



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
FACULTAD DE INGENIERÍA

**Propuesta de aplicación del mucílago de café
para la remoción de turbiedad en el agua como
un agente coagulante natural**

TESINA

Que para obtener el grado de

Especialista en Ingeniería Sanitaria

P R E S E N T A

Ing. Santiago Banda Santamaría

DIRECTOR DE TESINA

DR. LUIS ANTONIO GARCÍA VILLANUEVA





Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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

Propuesta de aplicación del mucílago de café para la remoción de turbiedad en el agua como un agente coagulante natural

Santiago Banda Santamaría¹

1 Facultad de Ingeniería, División de Ingenierías Civil y Geomática, Departamento de Ingeniería Sanitaria y Ambiental, Universidad Nacional Autónoma de México.

*Autor corresponsal: Departamento de Ingeniería Sanitaria y Ambiental, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México., Av. Universidad, No. 3000 – Ciudad Universitaria, Alcaldía Coyoacán. Ciudad de México. Código Postal 04510. México. Email: santiago.banda26@gmail.com

RESUMEN

La necesidad de satisfacer la demanda de agua segura para uso humano es un desafío latente, por lo que es necesario buscar nuevas alternativas para los insumos del tratamiento requeridos para la remoción de turbiedad con un enfoque sustentable.

Por esta razón, el presente trabajo buscó utilizar el mucílago de café para remover la turbiedad en el agua empleando este residuo como un agente coagulante natural, identificando el pH y la dosis óptima mediante pruebas en jarras. La concentración de mucílago de café se determinó con muestras recolectadas a partir de distintos métodos de extracción. Los valores de pH óptimo fueron de 11 y 12 unidades, se aplicó una dosis óptima de 10 y 20 ml del mucílago del café respectivamente y se alcanzó una eficiencia de remoción de 91.38% para el pH de 12 y 90.99% para un pH de 11. Se comprobó de esta forma que el coagulante orgánico del mucílago de café es una opción factible para la remoción de turbiedad en un agua sintética con características promedio de 652 UNT y 7.82 unidades de pH, específicamente cuando el valor de pH en la mezcla coagulante-agua se encuentra en 11 unidades.

Palabras Clave: Coagulante orgánico, mucílago de café, tratamiento de agua, remoción de turbiedad.

AGRADECIMIENTOS

A mis padres, Verónica y Francisco por ser mis pilares que con amor incondicional siempre han estado como un apoyo, soporte y motivación en cada etapa de mi vida.

A mi familia, que me han enseñado a dirigirme con respeto, compromiso y valor ante todo desafío.

A María Fernanda, por ser la persona con la que comparto alegrías y logros, intentado cada día superarnos y ser mejores.

A mi asesor, que ha demostrado ser un ejemplo a seguir, necesitamos más profesores que impulsen a sus alumnos a conseguir los objetivos y superarse.

A la empresa DM Sustentable, por fomentar el desarrollo de la ciencia y proyectos estudiantiles para encaminar a la industria en un camino sustentable. Y a los agricultores que nos permitieron conocer sus fincas y beneficios cafetaleros para la realización de este trabajo.

Al CONAHCYT, no solo por apoyarme de manera individual a lo largo de mi desempeño académico, sino por seguir promoviendo y ayudando a que cada vez más jóvenes se involucren en la ciencia y la tecnología.

Y finalmente a la UNAM y a la Facultad de Ingeniería, porque gracias a esta institución y a mis profesores he logrado alcanzar uno de mis grandes objetivos, formarme no únicamente como ingeniero geólogo sino también alcanzar el grado de especialista, permitiéndome contribuir a nuestra sociedad de manera más preparada.

Por esto y más, gracias.

ÍNDICE DE TABLAS Y FIGURAS

TABLAS

Fig 2.1. Esquema descriptivo de la OIC	9
Fig 2.2. Producción de café en el mundo	10
Fig 2.3. Partes del fruto de café	13
Fig 3.1 Mapa de ubicación de los beneficios del café	24
Fig 3.2 Proceso de Beneficio en Teocelo	25
Fig 3.3 Gestión de Residuos en Teocelo	26
Fig 3.4 Proceso de Beneficio en Ixhuacán de los Reyes	27
Fig 3.5 Residuos en Ixhuacán de los Reyes	28
Fig 3.6 Puntos de Muestreo	29
Fig 3.7 Muestreo del fruto del café	30
Fig 3.8 Preparación del mucílago en laboratorio	31
Fig 3.9 Preparación y determinación de concentración del mucílago	31
Fig 3.10 Pruebas de jarras.	34
Fig 4.1 Concentración del Mucílago	35
Fig 4.2 Variación de pH en el mucílago de la muestra Lab	36
Fig 4.3 Determinación del pH óptimo de remoción para las muestras del mucílago del café como coagulante.	37
Fig 4.4 Determinación de la dosis óptima de remoción para las muestras del mucílago del café como coagulante.	39
Fig 4.5. Determinación de la dosis óptima para las muestras del mucílago del café como coagulante.	41
Fig 4.6 Relación de pH de mezcla con el porcentaje de remoción	42

TABLAS

Tabla 2.1 Producción de café cereza por estado en México.	12
Tabla 2.2 Etapas de desarrollo del fruto de café.	14
Tabla 2.3 Composición de Mucílago de Café.	18
Tabla 3.1 Nomenclatura de muestreo	29
Tabla 4.1 Valores de concentración de mucílago como Sólidos Totales.	35
Tabla 4.2 Valores de remoción de turbiedad para la determinación del pH óptimo.	38
Tabla 4.3 Resultados de Pruebas de Dosis Óptima.	40
Tabla 4.4 Remoción de turbiedad con coagulantes inorgánicos.	43

Propuesta de aplicación del mucílago de café para la remoción de turbiedad en el agua como un agente coagulante natural.

RESUMEN	2
AGRADECIMIENTOS	3
ÍNDICE DE TABLAS Y FIGURAS	4
1. INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS	7
1.1 Introducción	7
1.3 Objetivos	7
Objetivo General	7
Objetivos Específicos	7
2. ANTECEDENTES	8
2.1 Panorama del café en el mundo	8
Historia del café	8
Situación económica	8
Organismos internacionales	8
2.2 Situación del Café en México	10
Producción y consumo	10
Importaciones y exportaciones de café	11
Tipos de Café	11
Café en Veracruz	12
2.3 Proceso productivo del café	12
Siembra y cosecha	12
Proceso de beneficio	14
2.4 Residuos del beneficio de café	16
Generación	16
Afectaciones ambientales	17
Mucílago del café	18
2.5 Tratamiento del agua	19
Agua para la población	19
Partículas coloidales	19
Coagulación-Floculación	20
Coagulantes	21

Coagulantes Químicos	21
Coagulantes Orgánicos	21
Situación de Coagulantes en México	22
3. METODOLOGÍA	23
3.1 Caso de Estudio	23
3.2 Desarrollo Experimental	28
4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	35
4.1 Concentración del mucílago	35
4.2 Agua sintética y pH del mucílago	36
4.3 Pruebas de pH óptimo	37
4.4 Pruebas de dosis óptima	39
4.5 Comparación con coagulante artificial	43
5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	43
6. REFERENCIAS	45

1. INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

1.1 Introducción

En la sociedad moderna y globalizada existen ciertos productos que tienen una gran importancia por su uso cotidiano y por su presencia internacional. El café es uno de ellos, ya que está presente en la vida diaria de gran parte de la población.

Por lo anterior y teniendo en cuenta que las empresas tanto mexicanas como extranjeras continúan en la búsqueda de mejorar los procesos productivos e industriales para hacerlos sustentables y generar el menor impacto al ambiente, el presente trabajo de investigación busca dar una alternativa a la utilización de los residuos orgánicos de la industria cafetalera para la remoción de turbiedad de aguas contaminadas.

1.2 Hipótesis

La eficiencia del mucílago de café para la remoción de turbiedad en el agua dependerá de la calidad del mismo, que será determinada por el método de extracción del mucílago y el tiempo de fermentación.

1.3 Objetivos

Objetivo General

Generar una propuesta de aplicación del mucílago de café para la remoción de turbiedad en el agua como un agente coagulante natural.

Objetivos Específicos

- Realizar una investigación y recopilación bibliográfica en medios electrónicos e impresos sobre los residuos orgánicos de la industria cafetalera nacional, para la identificación de estos.
- Identificar los diferentes residuos orgánicos generados durante la producción del café para la identificación de las propiedades físico químicas.
- Describir los diferentes usos de los residuos orgánicos provenientes de la industria del café para su aplicación en el tratamiento de agua.

2. ANTECEDENTES

2.1 Panorama del café en el mundo

Historia del café

Existen registros de la historia del café, así como de la interacción entre grano y humano, donde se dice que la planta del café o cafeto, pudo haber tenido origen en una región de Etiopía. (OIC, 2022). Este producto se cultivaba en Yemen desde el siglo XIII (Gotteland & de Pablo V, 2007), incluso se piensa que los cultivos datan de tiempo antes. Fue en Constantinopla durante el siglo XV, donde los primeros establecimientos para su venta conocidos como “Kaveh Kanes” se convirtieron en lugares de cultura, negocios y convivencia. (OIC, 2022)

El café llegó a Europa en el siglo XVII, a manos de los holandeses donde a pesar de las medidas para evitar la exportación de granos fértiles, lograron transportarlos en 1616, para posteriormente cultivarlos en invernaderos, gracias a esto se transformó en una bebida muy popular.

En el siglo XVIII, se desplazaron los grandes cultivos a Sri Lanka, Indonesia y América del Sur, donde la primera plantación se estableció en Brasil en 1727. Pero fue hasta el año 1796, cuando esta semilla fue traída a México, en la región de Córdoba, Veracruz. (OIC, 2022; Gotteland & de Pablo V., 2007; Forum Café, 2018).

Situación económica

El café es un activo con una alta importancia económica a nivel global, incluso ha llegado a ser uno de los productos primarios más valiosos para diversas economías, ya que gracias a su producción, venta y traslado, el café genera empleos para millones de personas (CEDRSSA, 2019). Para países en desarrollo, tiene una relevancia tanto económica como política, ya que es una importante fuente de divisas gracias a su exportación, además de que cotiza dentro de mercados de materias primas y futuros en la bolsa de valores de Londres y Nueva York. (Gómez Posada, 2019)

Existe un alza en los precios internacionales del café desde hace algunos años después de una fuerte caída debido a la pandemia, sin embargo, esto no se compensa con el valor en aumento de los insumos y con el costo laboral, lo que evita que exista un mayor crecimiento de la industria. (USDA, 2022)

Organismos internacionales

La Organización Internacional del Café (OIC) es la principal organización intergubernamental que se ocupa de asuntos cafeteros. Reúne a gobiernos de países exportadores e importadores para

abordar mediante la cooperación internacional, los desafíos a los que se enfrenta el sector cafetero mundial. Sus miembros representan el 98% de la producción mundial de café y más del 67% del consumo mundial.

La OIC funciona en asociación con los Gobiernos, las organizaciones del sector privado, los organismos de desarrollo y los organismos especializados dedicados al café, además de tener relación y trabajo colaborativo con distintas instituciones a nivel global para el desarrollo de los caficultores, así como el desarrollo de una industria rentable y sostenible. Toda esta información se sintetiza en la Fig 2.1.



Fig 2.1. Esquema descriptivo de la OIC (Elaboración propia, 2023). Se muestran distintos temas relevantes para el funcionamiento de la OIC a nivel mundial.

En México el primer organismo gubernamental cafetalero fue la Comisión Nacional del Café creada en 1949, que posteriormente se convertiría en el Instituto Mexicano del Café que a partir de 1956 y hasta 1989 fue la instancia gubernamental encargada de atender al sector cafetalero. Pero a partir de 1993 esa función le fue asignada al Consejo Mexicano del Café. (Centro de Estudios de Finanzas Públicas, 2001). En el 2006 y hasta el 2012, el CMC evolucionó a lo que hoy conocemos como AMECAFE como representatividad de la Comisión Nacional Sistema-Producto Café (CNSPC).

2.2 Situación del Café en México

Producción y consumo

El café es un producto presente en la agricultura de México desde hace más de doscientos años y actualmente ocupa el primer lugar como producto agrícola generador de divisas además de ser un gran generador de empleos. (Cafés de México, 2020)

De acuerdo con los reportes del Servicio de Agricultura Extranjera del Departamento de Agricultura de los Estados Unidos (USDA) generados en 2019 y 2022, así como del Centro de Estudios para el Desarrollo Rural Sustentable y la Soberanía Alimentaria (CEDRSSA, 2019), México es el onceavo productor de café en escala global. En la Fig. 2.2 se observan los porcentajes de producción en el mundo para el café.

México produce café de excelente calidad, ya que diversos factores del medio físico como su topografía, altura, climas y suelos, permiten cultivar variedades clasificadas entre las mejores del mundo (SADER, 2018) y la presencia de la producción del café se encuentra en 15 estados y 480 municipios concentrados en la parte central y sur del territorio nacional, donde actualmente se pueden identificar 49 regiones que integran alrededor de 700 mil hectáreas de cultivo. (Café de México, 2019; USDA, 2022; 2019).

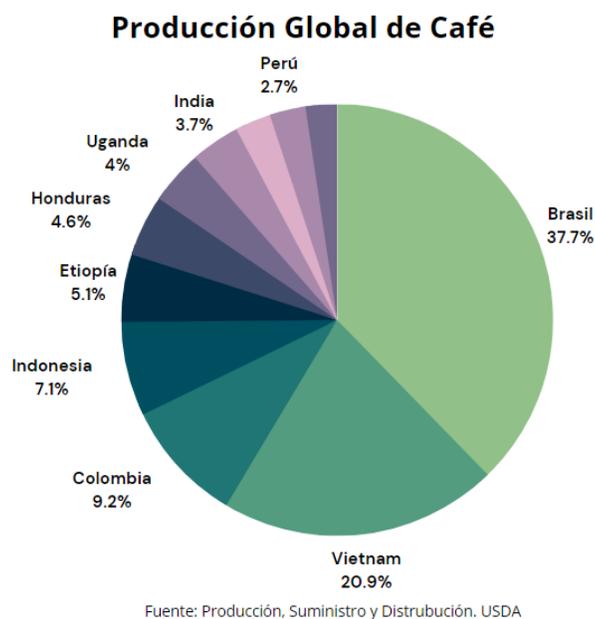


Fig 2.2. Producción de café en el mundo (Elaboración propia con datos de USDA (2022) y CEDRSSA (2019), 2023).

La USDA (2019) señala que México emplea a más de 515,000 productores donde el 85% lo constituye población indígena. Esta población en la mayoría de los casos, no tiene acceso a los

servicios adecuados de abastecimiento, saneamiento y por consecuencia, la oportunidad de dar tratamiento a las aguas y residuos que se generan en estas localidades.

La calidad del café mexicano es reconocida a nivel mundial, sin embargo, el consumo nacional anual por habitante se ubica entre 1.3 a 1.5 kg por persona, siendo un promedio bajo entre países cafetaleros. Según CEDRSSA para el 2016 existió un total de consumo de café de 87,300 toneladas. Esto indica que a pesar de que el consumo de café per cápita sea bajo, es un producto presente para la población y en consecuencia, la producción permanecerá.

Importaciones y exportaciones de café

En el mundo 3 de cada 100 toneladas de café son mexicanas, el país realiza ventas de café verde en más de 42 naciones. (CEDRSSA, 2019). El mercado estadounidense continúa siendo el mayor consumidor extranjero en varias presentaciones del café, como lo son el verde, tostado y soluble de acuerdo con los datos del Centro de Estudios mencionado.

Con cifras de la USDA (2022) para el ciclo productivo 2022-23, se estima que 2.7 millones de bolsas de 60 kg serán consumidas en México, generando un pequeño aumento en el consumo en relación al ciclo anterior, debido a la reapertura de los establecimientos comerciales cerrados en pandemia.

Tipos de Café

El café o cafeto, es un género de árboles de la familia de las rubiáceas, la cual es una de las más diversas entre las plantas con flores, ya que existen aproximadamente 700 especies de esta familia. A pesar de esto, el género *coffea* es el de mayor importancia económica a nivel mundial (Torres, 2022), dentro de este género existen por lo menos 25 especies principales, todas ellas autóctonas del África tropical y algunas islas del Océano Índico, dos de ellas predominan en la industria cafetalera de México y el mundo. (ICO, 2020)

Estas dos especies son el *Coffea arabica* (café Arábica) y el *Coffea canephora* (café Robusta) que presentan diferencias en materia biológica, así como en las propiedades organolépticas en la bebida final y conforman entre el 60-70% y 30-40% de la producción mundial respectivamente. Otras dos especies que se cultivan en mucha menor escala son el *Coffea liberica* (café Libérica) y el *Coffea dewevrei* (café Excelsa) (ICO, 2020; Cielo Abierto Café, 2019; Cafés de México, 2020).

De acuerdo con la Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural, aproximadamente el 86% del café producido en México es de especie Arábica, crecido a distintas altitudes en el territorio mexicano, mientras el 14% de la producción es de café Robusta. Además, cabe subrayar que el 3.2% de la superficie cultivada en café es orgánico. (SAGARPA, 2017; CEDRSSA, 2019)

Café en Veracruz

El estado de Veracruz de Ignacio de la Llave, se compone de 212 municipios, de los cuales de acuerdo con los datos del Servicio de Alimentación Agroalimentaria y Pesquera (SIAP) 100 son los que tienen el cultivo de café en al menos una de sus localidades.

Con respecto al cierre agrícola por municipios realizado por el SIAP en el año 2020 y 2021, Veracruz es el segundo estado mexicano con mayor producción de café en el país, tomando en cuenta la producción de toneladas de café, como se muestra en la tabla 2.1.

Tabla 2.1 Producción de café cereza por estado en México.

Producción por Estado de Café Cereza (t)							
Entidad Federativa		2020	2021	Entidad Federativa		2020	2021
1	Chiapas	377255	384549.72	8	San Luis Potosí	8863.95	9802.43
2	Veracruz	234583.31	229849.02	9	Jalisco	4753.29	4772.17
3	Puebla	159615.41	149549.09	10	Colima	3372.3	3392.58
4	Oaxaca	85681.26	85903.69	11	Estado de México	622.29	639.89
5	Guerrero	38023.6	39132.51	12	Tabasco	419.86	420.95
6	Hidalgo	31422.55	29301.6	13	Querétaro	58	59.7
7	Nayarit	8975.62	9680.18	14	Morelos	36.46	38.68

Fuente: Elaboración propia con datos del SIAP (2023)

2.3 Proceso productivo del café

Siembra y cosecha

El cultivo del café como actividad agrícola depende, de entre otros factores, de la calidad y cantidad de crecimiento de la planta para tener un buen desarrollo y producción. (Arcila P. et al., 2007)

La planta del cafeto tiene 3 fases de desarrollo durante su ciclo de vida, que dependiendo de las condiciones o del sistema de cultivo, puede ser hasta de 20-25 años. (Arcila Pulgarín, 2007 cap. 2) En la primera fase de desarrollo vegetativo, se forman las estructuras no reproductivas como las raíces, ramas y hojas. En la fase reproductiva se forman flor y fruto, es aquí donde

existe la mayor explotación agrícola. Finalmente la senescencia o envejecimiento, donde se deteriora la planta, disminuyendo la producción. (Arcila Pulgarín, 2007 cap. 2)

El fruto del café es una drupa compuesta por diversas partes como se observa en la Fig. 2.3.

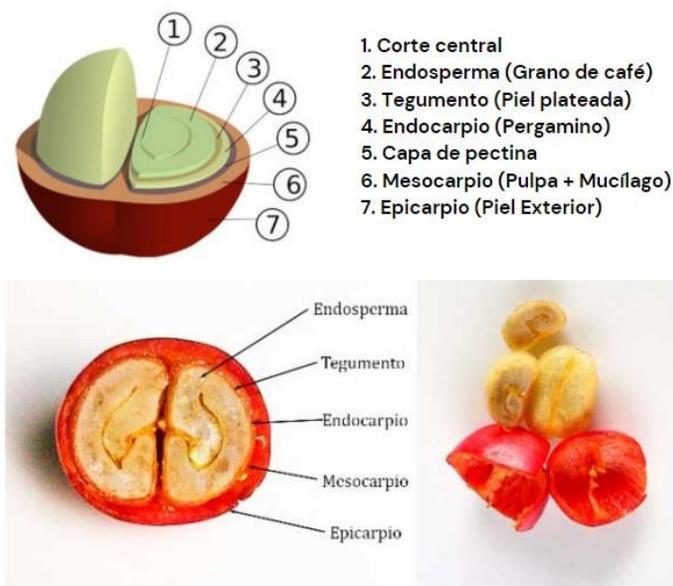


Fig 2.3. Partes de fruto de café (Elaboración propia, 2023). *Adaptado de (Café Tierra y Nube, 2021; CIAL, 2022)

La pulpa de la cereza está compuesta por el epicarpio y el mesocarpio de la fruta, las cuales son las dos capas más externas y representan el 43.2% (Arcila Pulgarín, 2007) en base húmeda (bh). El color del epicarpio o “piel de la cereza” dependerá de la variedad de café y de la madurez del mismo varía desde verde, amarillo, rojo intenso, inclusive violeta o negro. (Prieto Duarte, 2002; Marín L. et al, 2003). El mesocarpio, es la capa gruesa de tejido esponjoso de aproximadamente 5 mm de espesor, el cual es rico en azúcares y mucílagos. Este mesocarpio recubre y protege a la semilla del café, que se compone por dos granos de caras planas (Oliveros-Tascón and Roa-Mejía, 1995).

Los granos están revestidos por una doble membrana: la primera es el endocarpio, de color amarillo pálido, el cual es duro y frágil, que se conoce como pergamino, este representa el 6.1% bh. Y la segunda, fina y adherida al grano, conocida como película plateada que representa el 0.2% bh. El endospermo (café verde) representa el 38.9% bh y el 55.4% del fruto en base seca. Finalmente, el mucílago representa el 11.8% del fruto en base húmeda. (Salazar et al., 1994; tomado de Puerta Quintero & Arias, 2011)

Para el presente trabajo es de interés la segunda etapa, la etapa reproductiva, donde para la recolección y procesamiento del fruto, se atraviesan diferentes estados posteriores al desarrollo de la planta y floración, descritos por distintos autores y recopilados en Arcila Pulgarín (2007) como se muestra en la Tabla 2.2.

Tabla 2.2 Etapas de desarrollo del fruto de café.

	Tiempo	Fase	Fruto	Semilla
Etapa 1	Semanas 1 a 7 (0 - 50 días)	Crecimiento lento	Aproximadamente un fósforo	-
Etapa 2	Semana 8 a 17 (50 - 120 días)	Crecimiento acelerado	Llega a su tamaño final	Semilla con consistencia gelatinosa
Etapa 3	Semana 18 a 25 (120 - 180 días)	Desarrollo completado	Fruto gana peso	Totalmente desarrollada y con consistencia sólida
Etapa 4	Semana 26 a 32 (180 - 224 días)	Comienza a madurar	Desarrollado	-
Etapa 5	Después de semana 32 (+ de 224 días)	Sobremaduración	Cambia coloración a violeta y se seca	Pierde peso

Fuente: Elaboración propia adaptada de Arcila Pulgarcín, 2007.

De acuerdo a CENICAFÉ (2007), el grado de maduración de la fruta es uno de los factores más importantes, ya que influye en la calidad de la cosecha y el rendimiento del cultivo, hasta llegar a la calidad de la taza de café. Cuando los frutos se encuentran en la cuarta etapa de crecimiento (de 210 a 224 días), se presentan las mejores condiciones para el proceso de beneficio, ya que el mucílago actúa como lubricante, favoreciendo el proceso de despulpado al requerir una menor fuerza aplicada.

Debe de cuidarse mucho la cosecha ya que al recolectar cerezas inmaduras con tonalidades verdes y amarillas, se está realizando una cosecha prematura generando pérdidas en peso y rendimiento del cultivo, debido a que tendrán un menor tamaño y a que pueden carecer de las condiciones apropiadas para el consumo. Por otro lado, una cosecha tardía dará como resultado una gran cantidad de frutos sobre maduros o incluso secos, donde se pierden propiedades organolépticas, importantes para la comercialización, además de estar más tiempo susceptibles a alteraciones por agentes externos dañinos. (CENICAFÉ, 2007)

Proceso de beneficio

El proceso del beneficio del café, se define como el conjunto de pasos y operaciones para la transformación del fruto cosechado en el producto de venta final, el cual dependiendo del giro industrial puede ser el grano de café en distintas etapas o presentaciones, como el café seco, tostado o molido (Prieto Duarte, 2002).

Dentro del proceso productivo general del café, se tienen dos métodos para la obtención de dicho producto final, el método seco o el método húmedo (Prada, 2014), el procedimiento completo se describe a continuación (Barrios Orozco, 2018; IICA, 2010; Oliveros-Tascón & Roa-Mejía, 1995; Samayoa Toledo et al., 2014):

1.- Selección

Operación tecnológica enfocada a eliminar la materia extraña (por ejemplo: piedras, ramas, hojas) y clasificar las cerezas de café de acuerdo al tamaño, densidad y grado de maduración. Adicionalmente se tienen 2 subprocesos de selección:

- a) Separación por flotación: se colocan los frutos en un tanque con agua donde flotarán principalmente dos tipos que deben de ser removidos. En primer lugar los frutos secos sobremaduros o enfermos, en segundo lugar los frutos sin semilla o donde ésta se encuentre dañada o podrida, lo cual genera una capa de aire formada por el endospermo causando que flote.
- b) Clasificación por tamaño: el café cosechado se compone de frutos de tamaño similar, y en poco porcentaje, un tamaño ligeramente menor. Esto es para el ajuste de la maquinaria siguiente (despulpadora), pero principalmente para lograr un proceso de secado uniforme.

2A.- Proceso seco (vía seca)

Tratamiento que consiste en secar las cerezas de café ya sea mediante el efecto combinado de la luz del sol y la aireación o máquinas secadoras, para obtener café en cáscara. Esto es generalmente seguido por la remoción mecánica de la cáscara (pericarpio) seca para producir café verde natural.

2B.- Proceso húmedo (vía húmeda)

Tratamiento que consiste en remover mecánicamente la pulpa (exocarpio) de las cerezas de café en presencia del agua seguido por alguno de los dos procesos siguientes:

a) La remoción del mucílago (mesocarpio) mediante la fermentación u otro método, seguido por el lavado para obtener café pergamino, (generalmente seguido por el secado y la trilla para producir café verde lavado)

b) El secado directo de los granos sin pulpa dentro del pergamino mucilaginoso seguido por la trilla para producir café verde semi-lavado.

Todo el proceso realizado por vía húmeda, tiene los siguientes procedimientos:

I. Despulpado

Operación usada en la vía húmeda para remover la pulpa (exocarpio) tanto como sea posible del mucílago (mesocarpio) por medios mecánicos.

II. Proceso de fermentación

Proceso natural inducido en el que bacterias aerobias y anaerobias digieren el mesocarpio mucilaginoso adherido al pergamino del café despulpado para permitir así su eliminación mediante el lavado.

III. Lavado

Etapa donde se eliminan los restos de mucílago o miel degradada, así como los materiales disueltos durante la fermentación, para obtener un grano de café pergamino limpio. Esta operación puede realizarse tanto por separadox como en pilas o tanques de fermento. El agua se cambia dependiendo de la cantidad de residuos liberados y se pueden utilizar paletas de madera para mover el café y clasificarlo.

IV. Secado del café pergamino

Operación usada para reducir el contenido de humedad del café pergamino hasta un nivel de 10 a 12.5% mediante hornos o en condiciones de temperatura específicas. Esto para permitir posteriormente la trilla bajo condiciones técnicas satisfactorias y que no afecte el almacenaje del café.

V. Trillado

Remoción del pergamino seco del café (pericarpio) del café natural para producir café verde.

3.- Pulido

Operación tecnológica usada para remover la película plateada (perispermo) en el café verde a través de medios puramente mecánicos.

4.- Clasificación

Operación donde se elimina materia extraña, fragmentos de café y granos defectuosos del café verde, así como para separar los granos de café sanos de acuerdo a su forma, tamaño y peso.

5.- Tostado

Tratamiento de calor que produce cambios físicos y químicos fundamentales en la estructura y composición del café verde, oscureciendo los granos, además de fomentar el desarrollo del aroma y sabor característico del café tostado.

6.- Molienda

Última operación mecánica usada para fragmentar los granos de café tostado en diferentes tamaños dependiendo del método de preparación a realizar, lo cual da como resultado el café molido.

2.4 Residuos del beneficio de café

Generación

En el proceso productivo antes mencionado, únicamente se aprovecha el 5% del peso del fruto fresco para la preparación final de la bebida y el 95% lo constituyen los residuos orgánicos que contienen diferentes composiciones químicas. (Nuvar, L. & Rojas M., 2018).

Durante las etapas de beneficio se generan diversos subproductos del café, los cuales pueden ser valorizables para un posterior aprovechamiento o en sentido contrario, también causar un impacto negativo al ambiente si no se tratan, transportan o disponen de una manera adecuada.

Los principales subproductos orgánicos de acuerdo a Samayoa Toledo et al. (2014) y ANACAFÉ, (2019) de este proceso son:

- Pulpa del café, es el subproducto más voluminoso ya que representa el 56% del volumen del fruto. Debido a la carga orgánica de este subproducto, puede generar problemas ambientales en cuerpos de agua. Puede utilizarse como abono orgánico o para el compostaje.
- Mucílago, el cual se analizará ampliamente en un apartado a continuación, ya que es de relevancia para este trabajo.
- Agua miel, es el agua residual del proceso de despulpado y lavado, por lo que sus características dependen de los dos anteriores. Se pueden generar lodos útiles para el compostaje al someter este residuo a procesos aerobios y de espesamiento.
- Pergamino suelto (cascarilla), este subproducto no representa riesgo contaminante dentro del beneficio húmedo y es un material que puede utilizarse como combustible sólido en el secado mecánico del café. Genera aproximadamente 4,000 kilocalorías por kilogramo.

Afectaciones ambientales

En ocasiones los subproductos o residuos orgánicos generados durante el beneficio del café, terminan con una inadecuada disposición en cuerpos de agua, generando afectación al medio natural, ya que al suministrar una cantidad considerable de materia orgánica (contenida en los residuos) el cuerpo receptor buscará degradarla por medio de bacterias, mismas que consumen el oxígeno disuelto contenido en el agua. Si se vertieran estos subproductos en un cuerpo receptor, el ecosistema acuático presente, así como la química del agua se verían afectados, ya que se desencadenan cambios descritos por Samayoa Toledo et al. (2014) como son:

1. Modificación de la acidez natural del agua a un pH 2.5, debido al aporte de los ácidos orgánicos (acético, butírico, propiónico) que se producen durante la degradación de la materia orgánica en una etapa anaerobia.
2. Disminución del oxígeno disuelto (OD) en el agua, debido a la demanda de oxígeno que necesitan los microorganismos para realizar el proceso de degradación.
3. Incremento de la turbiedad del agua, como consecuencia de los polifenoles presentes y de la gran cantidad de sólidos suspendidos (ANACAFÉ, 2019).

Mucílago de café

El mucílago (o mesocarpio) del café es una capa de tejidos translúcidos compuesta de agua, azúcares y sustancias pécticas, que actúa como hidrogel (Barreto Pardo et al., 2020; Puerta Quintero & Arias, 2011), el cual se localiza entre la pulpa y la cáscara de la semilla, este queda al descubierto cuando el grano es despulpado. El mucílago representa el 11.8% del fruto en base húmeda y su remoción es necesaria para facilitar el proceso de deshidratación, secado y conservación de las características de calidad del café pergamino (IICA, 2010, p. 58).

Así como se describió al abordar el proceso de beneficio en el capítulo anterior, el desprendimiento del mucílago no es inmediato debido a la pectina, sustancia que forma un gel con el agua y el azúcar del mucílago (Peñuela Martínez et al., 2011). Por lo que se necesita aplicar fricción por medio de un desmucilagador mecánico o se debe de esperar lo suficiente en el tanque de fermentación para retirarlo mediante el lavado. Sin embargo, debe de cuidarse el tiempo de la fermentación, ya que un tiempo excesivo produce una sobre fermentación, afectando la calidad del café.

La caracterización de este subproducto ha sido el objeto de estudio de varias investigaciones realizadas por distintos autores. En la Tabla 2.3 se observan las composiciones como resultado de dichos trabajos.

Tabla 2.3 Composición de Mucílago de Café.

Braham y Bressani tomado de Nadal (1959)	Braham y Bressani (1978)	Puerta y Arias (2011)
Agua - 84.2%	Sustancias pécticas totales 35.80%	Carbohidratos 85.5%
Proteína - 8.9%	Azúcares Totales ½ - 45.8%	Proteínas 9.3%
Azúcar - 4.1%	Azúcares Reductores - 30.0%	Cenizas 4.3%
Ácido Péctico - 0.91%	Azúcares no Reductores - 20.0%	Ácidos (Láctico) 1.7%
Cenizas 0.7%	(Celulosa + Ceniza) - 17.0%	Alcohol (Etanol) 1.2%
-	-	Lípidos 1.2%

Fuente: (Elaboración propia, 2023) *De acuerdo a distintos autores

En las condiciones actuales de la industria, la remoción del mucílago para el beneficio del café se realiza por alguno de los dos métodos siguientes: a) Remoción mecánica (desmucilagadora), y b) Remoción por fermentación natural. (Puerta Quintero & Arias, 2011; IICA, 2010; Samayoa Toledo et al. 2014)

La cantidad de mucílago en los frutos varía con la madurez del fruto, es así como los frutos maduros y frescos contienen en promedio 10.4% (con un intervalo entre 1.1% a 27.3%) en peso de mucílago y los granos despulpados un 18.8% (Puerta Quintero & Arias, 2011).

La producción del café en los beneficios determina las cantidades de mucílago y aguamiel de café generadas, esto también varía dependiendo de la época de cosecha y zona cafetalera. En general, se puede decir que por cada tonelada de café cereza que se procese pueden obtenerse entre 80 y 140 kilogramos de mucílago, según la madurez y la cantidad de agua usada en el desmucilaginado (Puerta Quintero & Arias, 2011).

2.5 Tratamiento de agua

Agua para la población

Considerando el panorama global actual, el garantizar servicios de higiene y saneamiento para la población, así como el suministrar agua que sea limpia, segura, asequible y continua para uso humano, es una de las necesidades más importantes de toda sociedad y representa un desafío en diversos ámbitos. (ONU, s.f.)

Se requiere considerar todos los aspectos de calidad en este líquido vital que la población usará de diversas maneras. Los aspectos microbiológicos, químicos y organolépticos son sólo algunos de los que se regulan y para los cuales existen parámetros normativos de calidad del agua. (OMS, 2011)

Partículas coloidales

Una de las características físicas y organolépticas a considerar para la aceptación de la población es la turbiedad en el agua, que generalmente se reconoce como un criterio estético, ya que un agua turbia podría generar el rechazo de este recurso. Adicionalmente, podría indicar directa o indirectamente la presencia de algún constituyente dañino en el agua. (Comisión Nacional del Agua, sf, p. 25).

La meteorización y erosión de las rocas, suelos y diversa materia tanto orgánica e inorgánica, es uno de los procesos generadores de turbiedad en aguas superficiales, ya que ocasiona la presencia de materia suspendida, coloidal y disuelta en la misma (Trussell et al., 2012).

Las principales partículas generadoras de esta característica se conocen como coloides, partículas con una geometría plana las cuales tienen un tamaño que varía desde 1 nm a 1 mm. (CONAGUA, sf., p. 27). La importancia en la remoción de estas partículas de acuerdo con Trussell et al., (2012) recae en que: a) reducen la calidad del agua por la turbiedad, b) pueden tener agentes infecciosos como virus, bacterias y otros microorganismos contenidos en los coloides, los cuales pueden protegerse de las reacciones de desinfección (CONAGUA, sf., p. 27), y c) algunos componentes como metales tóxicos pueden encontrarse adsorbidos en dichas partículas.

Estas partículas suspendidas no pueden sedimentar y ser removidas debido a su tamaño y a su baja densidad específica, lo que genera una mínima velocidad de sedimentación. Adicionalmente, no se forman agregados entre ellas, ya que se repelen entre sí por la carga eléctrica superficial negativa que presentan en su superficie. Por lo que estos coloides están estabilizados y pueden permanecer en suspensión durante mucho tiempo. (N.F. Gray, 2005; Veolia, 2023)

La turbiedad en el agua se debe monitorear de manera continua en cualquier proceso de tratamiento, ya que es un parámetro incluido en la NOM-127-SSA1-2021 y, adicionalmente funciona como mecanismo de control en la eficiencia de los procesos de tratamiento, así como la calidad del efluente tratado. (CONAGUA, sf., p. 68). Dicha norma establece los límites

permisibles de calidad para el agua de uso y consumo humano, en la cual se indica que para el año 2023, la turbiedad del agua a la población debe tener como máximo 4.0 Unidades Nefelométricas de Turbiedad (UNT), cambiando este límite máximo permisible (LMP) a 3.0 UNT a partir del año siguiente.

A pesar de que la turbiedad del agua sólo sea un parámetro normado en la NOM-127-SSA-2021 para el agua potabilizada y no un parámetro para el agua como efluente de una Planta de Tratamiento de Aguas Residuales (parámetro no incluido en las primeras tres normas de la SEMARNAT) se mencionan los valores de UNT anteriores, ya que es el tipo de contaminación a remover aplicando los procesos de coagulación – floculación.

En el tratamiento de aguas el sistema de clarificación convencional es uno de los más utilizados, donde de manera inicial el caudal a tratar atraviesa rejillas para la retención de sólidos de gran tamaño, posteriormente se puede incluir un desarenador para remover partículas discretas, por lo que los sólidos remanentes son de naturaleza coloidal, mismos que se encuentran en suspensión, y deben de ser removidos por algún proceso posterior. (Mazille, 2018)

Coagulación-Floculación

El proceso empleado más importante para la remoción de los coloides es la coagulación-floculación, el cual consiste en la adición de compuestos químicos, induciendo el contacto coagulante-materia en suspensión, con el objetivo de desestabilizar dichos sólidos fomentando la generación de agregados y adsorción de constituyentes disueltos para favorecer la sedimentación y su subsecuente remoción. (CONAGUA, sf.; Barreto Pardo et al., 2020; OMS, 2011; Hendricks, 2006; Trussell et al., 2012)

Este proceso tiene dos puntos importantes, referentes a la elección adecuada del coagulante dependiendo de la naturaleza de las partículas, la dosis y el ajuste de pH para alcanzar una alta eficiencia de remoción y generación de los contactos entre el coagulante elegido y las partículas presentes en el agua para la formación de flóculos (Hendricks, 2006; N.F. Gray, 2005). El tratamiento se compone de dos procesos unitarios: coagulación y floculación.

La primera parte, la coagulación, consiste en neutralizar las partículas de carga para desestabilizar los sólidos en suspensión limitando la repulsión entre partículas, esto se logra por la aplicación de energía al realizarse en un tanque de mezcla. Se considera una primera etapa química ya que se añaden compuestos inorgánicos como sales de aluminio o hierro, las cuales se hidrolizan y forman precipitados insolubles. En la coagulación también pueden incorporarse polímeros orgánicos ya que cuentan con numerosos sitios ionizados para neutralizar la carga de las partículas. (Veolia, 2023; Huerta Calleja, 2022)

La segunda parte, la floculación, comienza cuando las partículas neutralizadas o atrapadas empiezan a chocar y a fusionarse mediante una mezcla lenta, para formar partículas más grandes llamadas flóculos. Este proceso puede darse de forma natural o puede mejorarse mediante el aporte de un floculante polimérico adicional para aumentar el tamaño de los flóculos (Veolia, 2023).

Los dos factores más importantes en el proceso de coagulación-floculación, posterior a conocer la naturaleza del agua a tratar, son el pH y la dosis del coagulante. Ambos factores se determinan con el fin de conocer la dosis óptima al mejor pH, es decir el momento en donde existe mayor remoción de contaminante con la mayor estabilidad de los flóculos formados (Restrepo, 2009).

La dosis de coagulante condiciona el funcionamiento del tratamiento, es decir, si la cantidad de coagulante no es la óptima, será imposible tener una buena clarificación. Esto porque al suministrar una dosis menor no se neutralizarán totalmente las cargas de las partículas, disminuyendo la formación de flóculos y por consecuencia, no se logra remover la turbiedad. Por otro lado, si la dosis es superior a la óptima, se invierte la carga de las partículas, formando flóculos muy pequeños en gran cantidad, los cuales tendrán una velocidad de sedimentación muy lenta por lo que no se podrán remover y la turbiedad se mantendrá. (Huerta Calleja, 2022)

Considerando lo anterior, se deben determinar los parámetros para coagulación-floculación mediante una prueba de jarras y así obtener un proceso óptimo de remoción de sólidos suspendidos. Este ensayo permite la medición y control de los efectos que tiene la dosis de coagulante empleado y el pH, en diferentes combinaciones donde se debe de medir la turbiedad y el pH del agua sobrenadante. (N.F. Gray, 2005)

Coagulantes

Las sustancias conocidas como coagulantes, son principalmente sales metálicas entre las cuales las de uso común para el tratamiento de agua son el cloruro férrico, sulfato de aluminio, sulfato férrico y sulfato ferroso. (Huerta Calleja, 2022)

Coagulantes Químicos

Los coagulantes inorgánicos, empleados tanto para el tratamiento de potabilización como de aguas residuales, reaccionan por el pH alcalino y se hidratan formando precipitados de hidróxidos ya sean de aluminio o hierro, que actúan al facilitar que los coloides se adhieran y precipiten. (Huerta Calleja, 2022)

Son los coagulantes más utilizados en el tratamiento de agua debido a su efectividad, pero cabe mencionar que el volumen de lodos que se generan es alto. Esto conlleva una mayor inversión al momento de tratar y disponer los residuos generados por este proceso. De acuerdo a (Huerta Calleja, 2022) usar coagulantes químicos, puede reducir la densidad del lodo y la capacidad de deshidratación del mismo.

Los coagulantes mayormente usados son inorgánicos, compuestos por sales metálicas de aluminio o hierro, pero debido a las problemáticas ambientales -generación de altos volúmenes de lodos de tratamiento con características tóxicas- (Barreto Pardo et al., 2020 tomado de Abebe, et al., 2016) y a la salud -asimilación del aluminio en el organismo, debido a la solubilidad del mismo asociándose a enfermedades neurológicas como el Alzheimer- (N.F. Gray, 2005; Barreto Pardo et al., 2020) que potencialmente pueden generar este tipo de agentes químicos, los coagulantes naturales se presentan como una alternativa ambientalmente viable y económicamente factible para la remoción de turbiedad. (Manzo Garrido, 2023)

Coagulantes Orgánicos

Como se mencionó en el apartado del proceso de coagulación, algunos polímeros naturales pueden funcionar tanto como coagulantes como floculantes para el tratamiento de agua. Esto

permitiría la valorización de ciertos compuestos naturales que en la actualidad se consideran como residuos orgánicos.

Entre los agentes coagulantes-floculantes naturales (orgánicos) se tiene registro de la utilización de múltiples coagulantes naturales con resultados favorables para la remoción de la turbiedad. De acuerdo a Manzo Garrido (2023) el mucílago de nopal y la semilla de Moringa *oleifera* son una óptima opción debido a su abundancia y fácil acceso en México.

De acuerdo con Huerta Calleja, (2022) los coagulantes orgánicos se emplean cuando se desea reducir la cantidad de lodo generado en el tratamiento. Adicionalmente, indica que el mejor escenario para el uso de coagulantes orgánicos son aguas a tratar con una alta turbiedad, ya que, de lo contrario pudieran aumentarla.

Del trabajo presentado por Manzo Garrido, (2023) es pertinente destacar que el coagulante natural mayormente usado a nivel internacional es la Moringa oleifera ya que ha presentado una alta eficiencia de remoción de turbiedad, así como de metales y otros compuestos. Para la revisión realizada en dicha investigación, se observa que la mayoría de los artículos mencionados, utilizan esta especie como valor de referencia para comparar la remoción de otros coagulantes.

Algunos de los beneficios de los coagulantes naturales están relacionados con su bajo costo, la disponibilidad que presentan, su biodegradabilidad, así como la posibilidad de revalorizar residuos de cadenas productivas existentes. Huerta Calleja, (2022) menciona que la combinación de coagulantes naturales e inorgánicos puede ser la manera más efectiva para un tratamiento de agua sustentable.

Situación de Coagulantes en México

Al día de hoy, no existen estudios en México que demuestren el uso y la efectividad del mucílago del café como un coagulante orgánico, debido a esto, el presente trabajo es un precedente importante de una alternativa útil y efectiva para el tratamiento de aguas en el país. Tomando en consideración que es el cultivo con mayor importancia económica en el territorio nacional con la posibilidad de revalorizar una sustancia considerada como residuo en la industria cafetalera.

Comparativa de coagulantes de Mucílago de Café

Se han desarrollado trabajos aprovechando el mucílago de café como coagulante natural para la remoción de turbiedad en el agua, como el reportado por Barreto Pardo et al., (2020) donde se mencionan dos tipos de coagulantes de mucílago de café obtenidos por métodos diferentes, el primero de una mezcla de mucílago acuoso generado en una planta de beneficio, y el segundo de una solución empleando un material particulado del mucílago después de un tratamiento térmico de la primera solución. En los resultados se observa que los dos coagulantes siguen una tendencia, aunque presentan diferentes eficiencias de remoción. El primer coagulante extraído de mucílago de café, removió el 65% de la turbiedad, con una dosis óptima de 300 mg/L. Por otro lado, el segundo coagulante tuvo una remoción entre el 30% - 39%. En ninguno se reporta el pH óptimo para la coagulación.

Adicionalmente, en el trabajo de Cendales & Cañón, (2016), se realizaron múltiples pruebas de jarras comparando la eficiencia de coagulantes inorgánicos (Cloruro férrico) contra el mucílago de café con dos maneras de extracción, una acuosa, la cual no consiguió remover turbiedad y otra con una solución salina que presentó una remoción del 29% con una dosis de 120 mg/L. Las bajas eficiencias reportadas fueron debido a la poca variación del pH al hacer las pruebas de jarras, al realizarlas con un intervalo de 7 a 8 unidades de pH. Para dichas pruebas, las dosis empleadas estuvieron en el rango de 20-240 mg/L.

3. METODOLOGÍA

3.1 Caso de Estudio

Localización

La región de estudio se localiza en el estado de Veracruz de Ignacio de la Llave, en la porción central, ya que es uno de los estados con mayor producción en cuanto a cultivo de café y se contaba con el contacto de productores en dicha entidad. El café que se produce en el estado de Veracruz es reconocido internacionalmente debido a las características que le otorgan una excelente calidad. Entre los municipios productores, se consideran los de Teocelo e Ixhuacán de los Reyes para la realización del presente estudio.

Finca del café y características del sitio

Se pretenden analizar los procesos empleados comúnmente por los productores en México, por lo que se consideran dos plantas de beneficio para el café (Fig. 3.1), el primero ubicado en Teocelo, con coordenadas 19.37901° N, 96.96861° W y una altitud de 1,335 m.s.n.m, el segundo en el municipio de Ixhuacán de los Reyes, con coordenadas 19.30855° N, 97.00900°W, con una altitud de 1,250 m.s.n.m.

Los dos beneficios cultivan y producen variedades de café de la especie *Coffea arabica*, donde aplican un proceso de beneficio húmedo, sin embargo, cada planta realiza un proceso de extracción de mucílago distinta, razón por la cual, podrían variar las características del mucílago y la eficiencia de dicho residuo orgánico como coagulante.

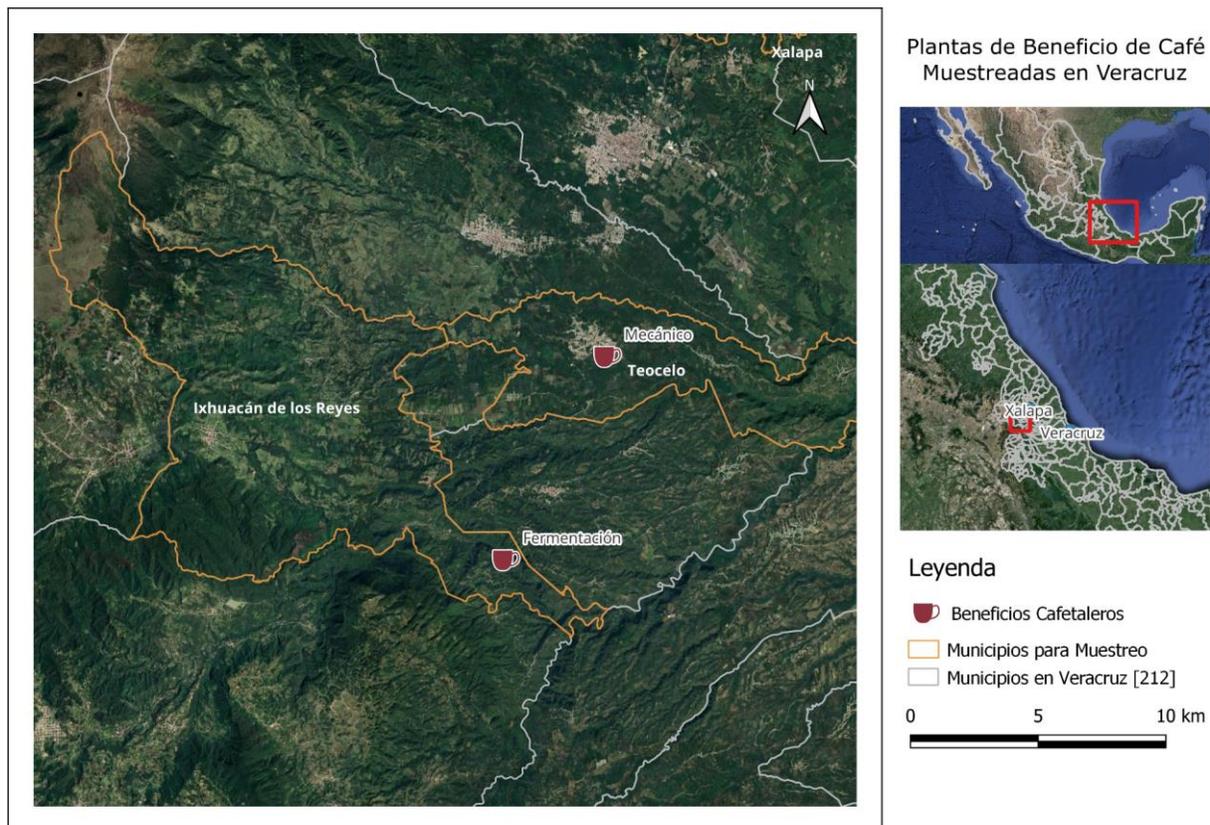


Fig 3.1 Mapa de ubicación de los beneficios de Café (Elaboración propia, 2023). Se observan los dos beneficios de café, en la parte central derecha, el ubicado en Teocelo y en la parte central inferior el perteneciente al municipio de Ixhuacán de los Reyes.

Proceso *in situ* y residuos

El beneficio en Teocelo, perteneciente a la empresa DM Sustentable, produce variedades de café con la característica de no aplicar ningún producto agroquímico para su cosecha, aumentando así la calidad del fruto recolectado y grano procesado, obtenido en las fincas de la empresa.

El proceso de beneficio se realiza como se muestra en la Fig. 3.2 con una central de procesamiento de café de la marca “Penagos” donde el café es despulpado Fig. 3.2a para posteriormente ingresar a la desmucilaginadora donde se remueve con agua el residuo de interés Fig. 3.2b, los granos de café continúan en el proceso de beneficio para ser lavados Fig. 3.2c y secados. Por otro lado, el mucílago ahora acuoso se conduce por una canaleta para su desalojo y posterior almacenamiento Fig. 3.2d.



Fig 3.2 Proceso de Beneficio en Teocelo (Elaboración en conjunto con Bello G., 2023). Imágenes: a) Maquinaria para despulpar. b) Equipo desmucilagador. c) Café lavado. d) Canaleta de transporte para mucílago.

El beneficio de DM Sustentable aplica un programa de manejo para sus residuos mostrado en la Fig. 3.3, ya que la piel y pulpa de la cereza se conducen a una tolva (Fig. 3.3a) donde se presan para extraer la mayor cantidad de humedad posible (Fig. 3.3b) y reusarlos en un proceso posterior de compostaje (Fig. 3.3c). El mucílago líquido se almacena en una cisterna para uso en el riego de los cultivos (Fig. 3.3d).



Fig 3.3 Gestión de Residuos en Teocelo (Elaboración en conjunto con Bello G., 2023). Imágenes: a) Tolva para cereza. b) Cáscara de cereza fresca. c) Composta en vivero. d) Cisterna de almacenamiento para mucílago.

El beneficio en Ixhuacán de los Reyes, perteneciente a un particular, obtiene el café de la finca del mismo dueño, así como de los agricultores cercanos, que venden la cereza del café cosechado para ser procesado. Aquí se aplican distintos herbicidas y plaguicidas para la conservación y cuidado de los cafetos. La técnica de remoción de mucílago es una de las más empleadas e incluso tradicionales para los agricultores de pequeña y mediana producción: la fermentación.

Particularmente en este beneficio (Fig. 3.4a), después del despulpado por medio de una despulpadora de 3 discos (Fig. 3.4b), se coloca el grano de café en una alberca como se muestra en la Fig. 3.4c para dejarse a temperatura ambiente y sin agua, alrededor de 24 horas. Esto fomenta el proceso de fermentación y separación del mucílago con el grano de café, y a continuación se realiza un lavado utilizando agua potable para remover los restos orgánicos fermentados como se muestra en la Fig. 3.4d para su posterior secado en hornos rotatorios (Fig. 3.4e).



Fig 3.4 Proceso de Beneficio en Ixhuacán de los Reyes (Elaboración en conjunto con Bello G., 2023). Imágenes: a) Vista general de beneficio. b) Despulpadora de 3 discos. c) Tanque de fermentación. d) Tanque de lavado, con aguamiel. e) Hornos rotatorios para secado.

El método de determinación para el momento de lavado del café es empírico, ya que al tomar con la mano los granos que se fermentan y frotarlo contra los dedos, se puede sentir si la capa mucilaginosa continua adherida al grano. Cuando esta se puede desprender fácilmente o ya no se encuentra adherida, se continúa con el proceso de beneficio. Para esta etapa de fermentación se cuenta con 2 tanques de fermentado y 1 tanque de lavado.

En materia de residuos, al agua empleada para el lavado (Fig. 3.5c) se le da un reciclaje al utilizarla para el siguiente proceso de despulpado. Esta agua reutilizada con una alta carga orgánica por la presencia del mucílago disuelto así como la piel y pulpa de la cereza, se conduce por una canaleta y un tornillo de arquímedes para su disposición final en una de las laderas de la finca (Fig. 3.5 a,b). Adicionalmente, la cascarilla que es removida durante el proceso de secado, se vende o se utiliza como combustible orgánico (Fig. 3.5d).



Fig 3.5 Residuos en Ixhuacán de los Reyes (Elaboración en conjunto con Bello G., 2023). Imágenes: a) Disposición de residuos orgánicos. b) Transporte no controlado hacia arroyo cercano. c) Agua de lavado para siguiente despulpado. d) Cascarilla de café.

3.2 Desarrollo Experimental

Con la investigación desarrollada en el capítulo de antecedentes, así como con la determinación de los procesos generadores de residuos durante el proceso del café y consolidando un acuerdo con los responsables de las dos fincas mencionadas, se realizó una visita al estado de Veracruz de Ignacio de la Llave a las zonas productivas y plantas de beneficio de café previamente mencionadas.

Muestreo

Se pretende obtener muestras de los residuos del proceso de beneficio del café, específicamente en las etapas donde se genere, fermente y/o se remueva el mucílago. Por lo anterior, se muestreó en cada proceso mencionado en el apartado previo, para los análisis posteriores.

Para la toma de las muestras acuosas se emplearon recipientes plásticos de 4 litros, previamente lavados. Posterior al muestreo y determinación de datos de identificación, proceso, fecha y hora de la muestra, los recipientes se almacenan en una hielera para mantenerlos en refrigeración a una temperatura promedio de 4°C.

Se tomaron muestras de los distintos procesos de extracción de mucílago en las plantas de beneficio cafetaleras. En Teocelo se muestreó el agua almacenada en la cisterna de mucílago (Fig. 3.6c), debido a que no se tuvo producción para el beneficio en el momento de la visita. Este mucílago tenía tres días en el almacenaje.

Para el beneficio con proceso artesanal, se muestreó en el desfogue de la alberca de fermentación (Fig. 3.6a), dicha muestra presentaba ya un día de fermentación. Adicionalmente, se muestreó en la alberca de lavado del proceso del día anterior (Fig. 3.6b), es decir, dos días de fermentación.

al momento de la toma.



Fig 3.6 Puntos de Muestreo (Elaboración en conjunto con Bello G., 2023). Imágenes: a) Desfogue del tanque de fermentación. b) Aguamiel - aguas de lavado. c) Almacenamiento de cisterna por remoción mecánica.

Se asignaron claves de nomenclatura para el desarrollo de la fase experimental con la información anterior, como se describe a continuación en la Tabla 3.1:

Tabla 3.1 Nomenclatura de muestreo

Nombre de Muestra	Punto de Muestreo	Tiempo de Fermentación (Días)
“Mec”	Salida de máquina desmucilagadora (Remoción Mecánica)	3
“Fer”	Desfogue del tanque de fermentación	1
“Fer2”	Agua de lavado del grano de café	2

Fuente: Elaboración Propia, 2023

Adicionalmente, se obtuvieron cerezas de café de la finca de Ixhuacán de los Reyes (Fig. 3.7), para la obtención de una muestra de mucílago en laboratorio. Esta muestra presentaba frutos de tamaños, variedades y coloraciones distintas.



Fig 3.7 Muestreo de fruto de café (Elaboración en conjunto con Bello G., 2023). Frutos recolectados en campo.

Obtención de mucílago

De la muestra recolectada en campo, se despulpan manualmente siete kilogramos de cereza de café en el laboratorio (Fig. 3.8a), obteniendo tres kilogramos aproximadamente, de granos con el mucílago adherido. En este paso se despulpan los frutos que presentaban coloraciones rojizas, eliminando los granos tanto verdes como sobremaduros, esto para simular el proceso real que sucede en los beneficios de café (Fig. 3.8b).

Estos granos de café cereza (Fig. 3.8c), se colocan en una palangana y se le añaden 4 litros de agua para fomentar la fermentación durante 24 horas a temperatura ambiente (Fig. 3.8d). Posteriormente, se procede al filtrado de las muestras acuosas recolectadas en campo y preparada en el laboratorio con un tamiz del no. 8 (2.36 mm) para separar los sólidos de gran tamaño (Fig. 3.9 a, b), del mucílago del café y tener muestras sin contaminantes que afecten la eficiencia del coagulante orgánico.



Fig 3.8 Preparación de Mucilago en laboratorio (Elaboración en conjunto con Bello G., 2023). Imágenes: a) Desulpado manual. b) Frutos descartados del desulpado. c) Granos de café verde. d) Adición de agua para el proceso de fermentación.

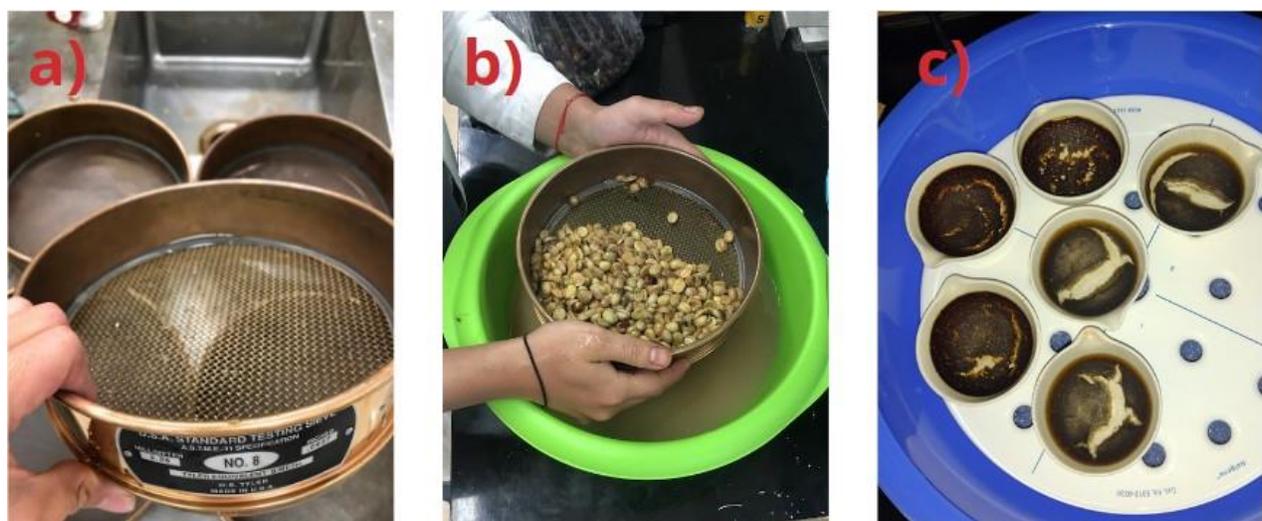


Fig 3.9 Preparación y determinación de concentración de mucilago. (Elaboración en conjunto con Bello G., 2023). Imágenes: a) Malla utilizada para remoción de sólidos de gran tamaño. b) Filtrado de muestras. c) Cápsulas de porcelana después de deshidratación.

A continuación, se determina la concentración de mucílago en las distintas muestras tanto de campo como la obtenida en el laboratorio, como ST (Sólidos Totales) con base en la metodología realizada por Cendales & Cañón (2016):

1. Se pesan en una balanza analítica (OHAUS, Galaxy 160) cápsulas de porcelana a peso constante por triplicado, por cada muestra.
2. Se agregan 20 ml de cada muestra de mucílago en cada cápsula y posteriormente se introducen en un horno a una temperatura constante de 105° C, durante 24 horas.
3. Una vez deshidratadas las muestras de las cápsulas (Fig. 3.9c), se retiran del horno y se dejan enfriar en un desecador para pesar las cápsulas y obtener los sólidos totales por una diferencia de masa.

De esta manera se puede determinar la concentración de mucílago por litro de cada muestra.

Eficiencia de Coagulantes

Para determinar la eficiencia de remoción de turbiedad de un coagulante ya sea químico u orgánico, se aplican pruebas o ensayos de jarras, donde primero se determina el pH óptimo con el cual existe una mejor remoción de sólidos posteriormente se determina la dosis óptima de coagulante en ml. La técnica de prueba de jarras realizada fue de la siguiente manera:

1. Para la preparación del agua sintética se añaden 0.5 gramos de caolín por cada litro de agua potable. Se agita la mezcla en una parrilla agitadora (StableTemp, Cole-Parmer) para garantizar una mezcla completa, a una velocidad de 500 rpm.
2. Se miden 900 ml de agua sintética en las probetas y se vierten en vasos de precipitados de un litro que se colocan en el aparato de jarras (Phipps & Bird, Modelo PB-700 Jar Tester).
3. Se ajusta el aparato de jarras a una velocidad de 100 rpm para posteriormente agregar la dosis de coagulante en los vasos de precipitado, dando lugar a la mezcla rápida (coagulación) que tiene una duración de un minuto.
4. Posteriormente se cambia a una mezcla lenta (floculación), ajustando la velocidad a 40 rpm durante 15 minutos.
5. Transcurrido el tiempo de mezcla lenta se detiene el funcionamiento, levantando las paletas mezcladoras, permitiendo que los flóculos sedimenten durante 15 minutos, para extraer una muestra del sobrenadante y realizar la lectura de turbiedad con el turbidímetro (HACH, 2100N Turbidimeter).

Se deben de realizar las pruebas de jarras, inicialmente para la determinación del pH óptimo de remoción, esto se logra al modificar el pH de cada uno de los vasos o jarras, para la presente investigación se ajustó el pH para medio alcalino con NaOH 1N y en medio ácido con HCl 1N. Una vez ajustado el pH, se procede a aplicar una misma dosis de coagulante a las muestras de agua sintética siguiendo la metodología descrita anteriormente.

Al identificar el valor de pH óptimo para la remoción de turbiedad, se realizan nuevamente pruebas de jarras con la solución al valor de pH determinado, variando la dosis de coagulante en cada jarra. De esta manera se conoce el valor de dosis óptima.

Los coagulantes químicos que se aplicaron en otras pruebas de jarras para realizar la posterior comparativa, son los que tienen una mayor presencia en la industria, el cloruro de hierro (FeCl_3) y sulfato de aluminio ($\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$) cada uno con una concentración de 10 mg/L de coagulante.

Para cada una de las muestras de mucílago de café provenientes de los beneficios cafetaleros se realizaron pruebas de jarras en dos días diferentes, por otro lado, para la muestra de mucílago extraída en laboratorio se realiza a los tres, seis y ocho días de fermentación.

Para determinar la eficiencia del mucílago de café como coagulante orgánico, en las pruebas de pH óptimo se colocan 40 ml de mucílago para cada jarra, siguiendo la metodología recomendada por Cendales & Cañón (2016), ya que reporta un mayor porcentaje de remoción de sólidos. La prueba se hizo con una variación en jarras con pH de 5 hasta 12. En la segunda prueba de jarras, se dosifican volúmenes que van desde los 10 ml de mucílago, hasta llegar a un volumen de 70 ml, con intervalos de 10 ml entre cada uno.

Para la determinación de la eficiencia de remoción se utiliza la siguiente ecuación (Barreto Pardo et al., 2020):

$$\% \text{ Remoción} = \frac{UNT_{inicial} - UNT_{final}}{UNT_{inicial}} * 100$$

Donde

UNT: Unidad Nefelométrica de Turbiedad

Diversas pruebas de jarras realizadas se presentan en la Fig. 3.10 como se muestra a continuación:

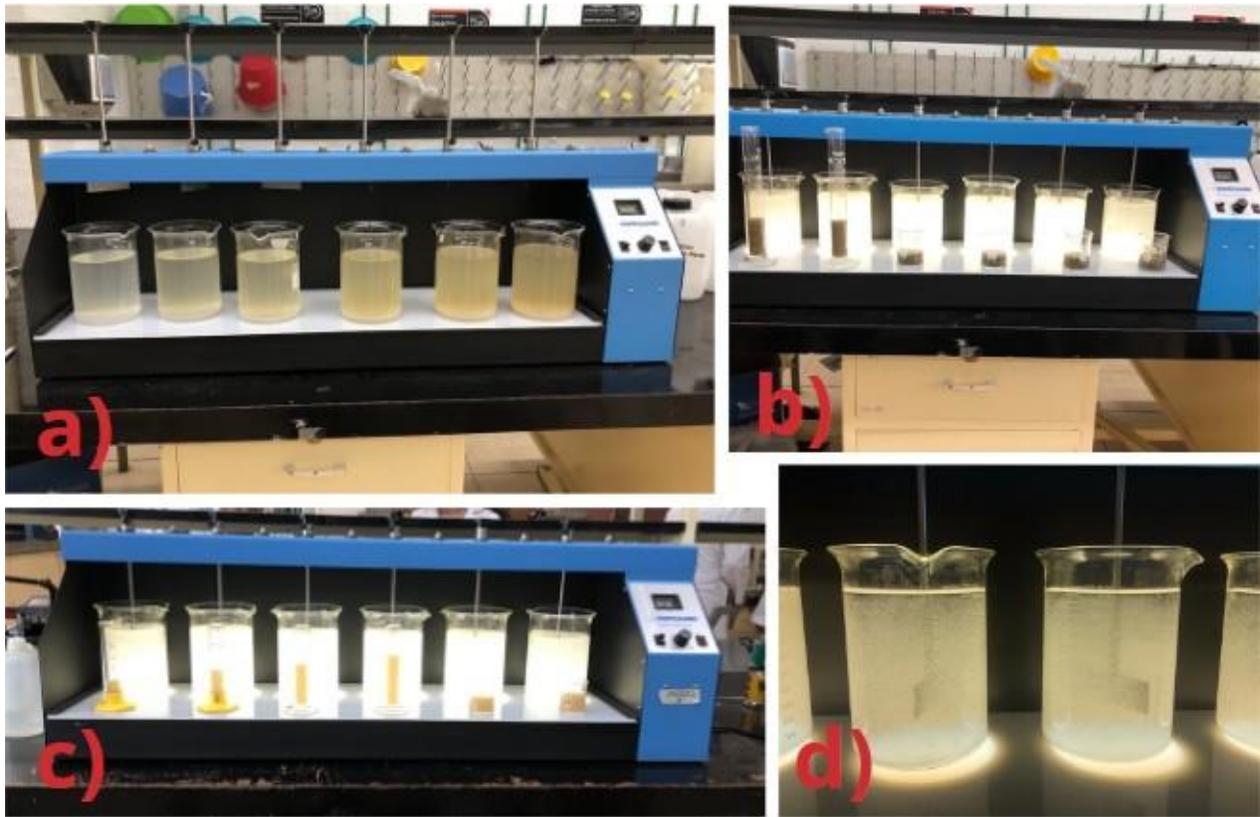


Fig 3.10 Pruebas de jarras. (Elaboración en conjunto con Bello G., 2023). En las imágenes se muestran pruebas realizadas con distintas dosis de coagulante de mucílago de café como se aprecia en *b)* y *c)*. En *a)* se muestran los diferentes resultados al remover turbiedad aplicando el mucílago de café como agente coagulante. En *d)* se aprecia la formación de flóculos debido a la adición de sulfato de aluminio durante los procesos experimentales.

3.3 Determinación de variables

Para la presente investigación se reconocen las variables involucradas para la determinación de la eficiencia de remoción de turbiedad en el agua, aplicando el mucílago de café como coagulante de la siguiente manera:

Variable dependiente: Eficiencia de remoción de la turbiedad.

Variables independientes: Dosis de coagulante, pH óptimo, método de extracción del mucílago y tiempo de fermentación.

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1 Concentración de mucílago

En la Fig 4.1 se muestran las diferentes concentraciones de mucílago en las muestras de acuerdo con los distintos métodos de extracción, considerando los distintos días de recolección.

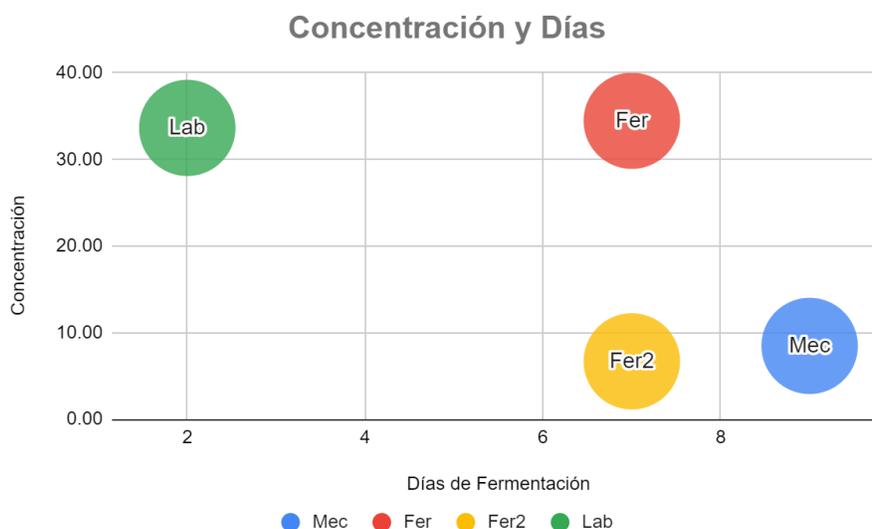


Fig 4.1 Concentración de Mucílago (Elaboración propia, 2023). En el eje de las ordenadas se observan las concentraciones en g/L mientras que en el eje de las abscisas se observan los días de fermentación al momento de la determinación de ST. Dónde: “Mec” representa la muestra por una extracción mecánica, “Fer” representa el drenaje del tanque de fermentación, “Fer2” la muestra proveniente del agua de lavado y “Lab” la extracción realizada en laboratorio.

En la Tabla 4.1, se observan 4 columnas, las cuales representan el método mecánico “**Mec**”, la fermentación hecha artesanalmente en campo “**Fer**” y “**Fer2**” y la extracción artesanal hecha en laboratorio “**Lab**”.

Tabla 4.1 Valores de concentración de mucílago como Sólidos Totales.

	Mec	Fer	Fer2	Lab
Concentración (g/L)	8.47	34.48	6.69	33.65
Días	9	7	7	2

Fuente: Elaboración Propia, 2023

Las muestras “Fer” y “Lab” tienen concentraciones aproximadas a pesar de que el tiempo de fermentación sea de una semana de diferencia, por lo cual se puede interpretar que los días de fermentado no afectan la concentración de sólidos totales, sin embargo ambas muestras se obtuvieron con un proceso muy similar, por lo que se puede inferir que el método de extracción es importante para una concentración del mucílago acuoso.

La muestra “Mec” representa la extracción por medio del desmucilagador, donde se desprende el mucílago del grano sin pasar por un proceso de fermentación. Los días de fermentado son debido al almacenamiento desde la planta de beneficio hasta la determinación de ST, y con estos resultados, se reafirma que el método de extracción influye en la concentración de sólidos totales de mucílago, pero no necesariamente afecta en la remoción de turbiedad.

La muestra “Fer2” presenta la menor concentración en comparación con las muestras “Fer” y “Lab” que comparten características de extracción, esto debido a la dilución por el agua de lavado en la planta de beneficio, por lo que se decide no continuar con dicha muestra.

Para las pruebas de jarras del presente trabajo, se considera como dosis de coagulante al volumen de mucílago de café empleado en cada ensayo.

4.2 Agua sintética y pH de mucílago

Las condiciones del agua a tratar de acuerdo con la metodología descrita, fueron en promedio: turbiedad inicial de 625 UNT y un pH de 7.82. Sin la adición de ningún otro compuesto más que el caolín previamente mencionado.

Para el caso del pH del mucílago del café, específicamente la muestra “Lab” obtenida en laboratorio, este residuo se presenta como un medio ácido desde los días de muestreo, sin embargo aumenta ligeramente el grado de acidez conforme transcurren los días de fermentación, manteniéndose dentro de un rango de 4.03 - 3.38 para los primeros 8 días, esta información se observa en la Fig 4.2.

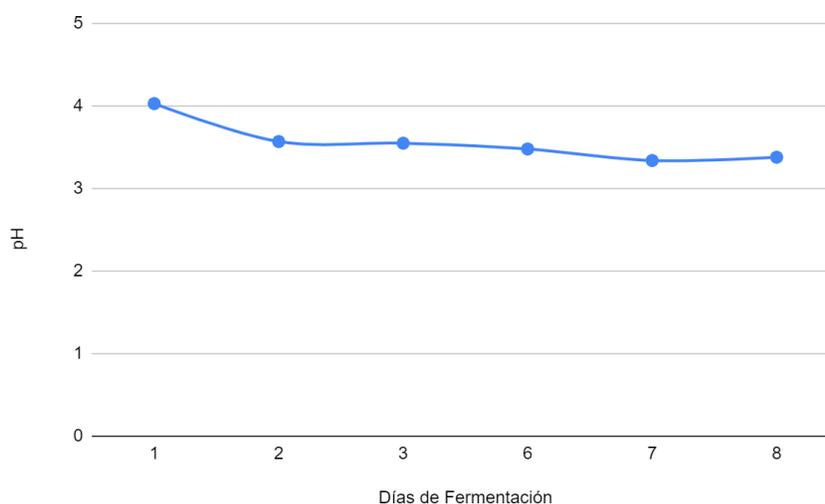


Fig 4.2 Variación de pH en el mucílago de la muestra Lab (Elaboración propia, 2023). Se observa una relación directa entre los días de fermentación y la disminución del pH del mucílago de café.

4.3 Pruebas de pH óptimo

Las pruebas de jarras que se realizaron para la determinación del pH óptimo de coagulación, se llevaron a cabo con las distintas muestras obtenidas, cada una a distintos días de fermentación debido al desfase de tiempo dentro del muestreo y la experimentación.

Las muestras de mucílago obtenido en laboratorio y campo, pudieron ser analizadas en distintos días, desde el primer día de fermentación para la muestra “Lab” y continuando con los días 3, 6 y 8 en este proceso de fermentación. Los resultados de todas las pruebas se presentan a continuación en la Fig 4.3:

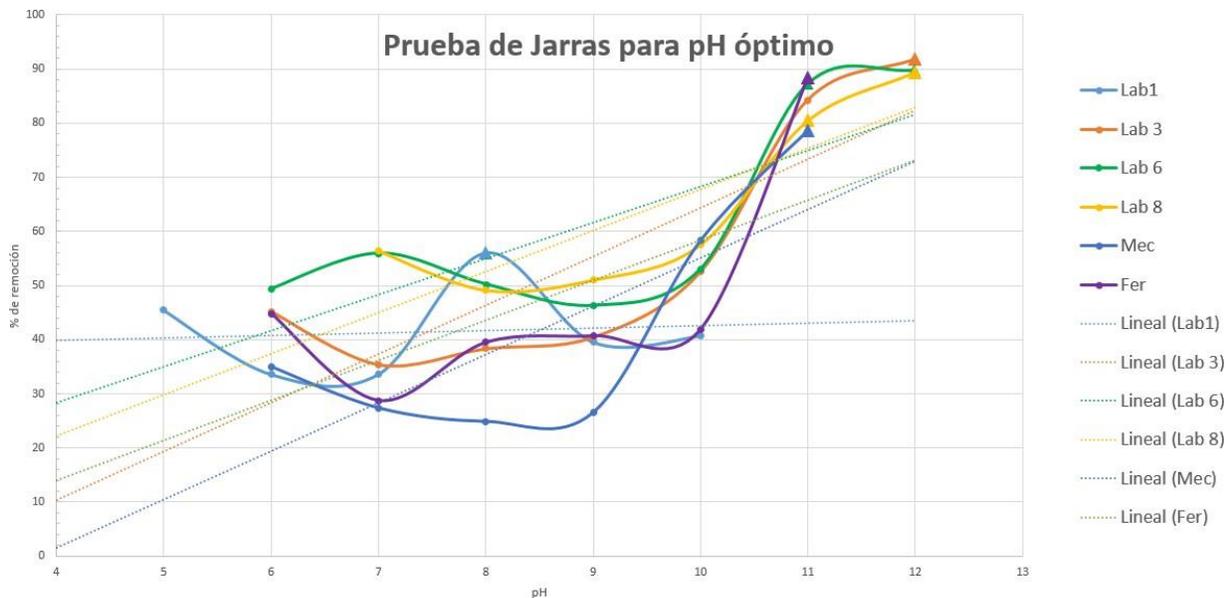


Fig 4.3 Determinación del pH óptimo de remoción para las muestras de mucílago de café como coagulante. (Elaboración propia, 2023). Se observan las curvas de comportamiento para cada muestra a diferente pH generando un distinto porcentaje de remoción. Para cada curva, se presentan marcas puntuales y se remarca el porcentaje de remoción mayor con un triángulo. Adicionalmente se observan las líneas de tendencia para cada muestra, representadas por líneas punteadas. Las muestras “Lab” son las obtenidas en el laboratorio e indican el número de días de fermentación. La muestra “Mec” representa la obtenida por remoción mecánica y “Fer” la obtenida en el tanque de fermentación.

En la imagen anterior se puede observar una tendencia general positiva, esto implica que los mejores porcentajes de remoción tienden a encontrarse en un pH alcalino.

La muestra Lab-1 es la única curva que no sigue dicho comportamiento, con una línea de tendencia prácticamente horizontal, siendo el valor máximo de remoción para un pH de 8 y teniendo un valor de remoción máximo por debajo de la media para las otras muestras.

Dentro de las muestras que siguen la misma tendencia, el coagulante con una menor eficiencia es la muestra “Mec”, esto puede ser atribuible a la baja concentración de sólidos que presentó,

posiblemente como consecuencia del método de extracción (desmucilagadora) o al tiempo de almacenamiento que se tenía al momento de la recolección de la muestra, el cual fue de 3 días en el beneficio, sin algún método de preservación.

La segunda menor eficiencia pertenece a la muestra “Fer”. Esto indica que a pesar de que la concentración de sólidos se mantenga constante (Tabla 4.1 Concentraciones de Mucílago), el cambio de la composición química debido a los días de fermentación repercute en la eficiencia de su uso como coagulante.

En los resultados obtenidos para las muestras Lab 3 y Lab 6 se observa que el comportamiento de ambos en un rango de pH neutro, es distinto por casi el 10% de remoción, pero a medida que se alcalinizan las distintas jarras para las muestras, los valores de remoción son muy parecidos, encontrándose en un rango de 87.17% - 91.80% de eficiencia.

Analizando únicamente resultados puntuales, la muestra Lab 3, fue la que presentó una mejor eficiencia, siendo hasta del 91.80%, seguida por Lab 6 (89.77%) y el Lab 8 (89.46%), donde en todas las muestras el pH óptimo fue de 12.

Sin embargo, el mejor resultado en la eficiencia de remoción para las pruebas de pH óptimo, de acuerdo a las líneas de tendencia, se obtuvo con la muestra del laboratorio para la prueba realizada a 8 días de fermentación (Lab 8).

De las pruebas de jarras realizadas, se obtuvieron los resultados que se muestran en la Tabla 4.2 como los mayores valores de remoción de turbiedad manteniendo una dosis de coagulante, es decir, el pH óptimo para cada muestra.

Tabla 4.2 Valores de remoción de turbiedad para la determinación del pH óptimo.

Coagulante	Días Fermentación	pH	Vol Coagulante	pH Mucílago	%
Mec	10	11	40	3.2	78.55
Fer	8	11	40	3.8	88.41
Lab	1	8	40	4.03	56.01
Lab	3	12	40	3.55	91.80
Lab	6	11	40	3.48	87.17
Lab	6	12	40	3.48	89.77
Lab	8	11	40	3.38	80.46
Lab	8	12	40	3.38	89.46

Fuente: Elaboración Propia, 2023

Para la muestra Lab-6 y Lab-8 se consideran los valores de remoción a pH de 11 y 12 respectivamente, esto para analizar la variación de resultados obtenidos en la siguiente corrida experimental.

De esta etapa de la experimentación, se concluye que la eficiencia del mucílago de café como coagulante depende de dos variables significativas, las cuales son: el tiempo de fermentación y potencialmente el método de extracción, siendo la primera la predominante sobre el porcentaje de remoción.

4.4 Pruebas de dosis óptima

Con los resultados obtenidos del pH óptimo para cada muestra, se procede a la determinación de la dosis óptima para el agua sintética preparada. En cada corrida, se preparan las jarras con el pH determinado anteriormente y se varían las dosis de coagulantes. Los resultados obtenidos se presentan en la Fig. 4.4 los cuales se discuten a continuación:

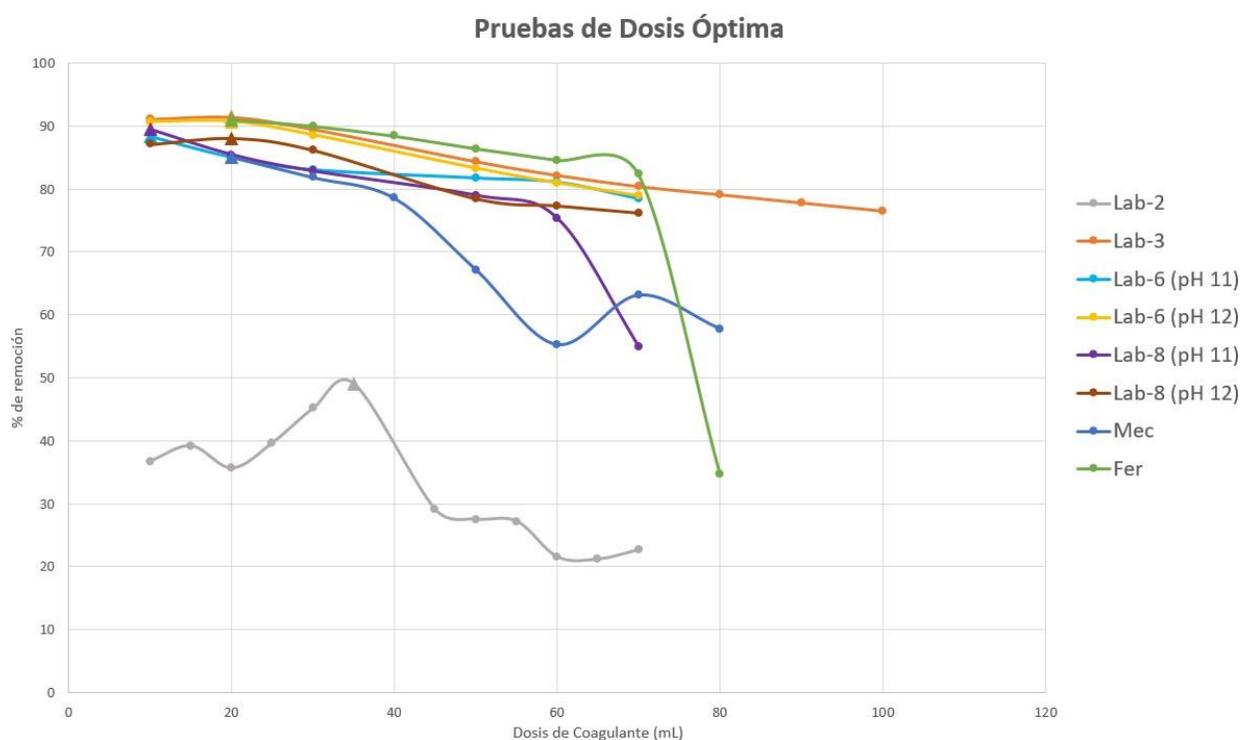


Fig 4.4 Determinación de la dosis óptima de remoción para las muestras de mucílago de café como coagulante. (Elaboración propia, 2023). Se observan las curvas de comportamiento para cada muestra, empleando diferentes volúmenes de coagulantes. Para cada curva, se presentan marcas puntuales y se remarca el porcentaje de remoción mayor con un triángulo.

Se observan las 8 curvas correspondientes a las muestras de mucílago aplicadas como coagulante orgánico. De manera general se tienen 2 grupos de tendencias, el primero únicamente con la muestra Lab-2, donde se observa un porcentaje de remoción máximo de aproximadamente 50%, disminuyendo la eficiencia a medida que la dosis aumenta.

El segundo grupo contiene a las 7 pruebas restantes con una tendencia negativa, donde a medida que el volumen de coagulante aumenta, la eficiencia de remoción disminuye. Las muestras “Fer” y “Lab-8” (con un pH de 11) presentan una disminución drástica en la eficiencia desde los 70 mL suministrados.

Las mejores eficiencias de remoción se presentan con bajas dosis de coagulante siendo el valor de 20 mL el más recurrente al presentarse en 5 muestras. Para el caso de las muestras “Lab-8” y “Lab-6” ambas con un pH de 11, la dosis que presenta mejores resultados es de 10 mL. Únicamente para la muestra Lab-2 la dosis óptima se encuentra entre 30-35 mL.

Los resultados evidencian que a un menor valor de pH la dosis óptima para remoción es menor también. Si el pH de la solución es de 12, los datos indican que la dosis óptima será de 20 mL.

De los resultados obtenidos en las pruebas mencionadas, se seleccionaron los valores de remoción y dosis óptima para cada uno de los coagulantes de mucílago de café, eliminando la muestra “Lab-2” debido al bajo valor de remoción de dicha muestra. En la tabla 4.3 se resumen los datos obtenidos en la que se aprecian los porcentajes de remoción:

Tabla 4.3 Resultados de Pruebas de Dosis Óptima.

Coagulante	Días Fermentación	pH	Vol Coagulante	pH Mucílago	%
Lab-6	6	11	10	3.48	88.27
Lab-8	8	11	10	3.38	89.41
Fer	13	11	20	3.7	91.00
Mec	15	11	20	3.56	85.07
Lab-3	3	12	20	3.55	91.38
Lab-6	6	12	20	3.48	90.70
Lab-8	8	12	20	3.38	88.07

Fuente: Elaboración Propia, 2023

Para realizar una comparativa entre dichos valores, se elabora la Fig. 4.5 de la cual se obtiene el siguiente análisis de resultados.

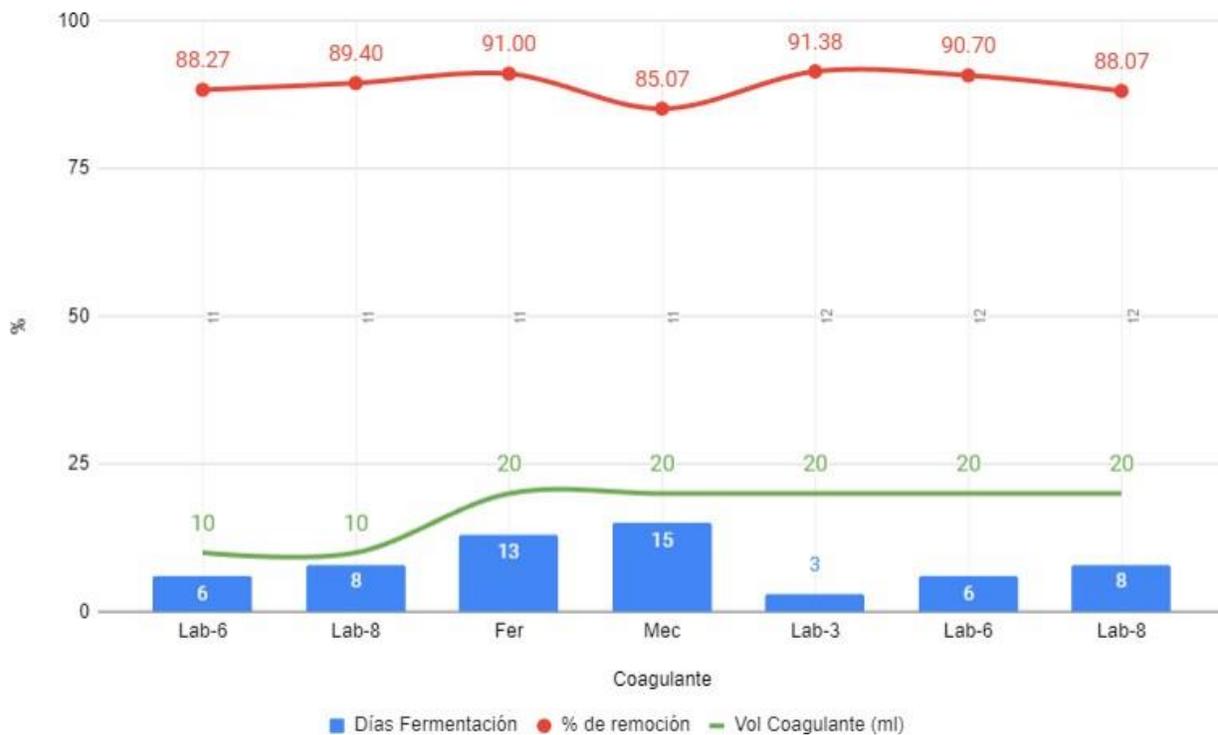


Fig 4.5. Determinación de la dosis óptima para las muestras de mucílago de café como coagulante. (Elaboración propia, 2023). Se observan distintos datos en la imagen, valor de pH de la prueba, volumen de coagulante, porcentaje de remoción y días de fermentación.

Analizando la Fig. 4.5, se puede notar una similitud en todas las pruebas con una concentración de 20 ml para los distintos días de fermentación. Se observa que el porcentaje de remoción fluctúa por los mismos valores en el siguiente orden de acuerdo con los días de fermentación 88.27%, 89.40%, 91.00% y 85.07% para los valores de pH de 11 y los porcentajes de remoción en un pH de 12 son de 91.38%, 90.70% y 88.07%.

La diferencia de porcentajes que hay para los 2 valores de pH resulta ser mínima, se puede observar con las pruebas “Lab-6” cuya diferencia es de 2.5% al 5% de remoción, siendo un valor pequeño para una unidad de pH. Con estos resultados se demuestra que el mucílago de café se presenta como una opción de coagulante orgánico y no aumenta la turbidez como lo reporta Cendales & Cañón, en su trabajo del 2016.

De la misma manera, los cambios con las dosis de 10 a 20 ml de mucílago de café pueden resultar pequeños, presentando una diferencia del 5% de remoción como máximo. Los mejores porcentajes de remoción se encuentran con valores de 20 ml de mucílago de café con un porcentaje de remoción de 91.38% de pH 12. Con un pH de 11 resulta que el mejor porcentaje de remoción se obtiene con la misma dosis de mucílago de café.

De acuerdo con los resultados obtenidos y en comparativa con Barreto Pardo et al., en su trabajo del 2020, se demuestra que la determinación del pH óptimo resulta ser predominante para una mejor remoción de turbiedad.

Se observa que los porcentajes de remoción se mantienen dentro de un rango $\pm 5\%$, con cambios en los días de fermentado, el tipo de extracción y la dosis de coagulante utilizada.

Finalmente se analizaron los datos obtenidos de las lecturas de pH de la mezcla agua sintética – mucílago de café posterior al proceso de coagulación floculación, es decir, dosificando los distintos volúmenes de coagulante con el agua sintética. Donde se observa que a medida que la dosis de coagulante aumentaba, el pH inicial de la jarra se veía afectado de mayor manera por la naturaleza ácida del mucílago.

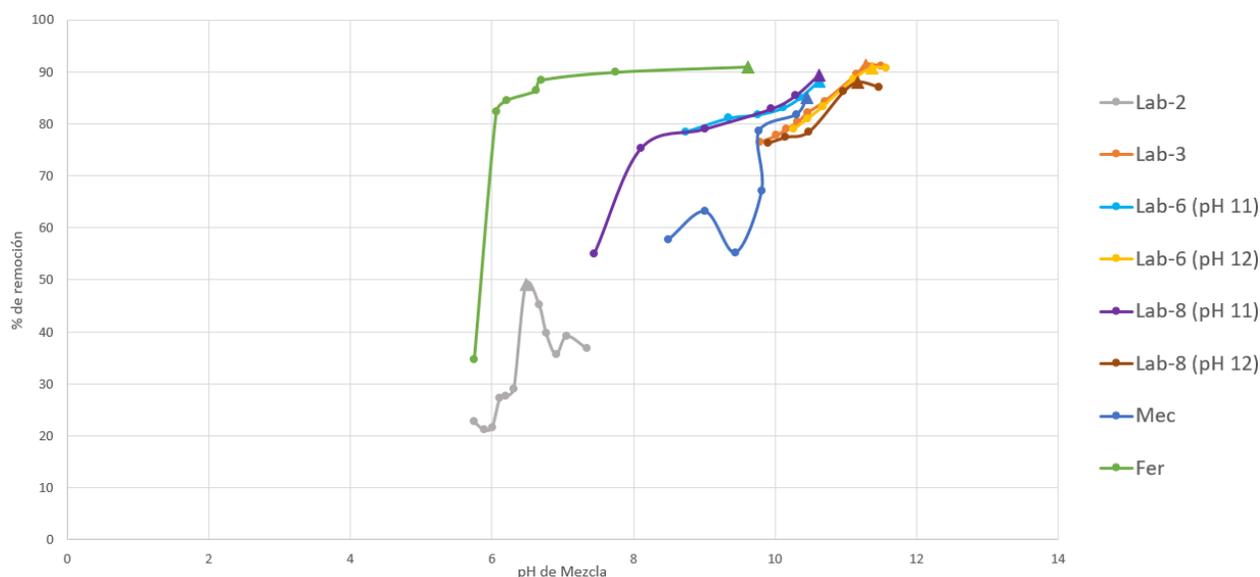


Fig 4.6 Relación de pH de mezcla con el porcentaje de remoción. (Elaboración propia, 2023). Se observan las curvas de comportamiento para cada muestra, empleando diferentes volúmenes de coagulantes, midiendo el pH final. Para cada curva, se presentan marcas puntuales y se remarca el porcentaje de remoción mayor con un triángulo. Las muestras “Lab” son las obtenidas en el laboratorio e indican el número de días de fermentación, donde se observan los valores con un pH de 11 y 12 para los días 6 y 8 de fermentación. La muestra “Mec” representa la obtenida por remoción mecánica y “Fer” la obtenida en el tanque de fermentación.

Realizando el análisis de la Fig. 4.6, se demuestra que la mayoría de los coagulantes sometidos a las pruebas de jarras presentan la mayor eficiencia de remoción para un pH cercano a 11. Esto se comprueba al observar que los experimentos con jarras ajustadas a un pH inicial de 11 se modifican generando una disminución en la remoción. Por otro lado, para las jarras con un pH inicial de 12, al añadir el coagulante orgánico se modificó este valor a un pH de 11, presentando una mejor eficiencia de remoción cuando la mezcla final, se encontraba cercano a este valor.

4.5 Comparación con coagulante artificial

Los coagulantes inorgánicos que se evaluaron, se sometieron a las mismas pruebas y una metodología de preparación de agua sintética igual, dando como resultado los datos que se presentan en la tabla 4.4.

Tabla 4.4 Remoción de turbiedad con coagulantes inorgánicos.

Coagulante	pH	Vol Coagulante (mL)	%
pH Óptimo			
Sulfato de Aluminio	8	16	99.74
Cloruro Férrico	9	8	99.76
Dosis Óptima			
Sulfato de Aluminio	8	11	99.74
Cloruro Férrico	9	11	99.78

Fuente: Elaboración Propia, 2023

Se reconoce que los coagulantes empleados comúnmente en la industria, tienen un valor mayor en la eficiencia de remoción de turbiedad para el agua analizada con valores de pH prácticamente neutros. También cabe mencionar que las dosis óptimas reconocidas son menores en los coagulantes químicos, aunque en comparativa esto no presenta un impedimento para la aplicación como coagulante del mucílago ya que, implica la utilización de un residuo valorizable.

Sin embargo, la problemática asociada con el riesgo a la salud y al ambiente, así como la generación de lodos con necesidad de un post tratamiento continúa latente, por lo que la combinación de ambos coagulantes (mucílago de café en conjunto con otro coagulante inorgánico) para el tratamiento de agua puede ser la solución para atender los desafíos de eficiencia y sustentabilidad que se abordan en el presente trabajo.

5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Se evaluó la eficiencia del mucílago del café como coagulante orgánico para la remoción de turbiedad, considerando el pH y dosis óptima, donde los resultados obtenidos presentan una buena eficiencia de remoción de turbiedad para las características del agua sintética.

La determinación de concentración del mucílago del café puede realizarse con una metodología diferente, ya que en la manera que se obtuvo en este trabajo, la concentración de mucílago calculada como ST, no necesariamente afecta la remoción de turbiedad. Debe ampliarse la investigación para definir si existe una relación entre la remoción de turbiedad y la concentración de cierto compuesto en el mucílago de café.

Para las pruebas de pH óptimo, las mejores eficiencias se presentaron en el rango 11 a 12, siendo de 88.41% para la muestra obtenida por fermentación en el beneficio. Y de 91.80% para el coagulante obtenido en el laboratorio con 3 días de fermentación.

Para las pruebas de dosis óptima, las mejores eficiencias se obtuvieron con 20 ml para los pH de 11 y 12. Obteniendo eficiencias de 91.00% en la muestra obtenida en el beneficio por fermentación y 91.38% para la muestra extraída en laboratorio con 3 días de fermentación respectivamente.

Debido a los resultados analizados, se reconoce que para el agua sintética preparada en el laboratorio con la metodología para obtención del mucílago realizada, cuando la mezcla del agua a tratar con el coagulante orgánico se encuentra en un pH cercano a 11, es cuando existe una mejor remoción de turbiedad.

La eficiencia del mucílago del café como coagulante natural para la remoción de turbidez, es influenciada principalmente por el tiempo de fermentación del mismo. Existe una ventana de aplicación entre los 3 y 13 días de fermentación obteniendo los mejores resultados de remoción de turbiedad en el tratamiento de agua.

El método de extracción del mucílago, no es una variable que influya significativamente, esto podría ser benéfico para su aplicación en las distintas zonas cafetaleras sin importar el proceso de beneficio que se emplee. Se recomienda continuar con la investigación para determinar una variación en los resultados del mucílago obtenido por un método mecánico, ya que el bajo rendimiento presentado puede deberse al tiempo de almacenamiento en la planta de beneficio.

Como consecuencia del presente trabajo y reconociendo la importancia de la determinación del pH en la remoción de turbiedad en el agua, se recomienda que la línea de investigación continúe encaminada al tratamiento de aguas residuales agroindustriales o aquellas que tengan un valor de pH alcalino.

Existen áreas de oportunidad para mejorar la eficiencia de este coagulante, definiendo la efectividad del mismo al realizar una mezcla con un agente coagulante químico. Para esto, deben determinarse las características químicas del mucílago del café y las reacciones entre ambos compuestos.

Adicionalmente, realizar otras líneas de investigaciones implicaría buscar la posible relación entre la altitud de sembrado y la eficiencia de remoción, la madurez del fruto cosechado, así como la especie y variedad de café. Incluso combinarlo con otros procesos de tratamiento del agua y también definir las acciones a seguir para el tratamiento por la generación de lodos en este proceso.

6. REFERENCIAS

- Anacafé. (2019). Los subproductos del beneficio húmedo del café. Anacafé. Retrieved February 24, 2023, from <https://portalgral.com/wp-content/uploads/sites/65/2019/11/los-subproductos-del-beneficio-humedo-del-cafe-anacafe.pdf>
- ARCILA P. et al. (2007) Sistemas de producción de café en Colombia. Chinchiná, Cenicafe, 309 p.
- Arcila Pulgarín, Jaime. "Crecimiento y Desarrollo de la Planta de Café." 1a ed., CENICAFÉ, 2007. *Digital repository of the National Coffee Research Centre - CENICAFE*, <https://biblioteca.cenicafe.org/handle/10778/720>.
- Barreto Pardo, S., Vargas Moncada, D. K., Ruiz Martínez, L., & Gómez Ayala, S. L. (2020, August 10). Evaluación de coagulantes naturales en la clarificación de aguas. *Revista de Investigación Agraria y Ambiental*. Retrieved February 21, 2023, from <https://doi.org/10.22490/21456453.3081>
- Barrios Orozco, Marco Antonio. Buenas prácticas de beneficiado húmedo del café, fundamentales para mantener la calidad. *Boletín Técnico*. Centro de Investigaciones en Café, 2018.
- Café de México. "Estados y sus regiones." *Café de México*, 2019, <http://www.cafedemexico.mx/estados-y-sus-regiones.html>. Accessed 5 June 2023.
- Café Tierra y Nube. "Composición de los granos de café." *Café Tierra y Nube*, 3 August 2021, <https://www.tierraynube.com/composicion-de-los-granos-de-cafe/>. Accessed 8 May 2023.
- Cafés de México. "Variedades de Café." *Cafés de México*, 29 December 2020, <https://cafesdemexico.com/variedades-de-cafe/>. Accessed 17 January 2023.
- CEDRSSA Centro de Estudios para el Desarrollo Rural Sustentable y la Soberanía Alimentaria. *Comercio Internacional del Café, el caso de México*. Cámara de Diputados, Julio 2019.
- CENDALES, A., Ricardo, W., & Cañón Celi, O. A. (2016). Evaluación de la eficiencia del mucílago del café como coagulante frente al cloruro férrico en los procesos de remoción de sólidos suspendidos en el agua. Universidad de la Salle. Facultad de Ingeniería. Programa de Ingeniería Ambiental y Sanitaria. Bogotá dc.
- CENICAFÉ. "Crecimiento y Desarrollo de la planta de café." *Sistemas de producción*, 2007, <https://biblioteca.cenicafe.org/bitstream/10778/720/3/2.%20Crecimiento%20y%20desarrollo%20planta%20de%20caf%c3%a9.pdf>. Accessed 29 June 2023.
- Centro de Estudios de Finanzas Públicas. "El mercado del café en México." *Centro de Estudios de las Finanzas Públicas*, 2001, <https://www.cefp.gob.mx/intr/edocumentos/pdf/cefp/cefp0542001.pdf>.
- CIAL. "Los subproductos del café podrían utilizarse para la producción de alimentos enriquecidos e innovadores." *CIAL-CSIC*, 2022, <https://www.cial.uam-csic.es/7143/los-subproductos-del-cafe-podrian-utilizarse-para-la-produccion-de-alimentos-enriquecidos-e-innovadores/>. Accessed 8 May 2023.

- Cielo Abierto Café. “Conoce las mejores variedades de café en México.” *Cielo Abierto Café*, 28 October 2019, <https://cieloabiertocafe.com/2019/10/28/cuales-son-las-variedades-de-cafe-y-sus-caracteristicas/>. Accessed 17 January 2023.
- Comisión Nacional del Agua. (sf). Diseño de Plantas Potabilizadoras de Tecnología Simplificada. In *Manual de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento* (Vol. 24).
- Forúm Café. “Café en Origen - VERACRUZ, MÉXICO.” *Fórum Cultural del Café*, 2018, https://www.forumdelcafe.com/sites/default/files/biblioteca/f-44_origen_veracruz.pdf. Accessed 21 January 2023.
- Gómez Posada, Susana. “Cotización del café en bolsa. 5 Hechos que debes saber.” *Qué Café!*, 2019, <https://quecafe.info/cotizacion-del-cafe-en-bolsa/>. Accessed 5 June 2023.
- Gotteland, Martín, & Saturnino de Pablo V. “ALGUNAS VERDADES SOBRE EL CAFÉ.” *SciELO Chile*, Revista chilena de nutrición, 2007, https://www.scielo.cl/scielo.php?pid=S0717-75182007000200002&script=sci_arttext. Accessed 22 December 2022.
- Gray, N. F. (2005). *Water technology: an introduction for environmental scientists and engineers*. Elsevier Butterworth-Heinemann.
- Hendricks, D. W. (2006). *Water Treatment Unit Processes: Physical and Chemical*. Taylor & Francis.
- Huerta Calleja, Kassandra. “El coagulante en el tratamiento de aguas.” *Contyquim*, 22 March 2022, <https://contyquim.com/blog/el-coagulante-en-el-tratamiento-de-aguas>. Accessed 13 July 2023.
- ICO. “Aspectos botánicos.” *International Coffee Organization*, 2020, https://www.ico.org/es/botanical_c.asp. Accessed 17 January 2023.
- IICA. (2010). *Guía técnica para el beneficiado de café protegido bajo una indicación geográfica o denominación de origen*. Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura, IICA.
- International Coffee Organization (OIC). “Historia del café.” *International Coffee Organization*, 2022, https://www.ico.org/ES/coffee_storyc.asp. Accessed 28 June 2023.
- Manzo Garrido, Maribel. *RIESGO ECOLÓGICO Y A LA SALUD MEDIANTE EL SOFTWARE SADA, ASÍ COMO DETERMINACIÓN DE LA REMOCIÓN DE MERCURIO UTILIZANDO COAGULANTES NATURALES Y COMERCIALES*. Tesis de Maestría. Facultad de Ingeniería, UNAM, Septiembre 2023.
- Marín L., S.M.; Arcila P., J.; Montoya R., E.C.; Oliveros T., C.E.: Cambios físicos y químicos durante la maduración del fruto de café (*Coffea arabica* L. var. Colombia) *Cenicafé* 54(3): 208-255. 2003
- Mazille, Félicien. “Coagulación, floculación y separación.” *SSWM.info*, Luis Roberti, 2 December 2018, <https://sswm.info/es/gass-perspective-es/tecnologias-de-agua-y-saneamiento/tecnologias-de-abastecimiento-de-agua/coagulaci%C3%B3n-floculaci%C3%B3n-y-separaci%C3%B3n>. Accessed 7 January 2023
- Nuvan Vargas, L. N. y Rojas Nariño, M. M. (2018) *Evaluación fisicoquímica del tratamiento primario de agua, mediante el uso de un coagulante obtenido a partir de*

- residuos de café (Trabajo de grado). Fundación Universidad de América. Retrieved from <http://hdl.handle.net/20.500.11839/6764>
- Oliveros-Tascón, Carlos Eugenio, and Gonzalo Roa-Mejía. "EL DESMUCILAGINADO MECÁNICO DEL CAFÉ." *Avances Técnicos*, 216 ed., Cenicafé, 1995.
 - ONU (n.d.). 6. Agua Limpia y Saneamiento. AGUA LIMPIA Y SANEAMIENTO: POR QUÉ ES IMPORTANTE. Retrieved February 21, 2023, from https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/wp-content/uploads/sites/3/2016/10/6_Spanish_Why_it_Matters.pdf
 - Organización Mundial de la Salud., OMS (2011). *Guías para la Calidad del Agua de Consumo Humano* (2018, Cuarta ed.).
 - Peñuela Martínez, Aída E., et al. "ENZIMAS: una alternativa para remover rápida y eficazmente el mucílago del café." *Avances Técnicos Cenicafé*, vol. 406, no. 1a, 2011.
 - Prada, R. (2014, October 20). La ciencia del café (I): De la planta a la taza. *Hablando de Ciencia*. Retrieved diciembre 4, 2022, from <https://hablandodeciencia.com/la-ciencia-del-cafe-i-de-la-planta-a-la-taza/>
 - Prieto Duarte, Yenni Alexandra. *Caracterización física de café semitostado*. Bogotá D.C., Fundación Universidad de América, 2002.
 - Puerta Quintero, Gloria Inés, and Sara Ríos Arias. *COMPOSICIÓN QUÍMICA DEL MUCÍLAGO DE CAFÉ, SEGÚN EL TIEMPO DE FERMENTACIÓN Y REFRIGERACIÓN*. vol. 62, CENICAFÉ, 2011
 - Restrepo Osorno, Hernán Alonso. "EVALUACIÓN DEL PROCESO DE COAGULACIÓN – FLOCULACIÓN DE UNA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUA POTABLE Hernán Alonso Restrepo Os." *Repositorio Universidad Nacional*, 2009, https://repositorio.unal.edu.co/bitstream/handle/unal/2561/15372239_2009.pdf?sequence=1&isAllowed=y.
 - SAGARPA. "CAFÉ MEXICANO." *PLANEACIÓN AGRÍCOLA NACIONAL 2017-2030*, Subsecretaría de Agricultura, 2017.
 - Samayoa Toledo, Ana Lucia, et al. *EXTRACCIÓN DE MUCÍLAGO, AZÚCARES, Y TANINOS DE LA PULPA DEL CAFÉ Y PRODUCCIÓN DE ÁCIDO ACÉTICO COMERCIAL A PARTIR DE LAS MIELES DEL CAFÉ*. UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA, 2014.
 - Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural. (SADER) "México, onceavo productor mundial de café | Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural | Gobierno | gob.mx." Gobierno de México, 2 March 2018, Trussell <https://www.gob.mx/agricultura/es/articulos/mexico-onceavo-productor-mundial-de-cafe>. Accessed 5 June 2023.
 - Secretaría de Salud. "Diario Oficial de la Federación." *DOF - Diario Oficial de la Federación*, 2 May 2022, https://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5650705&fecha=02/05/2022#gsc.tab=0.
 - Servicio de Alimentación Agroalimentaria y Pesquera. "Datos Abiertos | Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera | gob.mx." *SIAP*, 2023, http://infosiap.siap.gob.mx/gobmx/datosAbiertos_a.php. Accessed 29 June 2023.

- Torres, Alejandro. “Las Rubiáceas mexicanas y sus polinizadores.” *Revista Saber Más*, 2022, <https://www.sabermas.umich.mx/archivo/articulos/544-numero-61/1069-las-rubiaceas-mexicanas-y-sus-polinizadores.html>. Accessed 2 January 2023.
- Trussell, R. R., Hand, D. W., Howe, K. J., Tchobanoglous, G., & Crittenden, J. C. (2012). *MWH's Water Treatment: Principles and Design*. Wiley.
- United States Department of Agriculture. *Coffee Annual Report Mexico*. 2019.
- United States Department of Agriculture. *Coffee Annual Report Mexico*. 2022.
- Veolia. “Tratamiento de agua con coagulaciones y floculación.” Veolia Water Technologies & Solutions, 2023, <https://www.watertechnologies.mx/products/wastewater-treatments/coagulants-and-flocculants>. Accessed 13 July 2023.