

UNIVERSIDAD DE LAS AMÉRICAS PUEBLA

Escuela de Ingeniería

Departamento de Ingeniería Química, Ambiental, Alimentos y Energía



**Tuna como coagulante natural para la remoción de
microplásticos**

Tesis que, para completar los requisitos del Programa de Honores presenta la
estudiante

Paulina Monroy Escobedo

171156

Ingeniería Química

Director: Deborah Xanat Flores Cervantes

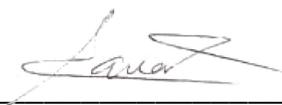
San Andrés Cholula, Puebla.

Primavera 2024

Hoja de firmas

Tesis que, para completar los requisitos del Programa de Honores presenta el
estudiante **Paulina Monroy Escobedo con ID 171156**

Director de Tesis



Dra. Deborah Xanat Flores Cervantes

Presidente de Tesis



Dr. René Alejandro Lara Díaz

Secretario de Tesis



Dra. Nelly Ramírez Corona

A Pau, por confiar y creer que lo podría hacer y lo logró.

Agradecimientos

A mis padres Ricardo y Eva, por siempre creer en mis sueños e impulsarme a hacerlos más grandes. Por siempre apoyarme, escucharme y ser mi consuelo toda la vida. Se que son mis fans número 1 y yo también soy la de ustedes. Gracias por hacerme sentir que todo lo que hago es valioso. Y por enseñarme la forma en la que veo la vida.

A mi hermano Ricardo Félix, por enseñarme que las mentes más brillantes son las más jóvenes. Por siempre hacerme sentir que no estoy sola, aunque la casa este en silencio. Por ser mi cómplice y mi guía.

A Rosa Isela, por decidir quedarse conmigo y crecer junto a mí. Por no solo ser mi amiga sino también mi familia. Por acompañarme en todas mis travesías y etapas. No lo hubiese logrado sin ti.

A mi familia Escobedo Muñoz y Monroy Mercado, por siempre hacerme sentir que tengo un hogar, por su compañía, por su cariño, por su amor y su lealtad. Gracias por nunca dejarme sin sus chistes y bromas. No sería quien soy sin ustedes.

A la Dra. Xanat F, por ser una inspiración antes, durante y después de esta etapa.

A mis maestros de la carrera, pero con especial agradecimiento a mis sinodales el Dr. Rene y la Dra. Nelly, por su apoyo en la finalización de este proceso y por compartir la esencia de la enseñanza.

A Guillermo Díaz, por ser un gran maestro y amigo. Esto, no hubiese sido posible sin ti

A todos mis amigos de la Universidad, pero con especial cariño a Misael, Ivana, Venus y Aranza. Por acompañarme desde el primer día y hacer de esta etapa una inolvidable. A Misael, por ser mi mano derecha en esta vida lejos de casa. A Ivana por hacerme sentir que todos podemos cometer los mismos errores y que al final todo estará bien. A Venus por enseñarme la pureza de una amistad. Y Aranza por enseñarme que, aunque parezca que el camino está por terminar, siempre llegará alguien que nos acompañe.

A Benjamín por hacerme sentir que todo estará bien, por silenciar al mundo cuando esté se escucha muy fuerte y por entender y seguir las formas que veo y amo la vida.

A mis *Roomies*, Esthela, María X, María J, Dana, Montse, Daniela y Michelle. Por convertir un cuarto lleno de señoritas en un hogar, por abrazarme cuando tenía miedo, por escucharme, aunque fuera muy tarde, por la desveladas, por las risas y por abrir la puerta y escuchar un: ¡Ya se completó la familia!

A Xanat A, por jamás dejar de creer en mí y por hacerme sentir que nada es lo suficientemente grande para no lograrlo. Brisel, gracias por quedarte y nunca soltar mi mano. Eres mi para 5 siempre. Y a mis amigas por hacerme sentir un brillo en el corazón, que a veces solo es capaz de imaginarse a través de los libros.

Índice

Lista de figuras	7
Lista de tablas	9
Acrónimos	10
1. Introducción.....	11
2. Justificación	12
3. Objetivos.....	13
3.1 Objetivo general.....	14
3.2 Objetivos específicos	14
4. Marco teórico	14
4.1 El plástico	14
4.1.1 Contexto del plástico en el ambiente mundial	15
4.2 Microplásticos	16
4.2.1 Microplásticos Primarios	16
4.2.2 Microplásticos Secundarios	16
4.2.3 Microplásticos en el ambiente mundial	17
4.3 Composición física de los microplásticos	18
4.3.1 Tamaño	18
4.3.2 Forma y estructura	19
4.4 Agua.....	19
4.4.1 Agua cruda	20
4.4.2 Agua sintética	20
4.4.3 Lago de Valsequillo	20
4.5 Características física y químicas del agua	21
4.5.1 Turbiedad	21
4.5.2 Solidos Suspendidos Totales (SST)	22
4.5.3 Color	23
4.5.4 Temperatura	23
4.5.5 pH	24
4.6 Coagulación-Floculación	24
4.6.1 Coagulantes metálicos	26
4.6.2 Polielectrólitos	26
4.6.3 Coagulantes Naturales	27
4.6.3.1 Cactus (Opuntia)	27
4.6.3.2 Tuna (Opuntia ficus-indica)	26
4.6.3.3 Sandía (Citrullus lanatus)	27
4.8 Beneficios	28
4.8.1 Objetivos del desarrollo sostenible	28

5. Metodología	30
5.1 Obtención del coagulante	30
5.2 Agua cruda UDLAP	30
5.3 Agua sintética	31
5.4 Agua de Valsequillo	32
5.5 Pruebas de coagulación	32
5.6 Preparación del coagulante	33
5.7 Prueba de jarras	33
5.8 Análisis de microplásticos	35
5.9 Remoción de fase orgánica.....	37
5.10 Vacío para remoción de componentes orgánicos.....	38
5.11 Remoción de fase inorgánica.....	38
5.12 Preparación oxido de zinc en polvo	39
5.13 Vacío para remoción de componente inorgánicos.....	39
5.14 Conteo de microplásticos	40
6. Resultados y discusión	42
6.1 Selección de coagulante	42
6.2 Pruebas en tuna	50
6.3 Coagulante de tuna, remoción de microplásticos	53
6.4 Resultados microplásticos	58
7. Conclusiones y recomendaciones	66
8. Bibliografías	68
9. Anexos	74
A1. Limites permisibles SEMARNAT	74
A2. Mejores resultados agua cruda UDLAP	75
A3. Bitácoras	75

Lista de figuras

Figura 1. Escala de tamaños para los plásticos (Castañeta et al., 2020)	19
Figura 2. Formas de MP más comunes en agua, sedimentos y peces en estudios realizados en México (Acosta González et al., 2022)	20
Figura 3. Mapa Presa de Valsequillo.....	21
Figura 4. Escalas de clasificación calidad del agua para SST (SEMARNAT, 2020)	23
Figura 5. Propiedad del polvo de cactus Opuntia ficus-indica (López Pérez, 2018)	27
Figura 6. Objetivos de desarrollo sostenible	29
Figura 7. Proceso de obtención del coagulante	30
Figura 8. Muestras obtenidas de la presa de Valsequillo	32
Figura 9. Proceso de preparación para la concentración del coagulante	33
Figura 10. Prueba de jarras para agua sintética, agua cruda UDLAP y Lago de Valsequillo	34
Figura 11. Medición con colorímetro para turbidez, color y SST	35
Figura 12. Sedimentación de las muestras en agua cruda UDLAP, Lago de Valsequillo y agua sintética	36
Figura 13. Tamices de 45 micras, 500 micras y 2.3 milímetros	37
Figura 14. Proceso fase orgánica e inorgánica para obtener filtros con MP	40
Figura 15. División de filtro para conteo de MP	41
Figura 16. Bitácora para conteo de MP	42
Figura 17. Tuna, Nopal y Sandía, después de salir del secador	43
Figura 18. Porcentaje de remoción SST nopal 0.1% y tuna 0.1%	46
Figura 19. Porcentaje de remoción Agua sintética Sandía al 0.1%	49
Figura 20. Porcentaje de remoción Agua sintética Tuna al 0.1%	49
Figura 21. Porcentaje de remoción Agua cruda UDLAP	56
Figura 22. Porcentaje de remoción Agua sintética	57
Figura 23. Porcentaje de remoción Lago de Valsequillo	57
Figura 24. Medición de MP	62
Figura 25. Medición de MP	62
Figura 26. Promedio formas de MP agua cruda UDLAP.....	63
Figura 27. Promedio formas de MP agua sintética.....	63
Figura 28. Promedio formas de MP presa Valsequillo.....	63
Figura 29. Porcentaje de remoción de microplásticos de acuerdo con su forma a 500 micras.....	65
Figura A1. Límites permisibles de acuerdo con la NOM-001-SEMARNAT-2021 (DOF, 2022)	74
Figura A3.1. Bitácora ASA 45 micras a 20 ppm	75
Figura A3.2. Bitácora AVA 45 micras a 20 ppm	76
Figura A3.3. Bitácora ACA 45 micras a 20 ppm	76
Figura A3.4. Bitácora MI AVA 45 micras	77
Figura A3.5. Bitácora MI ASA 45 micras	77
Figura A3.6. Bitácora MI ACA 45 micras	78
Figura A3.7. Bitácora ACA 500 micras a 20 ppm	78
Figura A3.8. Bitácora ASA 500 micras a 20 ppm	79

Figura A3.9. Bitácora AVA 500 micras a 20 ppm	79
Figura A3.10. Bitácora MI AVA 500 micras	80
Figura A3.11. Bitácora MI ASA 500 micras	80
Figura A3.12. Bitácora MI ACA 500 micras	81

Lista de tablas

Tabla 1. % de remoción de agua después de salir del secador	43
Tabla 2. Nopal 0.1 % Lago de Valsequillo prueba de coagulante	44
Tabla 3. Tuna 0.1% Lago de Valsequillo prueba de coagulante	45
Tabla 4. Sandía 0.1% Agua sintética prueba de coagulante	47
Tabla 5. Tuna 0.1% Agua sintética prueba de coagulante	48
Tabla 6. Tuna 0.05% Agua sintética prueba de coagulante	51
Tabla 7. Tuna 0.1% Lago de Valsequillo muestra 2 prueba de coagulante	53
Tabla 8. Coagulación agua cruda UDLAP tuna 0.1%	54
Tabla 9. Coagulación agua sintética tuna 0.1%	55
Tabla 10. Coagulación Lago de Valsequillo tuna 0.1%	55
Tabla 11. % de remoción de MP a 45 micras	59
Tabla 12. % de remoción de MP a 500 micras	61
Tabla A2. Tuna 0.1% Agua Cruda prueba de coagulante.....	75

Acrónimos

AC	Agua cruda UDLAP
ACA	Agua cruda UDLAP en agua
AS	Agua sintética con microplásticos
ASA	Agua sintética con microplásticos en agua
LV/AV	Lago de Valsequillo / Agua de Valsequillo
LVA/AVA	Lago de Valsequillo en agua / Agua de Valsequillo en agua
MP	Microplásticos
ppm	Partes por millón
PTAR	Planta de tratamiento de aguas residuales
SST	Sólidos suspendidos totales
SM	Solución madre
SMAH	Solución madre de ácidos húmicos
T	Temperatura
UDLAP	Universidad de las Américas Puebla

1. Introducción

Nada en el mundo funciona sin agua: ni en los ecosistemas naturales, ni en las ciudades ni mucho menos en el cuerpo humano. Todos los procesos vitales de nuestro planeta dependen directa o indirectamente de esta sustancia cotidiana y, sin embargo, tan valiosa (German Water Partnership, 2013).

Actualmente, se vive en un mundo rodeado de material plástico. Desde mediados del siglo veinte, los plásticos han sido una bendición para la humanidad y una parte integral de nuestra vida moderna (Andrés Sarria-Villa & Gallo-Corredor, 2016). En todo momento, el ser humano tiene relación con este, pues son usados todos los días. No es necesario hacer un análisis muy exhaustivo para comprobar esto. Si se mira alrededor podemos asegurar esta afirmación; tan solo el computador, las lámparas, hasta nuestro calzado, están fabricados con este compuesto. La principal característica que hace este material atractivo para el ser humano es su durabilidad; sin embargo, es también su mayor problema pues es extremadamente resistente a su degradación (Sánchez Ramírez, 2018). Lamentablemente la mayor parte de todo con lo que podemos llevar a cabo nuestras actividades diarias provienen de este compuesto, desde el empaquetado de los alimentos, hasta los dispositivos médicos.

Los plásticos son capaces de generar riesgos no solo en el ambiente, sino también en la salud de los seres vivos. La ONU declaró en 2017 que hay hasta 51.000 millones de partículas microplásticas en el mar, 500 veces más que el número de estrellas de nuestra galaxia (Sánchez Ramírez, 2018) lo que implica que estos puedan ser ingeridos por animales marinos, los cuales a través de la cadena alimenticia terminen en nuestro cuerpo. Un informe de investigación de la plataforma de periodismo, denominado “Contaminación del agua a

nivel global por polímeros sintéticos” (Kosuth et al., 2017), reveló que de 159 muestras de agua recolectadas alrededor del mundo, incluyendo 3 muestras de agua embotellada tomadas de grifos que tienen sistemas de filtración en el 83% de ellas se encontraron partículas microscópicas de plástico (Catalina & Monroy, 2021); lo que quiere decir que incluso en muestras de agua potable, se presenta la existencia de este compuesto. Lo que se traduce, en que el plástico no solo interactúa de manera secundaria afectando la salud del ecosistema, sino también de manera directa por los millones de toneladas desechadas de plástico durante tantos años. El hecho de que los plásticos y micropásticos, se presenten de manera tan regular en nuestra vida, como el caso del “agua potable” implican riesgos a la salud desde alteraciones a la respuesta inmune hasta la reproducción sexual. En el año 2030, México contará con 137.5 millones de habitantes y se estima que cada año la población se vea incrementada con 1.1 millón de mexicanos (Ávila García et al., 2018). Por lo que es importante, generar medidas, que ayuden al buen tratamiento de aguas, lo que se traduce en que estas cumplan con los límites establecidos por las normas oficiales mexicanas, así como el aseguramiento, de que estas no cuenten con microplásticos o con una alta cantidad de estos.

2. Justificación

Unos de los procesos clave en el tratamiento de aguas, es la clarificación donde el objetivo es disminuir la cantidad de los sólidos suspendidos totales (SST) en el agua. Esta actividad se genera comúnmente con el uso de coagulantes químicos como son el sulfato de aluminio, sulfato ferroso y cloruro férrico. La función del coagulante es ayudar a la eliminación de las fuerzas de repulsión entre las partículas, lo que permite una aglomeración y una suspensión más rápida con ayuda de la gravedad (Horse, 2016). Sin embargo, actualmente se ha demostrado que el uso en cantidades altas de coagulantes químicos puede

producir daños a la salud como son Alzheimer, enfermedades neurodegenerativas, hasta Cáncer (Jaco et al., 2022). Adicionalmente, estos procesos de coagulación también pueden ser costosos y generar cantidades importantes de lodos que requieren tratamiento o disposición adicional (Jaco et al., 2022). En esta investigación se plantea el uso de coagulantes naturales, los cuales no tienen ningún efecto negativo en la salud de las personas, producen menores volúmenes de lodos, y los lodos que se generan son de origen biogénico. Adicionalmente, estos coagulantes vienen de desperdicios orgánicos por lo que no representan un costo extra de producción.

Actualmente el plástico representa el 85% de los residuos totales que llegan a los océanos (Quiñones, 2021). El problema con los plásticos no solo es su contaminación, sino también su fragmentación y producción de partículas menores a 5 mm, llamadas microplásticos (MP). El problema con los microplásticos está relacionado con sus efectos en los sistemas acuáticos que se encuentran en dichos hábitats. Estudios recientes han evidenciado la presencia de MP en organismos, desde pequeños moluscos hasta delfines. Al ser ingeridos, tienen un efecto en la nutrición y reproducción de los organismos (Acosta González et al., 2022). Más aún, en la actualidad se sabe que los humanos también se ven afectados por la presencia de microplásticos; se ha demostrado que anualmente en promedio se tiene una ingesta de 262 microplásticos por persona adulta (Parker, 2022)

Lo que se busca en el presente trabajo es analizar la efectividad de coagulantes naturales para la remoción de microplásticos en el tratamiento de agua, adicional a la reducción de SST.

3. Objetivos

3.1 Objetivo general

- Analizar el comportamiento que tienen los coagulantes naturales en el tratamiento de aguas para la remoción de microplásticos

3.2 Objetivos específicos

- Determinar los porcentajes de remoción del nopal, la cascara de tuna y la cascara de sandia como coagulantes para la disminución de la turbidez, color y los sólidos suspendidos totales (SST) en aguas sintéticas y en el Lago de Valsequillo.
- Estudiar la respuesta del mejor desperdicio orgánico probado anteriormente como coagulante a diferentes concentraciones y a parámetros iniciales distintos en agua sintética y Lago de Valsequillo.
- Determinar la eficiencia del mejor desperdicio orgánico como coagulante en el agua cruda de la UDLAP, agua sintética y Lago de Valsequillo a través de los parámetros de turbidez, color y SST a diferentes concentraciones.
- Determinar la concentración óptima del mejor desperdicio orgánico para la remoción de SST.
- Determinar el porcentaje de remoción de microplásticos a la concentración óptima del mejor desperdicio orgánico en agua cruda de la UDLAP, agua sintética y Lago de Valsequillo.

4. Marco teórico

4.1 El plástico

Se conoce con el nombre de plástico a las moléculas sintéticas que se forman al unir miles de pequeñas unidades moleculares conocidas como monómeros (Crawford & Martin, 2020).

Los monómeros son moléculas orgánicas que contienen un bajo peso molecular el cual unido a otros monómeros a través de enlaces químicos forman cadenas largas las cuales son conocidas como polímeros. Los polímeros son grandes moléculas formadas por unidades repetitivas, generalmente átomos de carbono que constituyen la base de la cadena polimérica. Aunque existen polímeros de forma natural en plantas y animales como proteínas, almidón o caucho natural también existen polímeros sintéticos que son creados por acción del hombre (Catalina & Monroy, 2021)

4.1.1 Contexto del plástico en el ambiente mundial

El plástico hoy en día es imposible que no se encuentre a nuestro alrededor. Todos los días, el plástico es la red de apoyo para la subsistencia del hombre, lo que ha generado que tan solo en los océanos existan alrededor de 50 trillones de fragmentos de plásticos lo que corresponde al 60 u 80% de la totalidad de basura marina (Catalina & Monroy, 2021).

La primera producción a escala de polímeros sintéticos (plásticos) tuvo lugar en 1940 (Catalina & Monroy, 2021) y desde entonces no ha existido una disminución en la producción, sino un aumento constante donde no se observa un alto. Se calcula que desde 1950 hasta 2015, la producción anual incrementó más de 200 veces y proyectan que se alcancen los 2.000 millones de toneladas para 2050 si la producción y el consumo continúan creciendo (Rojo Nieto & Montoto, 2017). Tan solo en el año de 2017 a 2018, de acuerdo a PlasticEurope, la producción de plástico a nivel mundial fue de 348 y 359 millones de toneladas (Caguana Chiriboga, 2020). Sin embargo, ¿Qué pasa con este plástico?, ¿De verdad se recicla/rehúsa?, ¿Cuál es su paradero? De todo lo que se produce de plástico, el 79% termina siendo acumulado en los vertederos y claro, en el medio ambiente. Del 21% restante, 12% se estima que se quema y tan solo el 9% del total se recicla (Caguana Chiriboga, 2020).

Sin embargo, esto no termina pues el 56% del plástico que se produce va dirigido hacia plásticos de un solo uso.

4.2 Microplásticos

Los microplásticos son pequeños fragmentos de desechos plásticos que se originan de la liberación directa de partículas de plástico y como consecuencia de la fragmentación de artículos más grandes (Catalina & Monroy, 2021). Se representan como partículas sólidas, insolubles en agua, de forma irregular, con origen industrial primario o secundario. Se consideran microplásticos a aquellos fragmentos o partículas con dimensiones menores a 5mm, los cuales presentan así mismo una degradación muy lenta (Caguana Chiriboga, 2020).

Los microplásticos se dividen en 2: los MP primarios y los MP secundarios. Los primarios son producidos intencionalmente y se utilizan principalmente en productos cosméticos y de limpieza que se desechan comúnmente a través de las aguas residuales (Welden & Lusher, 2020). A diferencia los MP secundarios no fueron creados intencionalmente, sino que provienen de la fragmentación por acción del medio ambiente o la descomposición durante el uso de plásticos de tamaño mayor.

4.2.1 Microplásticos Primarios

Los microplásticos primarios, son aquellos que son fabricados con la intención de que presenten un tamaño inferior a 5mm. La rama de origen donde más destacan es en la cosmética, pues entre los más conocidos están limpiadores corporales como los exfoliantes y pastas dentales. Estos productos están fabricados a base de micro perlas o micro exfoliantes, por lo cual ya pertenecen a la categoría de microplástico (2 a 5 mm).

4.2.2 Microplásticos Secundarios

Los microplásticos secundarios se generan a través de la fragmentación de plásticos más grandes, esto puede ocurrir como resultado de un daño directo al plástico. Este se relaciona con el deterioro del material mientras está siendo usado, así como por la exposición ambiental. Ejemplos de estos son el desgaste de neumáticos, formación de microfibras durante el lavado de la ropa o el uso de las redes de pesca (Welden & Cowie, 2017). Sin embargo, también existe la fragmentación posterior al uso, la cual se da por la mala gestión de los residuos plásticos y su exposición al viento, la acción de las olas, la arena o los rayos UV que debilitan el material plástico (Catalina & Monroy, 2021); lo cual produce que se generen materiales o piezas más pequeñas hasta convertirse en microplásticos, los cuales pueden terminar en el agua, en el fondo del mar y en los sedimentos.

4.2.3 Microplásticos en el ambiente mundial

Los microplásticos están presentes tanto en la tierra como en el agua; sin embargo, su presencia en el agua tiene un impacto mayor, pues no solo afecta la vida marina sino también la de los humanos. El ingreso de los microplásticos en las aguas se debe a la transportación de estos a través del viento, precipitaciones atmosféricas, escorrentía, drenajes, o por actividades humanas como la acuicultura, la pesca, el transporte marítimo y el turismo (Sbarbati Nudelman, 2020). Dentro de algunas aguas los microplásticos son acarreados por corrientes de aguas de distintas magnitudes a lagos, mares y océanos. De acuerdo con Castañeta et al., (2020) en la zona de Los Grandes Lagos de Estados Unidos el recuento de MP varía de 0-450,000 partículas de MP por km², un segundo ejemplo menos estudiado es el lago de Mongolia con 20.264 partículas por km².

Uno de los microplásticos predominantes a nivel global son las microfibras, ya sea de origen doméstico o industrial; pues durante el prelavado y confección de prendas nuevas, las

microfibras se desprenden y son liberadas a los drenajes urbano. Se estima que el 98% de las microfibras sintéticas en los ambientes marinos tiene origen terrestre (Sbarbati Nudelman, 2020). Se ha obtenido que durante los procesos de lavado se forman hasta 6,000,000 microfibras cuando se trata de telas de poliéster y 700,000 microfibras cuando se trata de tela acrílica (Napper, 2016).

El mal manejo de los residuos ha convertido a los microplásticos, en uno de los contaminantes más comunes del planeta, pues no solo se encuentra en el agua sino también en el aire que respiramos y en la cadena alimentaria. Su presencia en los ecosistemas acuáticos ocasiona daños físicos a una amplia variedad de organismos marinos como son los peces. Sus efectos recaen en obstrucciones intestinales y desgarramientos del tracto digestivo (Sbarbati Nudelman, 2020).

Existe una preocupación alta en cuanto a los MP, pues no solo tienen efectos en la salud y el ecosistema, sino que también son capaces de absorber diversos contaminantes debido a su hidrofobicidad. Algunos microplásticos han sido reportados por presentar adheridas toxinas reproductivas, cancerígenas y mutagénicas (Sbarbati Nudelman, 2020).

4.3 Composición física de los microplásticos

4.3.1 Tamaño

A continuación, se presentan los tamaños en los que se consideran microplásticos, y en qué medida dejan de serlo.

- Nanoplásticos: 1nm a 1000 nm
- Microplásticos: 5 mm a 1 μ m
- Mesoplásticos: 5mm a 25 mm

- Macroplásticos: 250 mm y más grandes

En la siguiente figura se presenta la escala de tamaños actualmente aceptada para los plásticos y sus productos de degradación física.

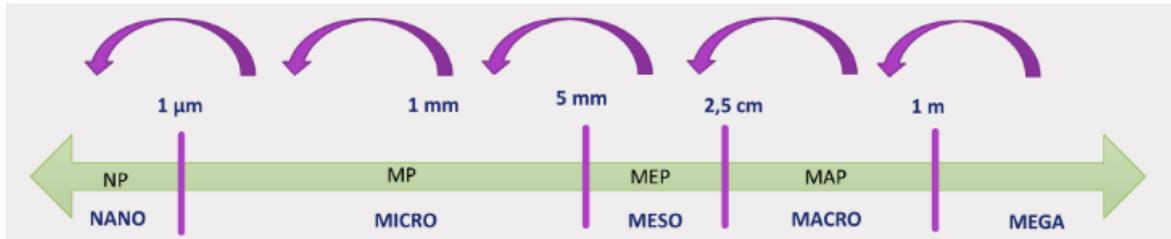


Figura 1. Escala de tamaños para los plásticos (Castañeta et al., 2020)

4.3.2 Forma y estructura

Los MP, se encuentran representados en diferentes formas en el medio ambiente, los más frecuentes son tales como esferas, espumas, fibras, fragmentos, filamento, gránulos, *pellets* y películas (Castañeta et al., 2020). Los MP de la categoría de "películas", la cual incluye objetos planos que son considerablemente más pequeños en un lado que en los otros dos, se derivan de envoltorios u bolsas de plástico más grandes (Catalina & Monroy, 2021). Los gránulos se encuentran comúnmente en muchos productos de limpieza y cosméticos o se producen por la descomposición de plásticos degradables más grandes y los *pellets* se utilizan como materia prima para la producción de plástico (Acosta González et al., 2022). La forma más abundante de partículas de plástico que se encuentran en las aguas residuales es la fibra debido a la descarga de las lavadoras domésticas por los polímeros sintéticos que contiene la ropa (Catalina & Monroy, 2021).

En la siguiente figura se muestran las formas de microplásticos más comunes en agua, sedimentos y peces en estudios realizados en México.

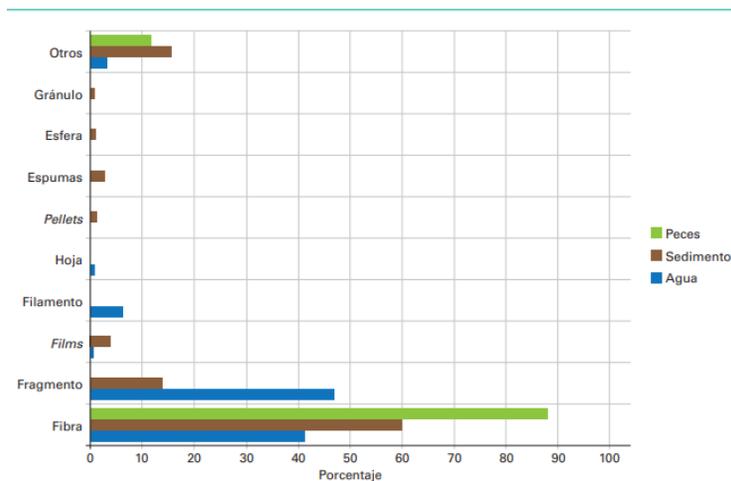


Figura 2. Formas de MP más comunes en agua, sedimentos y peces en estudios realizados en México (Acosta González et al., 2022)

4.4 Agua

4.4.1 Agua cruda

El agua cruda se basa en aquella agua residual que no ha recibido ningún tipo de tratamiento, y que no ha sido introducida en la red de distribución. El agua cruda o agua bruta contiene materia orgánica, materia inorgánica y microorganismos; dependiendo de donde se obtenga puede tener un sabor, olor, color y turbidez muy altos (Zarza, 2020).

4.4.2 Agua sintética

Un agua sintética es un agua que se prepara para que cumpla con ciertos valores específicos de algunas propiedades. Normalmente los parámetros que se proponen van a depender de los estudios que se busquen realizar en esta. Para esta investigación, los parámetros que interesan cumplir son: turbidez, sólidos suspendidos totales (SST) y microplásticos (MP).

4.4.3 Presa de Valsequillo

La presa de Valsequillo o “Manuel Ávila Camacho” posee una superficie de 237.9 Km² y se encuentra al sur de la ciudad capital en Puebla México. Ésta se ubica dentro de una cuenca

conformada al norte por los flujos de 3 ríos: el Atoyac, el Zahuapan y el Alseseca (Chávez López, 2014). Esta presa fue construida entre 1941-1946 para aprovechar los escurrimientos del río Atoyac para cubrir las necesidades de riego en la zona de Tecamachalco-Tehuacán (Pacheco, 2021). En la siguiente figura se muestra un mapa de la presa.

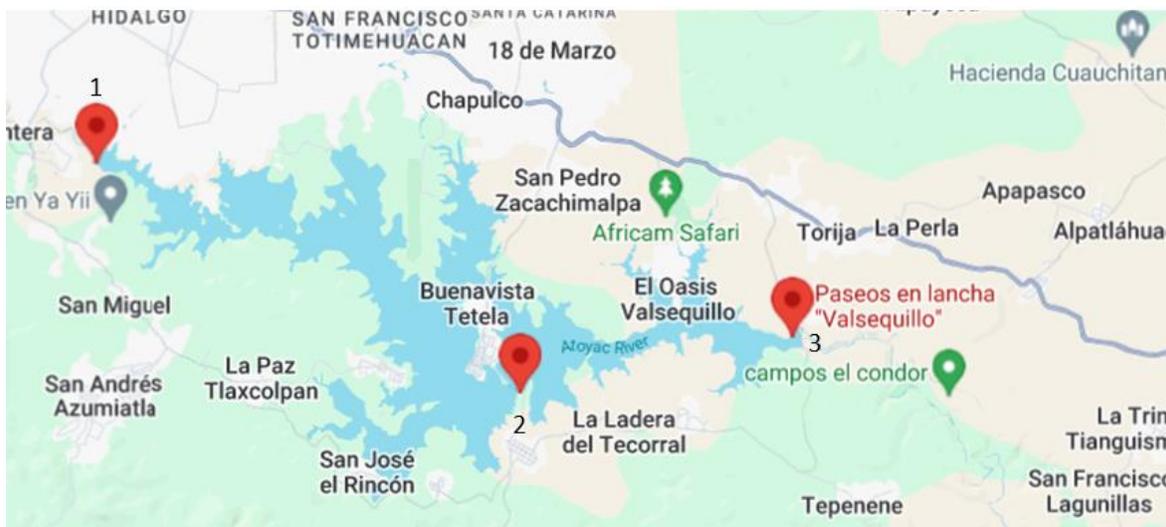


Figura 3. Mapa Presa de Valsequillo

Para este estudio se obtuvieron tres muestras de agua en los diferentes puntos marcados para generar las pruebas de coagulación. Las coordenadas de los puntos son las siguientes:

Punto 1 a $18^{\circ}56'53.3''N$ $98^{\circ}15'23.3''W$

Punto 2 a $18^{\circ}54'09.5''N$ $98^{\circ}10'03.2''W$

Punto 3 a $18^{\circ}54'49.6''N$ $98^{\circ}06'38.1''W$

4.5 Características física y químicas del agua

4.5.1 Turbiedad

La turbidez es una característica física importante del agua, pues en esta se puede basar la decisión del consumidor. La turbidez es una propiedad óptica de un líquido que causa que la

luz se disperse y se absorba en lugar de transmitirse en líneas rectas a través de la muestra (Kitchener et al., 2017). Esto se genera por las partículas suspendidas como pueden ser arcillas, tierra, etc. Lo que se traduce en que la turbidez cuanto menor es, más claro es el líquido. Existen problemas con la turbidez en el tratamiento biológico, pues las partículas causantes de la turbiedad reducen la eficiencia del proceso y protegen físicamente a los microorganismos que tienen contacto directo con el desinfectante que se esté tratando la muestra (Ada & Martel, 2004)

4.5.2 Sólidos Suspendidos Totales (SST)

Corresponden a los sólidos presentes en un agua residual. Se considera que los sólidos en suspensión son los que tienen partículas superiores a un micrómetro (Ada & Martel, 2004) . Los SST proporcionan información basada en el tamaño, la distribución y el tipo de partículas presentes en una solución (Hudson, 2010).

Estos parámetros permiten hacer un reconocimiento en cuanto a gradientes que inician desde condiciones relativamente naturales o sin influencia de la actividad humana, hasta agua que muestra indicios o aportaciones importantes de descargas de aguas residuales municipales y no municipales. En la siguiente figura se muestran las escalas de la SEMARNAT para la clasificación de la calidad del agua (SEMARNAT, 2020).

Criterio (mg/L)	Clasificación	Color
SST ≤ 25	EXCELENTE CLASE DE EXCEPCIÓN, MUY BUENA CALIDAD	AZUL
25 < SST ≤ 75	BUENA CALIDAD AGUAS SUPERFICIALES CON BAJO CONTENIDO DE SÓLIDOS SUSPENDIDOS, GENERALMENTE CONDICIONES NATURALES. FAVORECE LA CONSERVACIÓN DE COMUNIDADES ACUÁTICAS Y EL RIEGO AGRÍCOLA IRRESTRICTO	VERDE
75 < SST ≤ 150	ACEPTABLE AGUAS SUPERFICIALES CON INDICIO DE CONTAMINACIÓN. CON DESCARGAS DE AGUAS RESIDUALES TRATADAS BIOLÓGICAMENTE. CONDICIÓN REGULAR PARA PECES. RIEGO AGRÍCOLA RESTRINGIDO	AMARILLO
150 < SST ≤ 400	CONTAMINADA AGUAS SUPERFICIALES DE MALA CALIDAD CON DESCARGAS DE AGUAS RESIDUALES CRUDAS. AGUAS CON ALTO CONTENIDO DE MATERIAL SUSPENDIDO	NARANJA
SST > 400	FUERTEMENTE CONTAMINADA AGUAS SUPERFICIALES CON FUERTE IMPACTO DE DESCARGAS DE AGUAS RESIDUALES CRUDAS MUNICIPALES Y NO MUNICIPALES CON ALTA CARGA CONTAMINANTE. MALA CONDICIÓN PARA PECES	ROJO

Figura 4. Escalas de clasificación de la calidad del agua para SST (SEMARNAT, 2020)

4.5.3 Color

El color del agua se debe por lo general a la presencia de materias orgánicas coloreadas (sobre todo ácidos húmicos y fúlvicos) (OMS, 1995, p. 129). El color puede ser consecuencia de la contaminación por efluentes industriales así mismo por la presencia de hierro y otros metales ya sea por origen natural o por la corrosión.

Los colores superiores a 15 UCV (unidades de color verdadero) pueden ser detectados en un vaso de agua por la mayor parte de la gente. Los inferiores a 15 UCV son por lo general aceptables para los consumidores, pero esto puede variar según las circunstancias locales (OMS, 1995, p. 129).

4.5.4 Temperatura

La temperatura es un parámetro físico muy importante, pues este tiene la capacidad de influir en el retardo o aceleración de la actividad biológica, la absorción de oxígeno, la precipitación de compuestos, la formación de depósitos, la desinfección y los procesos de mezcla como

son: floculación, sedimentación y filtración (Ada & Martel, 2004). Básicamente, es capaz de acelerar o reducir nuestro proceso, por lo que su efecto y manejo es importante.

4.5.5 pH

El pH se define en términos de la actividad relativa de los iones de hidrógeno en la disolución (NMX, 2016). El pH influye en algunos fenómenos que ocurren en el agua, como la corrosión (Ada & Martel, 2004). El pH del agua mide su acidez o alcalinidad en una escala de 0 a 14. Un pH de 7 es neutro, mientras que un pH menor a 7 es ácido, y un pH mayor a 7 es básico.

Según lo reportado en la norma NMX-AA-008-SCFI-2016 La medición del valor de pH está basada en la diferencia de potencial de una celda electroquímica empleando un pHmetro adecuado. El valor de pH de una medición depende de la temperatura debido al equilibrio de disociación. Por lo tanto, la temperatura de la muestra siempre debe ser reportada en conjunto con el pH de la muestra. Más aún, el pH del agua puede afectar la solubilidad y toxicidad de los compuestos químicos en el agua, así como la salud de la vida acuática (Ada & Martel, 2004).

El rango de pH adecuado según la NOM-001-SEMARNAT-2021, que establece los límites permisibles de contaminantes en las descargas a cuerpos de agua receptores, es de 6 a 9.

4.6 Coagulación-Floculación

El procesamiento del agua cruda contempla un tratamiento fisicoquímico, conocido como coagulación y floculación. La coagulación consiste en agregar al agua un producto con el objetivo de neutralizar las cargas, al eliminar o desestabilizar las cargas, es decir que se elimine la fuerza de repulsión entre ellas, lo que permite una aglomeración y facilitara el

precipitado. Al producto capaz de generar esta acción se le conoce como coagulante (OMS, 1995, p. 129). El coagulante facilita la aglomeración de las partículas durante el lento proceso de mezcla que tiene lugar en la fase de floculación. La floculación es la capacidad de los polímeros conexiones entre las partículas de mayor masa, con la finalidad de optimizar el proceso de coagulación (Barros Barros, 2020). Las masas flocosas resultantes absorben las partículas y las retienen, reduciendo considerablemente la turbiedad y el número de protozoarios, bacterias y virus. La finalidad de la sedimentación es permitir que las masas flocosas se depositen, reduciendo así los sólidos en suspensión que deben eliminarse (OMS, 1995, p. 129).

La coagulación-floculación es un paso fundamental en el proceso de tratamiento del agua, no solamente porque remueve las partículas responsables de la turbiedad producida por las partículas suspendidas y por el material coloidal, sino porque también remueve los microorganismos que, a menudo, se adhieren a las partículas (Guzmán et al., 2013).

Existe evidencia que relaciona a los coagulantes, a base de aluminio, con el desarrollo de la enfermedad de Alzheimer en los seres humanos, debido a la presencia de aluminio residual en el agua tratada (Guzmán et al., 2013)

4.6.1 Coagulantes metálicos

Los coagulantes que contienen sales metálicas como aluminio o hierro tienen la capacidad de aumentar la floculación en las partículas en suspensión. Dentro de los coagulantes metálicos más utilizados están el sulfato de aluminio, el sulfato ferroso, sulfato férrico y el cloruro férrico (Horse, 2016).

4.6.2 Polielectrólitos

Se encuentran como polímeros orgánicos sintéticos de gran tamaño molecular, con carga eléctrica neta. Se clasifican según su carga:

- Catiónicos (carga positiva): al entrar en contacto con el agua forman aniones, que permiten remover las partículas de carga negativa
- Aniónicos (carga negativa): al entrar en contacto con el agua forman cationes, que permiten remover las partículas de carga positiva
- No iónicos (neutros): al entrar en contacto forman iones positivos y negativos, pero se necesitan dosis mayores para tener buenos resultados (Guzmán et al., 2013).

4.6.3 Coagulantes Naturales

Estos, como su nombre lo indica, tienen una composición basada en polímero de origen natural extraídos de plantas, frutas, verduras, etc. Dentro de los coagulantes naturales más conocidos se encuentran las semillas de moringa oleífera, cactus y taninos. Por lo general, presentan una mínima o nula toxicidad y, en muchos casos, son productos alimenticios con alto contenido de carbohidratos y de proteínas solubles en agua (Guzmán et al., 2013)

4.6.3.1 Cactus (*Opuntia*)

El género *Opuntia* (familia Cactaceae), se caracteriza por la producción de un hidrocoloide, conocido como mucílago, el cual, forma redes moleculares que pueden retener grandes cantidades de agua (Guzmán et al., 2013). El mucílago es un polisacárido de alto peso molecular que se comporta como un polielectrolito (Medina-Torres, 2000). Los polielectrolitos presentan la característica de que simultáneamente pueden tener ambos signos de carga, positivo y negativo (Lumitos, 2024), por lo cual su funcionamiento como coagulante es efectivo, pues el objetivo es neutralizar las cargas.

4.6.3.2 Tuna (*Opuntia ficus-indica*)

La estructura del mucílago del género *Opuntia* contiene proporciones variables de L-arabinosa, D-galactosa, L-ramnosa y D-xilosa, y el ácido galacturónico, siendo este último su componente principal (Guzmán et al., 2013). López (2018) afirma que al añadir de manera independiente el ácido galacturónico a muestras de agua se generó una reducción de la turbidez en un porcentaje mayor al 50%; por lo que pueden existir algunos otros componentes que se encuentren en el mucílago y que ayuden al proceso de coagulación. Ahora bien, de acuerdo con López (2018), el alto contenido de carbohidratos puede favorecer la coagulación. Así mismo, Tarrillo Potenciano & Tenorio Bernilla (2019), mencionan que los resultados con respecto a la alta cantidad de antraquinonas y carbohidratos que contiene, es de gran ayuda en el proceso de coagulación y desinfección del agua. En la figura 5 se muestra las propiedades del polvo de tuna.

Parámetro	Valor
pH	6.19
Estado físico	sólido
Color	blanco marfil
Nitrógeno X 6.35 (%)	7.39
Carbohidratos	58.77
Densidad (g/mL)	0.626

Figura 5. Propiedad del polvo de cactus *Opuntia ficus-indica* (López Pérez, 2018)

4.6.3.3 Sandía (*Citrullus lanatus*)

La corteza de sandía posee una cantidad significativa de humedad, cenizas, grasas, proteínas y carbohidratos 10,61%; 13,09%; 2,44%; 11,17% y 56,00%, respectivamente. Actualmente la enorme cantidad del residuo de la corteza de esta fruta se dedica a la

alimentación de animales o es eliminada a través de vertederos e incineración (García & Zegarra, 2021).

Al presente, no se ha encontrado información relacionada con el funcionamiento de la cascara de Sandía como coagulante en el tratamiento de aguas. Sin embargo, se puede relacionar el funcionamiento de la sandía como coagulante, de acuerdo con que tanto el nopal como la tuna y la sandía, cuenta con pectinas las cuales ayudan a unir las partículas suspendidas y formar los flóculos.

4.8 Beneficios

4.8.1 Objetivos del desarrollo sostenible

Todo tipo de investigación de índole ambiental ya sea de un ámbito científico o un ámbito social, tienen un aporte global para alcanzar los «objetivos de desarrollo sostenible 2030» (ver figura 6), si es que así se desea. En esta investigación se busca alcanzar algunos de los objetivos del desarrollo sostenible.

Salud y bienestar. Es el primer objetivo dentro de la investigación, la cual ya hemos cumplido. Como ya se ha mencionado dentro del trabajo, el hecho de hacer uso de coagulantes químicos tiene como consecuencia, daños mentales hacia la salud; de la misma manera, la no eliminación de los microplásticos, tienen efectos negativos en la salud humana; estos pueden llegar a ser consumidos por el hombre y, este puede consumirlos sin ser consciente de los daños.

Agua limpia y saneamiento. El coagulante, no solo tiene beneficios en el «atrapado» de microplásticos para su reducción, sino que también ayuda a la sedimentación de sólidos suspendidos en el agua.

Normalmente el coagulante es utilizado en el clarificador de una planta de tratamiento de aguas, esto para acelerar procesos de sedimentación, ahorrando un tiempo significativo en la limpieza del agua. Gracias a esto, también se ha podido cumplir con el objetivo de: Ciudades y comunidades sostenibles. El trabajo con nuevas técnicas para el tratamiento de aguas ayudaría en el crecimiento de plantas de tratamiento de agua, en las comunidades. Actualmente los mares tienen mucha basura donde los residuos que más abundan son los plásticos. Se cree que solo los plásticos de proporciones grandes son los que dañan a un ecosistema y al ambiente, pero también los microplásticos tienen un gran impacto en los ecosistemas y en el ambiente.

La disminución de los MP en cuerpos acuáticos no solo ayudaría en el cuidado de la salud de los seres vivos, sino que también en el cuidado de la vida submarina, como de los ecosistemas terrestres, lo cual ayudará a cumplir con otro de los objetivos de Desarrollo Sostenible; ya que, finalmente no se conoce cuánta de nuestra tierra está mezclada con partículas de microplásticos y, cuánto efecto tiene los microplásticos en el crecimiento de la flora.



Figura 6. Objetivos de desarrollo sostenible

5. Metodología

5.1 Obtención del coagulante

Para la obtención del coagulante, se llevó a cabo el lavado de la fruta/verdura y, el pelado de la cáscara, para luego cortarla en pequeños pedazos. Se procedió después a pesar la cantidad de fruta/verdura que se procesó. Posteriormente el material se introdujo a un horno (marca: Felisa, modelo: FE-291AD) y se dejó durante 24 horas a una temperatura de 60°C. Una vez seco, el material se volvió a pesar para tener registro del peso final. Para convertirlo en polvo, se utilizó un molidor (como lo puede ser un molcajete) hasta que se obtuvo la textura deseada. Posteriormente, se usó un pulverizador para pulverizar la tuna. Finalmente, para asegurar que no quedaran grumos, se pasó por un tamiz; este proceso garantizó la obtención de un polvo fino y uniforme. Este proceso se repitió de forma similar para los distintos residuos de biomasa a evaluar.



Figura 7. Proceso de obtención del coagulante

5.2 Agua cruda UDLAP

No existió una metodología para la prelación del agua cruda. Lo que se realizó, fue solicitar 5 L de agua cruda a la planta de tratamiento de aguas residuales (PTAR) de la Universidad de las Américas Puebla (UDLAP).

5.3 Agua sintética

Para el agua sintética se siguió el método desarrollado por el Mtro. Guillermo Díaz Martínez en el laboratorio de Ing. Ambiental de la UDLAP. Se preparó una solución con arcilla de bentonita para la solución madre (SM) de agua sintética. Para aportar la materia orgánica se preparó una solución madre de ácidos húmicos (SMAH) con Leonardita en polvo (Grupo TCDN, S.A de C.V).

Para preparar 1 L de SM se necesitaron 10 g de arcilla de Bentonita (Materias primas de Xiloxotla, S.A de C.V), se agitó durante 1 h a 200 rpm, pasado ese tiempo se dejó reposar durante 1 h. Finalmente se recuperó el sobrenadante y se desechó todo lo que se precipitó.

Para preparar 1 L de agua se SMAH, se necesitó 1 g de Leonardita, igual que en la SM, este se agitó durante 1 h a 200 rpm, después de este tiempo, se dejó reposar 1 h y finalmente se recuperó el sobrenadante y se desechó el precipitado.

Se prepararon 4.5 L de agua sintética es decir la combinación entre la SM y la SMAH, no existió como tal una medida exacta de cuanta SM y cuanta SMAH se le agregó; sin embargo, lo que se buscó fue que la solución presentara una turbidez de 90 FAU, lo cual fue alcanzado.

Para la obtención de los microplásticos se solicitó a los operadores de la PTAR de la UDLAP 4.5 L de agua cruda. Se utilizaron tres tamices uno por arriba de 2.3 mm, otro a 500 μm y el último a 45 μm . Los tamices se colocaron uno sobre el otro y se procedió a vaciar

los 4.5 L por encima de estos. Finalmente, se tomó toda la materia que quedó en los tamices de 500 y 45 μm (en el tamiz de 2.3 mm, no quedó nada) y se procedió a añadirsele a nuestra agua sintética.

5.4 Agua de Valsequillo

De acuerdo con el apartado 4.4.3, se obtuvieron tres muestras diferentes de la presa de Valsequillo (LV). Cada una de las muestras era diferente, pues algunas se encontraban más contaminadas que las otras. En la siguiente figura, se puede observar cada de ellas.

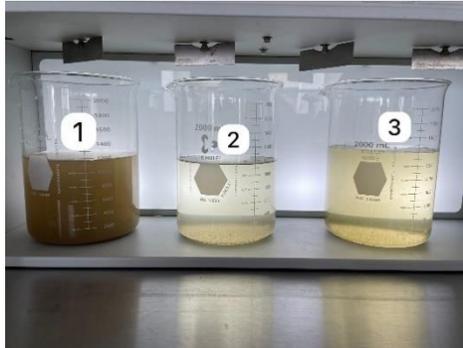


Figura 8. Muestras obtenidas de la presa de Valsequillo

Como se puede observar en la figura 8, la muestra 1 era la que se encontraba más contaminada, de ahí le seguía la dos y por último la tres. Igual que en las otras aguas el objetivo fue preparar alrededor de 4.5 L de agua, por lo que se utilizaron 1.350 L de la muestra 1, 1.350 L de la muestra 2 y 1.8 L de la muestra 3.

5.5 Pruebas de coagulación

Se midieron las siguientes propiedades fisicoquímicas al inicio y al final de las pruebas de coagulación para determinar la eficiencia de remoción:

- PH
- T

- Turbidez
- SST
- Color

5.6 Preparación del coagulante

Para iniciar la preparación se pesaron 0.3 g del coagulante, que, en este caso, es la tuna en polvo. Luego, se procedió a medir 300 mL de agua a tratar. Posteriormente se añadió el coagulante al agua y se mezclaron utilizando la prueba de jarra, manteniendo una velocidad de 200 rpm durante 3 min para garantizar una mezcla homogénea.

Es importante tener en cuenta que este proceso, desde la mezcla hasta la fase final de vaciado de la fase inorgánica, debe repetirse tres veces para cada tipo de agua que se esté trabajando. Este proceso asegura la consistencia y precisión del resultado final en el proceso de tratamiento de agua.

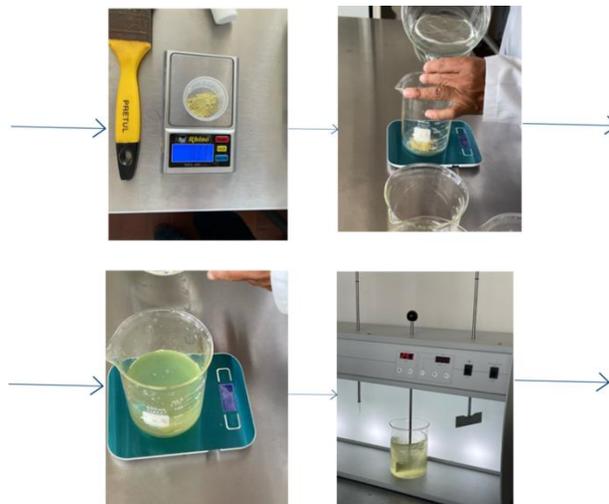


Figura 9. Proceso de preparación para la concentración del coagulante

5.7 Prueba de jarras

Para comenzar, vertieron 300 mL del agua específica en un vaso de precipitado, agua con la que ya se estuvo trabajando en cuatro vasos de precipitado. A continuación, se colocaron los

vasos en la prueba de jarras. Posteriormente, se encendió el equipo y se ajustó la velocidad a 200 rpm, este proceso se debe hacer durante 1 min para poder iniciar la agitación de las mezclas.

Una vez que el equipo ha alcanzó la velocidad adecuada, se procedió a añadir, los mililitros de coagulante requeridos a cada uno de los cuatro vasos, según lo indicado en la hoja de herramienta. Es de suma importancia, agregar los mililitros de coagulante requeridos mientras el equipo está a 200 rpm, esto para asegurar una dispersión uniforme del mismo.

Después de pasado el primer minuto de agitación a 200 rpm, se ajustó la velocidad a 30 rpm y se mantuvo esta velocidad durante 15 min para permitir que ocurriera el correcto proceso de floculación.

Pasados ya los 15 min de agitación a 30 rpm, se detuvo y se dejó reposar las mezclas durante 30 min. Este periodo de reposo es crucial para que las partículas que han sido floculadas se sedimenten de una forma adecuada en el fondo de los vasos de precipitado del equipo de prueba de jarras.



Figura 10. Prueba de jarras para agua sintética, agua cruda UDLAP y Lago de Valsequillo

Como se mencionó anteriormente, una vez pasado el tiempo de reposo se volvieron a medir todas las propiedades fisicoquímicas con el fin de determinar las características del

agua final, así como las de los flóculos formados, y poder identificar en que vaso de precipitados se obtuvieron los mejores resultados.

Se debe tener mucha precaución en esta parte del proceso, pues se pueden llegar a mover los flóculos (lo que se queda sedimentado en los vasos). Se debe procurar el poco movimiento del vaso, porque se tienen evitar daños en los resultados de la floculación.



Figura 11. Medición con colorímetro para turbidez, color y SST

5.8 Análisis de microplásticos

Una vez que se han escogido los vasos con los mejores resultados, se procede a hacer el análisis del agua y de sus lodos.

Después de la fase de sedimentación, se procedió a transferir 200 mL del agua tratada del vaso de precipitado de 300 mL, a otro vaso de precipitado, esto siendo con el sumo cuidado para evitar la distribución de los sedimentos.

Para la determinación de los microplásticos estos se separaron en dos fracciones, de 5 mm a 0.5 mm y de 0.5 (500 μm) a 0.045 mm (45 μm) por medio de tamices previamente limpiados. La limpieza de los tamices, se hacía solo con agua, normalmente al abrir la llave

el agua salía a cierta presión la cual permitía, que cualquier partícula que quedara en el tamiz fuera eliminada.

Para llevar a cabo la separación el tamiz de 45 μm se posicionó de manera estratégica, utilizando un lado pequeño del tamiz para así pasar los 200 mL de agua tratada, con el objetivo de concentrar la muestra y evitar la dispersión que podría generar que incremente el margen de error. El vertido del agua se realizó de forma gradual y lenta, debido a que los espacios del tamiz hacen que se presente una dificultad al no dar paso rápido del líquido.

Una vez que se filtró toda la muestra de agua, se requirió otro vaso de precipitado de agua destilada. El tamiz se inclinó 75° hacia la derecha para permitir el lavado de los microplásticos hacia un vaso de precipitados recolector mediante la adición de agua destilada para asegurar que se desprendieran completamente los MP. Es recomendable aplicar agua destilada desde el lado opuesto (donde no se filtraron los microplásticos) del tamiz, para garantizar que todos los microplásticos se desprendan y se recojan adecuadamente en el vaso de precipitado.

Este mismo proceso se repite con los lodos o floculantes, los cuales son los otros 100 mL.

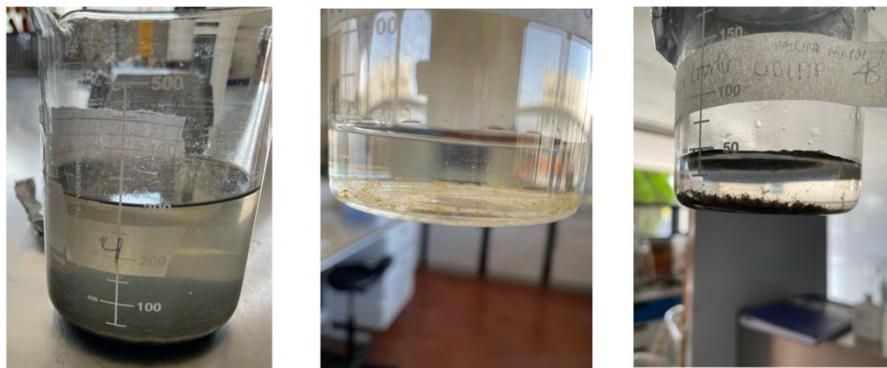


Figura 12. Sedimentación de las muestras en agua cruda UDLAP, Presa de Valsequillo y agua sintética.



Figura 13. Tamices de 45 μm , 500 μm y 2.3 mm-s

Para obtener los microplásticos se siguió el método por Lee et al., (2023) del artículo *Pretreatment methods for monitoring microplastics in soil and freshwater sediment samples: A comprehensive review*; página 6, tabla 3 número 8. Al método se le realizaron algunas modificaciones, las cuales fueron guiadas por Andrea Arredondo Navarro, estudiante de doctorado de la UDLAP.

5.9 Remoción de fase orgánica

Una vez que se tamizaron los microplásticos y se recolectaron la muestra en el vaso correspondiente se procedió a añadir peróxido de hidrógeno al vaso hasta cubrir la mezcla por completo. Posteriormente, los vasos de precipitado que contienen la mezcla con peróxido de hidrógeno al 30% se colocaron cuidadosamente en un baño María precalentado. Es importante asegurarse de que los vasos estén debidamente posicionados para poder garantizar una distribución uniforme del calor. Una vez en el baño María, las muestras se dejaron reposar durante dos días en el caso del agua tratada, y de 5 a 7 d para los lodos o flóculos. El tiempo que se dejaron en reposo el agua tratada o los flóculos permitió que se llevara a cabo de una manera efectiva y concisa, el proceso de descomposición y eliminación de la materia orgánica.

Es crucial recordar que, diariamente se debe mover la bandeja que contiene los vasos en el baño María durante al menos 5 min. Este movimiento asegura (como ya lo he mencionado), una distribución uniforme del calor y, del peróxido de hidrógeno en la muestra.

5.10 Vacío fase orgánica

Posterior al proceso de descomposición de la fase orgánica, se procedió a un filtrado a vacío de la mezcla resultante utilizando un filtro de celulosa en un embudo Buchner conectado a un matraz kitazato. Para garantizar un filtrado efectivo, se tiene que colocar el filtro de celulosa cerciorándose de que este esté completamente adherido a la parte interior del embudo. Si el filtro es más grande que el diámetro del embudo se tiene que recortar hasta alcanzar el tamaño correcto. Al vaciar la mezcla de la fase orgánica en el embudo, se debe tener cuidado de no perturbar demasiado lo sedimentado en el vaso, pero, al mismo tiempo, se debe vaciar casi por completo la mezcla, dejando aproximadamente un 7% de la cantidad original en el vaso, así asegurando que toda la materia sedimentada permanezca en el vaso.

Una vez que se ha completó el vaciado, se apagó la bomba; se retiró de forma cuidadosa el filtro del embudo, utilizando pinzas para levantarlo desde una esquina y se colocó rápidamente en una caja petri. Es fundamental asegurarse de que todo lo que cayó sobre el filtro durante el proceso de filtrado quede hacia arriba, tal cual estaba colocado en el embudo. Posteriormente se etiquetó la caja petri con los datos de la muestra, para poder analizarla después.

5.11 Remoción de fase inorgánica

Para remover la materia inorgánica de la mezcla de microplásticos, se tomó lo que quedó en el vaso después de realizado todo el proceso de filtrado al vacío. En esta etapa, se tiene que añadir óxido de zinc en cierta concentración acuosa hasta cubrir completamente la muestra o alcanzar una cobertura adecuada. Posteriormente la muestra se dejó reposar en baño María a temperatura constante durante 24 h.

Este tiempo de reposo y tratamiento térmico es esencial para permitir que el óxido de zinc interactúe con la muestra, facilitando así la separación por diferencia de densidades de los microplásticos y componentes orgánicos aún presentes en la muestra. Una vez completado este periodo, la muestra estará lista para filtrarse y continuar con el análisis y la identificación de microplásticos presentes.

5.12 Preparación óxido de zinc en polvo

Para preparar el óxido de zinc en polvo, se calculó la cantidad adecuada de polvo de óxido de zinc requerida para la cantidad de agua deseada. La proporción es de 1.8 g de óxido de zinc por cada mililitro de agua. Una vez preparada la solución de óxido de zinc, se utiliza como se mencionó en la fase inorgánica del proceso. La solución restante se guarda en un lugar oscuro y cerrado, donde no entre la luz para preservar su integridad y evitar cualquier alteración.

5.13 Vacío para remoción de componentes inorgánicos

En la fase inorgánica del vaciado, se repiten todos los pasos del proceso de vacío, tal como se realizaron en la remoción de la fase orgánica. Sin embargo, en esta etapa, se vacía

completamente el contenido del vaso, donde se procuró toda la parte suspendida que estos vasos contenían.



Figura 14. Proceso fase orgánica e inorgánica para obtener filtros con MP

5.14 Conteo de microplásticos

Para el conteo de microplásticos se siguió el método usado por Nora Exposito, et. al del artículo *Niveles, tamaño, morfología y composición de microplásticos en aguas marinas, sedimentos y arenas de playas. Estudio de caso de la costa de Tarragona (Mediterráneo occidental)*, apartado de “Quality control.” Al método se le realizaron algunas modificaciones, las cuales fueron guiadas por la estudiante del Doctorado de Ciencias del Agua de la UDLAP, Andrea Arredondo Navarro.

En breve, cada filtro de papel cuenta con 100 círculos; sin embargo, para el conteo, se siguió el método de solo contar una línea o una cruz del filtro. Para nuestro estudio, se contaron 12 círculos de manera lineal, pues nuestro filtro media 70 mm, lo cual era un tamaño

grande comparado al que se utiliza cuando se divide en forma de cruz. El hecho de que se cuente solo un porcentaje de los círculos gira en torno a que el conteo es muy tardado y conlleva mucho tiempo, por lo que de acuerdo con el resultado de los 12 círculos se hace un promedio del total de microplásticos por círculo. En la siguiente figura, se puede observar cómo se dividió el filtro.

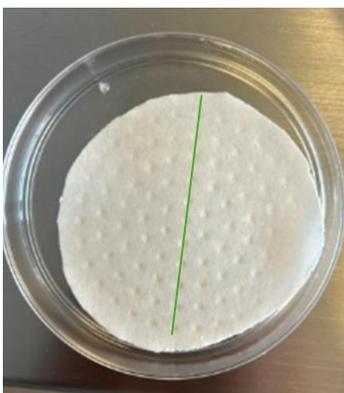


Figura 15. División de filtro para conteo de MP

Como se puede observar se llevó el conteo de extremo a extremo esto, para también tomar en cuenta la variabilidad de MP que puede existir de un círculo en el centro a un círculo en el extremo. Cada filtro toma alrededor de 2 h dependiendo de que tanto este contaminado el filtro.

Ya que la generación de MP es muy variada, es necesario realizar una correcta clasificación y conteo. Para esto se utilizó la bitácora de datos realizada por Andrea Arredondo (ver figura 16). Esta clasificación se realizó de forma directa (visual), con un microscopio óptico para determinar el número, tamaño, color y forma de los MPs en los 12 círculos marcados. Para poder analizar el tamaño de algunos microplásticos se utilizó el software *infinity capture*.

Codigo:		Conteo	TOTAL	TAMAÑOS			
Filamento	Transparente						
	Azul						
	Morado						
	Negro						
	Rojo						
	Amarillo						
	Naranja						
	Verde						
	Café						
	Brillante						
	Otro						
	TOTAL						
	Fragmento	Transparente					
Azul							
Morado							
Negro							
Rojo							
Amarillo							
Naranja							
Verde							
Café							
Brillante							
Otro							
TOTAL							
Esfera		Azul					
	Amarillo						
	Transparente						
	Otro						
	TOTAL						
		TOTAL F					

Figura 16. Bitácora para conteo de MP

6. Resultados y discusión

6.1 Selección de coagulante

Se realizaron pruebas de coagulación para determinar qué tipo de coagulante natural era la mejor opción para trabajar en la remoción de los microplásticos. Se trabajó con tres coagulantes diferentes, el primero siendo el nopal, el segundo la cascara de tuna y el tercero la cascara de sandia. En la figura 17, se muestran los coagulantes después de haber pasado por el secado y antes de introducirse al pulverizador.

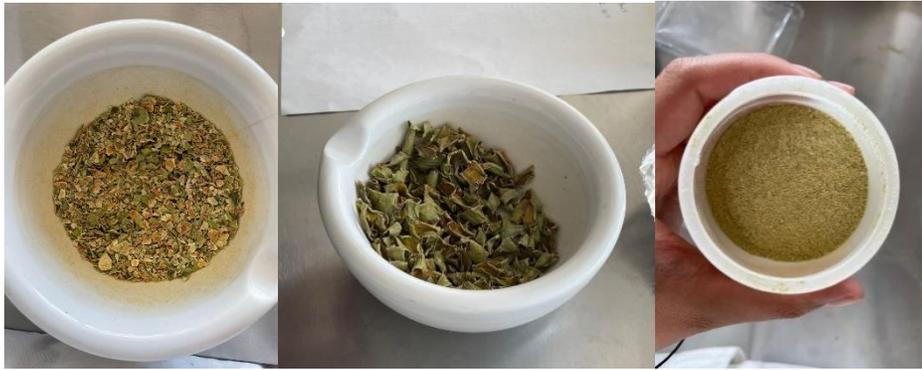


Figura 17. Tuna, Nopal y Sandía, después de salir del secador

Para el caso del nopal, el único paso adicional que se realizó para la obtención del coagulante fue en el que se removió la parte verde, pues el mucilago (es decir, la parte “babosa” del nopal), es el fragmento que nos interesa trabajar de acuerdo con el marco teórico.

El nopal y la tuna no requirieron más 24 h en el secador para estar completamente secos. Sin embargo, en el caso de la sandía no fueron suficientes las 24 h, por lo que se dejaron otras 24 h. Una vez pasado el tiempo, la sandía ya se encontraba seca y lista para poder trabajar con ella. En la tabla 1 se muestran los pesos antes y después de entrar al secador.

Tabla 1. % de remoción de agua después de salir del secador

Coagulante	Peso antes del secador (g)	Peso después del secador (g)	Agua extraída (g)	% de remoción de agua
Nopal	85	-	-	-
Tuna	133	23.9	109.1	82%
Sandía	410	23	387	94%

El hecho de que la extracción del agua para la sandía haya tomado más tiempo, fue una de las razones por las que no se tomó en cuenta para ser usada como coagulante en las pruebas de remoción de MP. Esto debido a que los procesos de las fases orgánica e inorgánica

toman un tiempo determinado (como se mencionó en el apartado de metodología), y esperar un día más para la obtención del coagulante no se consideró como una buena opción.

Se realizaron distintas pruebas para analizar los trabajos del nopal, tuna y sandía como coagulantes. En la tabla 2 se pueden observar los resultados obtenidos con el nopal.

Tabla 2. Nopal 0.1 % Presa de Valsequillo prueba de coagulante

PRUEBA COAGULACIÓN FLOCULACIÓN						
Presa de Valsequillo						
Nopal 0.1%						
Volumen	mL	300	300	300	300	300
Coagulante	ppm	0	30	50	80	100
Coagulante	mL	0	9	15	24	30
Turbidez	FAU	260	15	13	22	28
Color	Pt Co	1936	146	156	191	224
SST	mg/L	294	25	25	34	43
pH		7.7	7.5	7.8	8	7.9
Temperatura	°C	20.2	20.3	20.4	20.6	20.8

La prueba se realizó en una mezcla compuesta de la presa de Valsequillo y con una solución al 0.1% de coagulante (a esta concentración se realizaron diferentes pruebas). De acuerdo con los valores iniciales de la muestra, la turbidez estaba en 260 FAU, el color en 1936 Pt Co y los sólidos suspendidos totales (SST) en 294 mg por cada litro de muestra. Acorde a los resultados en la Tabla 2, la turbidez alcanza mejores resultados a 50 ppm; sin embargo, el color y los SST a 30 ppm.

De acuerdo con la tabla 2, a 30 ppm es cuando mejores resultados se obtienen en cuanto a remoción de SST, Color, y Turbidez.

Los resultados obtenidos se compararon con los de Vaca et al., (2014) cuyo objetivo fue evaluar la eficiencia del nopal como coagulante natural para remover la turbidez presente

en un agua con 367 FAU. Finalmente obtuvo una remoción del 68.9% en 10 mg/L, el máximo porcentaje que alcanzó fue a 70 mg/L con 91.6% de remoción. En el presente estudio a 10 mg/L (como se observa en la tabla 2), se alcanzó un porcentaje de hasta 94.2%. Este resultado se debe a que el valor de la turbidez fue menor, por lo que no necesito de más coagulante. De acuerdo con los resultados obtenidos por Vaca et al., (2014), este necesito de más coagulante (70 mg/L) para una mayor remoción, pues su valor de turbidez fue más alto.

Se realizó la misma prueba en la mezcla compuesta de la presa del Valsequillo, donde en vez de trabajar con nopal, se realizó con tuna (igualmente al 0.1% de concentración). Los resultados se pueden observar en la tabla 3.

Tabla 3. Tuna 0.1% Presa de Valsequillo prueba de coagulante

		COAGULACIÓN FLOCULACIÓN			
		Presa de Valsequillo			
		Tuna 0.1%			
Volumen	mL	300	300	300	300
Coagulante	ppm	0	20	40	60
Coagulante	mL	0	6	12	18
Turbidez	FAU	284	45	41	20
Color	Pt Co	2376	355	346	200
SST	mg/L	337	38	34	25
pH		7.1	7.78	7.9	8.24

Se puede observar que en la tabla 3 los valores iniciales de la muestra cambiaron, pues las pruebas de nopal y tuna fueron realizadas en fechas diferentes. Esto se debió a que, a la hora de hacer la mezcla compuesta de las muestras recoletas en la presa de Valsequillo, la proporción por cada muestra no fue la misma.

A diferencia de los resultados con el nopal de acuerdo con la tabla 3, al trabajar con tuna entre mayor sea el número de ppm que se agreguen mejor será la remoción de turbidez,

color y SST. Estos resultados, en comparación con los del nopal, se deben a que los valores iniciales de la tuna son más altos que los del nopal, por tanto, fue necesaria la adición de más coagulante, para la espera de mejores resultados.

En la figura 18 se puede observar el porcentaje de remoción de SST en la presa de Valsequillo (PV) para las pruebas con nopal y tuna.

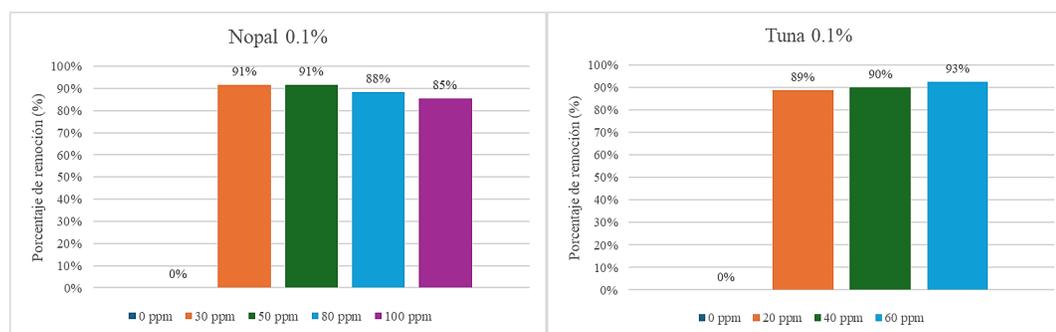


Figura 18. Porcentaje de remoción SST nopal 0.1% y tuna 0.1%

Las pruebas para la tuna y el nopal fueron realizadas a diferentes valores de ppm de acuerdo con lo presentado en las tablas 2 y 3. El propósito de haberlo realizado así fue con la intención de analizar la diferencia de remoción por cada 10 ppm.

Concorde a lo mostrado en la figura 18 la diferencia es muy mínima entre cada coagulante. Para la proporción a 30 ppm de nopal y 20 ppm de tuna, la diferencia radica en apenas el 2%, por lo que solo existe una pequeña discrepancia entre el trabajo de los dos coagulantes; pasa lo mismo en el caso de 50 ppm y 40 ppm, pues se observa una semejanza de apenas el 1%. Sin embargo, en donde se alcanzan resultados más desiguales es en la diferencia de 60 ppm y 80 ppm. Esto no solo por la desigualdad de proporciones, sino también porque para el caso del nopal, existió una sobredosisificación de coagulante, por lo que por arriba de las 50 ppm su efectividad fue disminuyendo.

La tuna y el nopal provienen de la misma familia cactácea por lo que se esperaban resultados positivos de ambas pruebas. Sin embargo, entre la tuna y el nopal se decidió continuar la investigación a través de las pruebas con tuna, esto por la razón de que la tuna es un coagulante más novedoso y menos estudiado que el nopal.

En la tabla 4, se detallan los resultados obtenidos en las pruebas realizadas con coagulante de sandía.

Tabla 4. Sandía 0.1% Agua sintética prueba de coagulante

PRUEBA COAGULACIÓN FLOCULACIÓN						
Agua sintética						
Sandía al 0.1%						
Volumen	mL	300	300	300	300	300
Coagulante	ppm	0	30	60	90	120
Coagulante	mL	0	10	18	27	36
Turbidez	FAU	172	49	47	37	49
Color	Pt Co	1424	357/373	314/330	319/320	370/383
SST	mg/L	185	37/34	31/28	17	35/29
pH		7.7	8.2	8.1	8.1	8
Temperatura	°C	21.6	21.7	21.6	21.8	21.7

Las pruebas de coagulación para la sandía se realizaron en agua sintética. Al igual que las otras pruebas con coagulantes, esta también se ejecutó al 0.1% de concentración.

De acuerdo con los resultados de la tabla 4 resulta evidente que los valores de los parámetros van descendiendo hasta antes de la proporción de 120 ppm, donde se advierte que esta vuelve a dar un resultado muy cercano a cuando se aplicaron 30 ppm. Este efecto ocurre en la mayor parte de las pruebas cuando se utilizan coagulantes, pues se llega a una proporción donde el coagulante se presenta como una sobrecarga del sistema, es decir una

sobredosificación; lo que se traduciría en que hay un exceso de coagulante saturando el sistema.

Con respecto a lo obtenido, podemos entender que, para los parámetros con los que se trabajaron, los mejores resultados se encontraron en la proporción de 90 ppm, donde se obtiene que los SST se redujeron hasta 17 mg/L.

Para poder generar una comparación entre que coagulante fue mejor si la sandía o la tuna, se realizó una prueba en agua sintética para la tuna.

En la tabla 5 se muestran los resultados de la tuna en agua sintética a 0.1% de concentración.

Tabla 5. Tuna 0.1% Agua sintética prueba de coagulante

COAGULACIÓN FLOCULACIÓN					
Agua sintética					
Tuna 0.1%					
Volumen	mL	300	300	300	300
Coagulante	ppm	0	20	40	60
Coagulante	ml	0	6	12	18
Turbidez	FAU	86	10	3	3
Color	Pt Co	537	77	54	58
SST	mg/L	108	18	7	11
pH		7.6	8.36	8.31	8.25

En la tabla 5 los resultados muestran que a 40 ppm se obtienen los mejores valores de SST, pues se alcanzaron 7 mg/L. Si se compara con los límites permisibles para SST de la NOM-001-SEMARNAT-2021 (ríos, arroyos, canales, drenes; embalses, lagos y lagunas; zonas marinas mexicanas; riego de áreas verdes, infiltración y cárstico), se alcanza a cumplir con todos. (En el anexo 1 se encuentra la tabla con los límites permisibles de la NOM-001-SEMARNAT-2021.)

Para poder generar un análisis más completo entre la sandía y la tuna, se realizaron las figuras 19 y 20, donde se presentan los porcentajes obtenidos de remoción de SST.

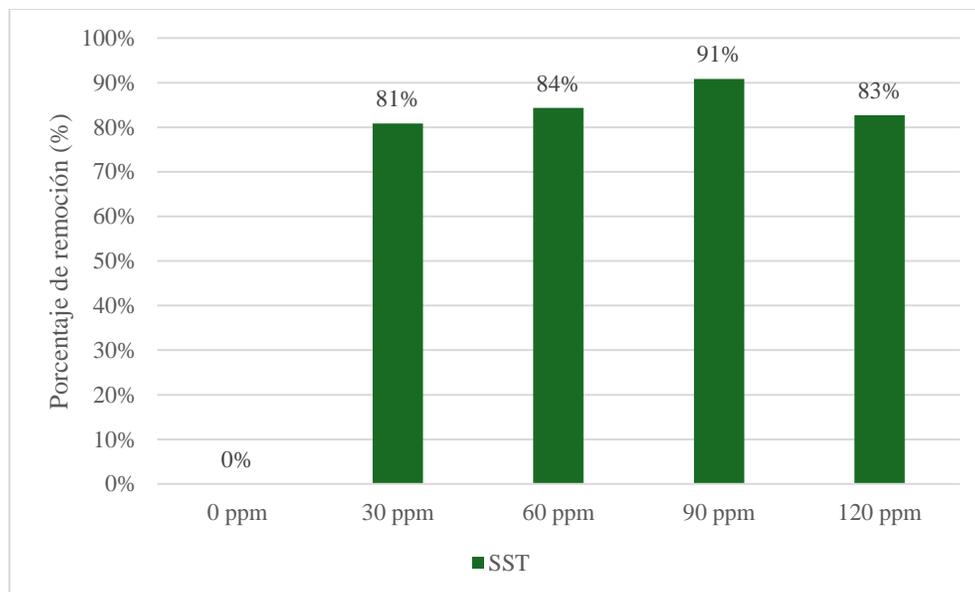


Figura 19. Porcentaje de remoción Agua sintética Sandia al 0.1%

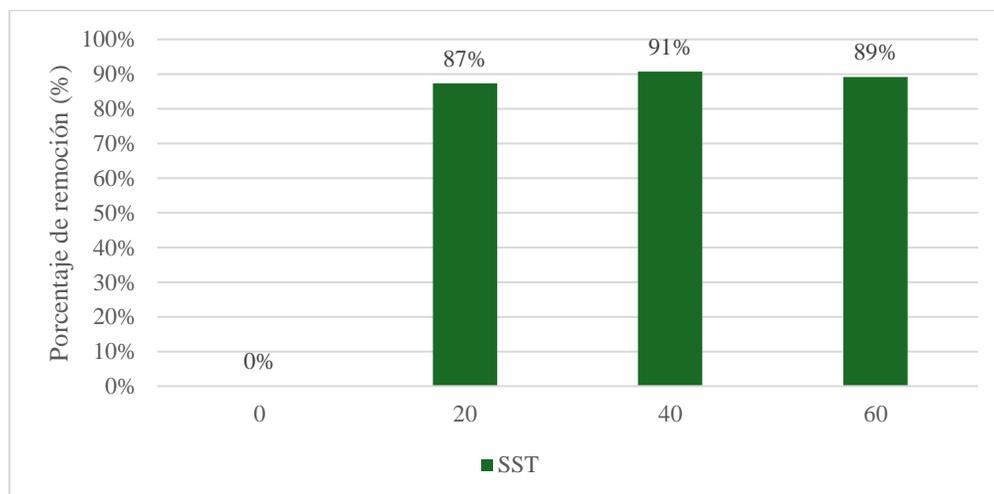


Figura 20. Porcentaje de remoción Agua sintética Tuna al 0.1%

De acuerdo con los resultados ilustrados en las gráficas, tiene sentido que el mayor porcentaje de remoción de la sandía se haya presentado a 90 ppm y que en la tuna haya sido a 40 ppm; pues conforme a los datos presentados como valores iniciales dentro de las tablas

4 y 5, se puede constatar que los valores en la tabla 4 son alrededor del doble que los de la tabla 5. Es por eso que la sandía requirió de mayores proporciones de ppm para reducir los SST en el agua. Tanto en el grafico 19 como en el grafico 20, se puede observar que ambos llegan a un punto de sobredosificación. En el caso de la sandía este ocurre a 120 ppm y en la tuna a 60 ppm.

Los resultados de ambas pruebas son satisfactorios, pues se alcanza el mismo porcentaje de remoción de SST, por lo que los dos coagulantes son muy buenos.

Para la selección del coagulante entre la tuna y la sandía, se tomó en cuenta los resultados presentados en la tabla 1, pues como se puede observar, la sandía necesito pesar al redor del triple de lo que peso la tuna en un inicio, para poder obtener la misma cantidad de coagulante a la salida del secador. Así mismo, requirió más tiempo en el secador para poder eliminar el mayor porcentaje de agua. Por lo que al proceder con las pruebas de coagulación para la remoción de MP el hecho de que se necesitara más gramos de cascara de sandía y tiempo para la obtención del coagulante, fue una de las razones que se tomaron en cuenta para su no selección.

Finalmente, los resultados de remoción para la tuna, nopal y sandia son muy buenos y cercanos en los tres casos; sin embargo, de acuerdo con las justificaciones propuestas, el coagulante con el que se decidió trabajar para las pruebas de remoción de microplásticos fue la tuna.

6.2 Pruebas en tuna

Una vez que se seleccionó el tipo de coagulante, se procedió a hacer pruebas a diferentes concentraciones y en otro tipo de agua.

En la tabla 3 y 5 se utilizó la tuna al 0.1% de concentración, con la diferencia que fueron probadas en distintas muestras de agua. De acuerdo con los resultados y el análisis que previamente se efectuó para cada tipo de agua, se encontró que, para la presa de Valsequillo, la proporción de ppm donde se obtuvieron mejores resultados de SST fue a 60; sin embargo, para el caso del agua sintética fue a 40 (pues a 60 ppm, dicho parámetro aumentaba en lugar de disminuir). La diferencia entre estas dos proporciones se debe a que, en el caso de la presa de Valsequillo, los parámetros de turbidez, color y SST eran al menos 70% mayores que los del agua sintética, por lo que fue necesaria una mayor proporción de coagulante para lograr una mayor disminución. En el caso del agua sintética, al ser que sus parámetros de inicio eran más pequeños, se necesitó menos coagulante y por tanto al agregar la dosis de 60 ppm se sobredosificó la muestra.

Antes de proceder con las pruebas de coagulación para la remoción de MP, se decidió analizar la efectividad de la tuna a concentraciones y valores iniciales más pequeños. Esto con el objetivo de analizar la efectividad del coagulante, y si es que al disminuir la concentración se presentaban mejores resultados.

Se procedió a realizar otras dos pruebas, una al 0.05% de concentración en agua sintética, y la siguiente al 0.1% de concentración, pero solo en la muestra 2 de la presa de Valsequillo. Los resultados de las pruebas se muestran en las tablas 6 y 7.

Tabla 6. Tuna 0.05% Agua sintética prueba de coagulante

PRUEBA COAGULACIÓN FLOCULACIÓN				
Agua sintética				
Tuna 0.05%				
Volumen	mL	300	300	300
Coagulante	ppm	0	40	80
Coagulante	mL	0	24	48

Turbidez	FAU	279	44	47
Color	Pt Co	1432	338	371
SST	mg/L	309	28	35
pH		7.3	7.6	-
Temperatura	°C	19.9	20.1	-

Como se puede observar, esta prueba se realizó solo a dos diferentes valores de ppm (con una amplia diferencia entre sí). Esto fue con el objetivo de analizar qué tan grande era su variación. De acuerdo con los resultados a 80 ppm se obtiene que el sistema comienza a sobredosificarse, pues se detecta un aumento en lugar de una disminución. Sin embargo, en este punto, es importante notar que, de 40 ppm a 80 ppm, la diferencia entre SST es de apenas 7 mg/L, por lo que realmente no hay mucho cambio entre uno y otro.

Los valores iniciales que se presentan la tabla 6 (es decir cuando no se les ha agregado coagulante) son muy parecidos a los medidos cuando se realizó la prueba de nopal en la tabla 2, por lo que la comparación entre la eficiencia del coagulante en menor concentración se realizó contra la tabla 2.

La diferencia entre los resultados obtenidos con el nopal al 0.1% y la tuna al 0.5% es muy pequeña, pues el nopal entre las proporciones de 30 y 50 ppm alcanzó una remoción del 91% y de acuerdo con la tabla 6 a 40 ppm la tuna alcanzo un valor de 90%. Por lo que, la tuna presento resultados satisfactorios a concentraciones menores,

Cuando se realizó la comparación entre el nopal y tuna al 0.1%, el mejor resultado lo obtuvo la tuna. Por lo tanto, se obtienen buenos resultados al trabajar con concentraciones más bajas del coagulante de tuna; sin embargo, a concentraciones más altas se reportan valores mucho más satisfactorios. Por consiguiente, para las pruebas de remoción de MP se trabajó al 0.1%.

Tabla 7. Tuna 0.1% Lago de Valsequillo muestra 2 prueba de coagulante

PRUEBA COAGULACIÓN FLOCULACIÓN										
Presa Valsequillo muestra 2										
Tuna 0.1%										
Volumen	mL	300	300	300	300	300	300	300	300	300
Coagulante	ppm	0	20	40	50	80	100	130	160	200
Coagulante	mL	0	6	12	15	24	30	39	48	60
Turbidez	FAU	20	14	17	13	15	17	14	15	18
Color	Pt Co	252	170	203	199	189	233	224	226	220
SST	mg/L	27	21	15	17	21	24	23	22	26
pH		7.5	7.7	7.7	7.7	7.7	8.2	8	8.1	8.1
Temperatura	°C	19.2	19.9	19.8	19.8	19.8	20.6	20.5	20.5	20.5

En el apartado de agua de la presa de Valsequillo en la sección de metodología, se menciona en que área de la presa fue obtenida esta muestra.

De acuerdo con la tabla 7, los valores iniciales de turbidez, color y SST son muy pequeños comparándolos con los de las otras pruebas. Pareciera que al ser valores tan bajos no habría que añadir un coagulante; no obstante, de acuerdo con la NOM-001-SEMARNAT-2021, los parámetros de SST no cumplen con los límites permisibles para lagos, pues se encuentran 3mg/L por arriba de lo establecido. Como se puede apreciar en la tabla 7, después de haber sido agregadas las primeras 20 ppm, se pudo alcanzar el valor permitido por la Norma Oficial Mexicana.

Como se puede observar dentro de la tabla 7, los resultados no cambiaron mucho una vez añadido el coagulante, pues los valores iniciales de SST en la muestra son muy pequeños, lo que se traduce a que hay pocas partículas y por tanto es difícil que el coagulante tenga una mayor contribución a la remoción de estas. De modo que, este tipo de muestras requieren apenas una poca cantidad de coagulante.

6.3 Coagulante de tuna, remoción de microplásticos

Se realizaron 36 pruebas de coagulación; 18 fueron para la selección del coagulante y las otras 18 para la obtención de los MP. Estas últimas fueron divididas en tres tipos de aguas como se mencionó en la metodología. Las aguas puestas a prueba fueron: agua cruda de la UDLAP, agua sintética y presa de Valsequillo. Para cada tipo de agua se realizaron 6 pruebas a tres valores de ppm diferentes (20, 40 y 60), cada caso se repitió 2 veces con el propósito de analizar su variabilidad. En la sección siguiente se hablará del número de filtros obtenidos una vez terminadas las pruebas de coagulación para el conteo de MP.

Los resultados para cada tipo de agua se presentan en las tablas 8, 9 y 10. En estas tablas se realiza un análisis más detallado en cuanto al parámetro de SST.

Tabla 8. Coagulación agua cruda UDLAP tuna 0.1%

COAGULACIÓN FLOCULACIÓN								
Agua cruda UDLAP								
Tuna 0.1%								
Volumen	mL	300	300	300	300	300	300	300
Coagulante	ppm	0	20	20	40	40	60	60
Coagulante	mL	0	6	6	12	12	18	18
Turbidez	FAU	1014	37	46	41	32	28	25
Color	Pt Co	1944	390	426	433	346	187	169
SST	mg/L	918	39	49	52	39	38	38
pH		-	-	-	-	-	7.87	7.69

De acuerdo con la tabla 8 los datos se comportan de manera un tanto más dispersa para el parámetro de color; sin embargo, en cuanto a turbidez y SST, se observa poca variación entre duplicados, sobre todo en los casos de 20 ppm y 40 ppm.

Los resultados obtenidos cumplen con la expectativa, pues sí se genera un cambio importante entre los valores y los observados después de haberle añadido el coagulante. De acuerdo con los límites permisibles de la NOM-001-SEMARNAT-2021, el agua resultante

solo podría ser utilizada para el caso de río, riego de áreas verdes e infiltración, pues el agua continuaba con altos niveles de contaminantes. En la figura 21, se muestra el porcentaje de remoción logrado de acuerdo con cada proporción de coagulante añadido.

Tabla 9. Coagulación agua sintética tuna 0.1%

COAGULACIÓN FLOCULACIÓN								
Agua sintética								
Tuna 0.1%								
Volumen	mL	300	300	300	300	300	300	300
Coagulante	ppm	0	20	20	40	40	60	60
Coagulante	mL	0	6	6	12	12	18	18
Turbidez	FAU	88	11	10	3	3	3	2
Color	Pt Co	537	68	77	54	50	58	-
SST	mg/L	109	21	18	7	8	11	13
pH		7.6	8.27	8.36	8.31	8.48	8.25	8.26

De acuerdo con lo presentado en la tabla anterior, nuevamente se aprecia que los resultados de los duplicados no variaron mucho de una muestra a otra. Se puede notar que los resultados con la adición de 40 ppm alcanzaron los máximos valores de remoción. El resultado de SST que se alcanza a esa concentración entra en todos los límites permisibles establecidos por la NOM-001-SEMARNAT-2021, por lo que la remoción en el agua sintética fue exitosa. De igual manera, a 20 y 60 ppm se alcanza a cumplir con estos límites, de tal forma que en el caso del agua sintética todos los resultados son satisfactorios.

Tabla 10. Coagulación con agua de la presa de Valsequillo tuna 0.1%

COAGULACIÓN FLOCULACIÓN								
Presa de Valsequillo								
Tuna 0.1%								
Volumen	mL	300	300	300	300	300	300	300
Coagulante	ppm	0	20	20	40	40	60	60
Coagulante	mL	0	6	6	12	12	18	18
Turbidez	FAU	284	154	46	41	55	20	23
Color	Pt Co	2376	1040	355	346	434	200	145

SST	mg/L	337	179	38	34	46	25	43
pH		7.1	7.35	7.78	7.9	7.76	8.24	8.92

Para el caso de la presa de Valsequillo, se puede observar que hay un resultado muy alejado en la proporción a 20 ppm. Este resultado se relaciona con que fue una muestra a la que se le añadió una proporción incorrecta a la especificada de ppm. Descartando este dato, puede comprobarse que los valores van decreciendo tanto para la turbidez como el color y los SST de la manera esperada. Para esta prueba, la proporción de 60 ppm presentó los mejores valores. Sin embargo, en este experimento se observa más variabilidad en las réplicas que en los resultados anteriores (Tablas 8 y 9).

Para entender mejor los resultados en cuanto a porcentajes de remoción en relación con la turbidez, color y SST, se tienen las figuras 21, 22 y 23.

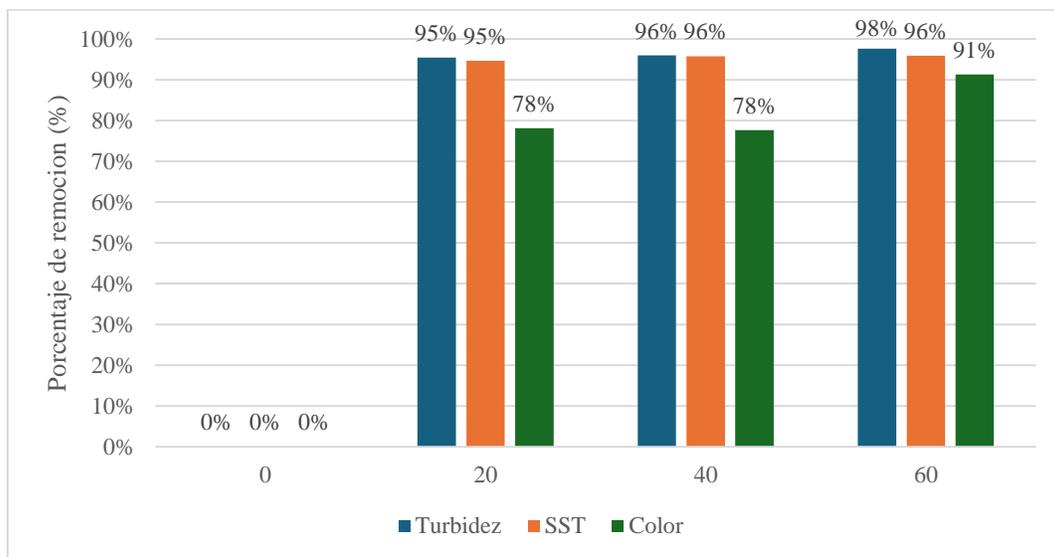


Figura 21. Porcentaje de remoción en agua cruda de la PTAR de la UDLAP

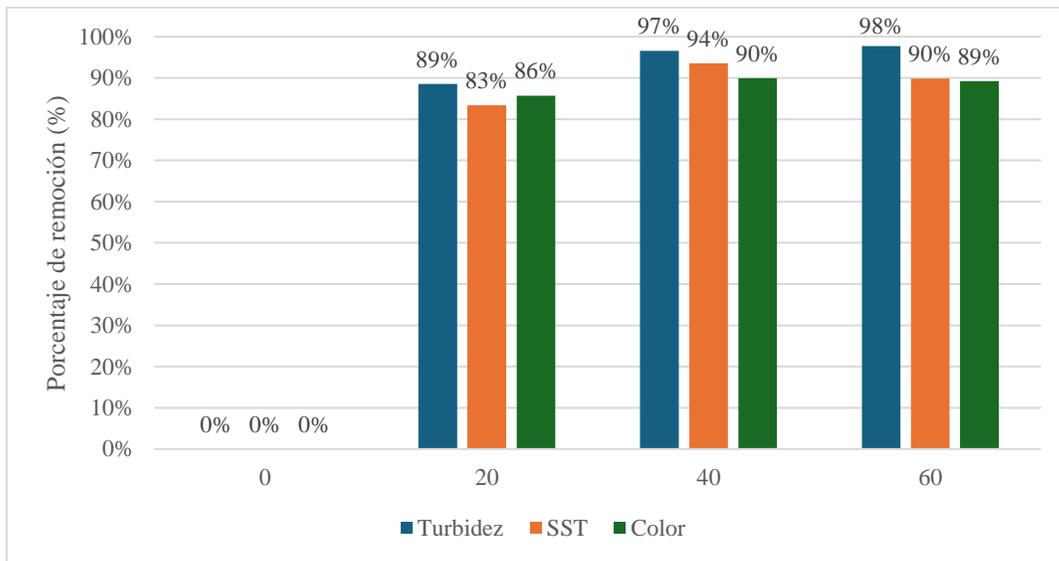


Figura 22. Porcentaje de remoción en agua sintética

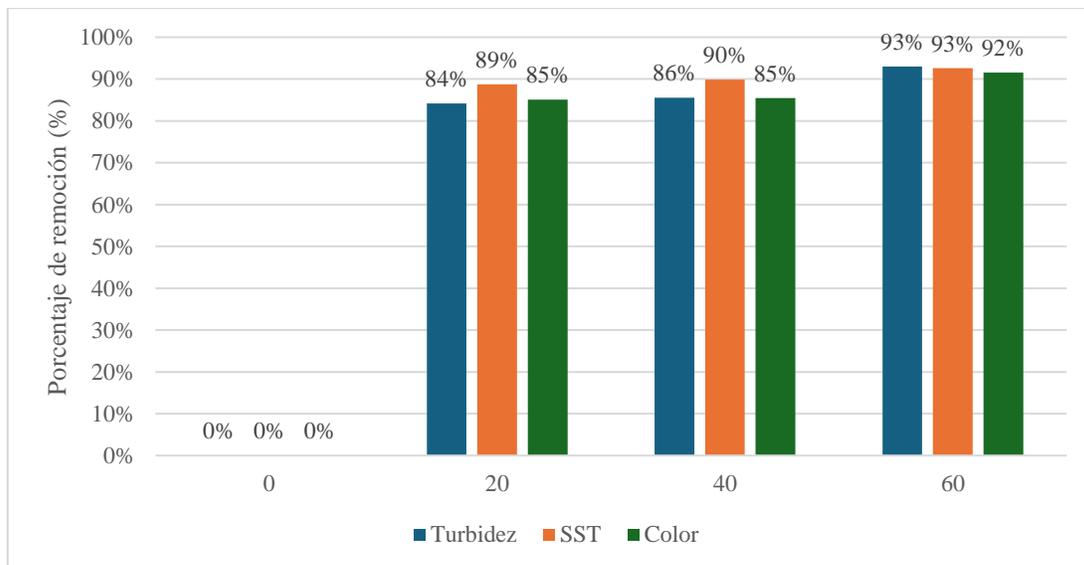


Figura 23. Porcentaje de remoción en agua de la presa de Valsequillo

El análisis las figuras antes presentadas, se generó a partir de los tres parámetros medidos tanto turbidez, SST como color, esto pues a partir de las gráficas es más fácil comprender los resultados. Sin embargo, para esta investigación el parámetro donde más interés se tiene es en los resultados de SST.

De acuerdo con los resultados obtenidos por los gráficos, se observa una mayor remoción de turbidez para los tres tipos de aguas a una concentración de coagulante de 60 ppm. A esta concentración se alcanzaron los porcentajes más altos en comparación a los demás, donde se logró hasta un 98% de remoción de la turbidez. Para el caso del agua cruda se obtuvieron valores por arriba del 95% a todas concentraciones probadas. Para los otros dos tipos de aguas hubo una diferencia más considerable a las distintas concentraciones.

En cuanto a la remoción de SST, los mejores resultados para el agua sintética se presentaron a las 40 ppm. Este efecto se relaciona con la sobredosificación, donde como ya se mencionó al agregar más coagulante la capacidad de remoción de SST disminuye. Por último, para la presa de Valsequillo, entre más se aumentó la dosificación de coagulante, mayor fue la remoción de este.

Finalmente, donde se alcanzaron los porcentajes de remoción más bajos fue en el color, lo cual es de esperarse, puesto que el coagulante ayuda a que los sólidos suspendidos se unan, por lo tanto, se aglomeren y se suspendan más rápido. Por consiguiente, el coagulante para este estudio no se analizó si contribuye de manera directa a la disminución del color. El hecho de que se suspendan más rápido las partículas va a generar que quede más limpia el agua, pero esto no necesariamente implica un cambio en la tonalidad. Para las tres muestras de agua los porcentajes de remoción fueron muy cercanos; sin embargo, donde se puede notar mayor diferencia es en el valor a 60 ppm.

6.4 Resultados microplásticos

En cada una de las pruebas de coagulación también se llevó a cabo el análisis de remoción de microplásticos, en las cuales se obtuvieron un total de cuatro filtros. Como se mencionó en la sección de metodología, dos de los filtros fueron del agua tratada y los otros dos de

lodos sedimentados, cada uno incluyendo la fracción de 45 y 500 μm . Lo que resultó en que finalmente se obtuvieran 72 filtros de las pruebas de coagulación, más otros 4 por cada muestra inicial del tipo de agua que se estudió. Es decir, se obtuvieron un total de 84 filtros. Sin embargo, para los resultados que se presentan a continuación solo se tomaron en cuenta 12 filtros, considerando dificultades en la parte experimental y conteos pendientes.

Las Tablas 11 y 12 muestran los resultados de los datos obtenidos de remoción de microplásticos, donde se detalla los resultados del coagulante a 20 ppm para las tres aguas estudiadas.

Para la obtención de la tabla 11 y 12, se obtuvo la proporción de microplásticos por cirulo en el filtro, se multiplico por 100 (número de cirulos en el filtro), finalmente el resultado de los MP en el filtro fue el que se obtuvo a 200 mL (de acuerdo con la metodología), por lo que al pasarlo a litros se multiplico por 5.

En la figura 16 se muestra la bitácora que se siguió para el conteo de los microplásticos. En el anexo 3 se muestran los resultados del conteo, es decir, cuántos filamentos, fragmentos y esferas resultaron de cada filtro, así como su tipo de color. Hay que recordar que no se contaron los tamaños del total de los MP, se analizaron algunos ejemplares y a partir de ello se estimó la proporción en el resto del filtro.

Tabla 11. % de remoción de MP a 45 μm y 20 ppm

Numero de microplásticos		
MI 45 micras agua (MP/L)	20 ppm 45 micras agua (MP/L)	% de remoción
Agua cruda UDLAP 9666.6667	Agua cruda UDLAP 6541.667	32%
Agua sintética 8791.6667	Agua sintética 3125	64%
Presa de Valsquillo	Presa de Valsquillo	76%

De acuerdo con los resultados presentados en la tabla 11, se encontró que donde hubo una menor remoción de microplásticos fue en la mezcla con agua cruda. Esto puede estar relacionado con el hecho de que el agua inicial contenía mayor turbidez, SST y color. Como ya se había observado anteriormente en la Tabla 9, también el porcentaje de remoción de SST fue menor, indicando que el resultado no solo está relacionado con las concentraciones de MP, sino también las de materia orgánica e inorgánica dentro de las mezclas. El agua cruda, como se puede observar en la figura 10, a simple vista presentaba los niveles más altos de contaminantes. A pesar de que la remoción de MP no fue como se esperaba, el coagulante ayudó a reducir considerablemente el porcentaje de remoción de los SST. En vista de los resultados, se entiende que las suspensiones de los sólidos en la mezcla incluían materia orgánica e inorgánica, que tendieron a precipitarse más rápido, puesto que existían en mayor cantidad como soluto en la mezcla. Al final de la prueba el coagulante funcionó en el agua cruda; el problema que se presentó fue que el agua se encontraba repleta de materia. Sería interesante analizar los efectos del coagulante una vez tamizada y desarenada cierta parte de la mezcla; trabajando sobre todo en el agua, y analizando cambios en la remoción de MP.

Para el agua sintética agua sintética (AS) y la muestra de la presa de Valsequillo, se lograron porcentajes más altos en la remoción de MP, 64% (AS) y 76% (PV). Son resultados que van de la mano con lo reportado en las tablas 9 y 10, pues este tipo de aguas presentaban mucho menos materia que las del agua cruda, por lo que realmente el coagulante tenía más contacto con las partículas suspendidas en el agua y los MP. De acuerdo con los resultados presentados anteriormente, PV se presentó con un 6% más de remoción en comparación con

AS. Este porcentaje se debe a que a AS se le habían colocado los MP extraídos del agua cruda, a través de tamices (como se mencionó en la metodología), por lo que el agua sintética presentaba mucho más MP que materia orgánica e inorgánica comparándola con la del agua cruda o la presa de Valsequillo. Lo anterior se puede comprobar al analizar la tabla 11, pues como se observa, el número de MP en un inicio era más cercano a los del agua cruda.

Tabla 12. % de remoción de MPa 500 μ m y 20 ppm

Numero de microplásticos		% de remoción
MI 500 micras (MP/L)	20 ppm 500 micras (MP/L)	
Agua cruda UDLAP 10208.333	Agua cruda UDLAP 8000	22%
Agua sintética 8416.6667	Agua sintética 3125	63%
Lago de Valsquillo 7583.3333	Lago de Valsquillo 2166.667	71%

En la tabla 12, se presentan porcentajes similares a los exhibidos en la tabla 11. Como se puede observar, la tabla 12 tiene como diferenciador el tamaño del tamiz o la concentración de MPs (500 μ m).

El análisis es similar al anterior, con el diferenciador de que en la PV la concentración de MP fue mayor. De acuerdo con lo detallado en la imagen A3.9 del anexo 3, existieron muchos más fragmentos a 500 μ m que a 45 μ m. Este resultado depende del tipo de materiales que se encuentran y descienden sobre la presa.

De acuerdo con las mediciones que se realizaron de algunos MP, el resultado fue que, para el tamiz menor a 45 μ m, el promedio de tamaño fue de aproximadamente 29.8 μ m, y para el tamiz de 500 μ m, el promedio fue de 69.5 μ m. A continuación, se presentan figuras con la medición de algunos ejemplares de MP.

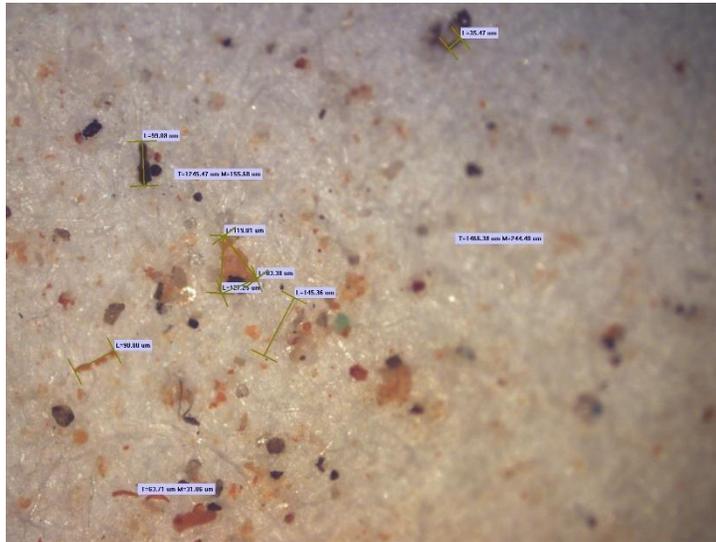


Figura 24. Medición de MP

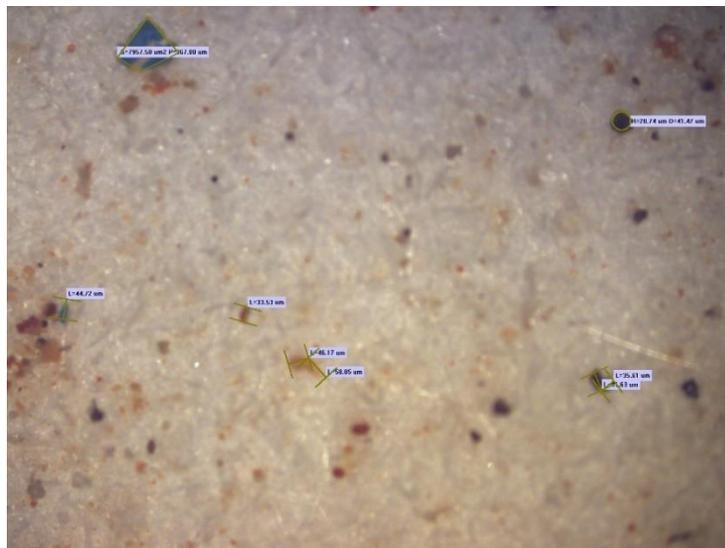


Figura 25. Medición de MP

De acuerdo con los resultados obtenidos dentro de las bitácoras, el promedio de tipos de MP para cada agua estudiada se presentan en las figuras 26, 27 y 28.



Figura 26. Promedio formas de MP agua cruda UDLAP

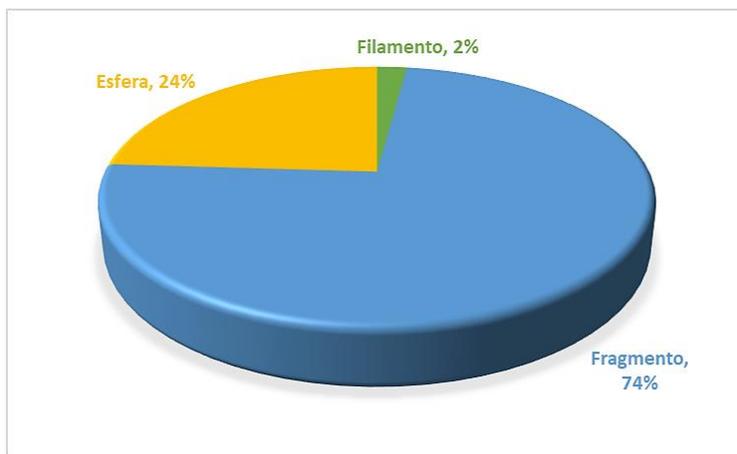


Figura 27. Promedio formas de MP agua sintética

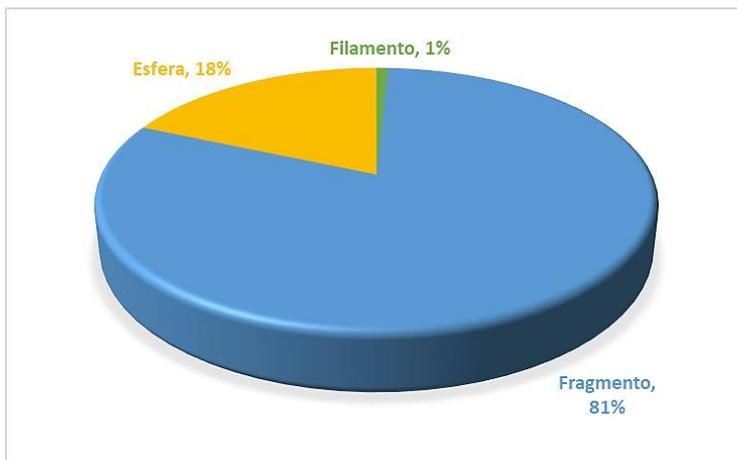


Figura 28. Promedio formas de MP presa Valsequillo

Para los tres casos, los MP que más abundaron fueron los fragmentos, lo cual coincide con lo reportado por Acosta González et al., 2022. En la figura 2 se puede observar que los valores más altos de formas de MP, se presentaron para fragmentos, después filamentos y por último esferas; lo cual ocurre dentro de los resultados obtenidos.

La figura 2, ayuda a generar una comparación de acuerdo con los resultados obtenidos; sin embargo, la abundancia en las formas de los MP va a depender del tipo de uso que se le esté dando a esa agua.

Así mismo, como se puede observar en los resultados de las tablas 11 y 12, los resultados de los tipos de MP que se encuentran en el agua coinciden con lo reportado en las últimas figuras. Ejemplo de esto es el caso de las pruebas en la Presa de Valsequillo. De acuerdo con lo reportado, existieron más MP a 500 micras en la muestra inicial que a 45; si se dirige a los tipos de MP, el hecho de que estos sean mayores a 500 micras representa la posibilidad de que pertenezcan más a los MP primarios, es decir a formas de esferas. Lo cual es cierto, pues si se observa la figura 28, se comprueba que existió un mayor porcentaje de esferas. Este tipo de resultados es importante e interesante, pues ayuda a identificar con que tipos de plásticos están trabajando las industrias, que están desechando y que impacto en el ambiente están teniendo. Pasa lo mismo con el caso del agua cruda, esta agua residual proviene de residencias estudiantiles, es decir que hay una gran población que utiliza esta agua para lavar su ropa, lo cual tiene un efecto en el porcentaje de filamentos que se obtienen; como se puede observar en la figura 26 este resultado coincide pues es el porcentaje más alto de filamentos entre las tres aguas.

Finalmente se obtuvieron los resultados de los porcentajes de remoción de MP de acuerdo con su forma a 500 micras. Dentro de los resultados reportados en la figura 29, se observa que la forma de MP que más se pudo remover cuando se realizaron las pruebas de coagulación fue para los filamentos. Este resultado se relaciona con el hecho que los filamentos al tener una longitud más grande que las otras formas de MP, sus posibilidades de que el coagulante lo atrape junto con las partículas al formar los flóculos son más grandes que para el caso de las esferas y los fragmentos.

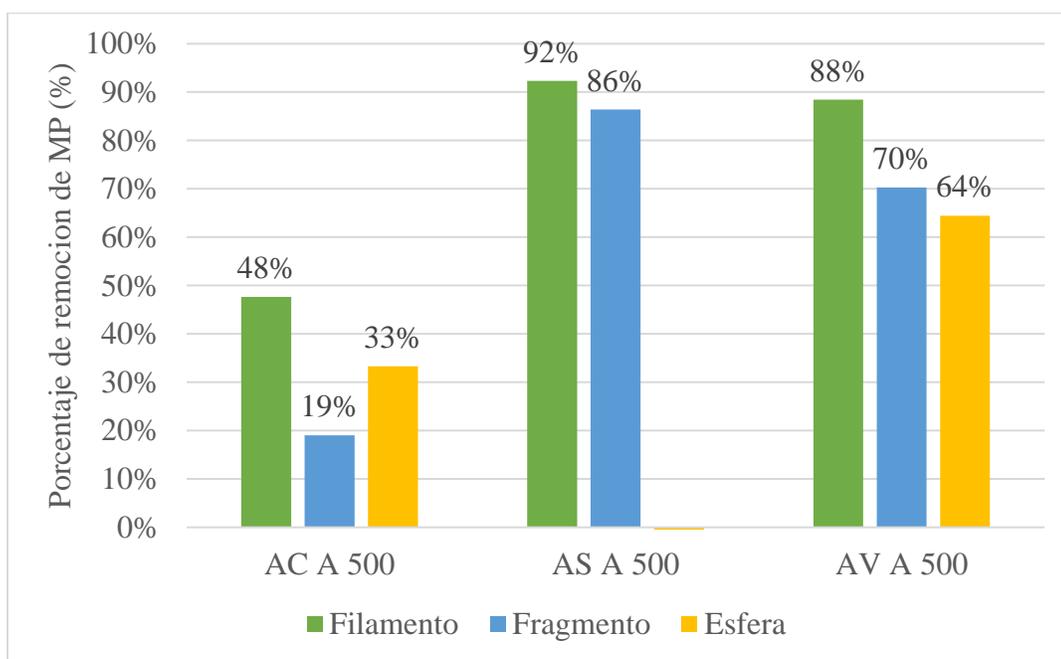


Figura 29. Porcentaje de remoción de microplásticos de acuerdo con su forma a 500 micras

Así mismo en la figura anterior se puede observar que no hay un resultado de porcentaje de esferas removido en el caso del agua sintética. De acuerdo con los resultados presentados en las figuras A3.8 y A3.11 del tercer apartado de anexos, se observa que cuando se realizó

el conteo de la muestra inicial esta contaba con 7 esferas; sin embargo, después de añadir el coagulante el número de esferas en vez de disminuir aumento a 9 esferas. Este tipo de resultados tiene mucho que ver con el tipo de conteo que se está haciendo, pues finalmente hay demasiado error humano en el conteo, así mismo de que es cansado y muy tediosos, por lo tanto, pudo ocurrir que no se haya contado de la manera correcta el filtro de la muestra inicial o que en todo caso cuando se añadió el coagulante este también contaba con microplásticos.

7. Conclusiones y recomendaciones

El hecho de que la sandía haya tomado más tiempo para la extracción del agua fue una de las razones por las que no se tomó en cuenta para ser usada como el coagulante en las pruebas de remoción de MP. Esto debido a que los procesos de remoción de las fases orgánica e inorgánica toman un tiempo requerido y específico, por lo que dar un día más para la obtención de un coagulante, no era la mejor opción. Así mismo, el hecho de que solo se da en cierta temporada y en ciertas zonas, genera un cambio en el costo y una obtención un poco más difícil.

Se comprueba, que la tuna si funciona como coagulante natural. Ya sea a través del mucilago que contiene, los carbohidratos, la pectina o el conjunto de los tres, que puede llevarse a cabo este trabajo, comparándolo con los resultados obtenidos por Guzmán et al., (2013)

A mayor SST en nuestra solución, se necesitarían más ppm para tratar el agua y reducir su valor de SST.

Todas las aguas llegaron a una sobredosificación de coagulante, por lo que este dejara de funcionar como es requerido, y en lugar de disminuir los valores comenzara a aumentarlos. Dependiendo de los valores iniciales a los que se encuentre el agua, es la cantidad de coagulante que se le debe añadir. No mayor cantidad de coagulante significa más limpieza, todo depende del tipo de agua que se esté manejando y los valores iniciales con los que se esté trabajando.

En el caso del agua cruda se deben realizar más pruebas, pues al contener un exceso de contaminantes el resultado de las muestras puede estar muy disperso si es que no se hace una repartición equilibrada de la mezcla.

El tratar con agua sintética lleva a adquirir valores más correctos, por el hecho de que el agua está preparada para ciertos valores iniciales, por lo tanto, es más apreciable la modificación que se realiza al agregar el coagulante; comparándola con el agua cruda y la presa de Valsequillo, pues al no llevarse un buen mezclado, pueden quedar vasos o muestras con más contaminantes que otros.

En cuanto al pH, se observó que este incrementó (en la mayoría de las pruebas) y la muestras se hicieron más alcalinas conforme aumentó la proporción de ppm. No obstante, para fines de la presente investigación, este no es un parámetro que realmente interfiera con los resultados, ya que se mantiene dentro de los límites establecidos por la NOM-001-SEMARNAT-2021 los cuales son permitidos en un rango de 6 a 9. Sin embargo, es importante tener en cuenta que a mayores concentraciones el rango de pH podría quedar fuera de los límites de la NOM.

En un futuro sería interesante estudiar más a fondo el rendimiento de los coagulantes naturales para el proceso de disminución de sólidos suspendidos totales. Si se realiza una

estimación rápida siguiendo la metodología para la preparación del coagulante (1 ml de agua por 1 mg de coagulante), Los resultados muestran que por cada kilogramo de coagulante de tuna se pueden tratar 25,000 L de agua sintética (esta muestra presentaba los menores valores de SST en la muestra inicial) obteniendo una remoción del 94% para SST. En el caso del agua cruda y la presa de Valsequillo que eran las muestras que se encontraban más contaminadas; por cada kilogramo de coagulante de tuna se podrían tratar 16,666 L de agua con un porcentaje de remoción del 96% de SST para el agua cruda y 93% para la presa de Valsequillo. De acuerdo con nuestro análisis, una tuna promedio pesa al redor de 40 gramos y su cascara representa el 40% del peso total de la tuna; sin embargo, cuando se introduce la cascara de tuna al secador esta sale pesando el 82% menos de lo que pesaba en un inicio. Por tanto, se necesitarían entre 343 y 344 tunas para conseguir 5.5 kg de cascara de tuna con el propósito de obtener un kilogramo de coagulante en polvo. Estos resultados equivaldrían a comprar alrededor de 14 kg de tunas enteras; si el costo de la tuna en México ronda los veintisiete pesos mexicanos (\$27) de acuerdo con mercados locales, tratar de 25,000 a 16,666 litros de agua contaminada (de acuerdo con los SST que contenga en un inicio) costaría alrededor de trescientos setenta y uno punto veinticinco pesos mexicanos (\$371.25). Sin embargo, hay que recordar que la cascara de tuna es un desperdicio por tanto no representaría un costo.

El conteo de microplásticos es una tarea difícil y cansada. El error humano está muy presente en el conteo, pues dentro de los filtros puede que se hayan quedado algunos restos de materia orgánica o inorgánica que se estén tomando en cuenta como microplásticos lo cual afecta el conteo. Así mismo, cada persona tiene un criterio diferente de como contar, así como de considerar que es un microplástico o no. A la hora de trabajar con el microscopio

es un tanto difícil saber o poder identificar a ciencia cierta si lo que se observa es realmente lo que queremos contar o analizar, es por eso que existe tanto error en el conteo.

El conteo de una sola parte del filtro puede llevar de dos a tres horas en terminarse y a pesar de eso, para esta investigación no fue el total del filtro, como se mencionó en la metodología la técnica que se utilizó fue contar todos los MP dentro de la línea marcada (es decir 12 puntos del filtro) ver figura 15. Al tomar tanto tiempo para ser contados y el error humano que pueden conllevar, es difícil poder llevar a cabo una repetición de los datos en cuanto a conteo de MP. Por lo que para siguientes ocasiones se recomienda trabajar con equipos/técnicas que ayuden a mejorar el conteo y disminuir el error humano. Una técnica y equipo que se propone es la microscopía por espectroscopia de infrarrojo por transformada de Fourier (FTIR).

8. Bibliografías

Acosta González, G., Ditzá, V., Rosales, & Caballero Vázquez, J. (2022). *Microplásticos en agua y en organismos*.

https://amc.mx/revistaciencia/images/revista/73_2/PDF/04_73_2_1431_Microplasticos_Agua.pdf

Ada, Q., & Martel, B. (2004). *CAPÍTULO 1 ASPECTOS FÍSICOQUÍMICOS DE LA CALIDAD DEL AGUA*. <https://agua.org.mx/wp-content/uploads/2020/02/uno.pdf>

Agua, I. M. de T. del. (2020, April 24). *Contaminación por microplásticos*. Gob.mx.

<https://www.gob.mx/imta/articulos/contaminacion-por-microplasticos?idiom=es>

Andrés Sarria-Villa, R., & Gallo-Corredor, A. (2016). La gran problemática ambiental de los residuos plásticos: Microplásticos. *Journal de Ciencia E Ingeniería*, 8(1), 21–27.

<https://jci.uniautonoma.edu.co/2016/2016-3.pdf>

Ávila García , P., Carmona Tinoco, J. U., González Pérez, L. R., Pablos Hach, J. L., & Pelayo Moller, C. M. (2018). *ESTUDIO SOBRE PROTECCIÓN DE RÍOS, LAGOS Y ACUÍFEROS DESDE LA PERSPECTIVA DE LOS DERECHOS HUMANOS.*

https://www.cndh.org.mx/sites/all/doc/Informes/Especiales/ESTUDIO_RIOS_LAGOS_ACUIFEROS.pdf

Barros Barros, A. (2020, June 29). *Optimización del proceso de coagulación y floculación a partir de la corriente de retorno de una EDAR urbana .*

file:///C:/Users/pauli/Downloads/TFM_Memoria_Arturo_Barros.pdf

Caguana Chiriboga, E. M. (2020). *EFECTO DE MICROPLÁSTICO SOBRE LAS COMUNIDADES CORALINAS.*

<https://repositorio.upse.edu.ec/bitstream/46000/6589/1/UPSE-TBM-2021-0003.pdf>

Castañeta, G., Gutiérrez, A. F., Nacaratte, F., & Manzano, C. A. (2020). Microplásticos: Un Contaminante Que Crece En Todas Las Esferas Ambientales, Sus Características Y Posibles Riesgos Para La Salud Pública Por Exposición. *Revista Boliviana de Química*, 37(3), 160–175.

https://www.redalyc.org/journal/4263/426365043004/html/#redalyc_426365043004_ref13

Catalina, J., & Monroy, M. (2021). *PROPUESTA DE PROCESO VERDE APLICADO AL APROVECHAMIENTO DE RESIDUOS Y TRANSFORMACIÓN DE MICROPLÁSTICOS.*

<https://repository.universidadean.edu.co/bitstream/handle/10882/10894/MedinaCatalina2021.pdf?sequence=1>

- Chávez López, O. M. (2014, March). *Proyecto de humedal para la zona de San Baltazar Tetela, Puebla*.
<https://repositorioinstitucional.buap.mx/server/api/core/bitstreams/e1fa0b66-fc05-46e6-9f7d-77aeb80e064b/content>
- Díaz Dávila, G. E. (2018). *EVALUACIÓN DEL MATERIAL PARTICULADO MICROPLÁSTICOS Y SU RELACION CON LA CALIDAD DEL AIRE EN EL INTERIOR DE LOS HOGARES, COMAS, 2018*.
https://repositorio.ucv.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12692/32304/D%C3%ADaz_DGE.pdf?sequence=1
- DOF. (2022, March 11). *NORMA Oficial Mexicana NOM-001-SEMARNAT-2021, Que establece los límites permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en cuerpos receptores propiedad de la nación*.
http://legismex.mty.itesm.mx/normas/ecol/semarnat001-2022_03.pdf
- García, D., & Zegarra, R. (2021, June 15). *Caracterización morfológica por microscopía electrónica de barrido de nanocelulosas de cáscara de sandía (Citrullus lanatus)*.
<file:///C:/Users/pauli/Downloads/Dialnet-CaracterizacionMorfologicaPorMicroscopiaElectronica-8085145.pdf>
- Guzmán, L., Villabona, Á., Tejada, C., & García, R. (2013). REDUCCIÓN DE LA TURBIDEZ DEL AGUA USANDO COAGULANTES NATURALES: UNA REVISIÓN. *Revista U.D.C.A Actualidad & Divulgación Científica*, 16(1), 253–262.
http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0123-42262013000100029
- Horse, T. (2016, June 8). *Coagulantes para tratamiento de agua – Tratamiento del Agua*.

Www.tratamientodelagua.com.mx. <https://tratamientodelagua.com.mx/coagulantes-para-tratamiento-de-agua/>

Hudson, A. (2010). Turbidity and Suspended Solids in Waste Water Treatment.

Measurement and Control, 43(3), 82–83.

<https://doi.org/10.1177/002029401004300304>

Kitchener, B. G., Wainwright, J., & Parsons, A. J. (2017). A review of the principles of turbidity measurement. *Progress in Physical Geography: Earth and Environment*, 41(5), 620–642. <https://doi.org/10.1177/0309133317726540>

Lee, H., Kim, S., Sin, A., Kim, G., Khan, S., Nadagouda, M. N., Sahle-Demessie, E., & Han, C. (2023). Pretreatment methods for monitoring microplastics in soil and freshwater sediment samples: A comprehensive review. *Science of the Total Environment*, 871, 161718. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.161718>

López Pérez, M. (2018). *EVALUACIÓN DEL USO DE LA CACTÁCEA Opuntia ficus-indica COMO COAGULANTE NATURAL PARA EL TRATAMIENTO DE AGUAS*. <https://repositorio.lamolina.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12996/3541/lopez-perez-malena.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

Lumitos. (2024). *Polielectrolito*. [Www.quimica.es](http://www.quimica.es).

<https://www.quimica.es/enciclopedia/Polielectrolito.html>

Medina-Torres, L. (2000). Rheological properties of the mucilage gum (*Opuntia ficus indica*). *Food Hydrocolloids*, 14(5), 417–424. [https://doi.org/10.1016/s0268-005x\(00\)00015-1](https://doi.org/10.1016/s0268-005x(00)00015-1)

NMX. (2016). *ANÁLISIS DE AGUA.- MEDICIÓN DEL pH EN AGUAS NATURALES, RESIDUALES Y RESIDUALES TRATADAS.- MÉTODO DE PRUEBA- (ANCELA*

- A LA NMX-AA-008- SCFI-2011).
- <https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/166767/NMX-AA-008-SCFI-2016.pdf>
- OMS. (1995). *Guías para la calidad del agua potable* (2nd ed., Vol. 1, p. 129).
- <https://iris.who.int/bitstream/handle/10665/37736/9243544608-spa.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Pacheco, Co. (2021, July 2). *Historia del lago de Valsequillo: mirada hacia la nostalgia*. DISTRITT. <https://distritt.com/estados/historia-del-lago-de-valsequillo-presamanuel-avila-camacho/>
- Parker, L. (2022, April 27). *Los microplásticos ya están en nuestros cuerpos. ¿Cuánto nos dañan?* National Geographic. <https://www.nationalgeographicla.com/medio-ambiente/2022/04/los-microplasticos-ya-estan-en-nuestros-cuerpos-cuanto-nos-danan>
- Quiñones, L. (2021, October 21). *El plástico, que ya ha atragantado nuestros océanos, terminará por asfixiarnos a todos si no actuamos rápidamente*. Noticias ONU. <https://news.un.org/es/story/2021/10/1498752>
- Rojo Nieto, E., & Montoto, T. (2017). *Basuras marinas, plásticos y microplásticos orígenes, impactos y consecuencias de una amenaza global*. <https://accedacris.ulpgc.es/bitstream/10553/56275/2/informe-basuras-marinas.pdf>
- Sánchez Ramírez, J. E. (2018, January 19). *Plásticos y microplásticos en agua, un problema mundial que afecta nuestros sistemas acuáticos*. <file:///C:/Users/pauli/Downloads/2027-Texto%20del%20art%C3%ADculo-9507-1-10-20190619.pdf>

Sbarbati Nudelman, N. (2020). *RESIDUOS PLASTICOS EN ARGENTINA. SU IMPACTO AMBIENTAL Y EN EL DESAFIO DE LA ECONOMIA CIRCULAR.*

<file:///C:/Users/pauli/Downloads/Rosetal2020Microplsticos.Macroproblemas.pdf>

SEMARNAT. (2020). *Calidad del Agua.* Semarnat.gob.mx.

https://apps1.semarnat.gob.mx:8443/dgeia/compendio_2020/dgeiawf.semarnat.gob.mx_8080/approot/dgeia_mce/html/RECUADROS_INT_GLOS/D3_AGUA/D3_AGUA04/D3_R_AGUA05_01.htm

Tarrillo Potenciano, H. K., & Tenorio Bernilla, M. B. (2019). *EFICIENCIA DEL COAGULANTE – FLOCULANTE TUNA (Opuntia ficus) PARA LA CLARIFICACIÓN DE LAS AGUAS DE LA ACEQUIA EL PUEBLO DE FERREÑAFE - 2019.*

<https://repositorio.udl.edu.pe/xmlui/bitstream/handle/UDL/331/Tesis%20Tarrillo%20y%20Tenorio.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

Vaca, M., López, R., & Flores, J. (2014, June 26). *APLICACIÓN DEL NOPAL (Opuntia ficus indica) COMO COAGULANTE PRIMARIO DE AGUAS RESIDUALES.*

<file:///C:/Users/pauli/Downloads/bgr,+46815-126108-1-CE.pdf>

Welden , N. A., & Cowie, P. R. (2017, May 15). *Degradation of common polymer ropes in a sublittoral marine environment.*

<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0025326X17302035?via%3Dihub>

Welden, N. A., & Lusher, A. (2020). Microplastics. *Plastic Waste and Recycling*, 223–249.

<https://doi.org/10.1016/b978-0-12-817880-5.00009-8>

Zarza, L. F. (2020, September 22). *¿Qué es el agua cruda?* IAguá.

9. Anexos

A1. Límites permisibles SEMARNAT

TABLA 1
Límites Permisibles

Parámetros (*) (miligramos por litro, excepto cuando se especifique)	Ríos, arroyos, canales, drenes			Embalses, lagos y lagunas			Zonas marinas mexicanas			Suelo								
	P.M.	P.D.	V.I.	P.M.	P.D.	V.I.	P.M.	P.D.	V.I.	Riego de áreas verdes			Infiltración y otros riegos			Cárstico		
										P.M.	P.D.	V.I.	P.M.	P.D.	V.I.	P.M.	P.D.	V.I.
Temperatura (°C)	35	35	35	35	35	35	35	35	35	35	35	35	35	35	35	35	35	35
Grasas y Aceites	15	18	21	15	18	21	15	18	21	15	18	21	15	18	21	15	18	21
Sólidos Suspendedos Totales	60	72	84	20	24	28	20	24	28	30	36	42	100	120	140	20	24	28
Demanda Química de Oxígeno	150	180	210	100	120	140	85	100	120	60	72	84	150	180	210	60	72	84
Carbono Orgánico Total*	38	45	53	25	30	35	21	25	30	15	18	21	38	45	53	15	18	21
Nitrógeno Total	25	30	35	15	25	30	25	30	35	NA	NA	NA	NA	NA	NA	15	25	30
Fósforo Total	15	18	21	5	10	15	15	18	21	NA	NA	NA	NA	NA	NA	5	10	15
Huevos de Helmintos (huevos/litro)	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	1								
Escherichia coli (NMP/100 ml)	250	500	600	250	500	600	250	500	600	250	500	600	250	500	600	50	100	200
Enterococos fecales* (NMP/100 ml)	250	400	500	250	400	500	250	400	500	250	400	500	250	400	500	50	100	200
pH (UpH)	6 - 9																	
Color verdadero	Longitud de onda									Coeficiente de absorción espectral máximo								
	436 nm									7,0 m ⁻¹								
	525 nm									5,0 m ⁻¹								
	620 nm									3,0 m ⁻¹								
Toxicidad aguda (UT)	2 a los 15 minutos de exposición																	
N.A.: No Aplica P.M.: Promedio Mensual P.D.: Promedio Diario V.I.: Valor Instantáneo NMP: Número más probable UpH: Unidades de pH UT: Unidades de Toxicidad * Si Cloruros es menor a 1000 mg/L, se analiza y reporta DQO. * Si Cloruros es mayor o igual a 1000 mg/L, se analiza y reporta COT. * Si la conductividad eléctrica menor a 3500 µS/cm se analiza y reporta E. coli. * Si la conductividad eléctrica es mayor o igual a 3500 µS/cm se analiza y reporta Enterococos fecales. Las determinaciones de Conductividad eléctrica y de Cloruros no requieren la acreditación y aprobación de la entidad correspondiente.																		

Figura A1. Límites permisibles de acuerdo a la NOM-001-SEMARNAT-2021 (DOF, 2022)

A2. Mejores resultados agua cruda UDLAP

Tabla A2. Tuna 0.1% Agua Cruda prueba de coagulante

COAGULACIÓN FLOCULACIÓN Agua cruda UDLAP

Tuna 0.1%				
Volumen	300	300	300	300
Coagulante	0	20	40	60
Turbidez	1014	46	41	24
SST	918	49	39	38
Color	1944	426	434	169
pH	-	-	-	7.69

A3. Bitácoras

Codigo:	Vaso 2 rep 20ppm AS A 45	Conteo	TOTAL	TAMAÑOS				
Filamento	Transparente							
	Azul							
	Morado							
	Negro	1		8				
	Rojo							
	Amarillo							
	Naranja							
	Verde							
	Café							
	Brillante							
	Otro							
	TOTAL	1	1					
Fragmento	Transparente	49		12.17	11	10	30	45.8
	Azul							
	Morado							
	Negro	5		23.77	14.14	12.65	8.94	20.88
	Rojo							
	Amarillo							
	Naranja	2		12.81	14	13.6		
	Verde							
	Café							
	Brillante							
	Otro							
	TOTAL	56	56					
Esfera	Azul							
	Amarillo							
	Transparente	13		12.81				
	Otro	5		8.94	12.65	10		
	TOTAL	18	18					
	TOTAL F		75					

Figura A3.1. Bitácora ASA 45 micras a 20 ppm

Codigo:		Vaso 2 Rep 20ppm AV A 45micras	Conteo	TOTAL	TAMAÑOS			
Filamento	Transparente							
	Azul	1						
	Morado							
	Negro	8		11.18	10			
	Rojo							
	Amarillo							
	Naranja							
	Verde							
	Café							
	Brillante							
	Otro							
	TOTAL	9	9					
Fragmento	Transparente	181		30.53	15.23	122.14	12.17	23.77
	Azul	3		45.61				
	Morado							
	Negro	11						
	Rojo							
	Amarillo							
	Naranja	9		24.19	30.46	20.4	28.43	16.97
	Verde							
	Café	12		15.52	15.23	18.87	35.9	18.11
	Brillante							
	Otro							
	TOTAL	216	216					
Esfera	Azul							
	Amarillo							
	Transparente	28		14.56	8.94	6.32	10.77	
	Otro	8		8.06	10.2	14.14	10.54	6.32
	TOTAL	36	36					
			TOTAL F	26				

Figura A3.2. Bitácora AVA 45 micras a 20 ppm

Codigo:		Vaso 2 20 ppm ACA 45 micras	Conteo	TOTAL	TAMAÑOS			
Filamento	Transparente			0				
	Azul	4		4				
	Morado	3		3				
	Negro			0				
	Rojo			0				
	Amarillo	1		1				
	Naranja	2		2				
	Verde			0				
	Café			0				
	Brillante			0				
	Otro			0				
	TOTAL			0				
Fragmento	Transparente			0				
	Azul	27		27				
	Morado	4		4				
	Negro	22		22				
	Rojo	19		19				
	Amarillo	22		22				
	Naranja	31		31				
	Verde	8		8				
	Café	12		12				
	Brillante			0				
	Otro			0				
	TOTAL			0				
Esfera	Azul			0				
	Amarillo	2		2				
	Transparente			0				
	Otro			0				
	TOTAL			0				
			TOTAL F	157				

Figura A3.3. Bitácora ACA 45 micras a 20 ppm

Codigo: Muestra Inicial AVA 45		Conteo	TOTAL	TAMAÑOS			
Filamento	Transparente						
	Azul						
	Morado						
	Negro	16					
	Rojo						
	Amarillo						
	Naranja						
	Verde						
	Café	3					
	Brillante						
	Otro						
	TOTAL						
Fragmento	Transparente						
	Azul	1					
	Morado						
	Negro	44					
	Rojo	1					
	Amarillo						
	Naranja	2					
	Verde						
	Café	16					
	Brillante						
	Otro						
	TOTAL						
Esfera	Azul	1					
	Amarillo						
	Transparente						
	Otro	25					
	TOTAL	109					
	TOTAL F	109					

Figura A3.4. Bitácora MI AVA 45 micras

Codigo: MI ASA 45 micras		Conteo	TOTAL	TAMAÑOS			
Filamento	Transparente		0				
	Azul	1	1				
	Morado	1	1				
	Negro	2	2				
	Rojo		0				
	Amarillo	2	2				
	Naranja	1	1				
	Verde	3	3				
	Café	1	1				
	Brillante		0				
	Otro		0				
	TOTAL		0				
Fragmento	Transparente	12	12				
	Azul	21	21				
	Morado	8	8				
	Negro	29	29				
	Rojo	19	19				
	Amarillo	17	17				
	Naranja	22	22				
	Verde	26	26				
	Café	32	32				
	Brillante	4	4				
	Otro		0				
	TOTAL		0				
Esfera	Azul	3	3				
	Amarillo	1	1				
	Transparente	6	6				
	Otro		0				
	TOTAL		0				
	TOTAL F		211				

Figura A3.5. Bitácora MI ASA 45 micras

Codigo:	MI ACA 45 micras	Conteo	TOTAL	TAMAÑOS			
Filamento	Transparente		0				
	Azul	4	4				
	Morado	3	3				
	Negro		0				
	Rojo	4	4				
	Amarillo	1	1				
	Naranja	3	3				
	Verde		0				
	Café	1	1				
	Brillante		0				
	Otro		0				
	TOTAL		0				
Fragmento	Transparente	2	2				
	Azul	27	27				
	Morado	14	14				
	Negro	18	18				
	Rojo	12	12				
	Amarillo	22	22				
	Naranja	31	31				
	Verde	43	43				
	Café	32	32				
	Brillante	12	12				
	Otro		0				
	TOTAL		0				
Esfera	Azul	1	1				
	Amarillo	2	2				
	Transparente		0				
	Otro		0				
		TOTAL		0			
	TOTAL F		232				

Figura A3.6. Bitácora MI ACA 45 micras

Codigo:	Vaso 2 20 ppm ACA 500 micras	Conteo	TOTAL	TAMAÑOS			
Filamento	Transparente		0				
	Azul	2	2				
	Morado	4	4				
	Negro		0				
	Rojo		0				
	Amarillo	2	2				
	Naranja	3	3				
	Verde		0				
	Café		0				
	Brillante		0				
	Otro		0				
	TOTAL		0				
Fragmento	Transparente		0				
	Azul	33	33				
	Morado	4	4				
	Negro	22	22				
	Rojo	19	19				
	Amarillo	36	36				
	Naranja	31	31				
	Verde	5	5				
	Café	29	29				
	Brillante		0				
	Otro		0				
	TOTAL		0				
Esfera	Azul		0				
	Amarillo	2	2				
	Transparente		0				
	Otro		0				
		TOTAL		0			
	TOTAL F		192				

Figura A3.7. Bitácora ACA 500 micras a 20 ppm

Codigo:	Vaso 2 rep 20ppm AS L 500	Conteo	TOTAL	TAMAÑOS			
Filamento	Transparente						
	Azul						
	Morado						
	Negro	2	26um				
	Rojo						
	Amarillo						
	Naranja						
	Verde						
	Café						
	Brillante						
	Otro						
	TOTAL	2	1				
Fragmento	Transparente	9					
	Azul						
	Morado						
	Negro	13	10.20um	19.10um	18.03um		
	Rojo						
	Amarillo						
	Naranja	1	32.56um				
	Verde						
	Café						
	Brillante						
	Otro						
	TOTAL	23	56				
Esfera	Azul						
	Amarillo						
	Transparente	3					
	Otro	6	18.38um	18.98um	31.32um	10.03um	
		TOTAL	9	18			
	TOTAL F		75				

Figura A3.8. Bitácora ASA 500 micras a 20 ppm

Codigo:	VASO 2 rep 20PPM AV A 500micras	Conteo	TOTAL	TAMAÑOS			
Filamento	Transparente	1					
	Azul						
	Morado						
	Negro	2	173.95				
	Rojo						
	Amarillo						
	Naranja						
	Verde						
	Café						
	Brillante						
	Otro						
	TOTAL	3	3				
Fragmento	Transparente	7					
	Azul	1					
	Morado						
	Negro	6					
	Rojo						
	Amarillo						
	Naranja						
	Verde						
	Café	19	14.14um				
	Brillante						
	Otro						
	TOTAL	33	33				
Esfera	Azul						
	Amarillo						
	Transparente	3					
	Otro	13	19.21um	9.22um	10.20um		
		TOTAL	16	16			
	TOTAL F		52				

Figura A3.9. Bitácora AVA 500 micras a 20 ppm

Codigo: Muestra Inicial AVA 500		Conteo	TOTAL	TAMAÑOS			
Filamento	Transparente						
	Azul						
	Morado						
	Negro	17					
	Rojo						
	Amarillo						
	Naranja						
	Verde						
	Café	9					
	Brillante						
	Otro						
	TOTAL	26	26				
Fragmento	Transparente						
	Azul						
	Morado						
	Negro	68					
	Rojo	4					
	Amarillo						
	Naranja	7					
	Verde						
	Café	32					
	Brillante						
	Otro						
	TOTAL	111	111				
Esfera	Azul						
	Amarillo						
	Transparente						
	Otro	45					
	TOTAL	45	45				
		TOTAL F	182				

Figura A3.10. Bitácora MI AVA 500 micras

Codigo: MI AS 500 micras		Conteo	TOTAL	TAMAÑOS			
Filamento	Transparente	3	3				
	Azul	2	2				
	Morado	4	4				
	Negro	2	2				
	Rojo	3	3				
	Amarillo	2	2				
	Naranja	3	3				
	Verde	2	2				
	Café	4	4				
	Brillante	1	1				
	Otro		0				
	TOTAL		0				
Fragmento	Transparente	19	19				
	Azul	23	23				
	Morado	1	1				
	Negro	25	25				
	Rojo	12	12				
	Amarillo	19	19				
	Naranja	21	21				
	Verde	18	18				
	Café	22	22				
	Brillante	9	9				
	Otro		0				
	TOTAL		0				
Esfera	Azul	2	2				
	Amarillo	1	1				
	Transparente	4	4				
	Otro		0				
	TOTAL		0				
		TOTAL F	202				

Figura A3.11. Bitácora MI ASA 500 micras

Codigo:	MI AC 500 micras	Conteo	TOTAL	TAMAÑOS			
Filamento	Transparente		0				
	Azul	1	1				
	Morado	2	2				
	Negro	12	12				
	Rojo	1	1				
	Amarillo	4	4				
	Naranja	1	1				
	Verde		0				
	Café		0				
	Brillante		0				
	Otro		0				
		TOTAL		0			
Fragmento	Transparente		0				
	Azul	43	43				
	Morado	12	12				
	Negro	5	5				
	Rojo	22	22				
	Amarillo	36	36				
	Naranja	31	31				
	Verde	43	43				
	Café	29	29				
	Brillante		0				
	Otro		0				
		TOTAL		0			
Esfera	Azul	1	1				
	Amarillo	2	2				
	Transparente		0				
	Otro		0				
	TOTAL		0				
			245				

Figura A3.12. Bitácora MI ACA 500 micras