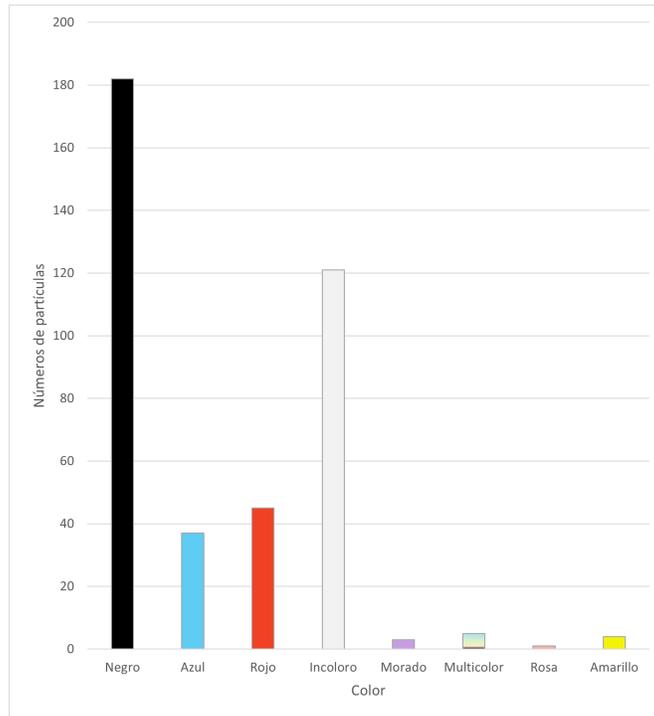
Resultados del conteo y clasificación de los microplásticos en la muestra Sal Cruz 17

Sal Cruz 17			
Color	Cantidad	Tipo	Medición promedio (μ)
Negro	182	Fibra	1254.38
Azul	37	Fibra, Fibras Enredadas y Fragmento	1371.02
Rojo	45	Fibra y Fragmento	1639.52
Incoloro	121	Fibra	1405.83
Morado	3	Fragmento	118.307
Multicolor	5	Fibra, Película y Fibras Enredadas	852.70
Rosa	1	Fibra	11180.50
Amarillo	4	Esfera	174.80
Total		398	
Total por kg		11246.11	

Figura 4.22

Gráficas de barras relacionando el color con la cantidad y forma (incluyendo separación de colores) con la cantidad de los microplásticos presentes en la muestra Sal Cruz 17

(a) Gráfica del número de partículas contra el color



(b) Gráfica del número de partículas contra la forma

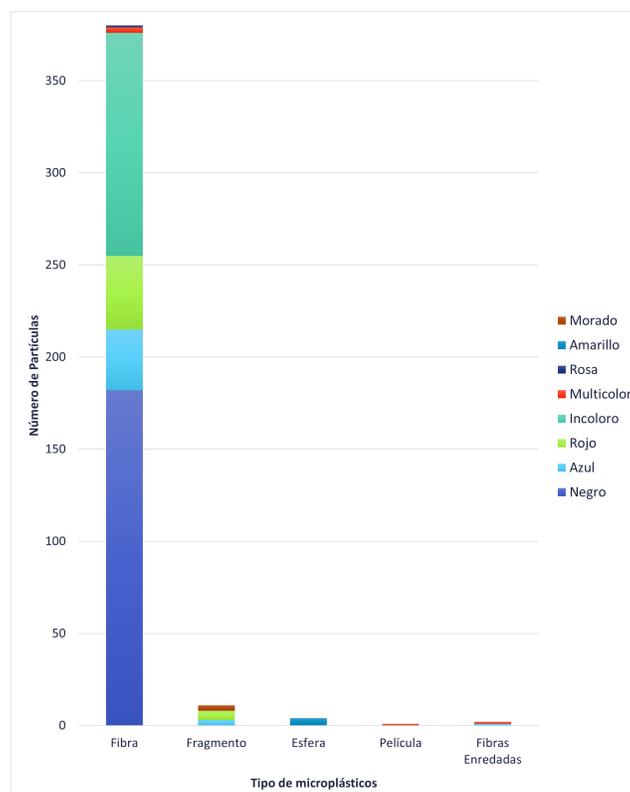


Figura 4.23

Fotografías de microplásticos encontrados en la muestra Sal Cruz 17



Nota. a) Fibra multicolor: azul e incolora; b y c) fragmentos azules; d) fibras enredadas azules; e) fibras enredadas multicolor: azul, rosa e incoloro; f) fibras roja y negra; g) fragmento rojo; h) película multicolor: rojo e incoloro; i) fragmento morado; j) fibras rosa y roja; k) fibras negras y l) esfera rota.

Total de la zona costera de la bahía de Salina Cruz

Se confirma la existencia de microplásticos en la zona costera, ya que hay presencia de microplásticos en todas las muestras. En los extremos de la zona analizada (Sal Cruz 01, 15 y 17) se tiene una mayor concentración de microplásticos, siendo el extremo oeste de la playa donde se presenta mayor concentración de microplásticos (Sal Cruz 15 y 17), a comparación de la parte central (muestras Sal Cruz 03 a 13). Al sumarse las partículas encontradas y el sedimento usado se tiene el siguiente resultado: en un total de 328.76 g de sedimento, se cuantificaron 1536 partículas, lo que equivale a 4672.10 partículas kg^{-1} d.w. (figura 4.24). En la figura 4.25 se muestra la abundancia por kilogramo de sedimento al realizar una interpolación, mostrándose en color azul oscuro las zonas con menos cantidad de microplásticos y en rojo la zona que mayor abundancia presenta.

Figura 4.24

Gráfica de barras comparando las partículas de microplásticos presentes en las muestras por kg

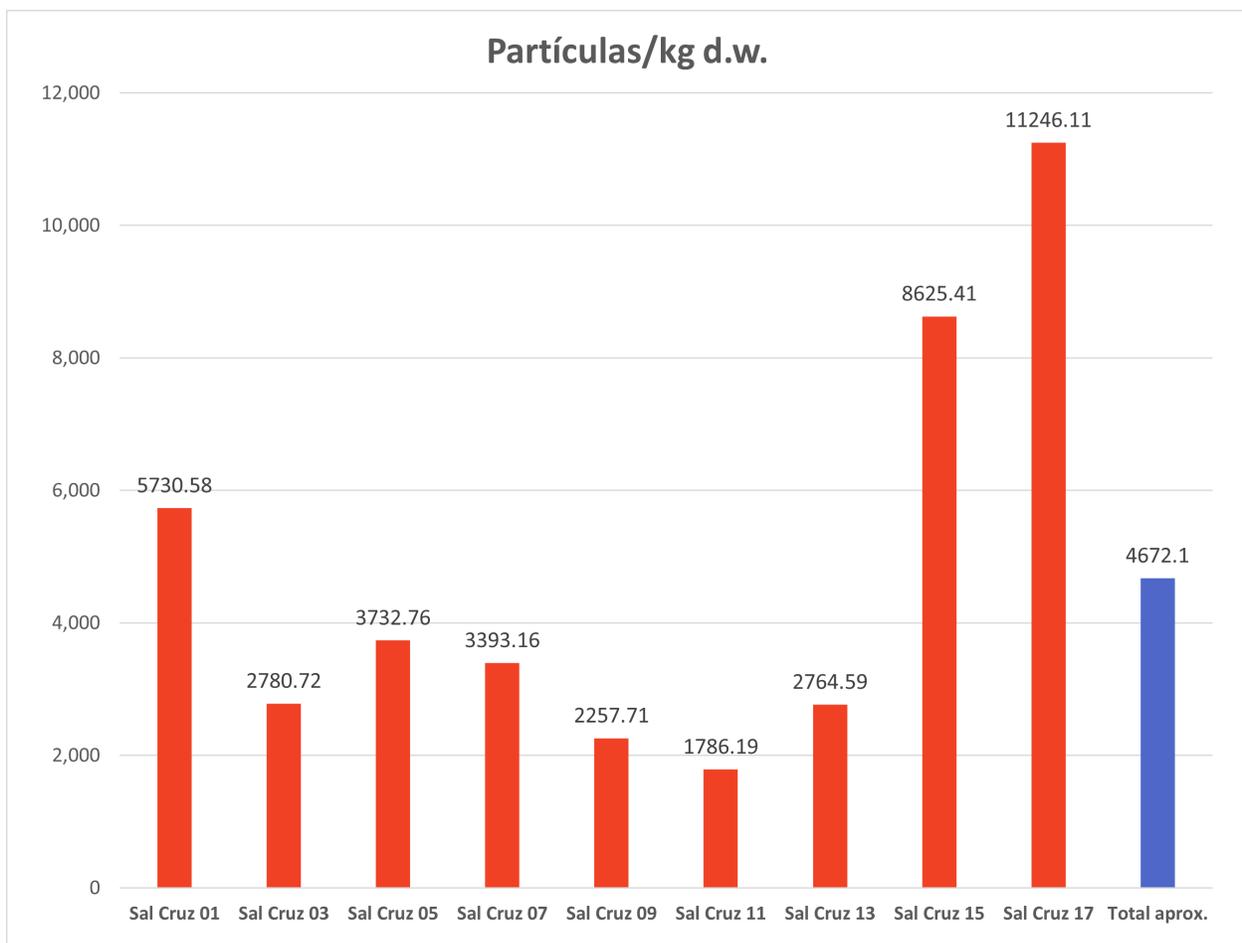
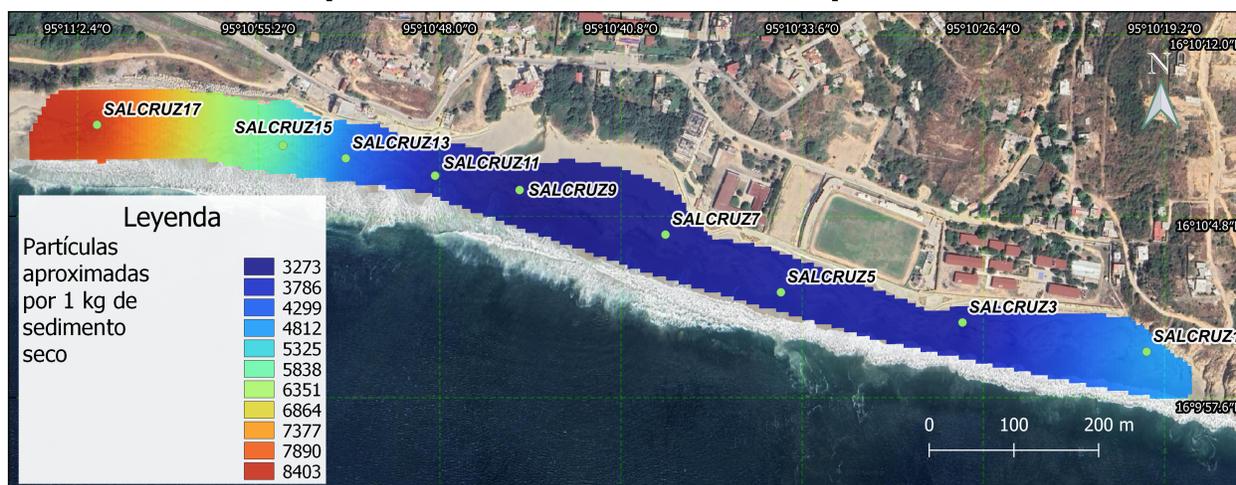


Figura 4.25

Mapa ilustrativo de la abundancia de microplásticos presentes en la zona costera (partículas kg^{-1} d.w.)

Mapa de abundancia de los microplásticos



Este mapa fue realizado con QGIS® 3.16.16 de código abierto.

Nota. Imagen satelital adaptada de [Salina Cruz, Oaxaca], de Google, s.f., Google Earth.

Color

Las muestras que presentan menor variación en colores corresponden a Sal Cruz 07 y 09, encontrándose solamente seis colores diferentes; por otro lado, aquellas que presentan mayor variedad de colores, con un total de diez colores diferentes, corresponden a las muestras Sal Cruz 01 y 15 (figura 4.26). En todas las muestras el color predominante es el negro, y, dependiendo la muestra, los siguientes colores más abundantes son el azul, rojo e incoloro. El segundo color más abundante en las muestras Sal Cruz 01 y 11 es el azul; mientras que en las muestras Sal Cruz 03, 05, 07 y 09, el color rojo ocupa esta posición; y, finalmente, el incoloro ocupa el segundo lugar de abundancia en Sal Cruz 13, 15, 17. Los colores que no tienen una buena distribución en la playa son el naranja, presente en una única muestra, el verde, localizada en solamente en cuatro muestras diferentes, y el pardo, también presente sólo en cuatro muestras (figura 4.27). Al obtener el porcentaje correspondiente a cada color, tomando en cuenta todas las muestras, se afirma lo siguiente. De todos los microplásticos encontrados en la zona analizada, aquellos que tienen color negro representan el 44.14 %, los siguientes más abundantes son el incoloro con 18.55 %, seguido del rojo con 15.82 %, y del azul con un 14.52 %; sumando entre ellos 93 % del total de microplásticos presentes en la zona. Y cerca del siete por ciento, de partículas restantes, tiene alguno de los siguientes colores: amarillo, rosa, multicolor, morado, pardo, verde y, por último, naranja (figura 4.28).

Figura 4.26

Gráfica de barras comparando los colores y la cantidad de microplásticos presentes en las muestras

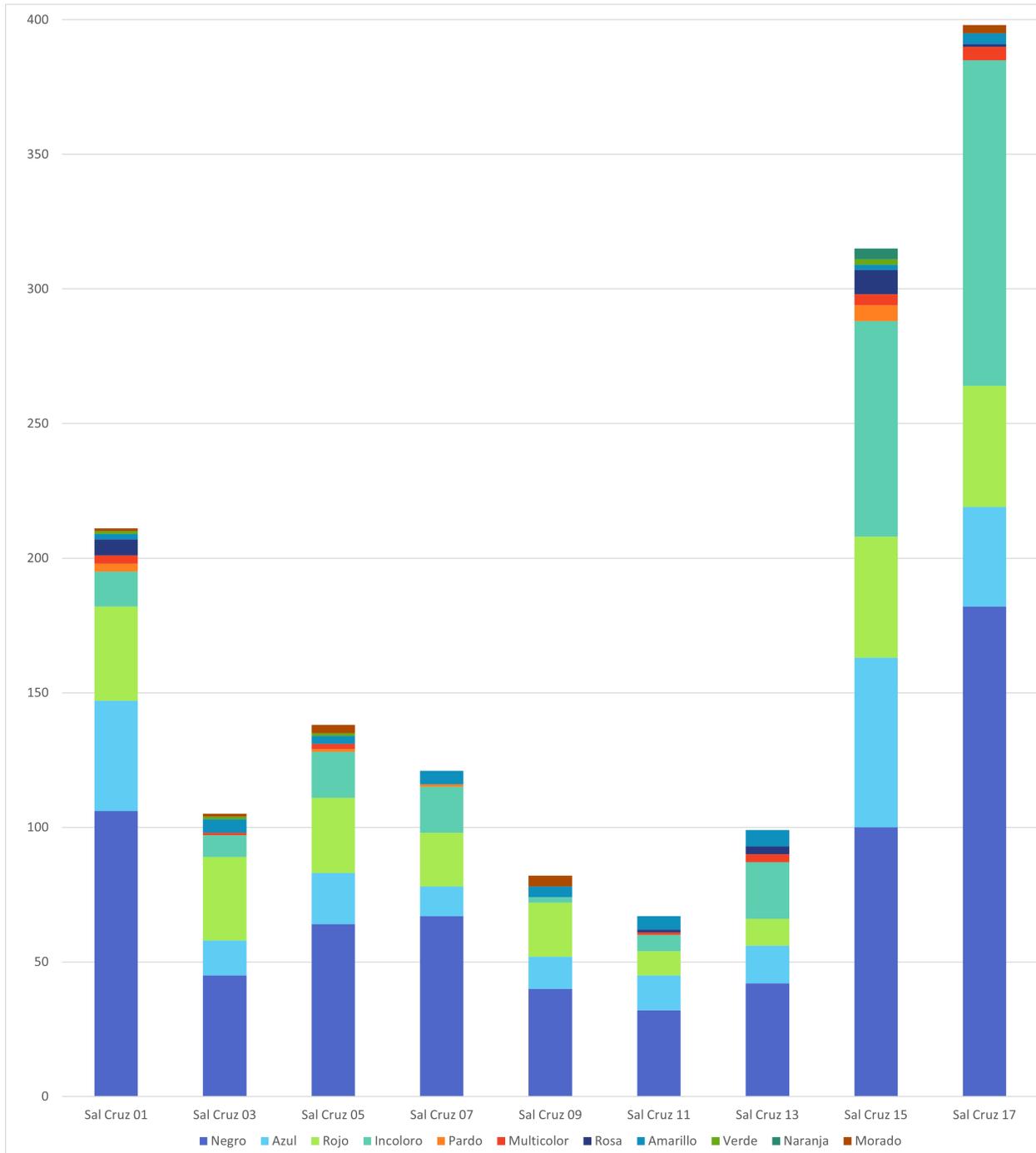


Figura 4.27

Gráfica comparativa de colores y abundancia de estos en cada muestra

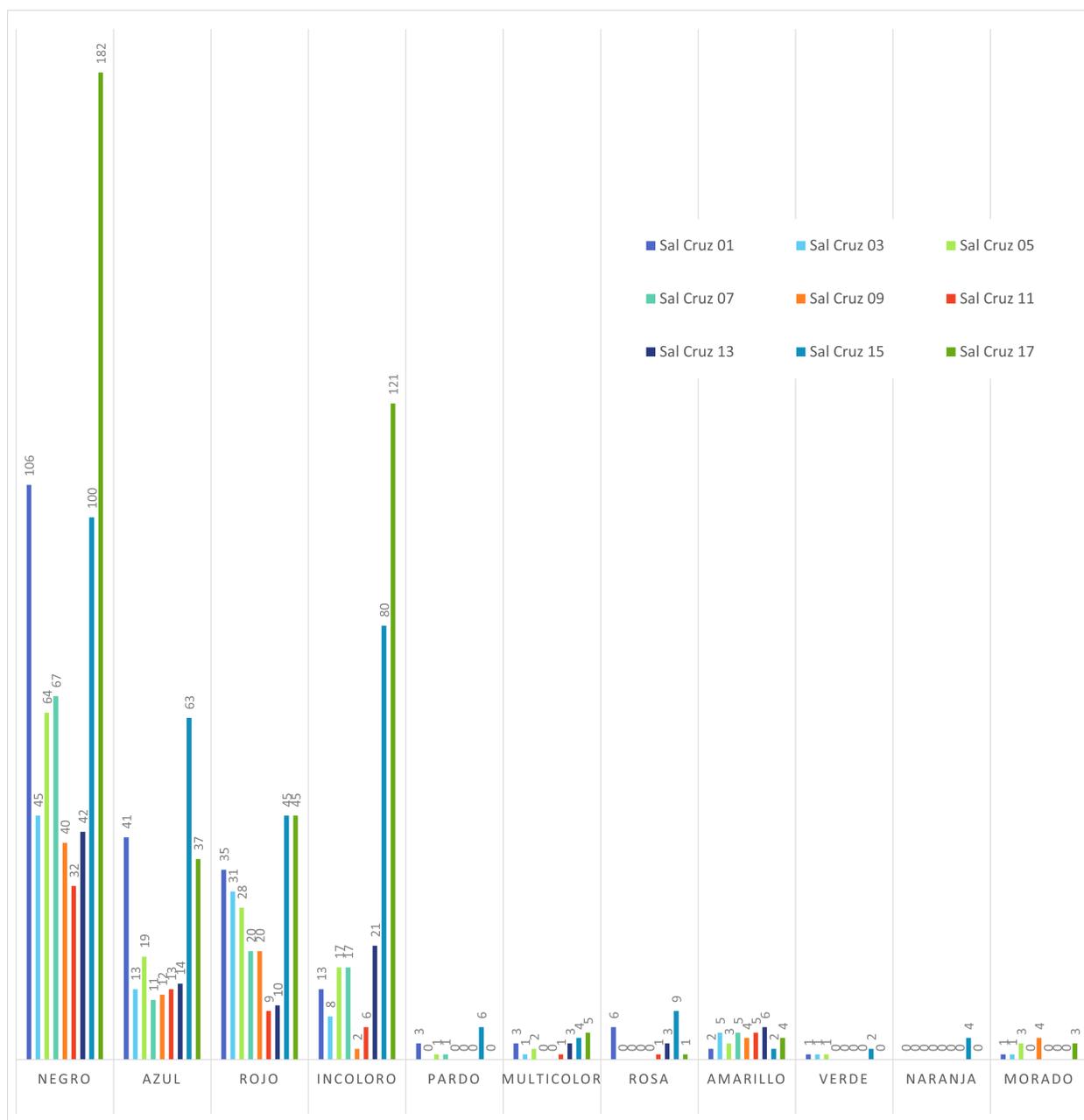
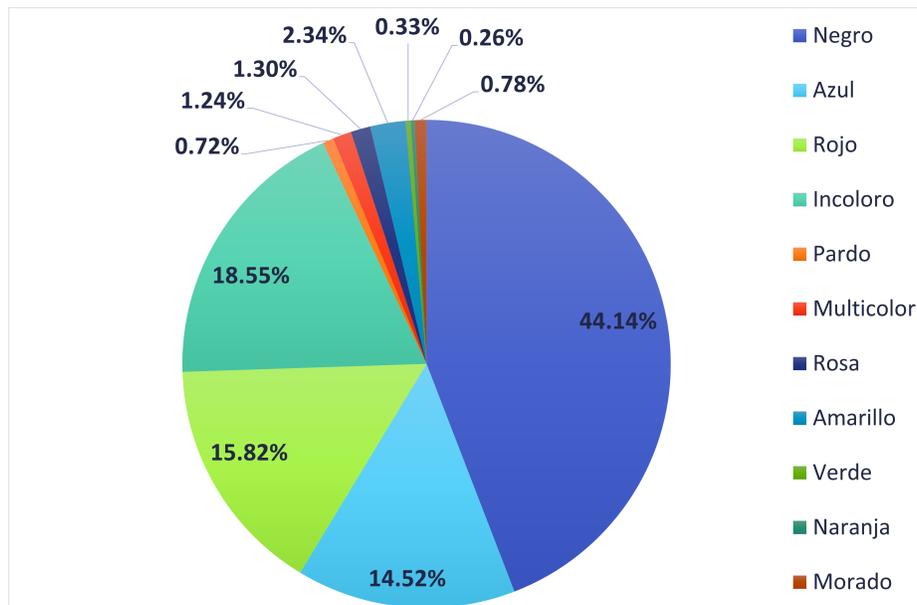


Figura 4.28

Gráfica circular del porcentaje de microplásticos por color en la playa



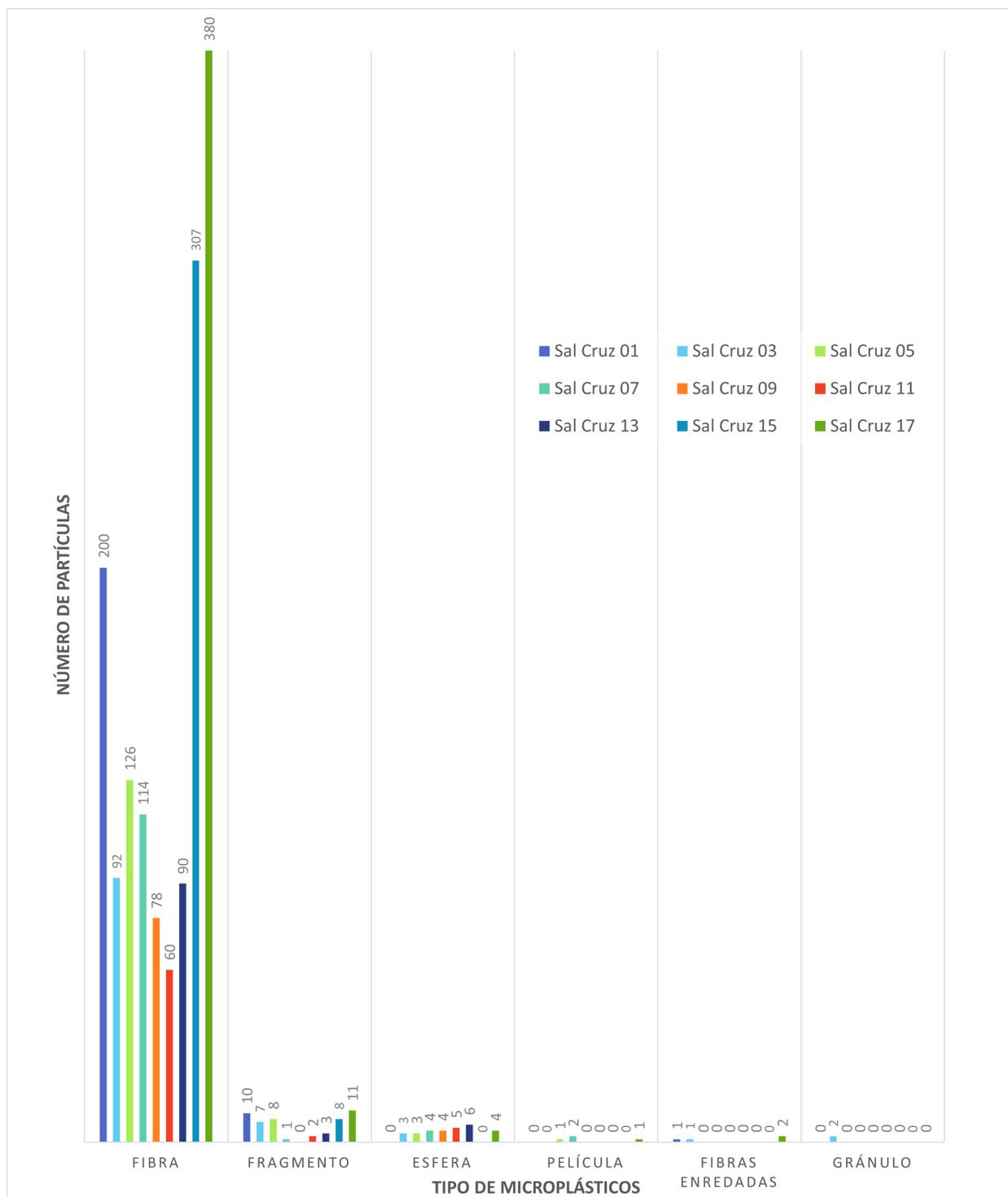
Forma

La morfología identificada con mayor frecuencia, en todas las muestras, es la correspondiente al tipo fibra, y, después de ésta, tenemos a los fragmentos y esferas, según el número de muestra. En Sal 01, 03, 05, 15 y 17, la morfología identificada en mayor cantidad de partículas, después de la fibra. Por otro lado, las esferas corresponden a la segunda morfología identificada en las muestras Sal Cruz 07, 09, 11 y 13. Por último, las formas que se encontraron con mucho menos frecuencia fueron la película, fibras enredadas y gránulo; estando presentes la primera y segunda morfología únicamente en tres muestras, y el último en sólo en una muestra [figura 4.29](#). De las imágenes tomadas con el microscopio electrónico de barrido, se muestran a continuación algunas de ellas para visualizar mejor los detalles de los microplásticos.

Fibra. Las fibras, de acuerdo a la clasificación seguida de Rochman et al. [2019](#), p. 705, deben de presentar en general el mismo grosor a lo largo de toda la fibra; también, éstas pueden presentar en sus extremos diferentes tipos de cortes (limpios, puntiagudos y deshebrados). En la [figura 4.31](#) se tienen ejemplos de algunas terminaciones y relieve del cuerpo de las fibras que se encontraron. Además, la fibra no siempre presenta igual terminación, a veces puede presentar una punta más abierta que otra, como en la [figura 4.32](#). Y, por último, las fibras también pueden tener cierto desgaste a lo largo de ellas ([figura 4.33](#)).

Figura 4.29

Gráfica de barras relacionando la forma con la cantidad de microplásticos presentes en la cada muestra analizada



Fragmento. La clasificación menciona que los fragmentos varían en espesor y forma; además, pueden estar de angulosos a redondeados, e incluso estar retorcidos o rizados. Los fragmentos tienen una estructura rígida y a veces forma irregular. Pueden ser redondos, subredondos, angulares o subangulares. No siempre son igual de gruesos y pueden parecer torcidos o rizados. En la **figura 4.34** se exponen diferentes fragmentos que fueron identificados en las muestras, en los cuales predominaron las formas irregulares.

Esfera. Las esferas son redondas con superficies lisas, y pueden estar completas o rotas. Las esferas que se muestran en la **figura 4.35** se encuentran deformadas y rotas.

Película Las películas son delgadas, planas y maleables; tal como se observan en la **figura 4.36**.

Del total de microplásticos identificados por morfología, el 94.36 % de las partículas corresponden al tipo fibra, el resto de porcentaje se distribuye entre fragmento (3.10 %), esfera (1.88 %), película (0.26 %), fibras enredadas (0.26 %) y gránulo (0.13 %) **figura 4.30**.

Figura 4.30

Gráfica circular del porcentaje de microplásticos por forma al sumar todos los microplásticos de las muestras y sacar su porcentaje

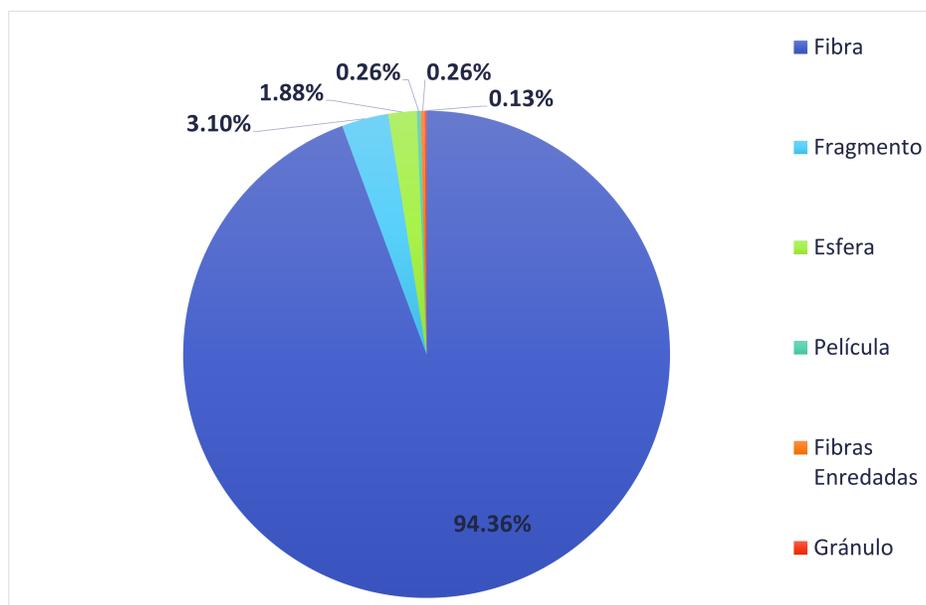
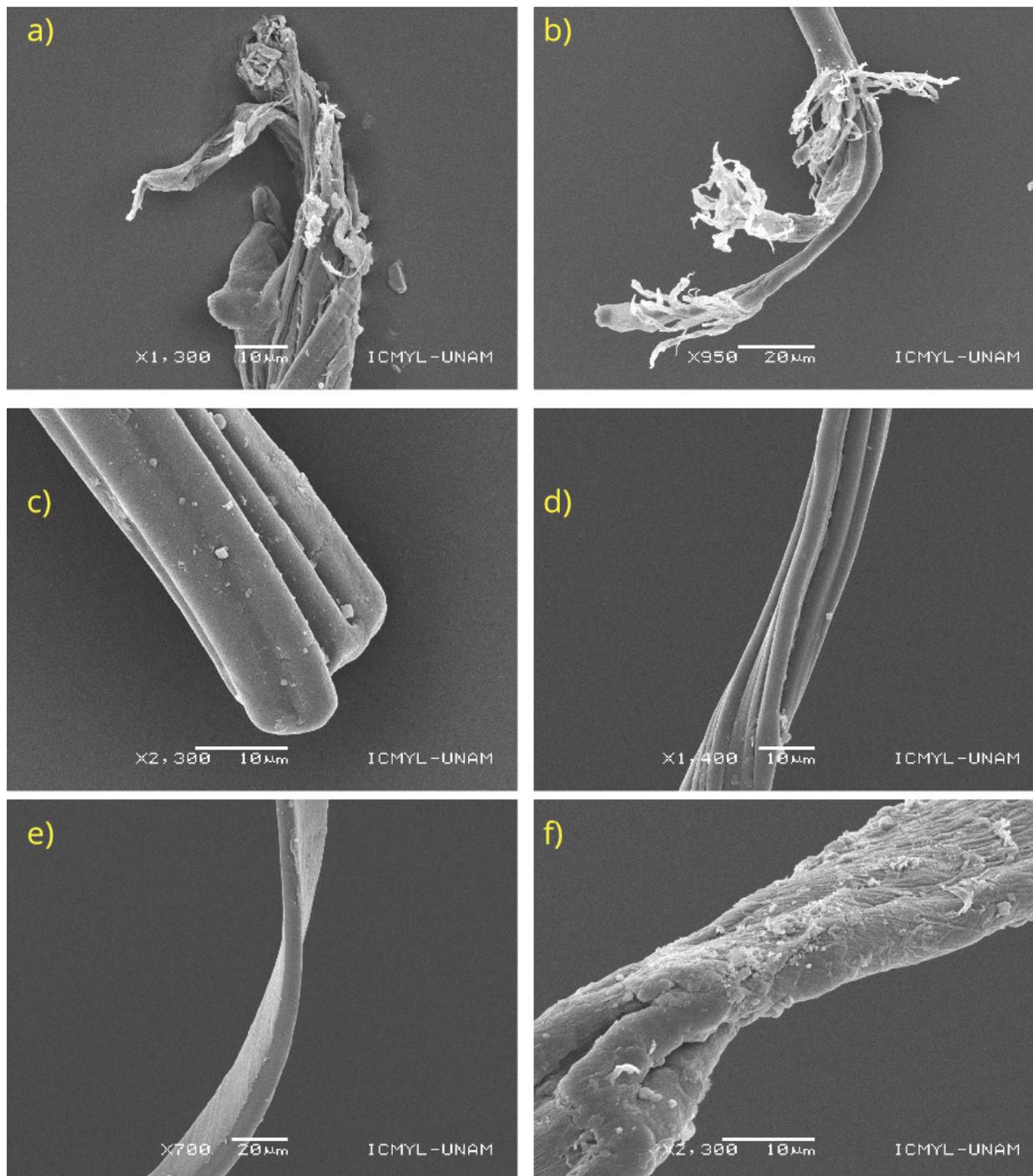


Figura 4.31

Fotografías de extremos y cuerpos de microplásticos en forma de fibras

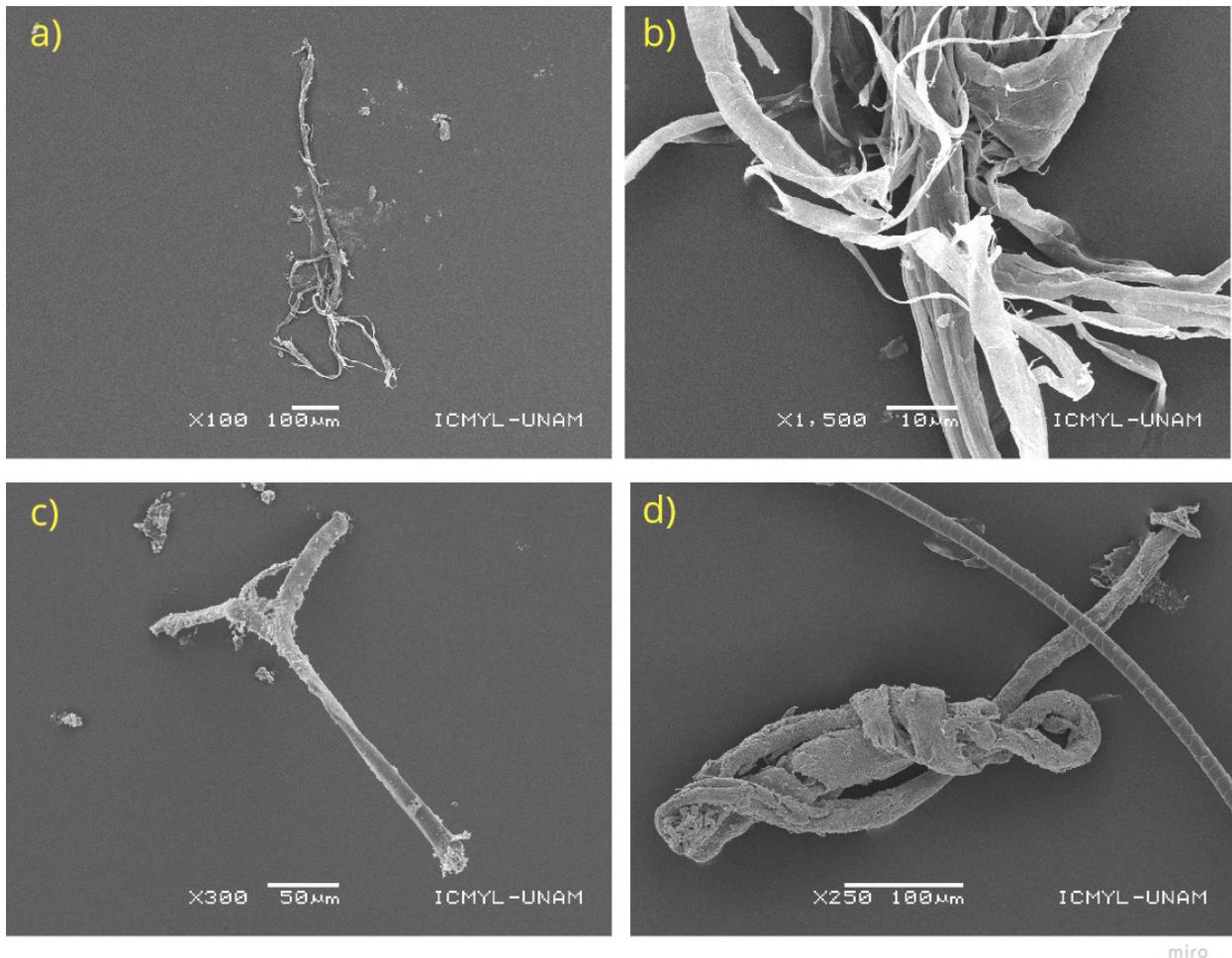


miro

Nota. En las primeras tres imágenes se tiene diferentes terminaciones de fibras, en a y b) se muestran extremos deshebrados, y en c) se observa un corte limpio. En las siguientes tres imágenes se ven algunos relieves que se presentaron en las fibras, teniendo un relieve más fibroso y definido en d), otro que se ve más liso con forma tabular listonado en e) (aunque aún presenta surcos superficiales muy delgados), y, en f) se muestran diferentes relieves (la parte inferior parece tener un aspecto fibroso como en d), pero en la parte superior los surcos se vuelven más finos y menos profundos).

Figura 4.32

Fotografías de microplásticos en forma de fibras

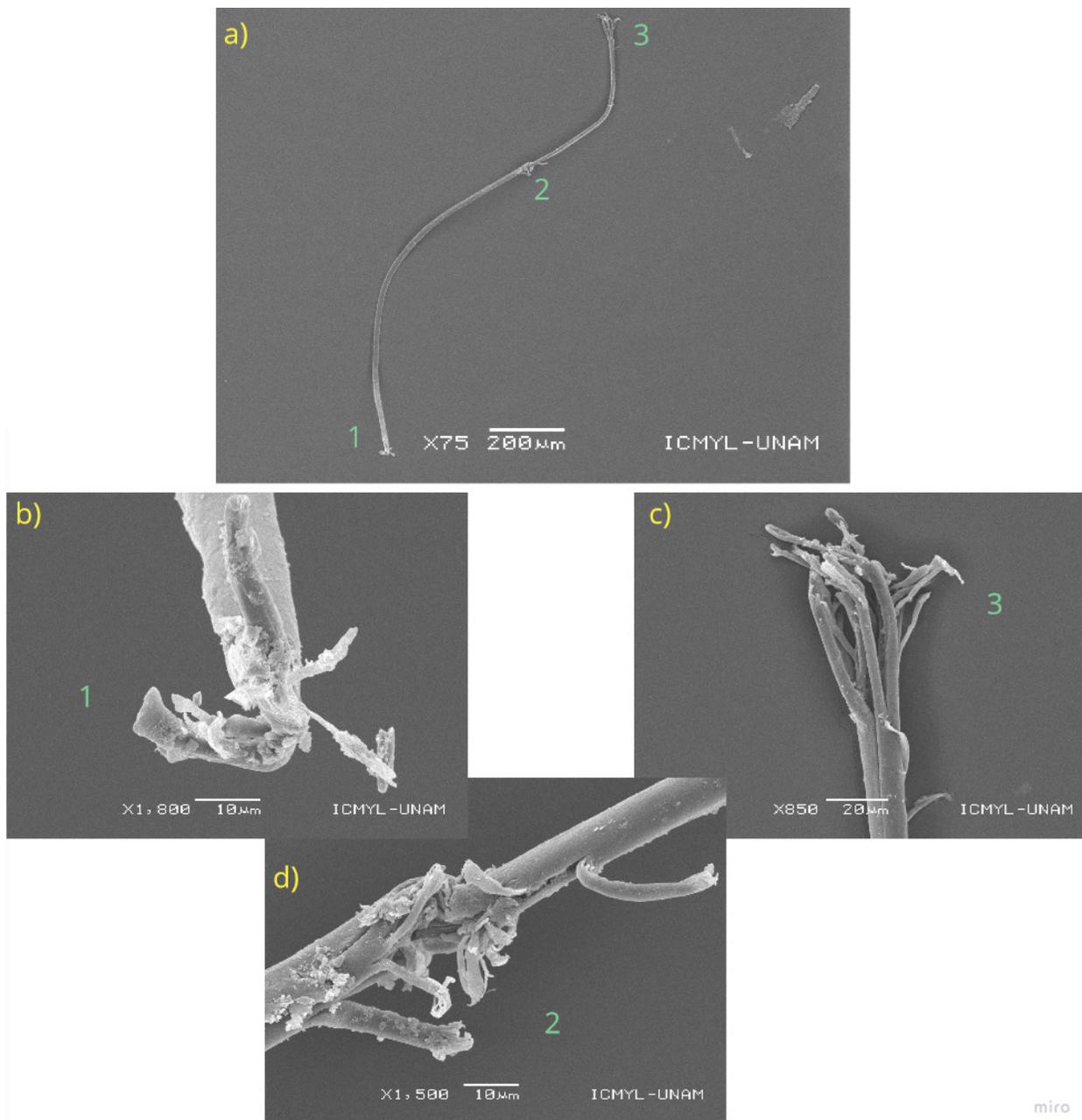


miro

Nota. La fibra de la imagen a) tiene el mismo tipo de terminación (deshebrado), aunque no con la misma apertura; la apertura superior se muestra en la **figura 4.31** imagen a); y, en b), se tiene un aumento de la fibra donde comienza a separarse la punta. En la fotografía c) se tiene otro ejemplo de diferencia en los extremos, teniendo en la parte superior, mayormente, una división en dos de la punta, y, por otro lado, en la parte inferior se tiene una punta deshebrada. La imagen d) corresponde a una fibra enredada en sí misma, con un extremo terminado en punta, el extremo visible.

Figura 4.33

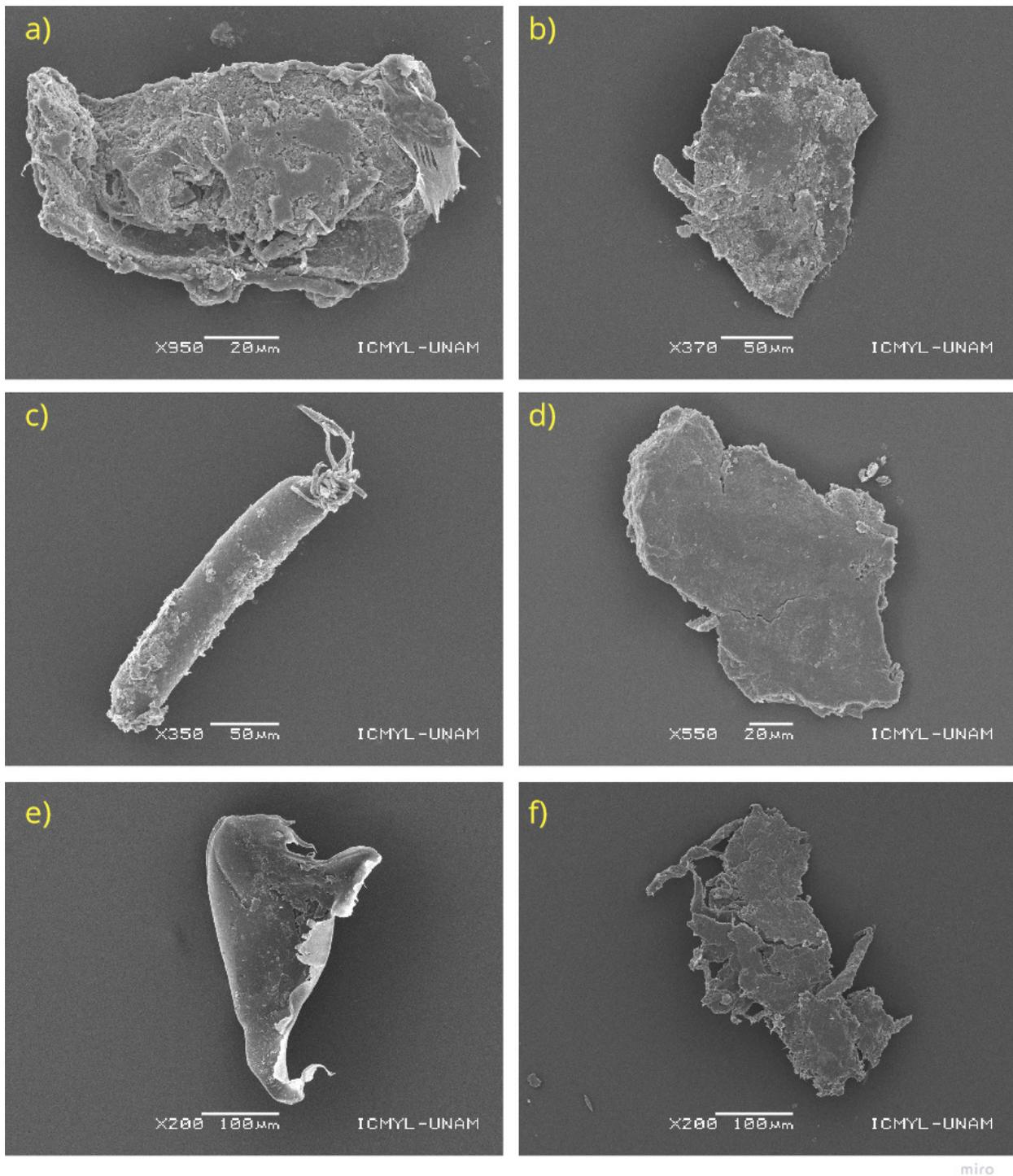
Fotografías de microplásticos en forma de fibra con aumento en sus extremos y zona donde presenta rotura



Nota. Fibra roja de la muestra Sal Cruz 11 localizado en [figura 4.17](#) imagen j). La fotografía a) es una toma de toda la fibra, y b, c y d) son acercamientos a diferentes zonas de la fibra. b y c) son extremos de la fibra que presentan diferente grado de apertura; y c) es el comienzo de una rotura de la fibra, donde se observan algunas partes de la superficie comenzando a desprenderse.

Figura 4.34

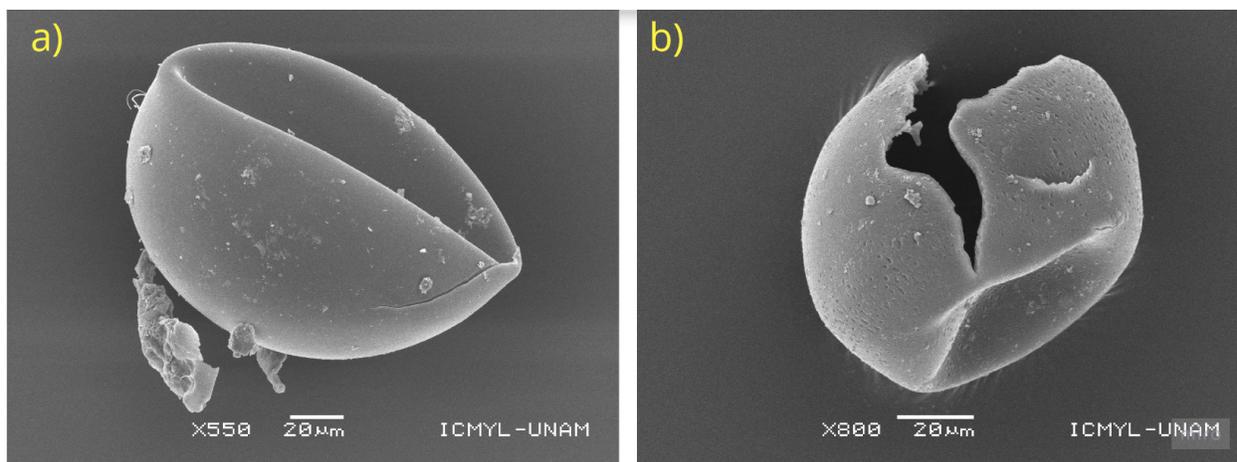
Fotografías de microplásticos en forma de fragmentos



Nota. Los fragmentos a y f) son fragmentos irregulares subredondeados, b y d) fragmentos subangulosos, c) fragmento cilíndrico, mayormente liso, con un extremo redondeado y el otro se desprenden una serie de hilos, y e) fragmento anguloso y torcido.

Figura 4.35

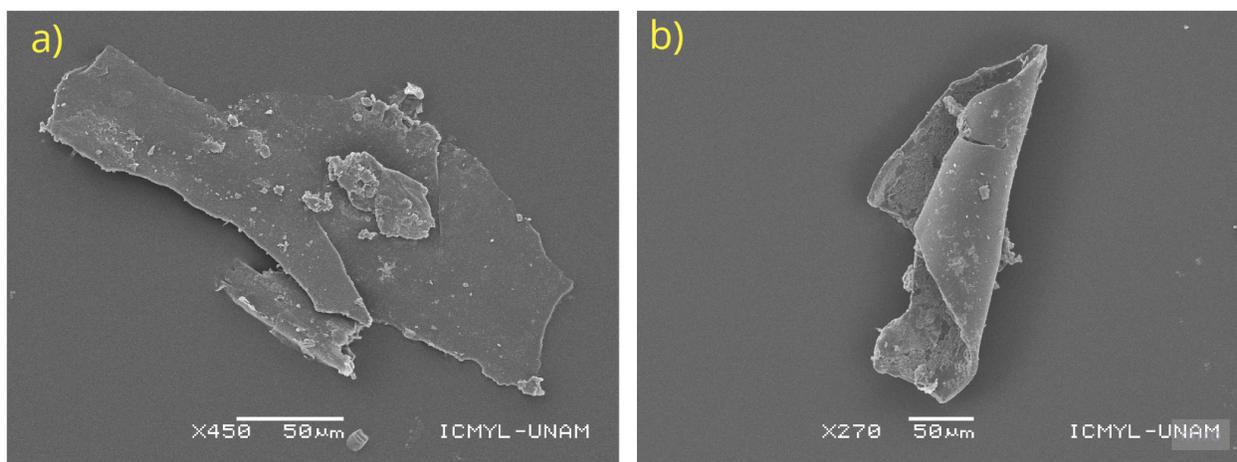
Fotografías de microplásticos en forma de esferas



Nota. Esferas deformadas, donde en a) la esfera se encuentra doblada y ligeramente rota, y en b) se encuentra sumida y rota en mayor intensidad.

Figura 4.36

Fotografías de microplásticos en forma de películas



Nota. Películas que se encuentran estiradas, a), y dobladas, b).

Tamaño

El tamaño de los microplásticos encontrados, por definición, miden menos de 5 mm. De todas las partículas medidas, la de menor tamaño mide 31.486μ (medida de un fragmento azul), y la de mayor tamaño mide 4815.69μ (medida de una fibra negra). Por morfología se tienen los siguientes resultados:

- Fibra: tamaño mínimo de 115.98μ , y tamaño máximo de 4815.69μ .
- Fragmento: tamaño mínimo de 31.49μ , y tamaño máximo de 581.53μ .
- Esfera: tamaño mínimo de 104.30μ , y tamaño máximo de 194.919μ .
- Película: tamaño mínimo de 219.70μ , y tamaño máximo de 334.17μ .
- Fibras enredadas: tamaño mínimo de 211.896μ , y tamaño máximo de 478.389μ .
- Gránulo: tamaño mínimo de 180.27μ , y tamaño máximo de 283.17μ .

El tamaño promedio, de longitud, de los microplásticos es de 1269.84μ . Para las formas que tuvieron más mediciones (fibra, fragmento y esfera), se realizaron diagramas de caja para mostrar la distribución de sus medidas.

El rango de tamaño de fibras, como se mostró antes, es la morfología con mayor rango de todas; presentando en la mayoría de los distintos colores, valores menores de 500μ y mayores a 1500μ . La media de las fibras, de todos los colores, se encuentra entre las medidas 500 a 1500μ , y la mayoría de medias se localiza entre 1000 a 1500μ , coincidiendo con los tamaños en los que se puede encontrar fibras de ocho colores diferentes (los colores que no se pueden encontrar son el morado, naranja y amarillo, estos se encuentran fuera del rango) **figura 4.37**.

Los fragmentos presentan los tamaños más chicos de todas las morfologías, aunque también tenga tamaños más grandes. En el rango de 100 a 200μ , se encuentran la media de cuatro colores, también, la distribución de los tamaños nos indica que en este rango es posible encontrar cualquiera de los siete colores que tienen los diferentes fragmentos **figura 4.38a**.

Finalmente, las esferas solo se presentaron en un solo color, por lo que no se puede comparar con otros colores; aún así, se puede observar la distribución de tamaño de las esferas amarillas presentes en la zona estudiada. Los tamaños se concentran en 126 y 154μ ; además, su mediana y media están entre 140 y 150μ **figura 4.38b**.

Figura 4.37

Distribución de los tamaños de fibras (por color) con su mediana, media y valores atípicos

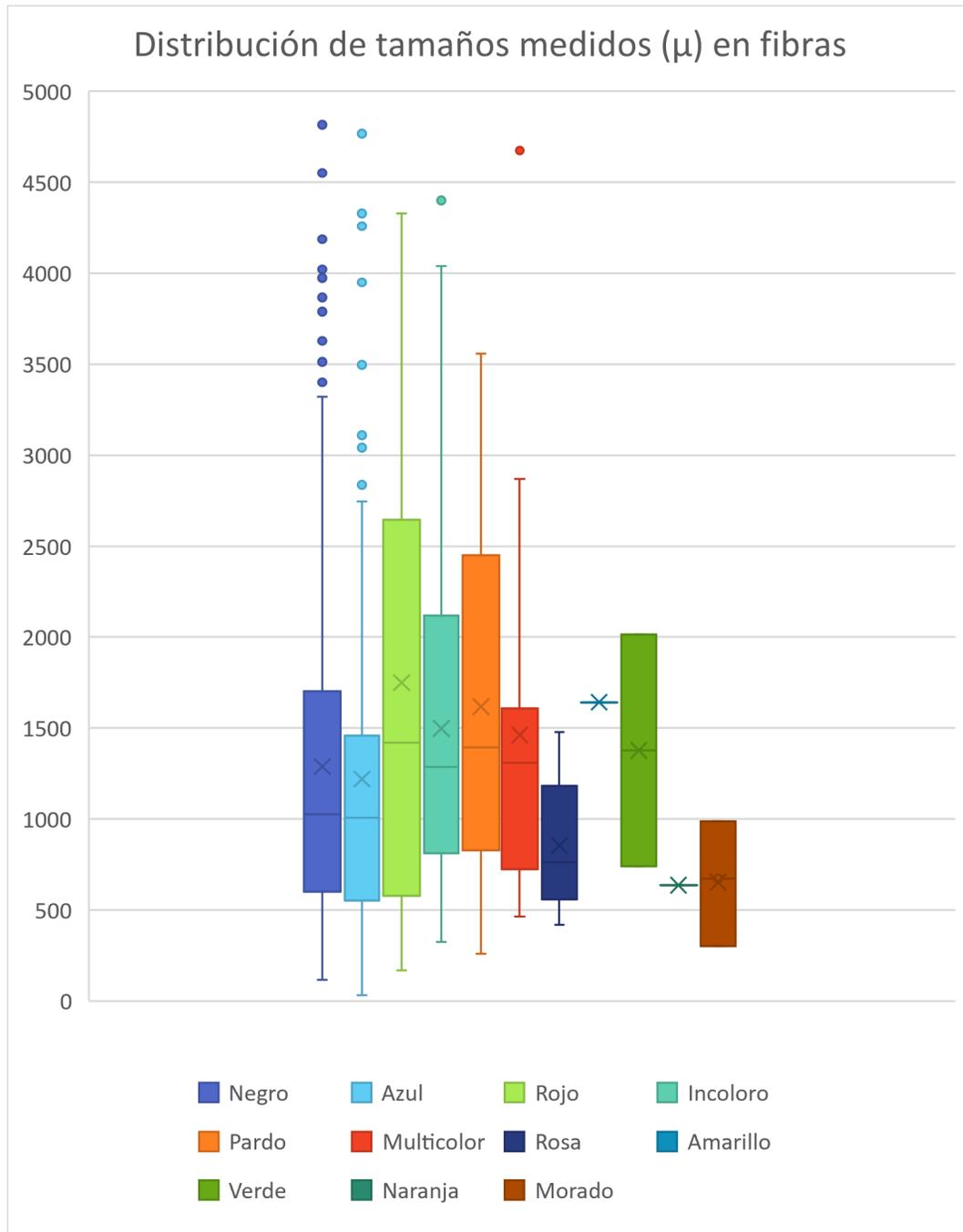
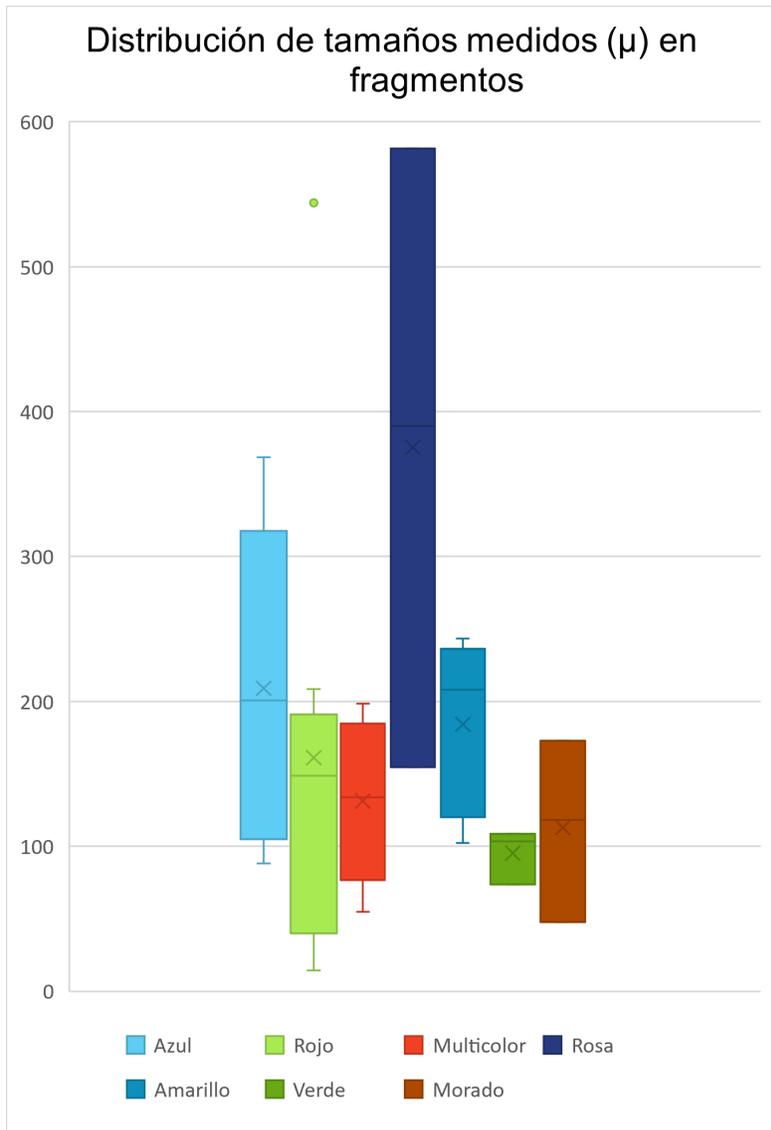


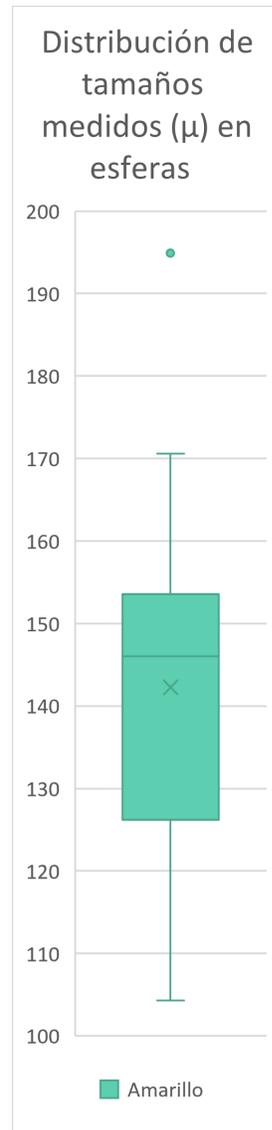
Figura 4.38

Distribución de los tamaños de fragmentos (por color) y esferas con su mediana, media y valores atípicos

(a) Fragmentos



(b) Esferas



Composición

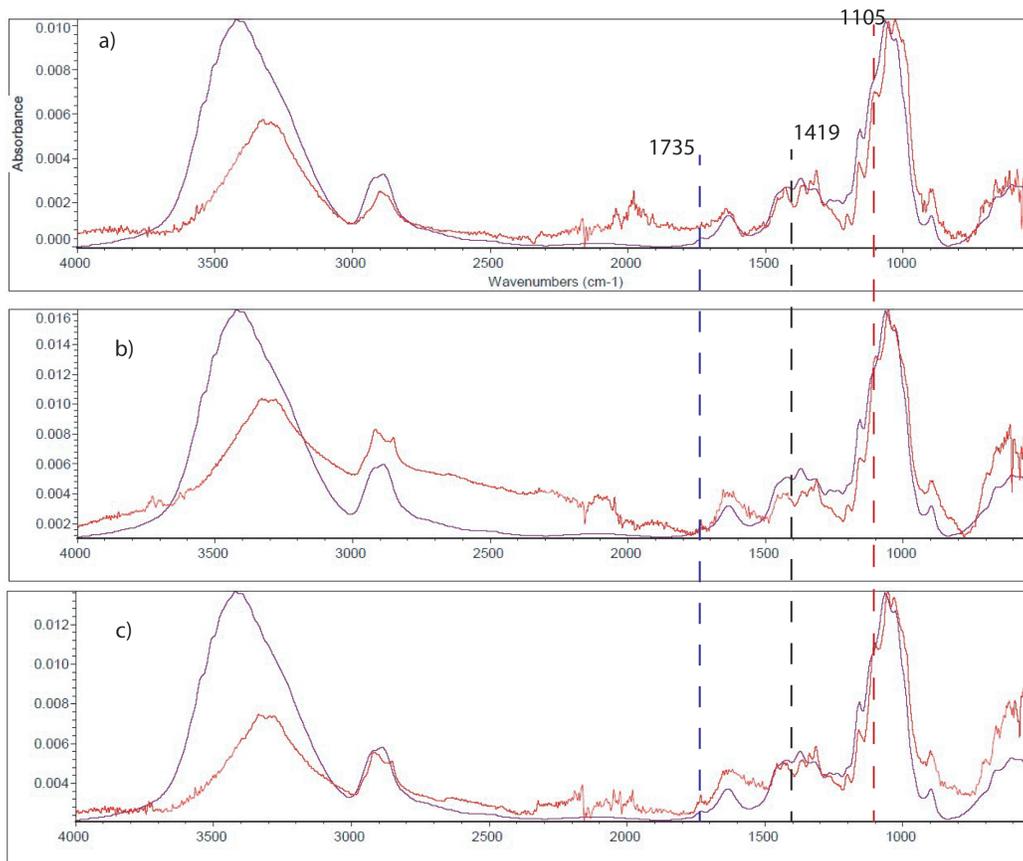
De los 26 microplásticos que se separaron para analizarlos mediante espectroscopia infrarroja, sólo 12 pudieron ser analizados, y de éstos, solamente se obtuvieron tres ajustes que cumplieran con el porcentaje necesario para considerarse resultados válidos. Entre estos tres se encuentran unas fibras enredadas, verdes y negras, de la muestra Sal Cruz 01, una fibra azul de Sal Cruz 09, y una fibra incolora de Sal Cruz 11. Los resultados de los tres microplásticos coincidieron con un celofán de la biblioteca de polímeros y aditivos Hummel, la cual contiene espectros recopilados por el profesor Dieter Hummel del Institute of Physical Chemistry, Universidad de Colonia (Alemania). Las fibras enredadas tuvieron un ajuste del 69.49 %, la fibra azul tuvo un ajuste del 72.33 %, y la fibra incolora de 70.88 %. Al tener un ajuste menor al 70 % las fibras enredadas, se realizó un análisis manual con la información expuesta por Cai et al. 2019, en donde nos mencionan que la celulosa semisintética, donde se puede clasificar el celofán, presenta ciertos picos, o falta de estos, en bandas del espectro; sirviendo así para distinguir si es semisintética o natural la fibra. En la banda 1735 cm^{-1} se suele presentar un poco en la celulosa semisintética (presente en la fibra azul e incolora, pero ausente en las fibras enredadas); la siguiente banda que desaparece en el celofán es la banda 1419 cm^{-1} , coincidiendo los tres espectros en la ausencia de esta banda; y, por último, la banda más importante: 1105 cm^{-1} , esta banda nos aclara si se trata de una fibra semisintética o natural (en las naturales presentan un gran pico, mientras que en las semisintéticas es menos perceptible), los tres espectros no presentan un gran pico en esa banda **figura 4.39**. Confirmando con esto que las fibras y fibras enredadas corresponden a fibras semisintéticas.

Discusión

La playa Salina Cruz tiene, casi en su totalidad, tiene sedimentos de tamaño arena, predominando la arena media. En general, el sedimento de la zona costera analizada se encuentra moderadamente bien clasificado, lo que significa que no presenta mucha variabilidad en los tamaños de los sedimentos presente; además de que la distribución de los tamaños es simétrica, indicando que no hay exceso de partículas gruesas o finas que provoquen el sesgo de la distribución de tamaños hacia alguno de los dos extremos. La curtosis de los sedimentos se localiza en el límite entre platicúrtica y mesocúrtica. Por último, su grado de esfericidad es variado, y, respecto a la redondez, las partículas subredondeadas a redondeadas son las más abundantes. Al tener poca cantidad de limos y arcillas, estar moderadamente bien clasificado y tener partículas subredondeadas y redondeadas, la madurez textural del sedimento se encuentra entre submadura a madura (Nichols, 2009b). Las características texturales los sedimentos en la zona costera de la bahía de Salina Cruz,

Figura 4.39

Espectro de fibras enredadas (verdes y negras) de la muestra Sal Cruz 01



Nota. Espectros correspondientes a: a) Fibras enredadas (verdes y negras) de la muestra Sal Cruz 01; b) fibra azul de Sal Cruz 09; y c) fibra incolora de Sal Cruz 11.

coinciden con las características mostradas por Carranza-Edwards et al. (1988), afirman que los sedimentos de playas analizadas del estado de Oaxaca, predominan aquellos de tamaño arena media, que se encuentran moderadamente bien clasificados, con distribución simétrica y curtosis mesocúrtica, además de ser arenas submaduras.

La abundancia de microplásticos presentes en el sedimento de la zona costera es de 4672.10 partículas kg^{-1} d.w.. Abundancia parecida, aunque menor, a la expuesta por Retama et al. 2016, en donde sus mayores registros de microplásticos son de 4800 partículas kg^{-1} d.w. (en abril) y de 6900 partículas kg^{-1} d.w. (en diciembre). En el estudio que realizaron los autores, en playas turísticas de las Bahías de Huatulco, utilizó separación por densidad con una solución de cloruro de zinc ($1.58 g/cm^3$) que tiene mayor densidad a la usada en el presente estudio, solución de cloruro de sodio ($1.2 g/cm^3$). Aunque la solución de cloruro de sodio ayude a la separación por densidad, tal como lo expone Rodrigues et al. (2019), hay una posible subestimación de

los polímeros que tienen alta densidad.

La zona que mayor abundancia de microplásticos presenta es el extremo oeste de la playa (**figura 4.25**). Esto puede ser resultado de las corrientes persistentes del Golfo de Tehuantepec, las cuales son paralelas a la costa con dirección este-oeste que provocan el movimiento de los sedimentos y, con éstos, a los microplásticos.

El color predominante en los microplásticos de la playa de Salina Cruz es el negro, estando presente en 44 % de los microplásticos encontrados. Los siguientes colores que aparecieron con mayor frecuencia son el incoloro, el rojo y el azul, los cuales representan cerca del 19 %, 16 % y 15 % respectivamente. El resto de colores (pardo, rosa, amarillo, verde, naranja, morado y multicolor) suman 7 %. Varios de colores encontrados, han sido identificados en otras playas en diferente orden de abundancia; en playas de publicaciones internacionales se tienen los colores negro, azul, verde y rojo, y en playas mexicanas (Golfo de México, Mar Caribe, Pacífico tropical, Golfo de California y Pacífico noreste) se encontraron los colores color blanco, verde, azul, amarillo, transparente y rojo (Alvarez-Zeferino et al. 2020; Flores Cortés, 2021); en playas de la Península de Baja California se tienen los colores negro, azul, morado, rojo y verde (de Jesus Piñon-Colin et al. 2018); en bahías del Pacífico Mexicano se presentan en mayor medida el amarillo, azul, transparente y negro (Kozak et al. 2021); en la Bahía de Huatulco, los colores blanco, negro, azul, rojo y pardo claro. La falta del color blanco presente en los microplásticos encontrados, puede ser debido a una diferencia de densidades, en la que algunos plásticos de color blanco tuvieran mayor densidad que la solución, también, podría ser que debido al color del filtro usado para retener los microplásticos, color blanco, provocara la dificultad para distinguir los microplásticos de este mismo color.

La morfología predominante, en la zona costera de la bahía de Salina Cruz, es la fibra, siendo esta forma identificada en poco más del 94 % de todos los microplásticos identificadas. La segunda forma más abundante es el fragmento, con aproximadamente 3 % del total de partículas. La tercera corresponde al tipo esfera, el cual está identificado en poco menos del 2 % de los microplásticos. Y, por último, las películas, fibras enredadas y gránulos, estas tres morfologías están presentes en sólo un uno por ciento. La abundancia de la morfología fibra, coincide con lo afirmado por Harris en 2020; aquí se menciona que las fibras representan cerca del 90 % de microplásticos concentrados en playas. Las dos formas más abundantes de la playa (fibra y fragmento) concuerdan con dos de las tres morfologías con mayor ocurrencia en publicaciones científicas sobre microplásticos en ambientes marinos; siendo la tercer morfología más abundante los films (películas), los cuales, en el caso de Salina Cruz, ocupan el cuarto lugar (Akanyange et al. 2022). Estas dos morfologías son, también, las formas que dominaron en los microplásticos de algunas bahías, en la parte central del Pacífico Mexicano, estudiadas por Kozak et al. (2021). Y respecto al tamaño de microplásticos, la longitud

promedio de los microplásticos, en la playa de Salina Cruz, es de 1269.84μ , valor mayor al obtenido por Sánchez-Hernández et al. (2021), $411 \pm 408\mu$. Esta diferencia se da por el porcentaje de fibras y fragmentos que se tienen; en el estudio de Sánchez-Hernández et al. las fibras se presentan en un 71.23 % y los fragmentos en un 28.76 %.

Mientras que en la composición, en la mayoría de los casos, los microplásticos identificados corresponden a los polímeros que tienen mayor fabricación a nivel mundial, siendo estos: polietileno (PE), polipropileno (PP), poliestireno (PS), poliéster, poliamida (PA), cloruro de polivinilo (PVC), tereftalato de polietileno (PET), acrílico y rayón (Akanyange et al. 2022; Rodrigues et al. 2019). Los espectros de las fibras analizadas, por espectroscopía infrarroja, ajustaron con el espectro de celofán; pero, al igual que otros tipos de celulosa semisintética (rayón y acetato de celulosa), tienen características químicas similares a las fibras naturales (algodón, el sisal y el yute), provocando que tengan espectros similares. Después de analizar el espectro y las bandas que pueden distinguirlos (Cai et al. 2019), las fibras son efectivamente semisintéticas. Pero estas fibras no son celofán, como fue ajustado por el programa utilizado durante el análisis, ya que el celofán se encuentra mayormente como películas. Se puede asegurar que, en las partículas con morfología de fibra, hay algunas que están hechas a base de celulosa, un ejemplo de este tipo de fibras es el rayón.

La mayoría de los microplásticos encontrados corresponden al tipo secundario, esto significa que provienen de plásticos más grandes que fueron fragmentado y, posteriormente, transportados. Los microplásticos más abundantes son del tipo fibra, siendo estos producidos mayormente durante el lavado de ropa (González Macías, 2007). Además, las fibras a base de celulosa arrojan más fibras que las sintéticas, durante el lavado acelerado (Zambrano et al. 2019). Al haber un gran porcentaje de fibras en la playa, se asume que la mayor fuente de microplásticos es por efluentes terrestre, como en otros estudios de playas mexicanas (Alvarez-Zeferino et al. 2020; de Jesus Piñon-Colin et al. 2018; Retama et al. 2016). En Salina Cruz se tienen “vertimiento inadecuado de las aguas residuales municipales; escorrentías que transportan tanto sustancias derivadas de las actividades agropecuarias, industriales y domésticas” (Zambrano et al. 2019, p. 119).

Capítulo V

Conclusiones

En este estudio se realizó la caracterización textural de los sedimentos de la zona costera de la bahía de Salina Cruz, teniendo como resultado: arenas medias, moderadamente bien clasificadas, simétricas, curtosis en el límite entre platicúrtica y mesocúrtica. Estas arenas tienen esfericidad variada, se encuentran subredondeadas a redondeadas y su madurez textural es de submadura a madura.

Además, se cuantificaron y categorizaron los microplásticos presentes en el sedimento. La playa de Salina Cruz tiene 4800 partículas kg^{-1} d.w.. El color predominante en la playa es el negro, seguido del incoloro, rojo y azul, y, en menor cantidad, los colores amarillo, multicolor, rosa, morado, pardo, verde y naranja. La morfología presente en la mayoría de las partículas es la fibra, seguida del fragmento, esfera, películas, fibras enredadas y gránulo, el orden de abundancia es: el segundo más abundante es el fragmento y el menor es el gránulo. La longitud promedio de los microplásticos es de 1269.84μ . Se determinó, por espectroscopia infrarroja, la presencia de fibras hechas a base de celulosa.

No se encontró una relación directa con el tamaño de los sedimentos y la abundancia de microplásticos, pero sí se hizo una relación de la abundancia de microplásticos dependiendo de la ubicación donde se extrajeron las muestras dentro de la playa. Presentando mayor abundancia en el extremo oeste de la playa, causada probablemente por el acarreo de sedimentos que tiene lugar en la orilla de la playa, causado por el oleaje y que sigue la dirección de las corrientes del Golfo de Tehuantepec (paralelas a la costa en dirección este-oeste).

Es posible que al realizar separación por densidad con soluciones de mayor densidad a la usada en este estudio ($1.2 g/cm^3$), se obtenga un resultado mayor de partículas en la playa, ya que los polímeros de densidades mayores a la solución no flotaron como lo hicieron los polímeros que presentan menor densidad. Para futuras investigaciones se recomienda estudiar la zona de desembocadura del río Tehuantepec para comparar los tipos de microplásticos encontrados.

Este estudio forma parte de aquellos enfocados en la contaminación de Salina Cruz, Oaxaca; donde,

además de presentar contaminación por metales pesados e hidrocarburos, ahora, se le suma la contaminación por microplásticos procedentes de las zonas urbanas, siendo transportadas por escurrimientos o vertimiento inadecuado de las aguas residuales municipales. El estudio de contaminación por microplásticos es importante, y más en zonas contaminadas con otras sustancias como Salina Cruz, ya que, en algunas investigaciones, se ha detectado la capacidad de absorber otros contaminantes (como metales pesados y contaminantes orgánicos persistentes). Añadiéndole a esto, tienen una capacidad de viajar largas distancias, convirtiendo a los microplásticos en un motivo de preocupación en materia ambiental y salud, debido a que los microplásticos son a menudo consumidos por organismos acuáticos, y en caso de que estén contaminados éstos, la ingesta representa una vía de exposición única para la introducción de contaminantes químicos altamente tóxicos en la red alimentaria.

Referencias

- Abbas-Abadi, M. S., Haghghi, M. N. & Yeganeh, H. (2012). The effect of temperature, catalyst, different carrier gases and stirrer on the produced transportation hydrocarbons of LLDPE degradation in a stirred reactor. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, *95*, 198-204. <https://doi.org/10.1016/j.jaap.2012.02.007>
- Acevedo Peralta, B. (2016). *Análisis geoarqueológico de los cambios ambientales y la ocupación de espacios, dentro del sitio arqueológico Nuevo Corinto (1 500 a.C. – 1 550 d.C.)*, Limón, Costa Rica (Tesis doctoral). <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.27489.51046>
- Akanyange, S. N., Zhang, Y., Zhao, X., Adom-Asamoah, G., Ature, A.-R. A., Anning, C., Tianpeng, C., Zhao, H., Lyu, X. & Crittenden, J. C. (2022). A holistic assessment of microplastic ubiquitousness: Pathway for source identification in the environment. *Sustainable Production and Consumption*, *33*, 113-145. <https://doi.org/10.1016/j.spc.2022.06.020>
- Akdogan, Z. & Guven, B. (2019). Microplastics in the environment: A critical review of current understanding and identification of future research needs. *Environmental Pollution*, *254*, 113011. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2019.113011>
- Álvarez-Arellano, A. D. & Gaitán-Morán, J. (1994). Lagunas costeras y el litoral mexicano: Geología. *Lagunas costeras y el litoral mexicano*, 13-74.
- Alvarez-Zeferino, J. C., Ojeda-Benítez, S., Cruz-Salas, A. A., Martínez-Salvador, C. & Vázquez-Morillas, A. (2020). Microplastics in Mexican beaches. *Resources, Conservation and Recycling*, *155*, 104633. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2019.104633>
- Arias-Madrid, D., Lopez Paz, O. & Jiménez-Builes, J. (2012). Sediment Analysis Using a Structured Programming Approach. *TecnoLógicas*, *29*, 49-67.
- Bank, M. S. & Hansson, S. V. (2022). Chapter 1 - The Microplastic Cycle: An Introduction to a Complex Issuen. En M. S. Bank (Ed.), *Microplastic in the Environment: Pattern and Process* (pp. 1-26). Springer Cham. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-78627-4>
- Beltrán, M. (2011). Tema 2. Tipos de plásticos, aditivación y mezclado. <http://hdl.handle.net/10045/16893>

- Bernard, L., Décaudin, B., Lecoœur, M., Richard, D., Bourdeaux, D., Cueff, R. & Sautou, V. (2014). Analytical methods for the determination of DEHP plasticizer alternatives present in medical devices: A review. *Talanta*, 129, 39-54. <https://doi.org/10.1016/j.talanta.2014.04.069>
- Boggs, S. J. (2014). *Principles of Sedimentology and Stratigraphy* (5.^a ed.). Pearson.
- British Plastics Federation. (2014). *A History of Plastics*. Consultado el 5 de marzo de 2022, desde https://www.bpf.co.uk/plastipedia/plastics_history/default.aspx
- Cai, H., Du, F., Li, L., Li, B., Li, J. & Shi, H. (2019). A practical approach based on FT-IR spectroscopy for identification of semi-synthetic and natural celluloses in microplastic investigation. *Science of The Total Environment*, 669, 692-701. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.03.124>
- Caldwell, J. C. (2012). DEHP: Genotoxicity and potential carcinogenic mechanisms—A review. *Mutation Research/Reviews in Mutation Research*, 751(2), 82-157. <https://doi.org/10.1016/j.mrrev.2012.03.001>
- Carranza-Edwards, A. (1980). AMBIENTES SEDIMENTARIOS RECIENTES DE LA LLANURA COSTERA SUR DEL ISTMO DE TEHUANTEPEC. *ANALES DEL CENTRO DE CIENCIAS DEL MAR Y LIMNOLOGIA*, 7(2), 13-65. <http://biblioweb.tic.unam.mx/cienciasdelmar/centro/1980-2/articulo93.html>
- Carranza-Edwards, A., Rosales-Hoz, L. & Lozano-Santa Cruz, R. (1988). Estudio sedimentológico de playas del estado de Oaxaca, México. *Anales Del Instituto de Ciencias Del Mar y Limnología*, 15(2), 23-38.
- Cauich Rodríguez, J. V. (s.f.). *CELEBRANDO 100 AÑOS DE LA CIENCIA DE LOS POLÍMEROS Y SU IMPACTO EN LOS BIOMATERIALES*. Unidad de Materiales, Centro de Investigación Científica de Yucatán A.C. Consultado el 5 de marzo de 2022, desde <http://www.sociedadpolimerica.org.mx/node/187>
- Cenedese, C. & Gordon, A. L. (s.f.). *oceanic current*. Encyclopedia Britannica. Consultado el 10 de febrero de 2022, desde <https://www.britannica.com/science/ocean-current>
- Comisión Nacional del Agua. (2020, diciembre). *Actualización de la disponibilidad media anual de agua en el acuífero Tehuantepec (2007), estado de OAXACA*. Comisión Nacional del Agua. México. https://sigagis.conagua.gob.mx/gas1/Edos_Acuiferos_18/oaxaca/DR_2007.pdf
- Corcoran, P. L., Moore, C. J. & Jazvac, K. (2014). An anthropogenic marker horizon in the future rock record. *GSA Today*, 24(6), 4-8. <https://doi.org/10.1130/GSAT-G198A.1>
- Crawford, C. B. & Quinn, B. (2017). *Microplastic Pollutants*. Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-809406-8.00001-3>
- Crutzen, P. J. & Stoermer, E. F. (2000). The “Anthropocene”. *Global Change Newsletter*, (41), 17-18. <http://www.igbp.net/download/18.316f18321323470177580001401/1376383088452/NL41.pdf>

- de Jesus Piñon-Colin, T., Rodriguez-Jimenez, R., Pastrana-Corral, M. A., Rogel-Hernandez, E. & Wakida, F. T. (2018). Microplastics on sandy beaches of the Baja California Peninsula, Mexico. *Marine Pollution Bulletin*, 131, 63-71. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2018.03.055>
- DIGAOHM. (s.f.-a). Oaxaca. *Dirección General Adjunta de Oceanografía, Hidrografía y Meteorología*. Consultado el 2 de noviembre de 2021, desde <https://digaohm.semarn.gob.mx/derrotero/derrotero/oaxaca.pdf>
- DIGAOHM. (s.f.-b). Salina Cruz, Oaxaca. *Dirección General Adjunta de Oceanografía, Hidrografía y Meteorología*. Consultado el 2 de noviembre de 2021, desde <https://digaohm.semarn.gob.mx/derrotero/cuestionarios/cnarioSalinacruz.pdf>
- dos Muchangos, L., Xue, M., Zhou, L., Kojima, N., Machimura, T. & Tokai, A. (2019). Flows, stocks, and emissions of DEHP products in Japan. *Science of The Total Environment*, 650, 1007-1018. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.09.077>
- Douglas, T. (2012). *Essentials of Oceanography*. World Technologies. <http://ebookcentral.proquest.com/lib/unam/detail.action?docID=5012120>
- Elliot, D., Schwartz, M., Scott, G., Haymes, S., Heimiller, D. & George, R. (2004). *Atlas de recursos eólicos del estado de Oaxaca* (Informe). Laboratorio Nacional de Energía renovable. EUA.
- Entorno de Mercado. Dinámica y composición de las actividades en el Puerto de Salina Cruz*. (2018, 20 de febrero). Gobierno de México. <https://www.puertosalinacruz.com.mx/esps/0020501/entorno-de-mercado>
- Esri. (2020). World Ocean Base. *Map Service*.
- European Commission. (1995, 13 de marzo). *Case No IV /M.550 - UNION CARBIDE / ENICHEM. REGULATION (EEC)No 4064/89 MERGER PROCEDURE* [Article 6(1)(b) NON OPPOSITION]. European Union. https://ec.europa.eu/competition/mergers/cases/decisions/m550_en.pdf
- Fenollar Gimeno, O. Á. (2011). *Utilización de plastificantes naturales para la obtención de PVC flexible de bajo impacto medioambiental*. Universitat Politècnica de València. Universitat Politècnica de València. <https://doi.org/10.4995/Thesis/10251/11097>
- Flores Cortés, M. (2021). *Características texturales y contaminación por microplásticos en los sedimentos costeros del municipio de Tecolutla, Veracruz* (Tesis de licenciatura). Universidad Nacional Autónoma de México.
- Flores-Vidal, X., Durazo, R., Chavarme, C. & Flament, P. (2011). Circulación costera en ausencia de viento en el golfo de Tehuantepec, México: Observaciones con radares de alta frecuencia. *Ciencias marinas*, 37, 493-512.

- Folk, R. L. & Ward, W. C. (1957). Brazos River bar[Texas]; a study in the significance of grain size parameters. *Journal of Sedimentary Research*, 27(1), 3-26.
- Fuentes Aguilar, L. (1983). El puerto industrial de Salina Cruz, Oaxaca: Una estrategia de desarrollo sectorial. *Investigaciones geográficas*, (13), 211-238.
- GESAMP. (2015). *Sources, fate and effects of microplastics in the marine environment: a global assessment* (P. J. Kershaw, Ed.; Rep. Stud. GESAMP N.º 90). IMO/FAO/UNESCO - IOC/UNIDO/WMO/IAEA /UN/UNEP/UNDP Joint Group of Experts on the Scientific Aspects of Marine Environmental Protection. <http://www.gesamp.org/publications/reports-and-studies-no-90>
- Geyer, R., Jambeck, J. R. & Law, K. L. (2017). Production, use, and fate of all plastics ever made. *Science Advances*, 3(7), e1700782. <https://doi.org/10.1126/sciadv.1700782>
- Gibbens, S. (2018, 23 de noviembre). *Lo que necesitas saber sobre los plásticos de origen vegetal*. National Geographic Society. <https://www.nationalgeographic.com/medio-ambiente/2018/11/lo-que-necesitas-saber-sobre-los-plasticos-de-origen-vegetal>
- Gilbert, M. (2017). Chapter 1 - Plastics Materials: Introduction and Historical Development. En M. Gilbert (Ed.), *Brydson's Plastics Materials (Eighth Edition)* (Eighth Edition, pp. 1-18). Butterworth-Heinemann. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-35824-8.00001-3>
- Góngora Pérez, J. P. (2014). La industria del plástico en México y el mundo. *Comercio Exterior*, 64(5), 6-9. http://revistas.bancomext.gob.mx/rce/magazines/761/3/la_industria_del_plastico.pdf
- González Macías, M. d. C. (2007). *Herramientas de gestión ambiental para la industria de refinación: caso Salina Cruz* (Tesis de doctorado). Centro de Investigaciones Biológicas del Noroeste, S.C. <https://cibnor.repositorioinstitucional.mx/jspui/handle/1001/335>
- Google. (s.f.). *Google Earth* [Salina Cruz Oaxaca]. Consultado el 2 de noviembre de 2021, desde https://earth.google.com/web/@16.1668107,-95.19965547,10.52883637a,15531.71058158d,35y,359.99969922h,0t,0r?utm_source=earth7&utm_campaign=vine&hl=en
- Gorzelnik, S. (s.f.). *PFAS Discovery*. Consultado el 14 de marzo de 2022, desde <https://gorzelnikengineering.com/pfas-discovery/>
- Gran Diccionario Náhuatl*. (2012). Universidad Nacional Autónoma de México. <https://gdn.iib.unam.mx/diccionario/olli>
- Grillo, J. F., Guerrero Rebolledo, A., Sabino, M. A. & Ramos, R. (2022). Microplastics in Latin America and the Caribbean: On the adoption of reporting standards and quality assurance and quality control protocols. *Environmental Advances*, 8, 100236. <https://doi.org/10.1016/j.envadv.2022.100236>
- Hanan Alipi, A. M. & Mondragón Pichardo, J. (2009, 16 de agosto). *Malezas de México, Chenopodiaceae Beta vulgaris L. Acelga silvestre* (H. Vibrans, Ed.). Consultado el 30 de mayo de 2022, desde <http://>

- [//www.conabio.gob.mx/malezasdemexico/chenopodiaceae/beta-vulgaris/fichas/ficha.htm#2.%20Origen%20y%20distribuci%C3%B3n%20geogr%C3%A1fica](http://www.conabio.gob.mx/malezasdemexico/chenopodiaceae/beta-vulgaris/fichas/ficha.htm#2.%20Origen%20y%20distribuci%C3%B3n%20geogr%C3%A1fica)
- Harris, P. T. (2020). The fate of microplastic in marine sedimentary environments: A review and synthesis. *Marine Pollution Bulletin*, 158, 111398. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2020.111398>
- Hartmann, N. B., Hüffer, T., Thompson, R. C., Hassellöv, M., Verschoor, A., Daugaard, A. E., Rist, S., Karlsson, T., Brennholt, N., Cole, M., Herrling, M. P., Hess, M. C., Ivleva, N. P., Lusher, A. L. & Wagner, M. (2019). Are We Speaking the Same Language? Recommendations for a Definition and Categorization Framework for Plastic Debris [PMID: 30608663]. *Environmental Science & Technology*, 53(3), 1039-1047. <https://doi.org/10.1021/acs.est.8b05297>
- Health and Consumer Protection Directorate-General, European Commission. (s.f.). *Glosario General* [Di(2-ethylhexil)ftalato (DEHP)]. European Union. Consultado el 30 de mayo de 2022, desde https://ec.europa.eu/health/scientific_committees/opinions_layman/es/ftalatos-material-escolar/glosario/def/dehp-di-2-etilhexil-ftalato.htm
- Henderson, L. & Green, C. (2020). Making sense of microplastics? Public understandings of plastic pollution. *Marine Pollution Bulletin*, 152, 110908. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2020.110908>
- Hernández Santana, J. R., Ortiz Pérez, M. A. & Mah Eng, M. F. (2009). Análisis morfoestructural del estado de Oaxaca, México: un enfoque de clasificación tipológica del relieve. *Investigaciones geográficas*, (68), 11-12. http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0188-46112009000100002
- Hutley, T. J. & Ouederni, M. (2016). Polyolefins—The History and Economic Impact. En M. Al-Ali Al-Ma'adeed & I. Krupa (Eds.), *Polyolefin Compounds and Materials: Fundamentals and Industrial Applications* (pp. 13-50). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-319-25982-6_2
- INAH. (2008, 30 de julio). *Develan pelotas olmecas*. Instituto Nacional de Antropología e Historia. <https://www.inah.gob.mx/boletines/2245-develan-pelotas-olmecas>
- INEGI. (2004). Síntesis de Información geográfica del estado de Oaxaca. *Instituto Nacional de Estadística y Geografía*. http://internet.contenidos.inegi.org.mx/contenidos/productos/prod_serv/contenidos/espanol/bvinegi/productos/historicos/2104/702825224394/702825224394_1.pdf
- INEGI (Ed.). (2010). *Red Hidrográfica ESCALA 1:50 000 Edición: 2.0, Subcuenca Hidrográfica RH21Aa Salina Cruz /Cuenca R. ASTATA Y OTROS /R.H. Costa de OAXACA (PUERTO ÁNGEL)* (2.0) [Datos vectoriales digitales]. Instituto Nacional de Estadística y Geografía. <https://www.inegi.org.mx/app/mapas/>

- INEGI. (2016). División política estatal, 1:250000. [Datos vectoriales digitales]. *Instituto Nacional de Estadística y Geografía*. http://www.conabio.gob.mx/informacion/metadatos/gis/dest_2015gw.xml?_httpcache=yes&_xsl=/db/metadatos/xsl/fgdc_html.xsl&_indent=no
- INEGI. (2018). División política municipal, 1:250000 [Datos vectoriales digitales]. *Instituto Nacional de Estadística y Geografía*. http://www.conabio.gob.mx/informacion/metadatos/gis/muni_2018gw.xml?_httpcache%20=%20yes&_xsl=/db/metadatos/xsl/fgdc_html.xsl&_indent%20=%20no
- INEGI. (2021a). *Información topográfica E15C72 (Jalapa del Márquez) escala 1:50 000 serie III* [Datos vectoriales digitales]. Instituto Nacional de Estadística y Geografía. <https://www.inegi.org.mx/temas/topografia/default.html#Descargas>
- INEGI. (2021b). *Información topográfica E15C73 (Tehuantepec) escala 1:50 000 serie III* [Datos vectoriales digitales]. Instituto Nacional de Estadística y Geografía. <https://www.inegi.org.mx/temas/topografia/default.html#Descargas>
- INEGI. (2021c). *Información topográfica E15C74 (Unión Hidalgo) escala 1:50 000 serie III* [Datos vectoriales digitales]. Instituto Nacional de Estadística y Geografía. <https://www.inegi.org.mx/temas/topografia/default.html#Descargas>
- INEGI. (2021d). *Información topográfica E15C82 (El Morro) escala 1:50 000 serie III* [Datos vectoriales digitales]. Instituto Nacional de Estadística y Geografía. <https://www.inegi.org.mx/temas/topografia/default.html#Descargas>
- INEGI. (2021e). *Información topográfica E15C83 (Salina Cruz) escala 1:50 000 serie III* [Datos vectoriales digitales]. Instituto Nacional de Estadística y Geografía. <https://www.inegi.org.mx/temas/topografia/default.html#Descargas>
- INEGI. (2021f). *Información topográfica E15C84 (San Mateo del Mar) escala 1:50 000 serie III* [Datos vectoriales digitales]. Instituto Nacional de Estadística y Geografía. <https://www.inegi.org.mx/temas/topografia/default.html#Descargas>
- Jain, S. (2014). *Fundamentals of Physical Geology*. Springer, New Delhi. <https://doi.org/10.1007/978-81-322-1539-4>
- Kibria, G., Nugegoda, D. & Haroon, A. K. Y. (2022). Chapter 7 - Microplastic (MP) Pollution in the Context of Occurrence, Distribution, Composition and Concentration in Surface Waters and Sediments: A Global Overview. En M. Z. Hashmi (Ed.), *Microplastic Pollution: Environmental Occurrence and Treatment Technologies* (pp. 133-166). Springer Cham. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-89220-3>
- Kozak, E. R., Franco-Gordo, C., Mendoza-Pérez, J., Sánchez-Nuño, N., Martínez-Sánchez, X. A., Melo-Agustín, P., Pelayo-Martínez, G. & Gómez-Gutiérrez, J. (2021). Surface layer microplastic pollution

- in four bays of the central Mexican Pacific. *Marine Pollution Bulletin*, 169, 112537. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2021.112537>
- Larqué-Saavedra, A. (2016). Biotecnología prehispánica en Mesoamérica. *Revista fitotecnia mexicana*, 39, 107-115. http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0187-73802016000200107&nrm=iso
- Latisnere-Barragán, H. (s.f.). *Desde el árbol del Caucho hasta los Plásticos bio-compostables: ¿Hacia dónde vamos?* Centro de Investigaciones Biológicas del Noroeste. Consultado el 15 de febrero de 2022, desde <https://centrosconacyt.mx/noticia/desde-el-arbol-del-caucho-hasta-los-plasticos-bio-compostables-hacia-donde-vamos/>
- Liera Romero, F. J. (s.f.). *CATALIZADORES ZIEGLER NATTA* [SEMINARIO DE ACTUALIZACIÓN PROFESIONAL EN CIENCIA Y TECNOLOGÍA PARA LA INDUSTRIA DE LOS POLÍMEROS.]. Escuela Superior de Ingeniera Química e Industrias Extractivas. IPN. <https://tecnologiadelospolimeros.wordpress.com/2018/01/25/catalizadores-ziegler-natta/>
- Martinez Alcalá, J. A. (2005). Efecto de el viento en la circulación de el Golfo de Tehuantepec a través de sensores remotos. *Oceanografía y meteorología del Golfo de Tehuantepec* (p. 247). GEOS. <https://ugm.org.mx/site/geos-vol-25-no-1/>
- Meteorología. (s.f.-b). *Predicción Numérica del Tiempo*. Dirección General Adjunta de Oceanografía, Hidrografía y Meteorología. Consultado el 22 de febrero de 2022, desde <https://meteorologia.semar.gob.mx/#>
- Microscopía Electrónica de Barrido (MEB)*. (2020, 4 de marzo). Universidad de Burgos (España). https://meteorologia.semar.gob.mx/ww3/wave/atlantico/height_total/height_total.html
- Microscopía Electrónica de Barrido (MEB)*. (2020, 4 de marzo). Servicios Centrales de Apoyo a la Investigación, Universidad de Málaga (España). https://meteorologia.semar.gob.mx/ww3/wave/atlantico/height_total/height_total.html
- Mijangos, C. (2020). 100 años de Ciencia de Polímeros en el mundo, 73 años en nuestro país: Avances en la Academia y en la Industria. *Anales de la Real Sociedad Española de Química*, (4), 214-222.
- Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial. (2004). *Guías Ambientales / Sector Plásticos*. <http://biblioteca.org.anipac.mx/biblioteca/plastic/medio-ambiente-plasticos/guias-ambientales-sector-plasticos>
- Montero Rodríguez, C. & Mejía Barragán, F. (2018). El descubrimiento de los plásticos: de solución a problema ambiental. *Letras ConCiencia Tecnológica*, 80-96. <https://revistas.itc.edu.co/index.php/letras/article/view/51>

- Mora, J., Gélvez Lizarazo, Ó., Castro, J., Roa, D., Flórez, S. & Urbina-Gonzalez, J. M. (2011). Diodos orgánicos emisores de luz (oleds) y sus bases tecnológicas. *Scientia et Technica*, 16, 199-206. <https://doi.org/10.22517/23447214.1519>
- Nichols, G. (2009b). *Sedimentology and stratigraphy* (Second Edition). John Wiley & Sons.
- NOAA. (2015). *Laboratory Methods for the Analysis of Microplastics in the Marine Environment: Recommendations for quantifying synthetic particles in waters and sediments* (inf. téc. Technical Memorandum NOS-OR&R-48). National Oceanic and Atmospheric Administration. U.S. Department of Commerce.
- NOAA, Ocean Exploration. (2021, 26 de febrero). *What is a current?* <https://oceanservice.noaa.gov/facts/current.html>
- NOAA, Ocean Exploration. (s.f.-a). *How does the ocean affect climate and weather on land?* Consultado el 5 de febrero de 2022, desde <https://oceanexplorer.noaa.gov/facts/climate.html>
- NOAA, Ocean Exploration. (s.f.-b). *Multimedia Discovery Missions*. Consultado el 5 de febrero de 2022, desde <https://oceanexplorer.noaa.gov/edu/learning/welcome.html#lesson11>
- Ortiz Gallarza, S. M. (2007). *Sustentabilidad ecológica, salud ambiental y contaminación en ecosistemas acuáticos* (Tesis de doctorado). Centro de Investigaciones Biológicas del Noroeste, S.C. <http://cibnor.repositorioinstitucional.mx/jspui/handle/1001/334>
- Painter, P. C. & Coleman, M. M. (2008). *Essentials of Polymer Science and Engineering*. DEStech Publications, Inc.
- Plastics Europe. (2017). *Plastics – The Facts 2017: An analysis of European plastics production, demand and waste data*. <https://plasticseurope.org/knowledge-hub/plastics-the-facts-2017-2/>
- Plastics Europe. (2019). *The Circular Economy for Plastics – A European Overview*. <https://plasticseurope.org/knowledge-hub/the-circular-economy-for-plastics-a-european-overview/>
- Plastics Europe. (2020). *Plastics – The Facts 2020: An analysis of European plastics production, demand and waste data*. <https://plasticseurope.org/es/knowledge-hub/plasticos-situacion-en-2020/>
- Plastics Europe. (2021). *Plastics – The Facts 2021: An analysis of European plastics production, demand and waste data*. <https://plasticseurope.org/es/knowledge-hub/plasticos-situacion-en-2020/>
- Pulido-Sierra, S. I., Silva-Calvão, M. E., Ferreira-Neto, J. A. & Rojo-Alboreca, A. (2012). Análisis del caucho natural en el mundo. *Spanish Journal of Rural Development*, 3(S3), 57-64. <https://link.gale.com/apps/doc/A361713589/IFME?u=googlescholar&sid=bookmark-IFME&xid=036cf75a>
- Recalde, A., Lee, H., Jung, J. & Ramos, S. (2019). *Plastic flow in worldwide context MHSE11 - Circular Economy* (Reporte técnico). Technische Universität Dresden. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.29715.22567>

- Renner, G., Schmidt, T. & Schram, J. (2016). Characterization and Quantification of Microplastics by Infrared Spectroscopy. <https://doi.org/10.1016/bs.coac.2016.10.006>
- Retama, I., Jonathan, M., Shruti, V., Velumani, S., Sarkar, S., Roy, P. D. & Rodríguez-Espinosa, P. (2016). Microplastics in tourist beaches of Huatulco Bay, Pacific coast of southern Mexico. *Marine Pollution Bulletin*, 113(1), 530-535. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2016.08.053>
- Ritchie, H. & Roser, M. (2018). Plastic Pollution. *Our World in Data*. <https://ourworldindata.org/plastic-pollution>
- Rochman, C. M., Brookson, C., Bikker, J., Djuric, N., Earn, A., Bucci, K., Athey, S., Huntington, A., McIlwraith, H., Munno, K., De Frond, H., Kolomijeca, A., Erdle, L., Grbic, J., Bayoumi, M., Borrelle, S. B., Wu, T., Santoro, S., Werbowski, L. M., ... Hung, C. (2019). Rethinking microplastics as a diverse contaminant suite. *Environmental Toxicology and Chemistry*, 38(4), 703-711. <https://doi.org/10.1002/etc.4371>
- Roden, G. I. (1961). SOBRE LA CIRCULACIÓN PRODUCIDA POR EL VIENTO EN EL GOLFO DE TEHUANTEPEC Y SUS EFECTOS SOBRE LAS TEMPERATURAS SUPERFICIALES *. *Geofísica Internacional*, 1, 55-76. <https://doi.org/10.22201/igeof.00167169p.1961.1.3.1169>
- Rodrigues, M., Abrantes, N., Gonçalves, F., Nogueira, H., Marques, J. & Gonçalves, A. (2019). Impacts of plastic products used in daily life on the environment and human health: What is known? *Environmental Toxicology and Pharmacology*, 72, 103239. <https://doi.org/10.1016/j.etap.2019.103239>
- Rodríguez, J., Edeskär, T. & Knutsson, S. (2013). Particle shape quantities and measurement techniques: a review. *The Electronic journal of geotechnical engineering*, 18, 169-198.
- Sánchez-Hernández, L. J., Ramírez-Romero, P., Rodríguez-González, F., Ramos-Sánchez, V. H., Márquez Montes, R. A., Romero-Paredes Rubio, H., Sujitha, S. & Jonathan, M. (2021). Seasonal evidences of microplastics in environmental matrices of a tourist dominated urban estuary in Gulf of Mexico, Mexico. *Chemosphere*, 277, 130261. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.130261>
- SAPEA. (2019). *A Scientific Perspective on Microplastics in Nature and Society*. Science Advice for Policy by European Academies. <https://doi.org/10.26356/microplastics>
- Schiavon, M. I. (2012). *FUNDAMENTOS DE DIODOS*. Electrónica I. Universidad Nacional de Rosario. <https://www.fceia.unr.edu.ar/eca1/files/teorias/Diodos%20-%202012.pdf>
- Science History Institute. (2017, 4 de diciembre). *Wallace Hume Carothers*. <https://www.sciencehistory.org/historical-profile/wallace-hume-carothers>
- Seibold, E. & Berger, W. (2017). *The Sea Floor: An Introduction to Marine Geology* (4.^a ed.). Springer, Cham. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-51412-3>

- SGM. (2000). Carta Geológico-Minera Juchitán E15-10 D15-1 Oaxaca y Chiapas, 1:250000. *Servicio Geológico Mexicano*.
- Sheppard, C. (Ed.). (2019). *World Seas: an Environmental Evaluation* (Second Edition, Vol. 3). Academic Press. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-805052-1.00019-X>
- SYSTEMIQ. (2022). *ReShaping Plastics: Pathways to a Circular, Climate Neutral Plastics System in Europe*. <https://plasticseurope.org/reshaping-plastics/>
- Tarkanian, M. J. & Hosler, D. (2000). La elaboración de hule en Mesoamérica. *Arqueología mexicana*, 8, 54-57. <https://biblat.unam.mx/es/revista/arqueologia-mexicana/articulo/la-elaboracion-de-hule-en-mesoamerica>
- Trujillo, A. P. & Thurman, H. V. (2011). *Essentials of Oceanography* (Tenth Edition). Prentice Hall.
- UNEP. (2015). *Biodegradable Plastics and Marine Litter. Misconceptions, concerns and impacts on marine environments*. United Nations Environment Programme (UNEP). <http://biblioteca.org.anipac.mx/biblioteca/estudios-cientificos/biodegradable-plastics-and-marine-litter-misconceptions-concerns-and-impacts-on-marine-environments-unesp>
- UNEP. (2021). *From Pollution to Solution: A Global Assessment of Marine Litter and Plastic Pollution*. United Nations Environment Programme (UNEP). <https://www.grida.no/publications/747>
- Velázquez Muñoz, F. (2005). Efectos del viento del Norte en la dinámica costera del Golfo de Tehuantepec: observaciones con radar HF y resultados numéricos. *Oceanografía y meteorología del Golfo de Tehuantepec* (pp. 245-246). GEOS. <https://ugm.org.mx/site/geos-vol-25-no-1/>
- Velázquez-Muñoz, F., Martínez, J., Chavanne, C., Durazo, R. & Flament, P. (2011). Wind-driven coastal circulation in the Gulf of Tehuantepec, Mexico. *Ciencias Marinas*, 37(4A), 443-456. <https://doi.org/10.7773/cm.v37i4A.1920>
- Wainkwa Chia, R., Lee, J.-Y., Kim, H. & Jang, J. (2021). Microplastic pollution in soil and groundwater: a review. *Environmental Chemistry Letters*, 19, 4211-4224. <https://doi.org/10.1007/s10311-021-01297-6>
- Weber, B., Gruner, B., Hecht, L., Molina-Garza, R. & Köhler, H. (2002). El descubrimiento de basamento metasedimentario en el macizo de Chiapas: la “Unidad La Sepultura”. *Geos*, 22(1), 2-11.
- Wilkinson, T., Wiken, E., Creel, J. B., Hourigan, T., Agardy, T., Herrmann, H., Janishevski, L., Madden, C., Morgan, L. & Padilla, M. (2009). *Ecorregiones marinas de América del Norte*. Comisión para la Cooperación Ambiental. <http://www.cec.org/es/publications/ecorregiones-marinas-de-america-del-norte/>

- Xanthos, D. & Walker, T. R. (2017). International policies to reduce plastic marine pollution from single-use plastics (plastic bags and microbeads): A review. *Marine Pollution Bulletin*, 118(1), 17-26. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2017.02.048>
- Zambrano, M. C., Pawlak, J. J., Daystar, J., Ankeny, M., Cheng, J. J. & Venditti, R. A. (2019). Microfibers generated from the laundering of cotton, rayon and polyester based fabrics and their aquatic biodegradation. *Marine Pollution Bulletin*, 142, 394-407. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2019.02.062>