

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE BAJA CALIFORNIA

Facultad de Ciencias Químicas e Ingeniería



**“REMEDIACIÓN DE AGUAS GRISES CON UN RESIDUO
AGROINDUSTRIAL MODIFICADO QUÍMICAMENTE”**

TESIS

Que para obtener el título de

QUÍMICO INDUSTRIAL

Presenta

KAREN JOSELYNE GOMEZ PALACIOS

Director de tesis

DR. JAVIER EMMANUEL CASTILLO QUIÑONES

Tijuana, Baja California, México, 20 de diciembre 2023.

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE BAJA CALIFORNIA
FACULTAD DE CIENCIAS QUÍMICAS E INGENIERÍA
COORDINACIÓN DE EXTENSIÓN Y VINCULACIÓN

FOLIO No. 060

Tijuana, Baja California, a 06 de diciembre de 2023

C. KAREN JOSELYNE GOMEZ PALACIOS
PASANTE DE QUÍMICO INDUSTRIAL
PRESENTE:

El tema de trabajo y/o tesis para su examen profesional, en la opción de **Tesis** es propuesto por el **Dr. Javier Emmanuel Castillo Quiñones**, quienes será el responsable de la calidad del trabajo que usted presente, referido al tema: **"Remediación de Aguas Grises con un Residuo Agroindustrial Modificado Químicamente"**, el cual deberá usted desarrollar, de acuerdo con el siguiente orden:

RESUMEN

- I. INTRODUCCIÓN
- II. ANTECEDENTES
- III. PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL
- IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN
- V. CONCLUSIONES
- VI. TRABAJO A FUTURO
- VII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS
- VIII. APÉNDICES



Dr. Javier Emmanuel Castillo Quiñones
Director de Tesis

M.C. Roberto Alejandro Reyes Martínez
Director

Dra. Ana Alejandra Ramírez Rodríguez
Subdirectora

Dedicatorias

A mi familia, que a lo largo de mi vida han escuchado todas mis dudas y curiosidades; y aunque no cuentan con todas las respuestas, me incitan a encontrarlas por mi cuenta, gracias a su esfuerzo he logrado cumplir mis metas.

A mi compañero de vida, Ing. Beltrán, quien espero este orgulloso de leer esta tesis, y siga presionándome durante muchos años más a terminar todos los proyectos que comienzo.

A todos las químicas y químicos formados y en formación de la honorable Facultad de Ciencias Químicas e Ingeniería; esta tesis porta el logo de la carrera Químico Industrial propuesto por el Q.I. en formación Antonio Robles, representando para mí perseverancia y sentido de pertenencia.



“Cimarrón mi corazón”

Con todo mi corazón...

Karen Joselyne Gomez Palacios

Agradecimientos

A mi padrino, Dr. Javier Emmanuel Castillo Quiñones, por su completa disposición para guiarme y apoyarme desde mi ingreso a la facultad, gracias por haber decidido recorrer el camino de la enseñanza y compartir sus conocimientos, tiene todo mi respeto y profunda admiración.

A la M.C Rita Zurita Frías por su paciencia infinita, por ayudarme con las decenas de diluciones de disoluciones, por su carisma que volvió de lo más amenas las tardes en el laboratorio, toda mi admiración para usted.

A la Dra. Gabriela Carrillo Cedillo por ayuda para llevar a cabo los análisis de las muestras de agua en su laboratorio, por su supervisión y acompañamiento en la realización de cálculos y por su disposición a compartir sus conocimientos.

A la Dra. Emidgia Guadalupe Sumbarda Ramos por su apoyo en la caracterización de los materiales por potencial Z.

A la Facultad de Ciencias Químicas e Ingeniería y a todos los académicos, que formaron parte de mi desarrollo como estudiante.

Por último, pero no menos importante, agradezco a la Q.I. Leslie Ibarra, por ser mi apoyo durante todos estos años de formación, por acompañarme y brindarme su ayuda en las mil y un veces que repetimos los análisis juntas, por estar junto a mí en los laboratorios de sol a sol lavando material mientras escuchaba cada idea que saltaba a mi cabeza. Te agradezco y me disculpo si en algún momento te hice creer que te llevaba de la mano hacia adelante, fuiste tu quien nos sacó adelante a ambas.

Índice

RESUMEN	9
CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN.....	11
I.1 JUSTIFICACIÓN	11
I.2 OBJETIVO GENERAL.....	14
I.3 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	14
I.4 METAS.....	15
I.5 HIPÓTESIS.....	15
CAPÍTULO II. ANTECEDENTES	17
II.1 GESTIÓN DEL AGUA EN TIJUANA	20
II.2 INDUSTRIA CERVECERA EN LA REGIÓN.	23
CAPÍTULO III. PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL	28
III.1 MUESTREO Y MODIFICACIÓN DE LA MALTA RESIDUAL.....	30
III.2 CARACTERIZACIÓN DE LA MALTA RESIDUAL ANTES Y DESPUÉS DE SU MODIFICACIÓN.	32
<i>III.2.1 Espectroscopía Infrarroja.....</i>	<i>32</i>
<i>III.2.2 Potencial Z.....</i>	<i>36</i>
III.3 MUESTREO DE AGUA RESIDUAL DE LAVADORA.....	38
III.4 REMEDIACIÓN DEL AGUA GRIS CON EL MATERIAL ADSORBENTE RESULTANTE DE LA MODIFICACIÓN QUÍMICA DEL BAGAZO RESIDUAL.....	41
III.5 ANÁLISIS PARÁMETROS EN AGUA ANTES Y DESPUÉS DE LA INTERACCIÓN CON MATERIAL ADSORBENTE.....	42
<i>III.5.1 Medición de pH.....</i>	<i>42</i>
<i>III.5.2 Demanda Bioquímica de Oxígeno.....</i>	<i>46</i>
<i>III.5.3 Concentración de sulfatos.....</i>	<i>51</i>
<i>III.5.4 Concentración de fosfatos</i>	<i>54</i>
<i>III.5.5 Sustancias Activas al Azul de Metileno.....</i>	<i>56</i>
CAPÍTULO IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	60
IV.1 MUESTREO Y MODIFICACIÓN DE LA MALTA RESIDUAL.....	60
IV.2 CARACTERIZACIÓN DE LA MALTA RESIDUAL ANTES Y DESPUÉS DE SU MODIFICACIÓN	62
<i>IV.2.1 Espectroscopía Infrarroja.....</i>	<i>62</i>
<i>IV.2.2 Potencial Z</i>	<i>65</i>

IV.3 MUESTREO DE AGUA RESIDUAL DE LAVADORA.....	67
IV.4 REMEDIACIÓN DEL AGUA GRIS CON EL MATERIAL ADSORBENTE RESULTANTE DE LA MODIFICACIÓN QUÍMICA DE LA MALTA RESIDUAL.....	69
IV.5 ANÁLISIS DE PARÁMETROS EN AGUA ANTES Y DESPUÉS DE LA INTERACCIÓN CON MATERIAL ADSORBENTE.	72
IV.5.1 Medición de pH.....	72
IV.5.2 Demanda Bioquímica de Oxígeno.....	73
IV.5.3 Concentración de sulfatos	75
IV.5.4 Concentración de fosfatos	76
IV.5.5 Sustancias Activas al Azul de Metileno.....	77
IV.6 RESUMEN DE RESULTADOS Y CUANTIFICACIÓN DE LA EFICIENCIA DE REMOCIÓN DE CONTAMINANTES.....	79
CAPÍTULO V. CONCLUSIONES	82
CAPÍTULO VI. TRABAJO A FUTURO	85
CAPÍTULO VII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	87
CAPÍTULO VIII. APÉNDICE A	94

Índice de figuras

<i>Figura 1. Acueducto Rio Colorado – Tijuana. Imagen obtenida del portal digital de la Comisión Estatal de Agua (CEA, 2016).</i>	21
<i>Figura 2. Procedimiento ilustrado de la elaboración de cerveza. Obtenido del portal digital de Cerveceros de México, 2022.</i>	25
<i>Figura 3. Mapa cartográfico del noroeste de México que integra los diferentes climas de la región. Obtenido del portal digital INEGI, 2020.</i>	28
<i>Figura 4. Ilustración de los dos tipos de vibración en las moléculas, generadas por la absorción de energía infrarroja. Ilustración obtenida de: Artículo de divulgación CIATEJ (Mongragon, P., s.f.)</i>	32
<i>Figura 5. Representación del funcionamiento de una celda eléctrica para la cuantificación del potencial Zeta. Ilustración obtenida de Sumbarda, E., 2019.</i>	36
<i>Figura 6. Representación del funcionamiento del equipo Zeta-Meter para la cuantificación del potencial Zeta de un material suspendido. Ilustración obtenida de Sumbarda, E., 2019.</i>	37
<i>Figura 7. Curva de DBO generalizada para un efluente urbano. Obtenida de Rodier, J., Legube, B., Merlet, N. (2009) Análisis del agua. 9na edición Omega. Paris. ISBN: 978-84-282-1530-5</i>	46
<i>Figura 8. Bagazo seco de malta de cebada más 8% de maíz, antes de su modificación química.</i>	60
<i>Figura 9. Imagen de la modificación química del bagazo residual con ácido nítrico concentrado.</i>	61
<i>Figura 10. Gráfico de los espectros infrarrojos normalizados.</i>	62
<i>Figura 11. Gráfico de los espectros infrarrojos normalizados, señalando las bandas características que afirman la modificación química del material.</i>	64
<i>Figura 12. Fotografía del agua gris antes de ponerse en contacto con el material adsorbente.</i>	68
<i>Figura 13. Fotografía del cambio de color observable en el agua gris al entrar en contacto con el material modificado con Ácido Clorhídrico.</i>	69
<i>Figura 14. Fotografía del cambio de color observable en el agua gris al entrar en contacto con el material modificado con Ácido Nítrico.</i>	70
<i>Figura 15. Fotografía del cambio de color observable en el agua gris al entrar en contacto con el material modificado con Ácido Acético Glacial.</i>	70
<i>Figura 16. Fotografía de las muestras M3 HCl, M3 HNO₃, M3 CH₃COOH, después de los 15 minutos de agitación con el agua gris, para proceder a sedimentar durante 24 horas.</i>	71
<i>Figura 17. Fotografía de las muestras M3 HCl, M3 HNO₃, M3 CH₃COOH después de filtrar el material residual.</i>	71

Índice de tablas

<i>Tabla 1. Compendio de referencias para la interpretación de bandas del espectro IR del bagazo residual de elaboración de cerveza.</i>	<i>34</i>
<i>Tabla 2. Ingredientes de los productos utilizados en el lavado de ropa, correspondiente a Detergente 123 ®, Jabón para ropa oscura y Suavizante de telas Ensueño ®.</i>	<i>40</i>
<i>Tabla 3. Resultados obtenidos por la medición del potencial Z de las muestras en el equipo Zeta-Meter 3.0.</i>	<i>65</i>
<i>Tabla 4. Valor promedio del potencial zeta de cada material modificado.</i>	<i>66</i>
<i>Tabla 5. Mediciones de pH realizadas a las muestras de agua.</i>	<i>72</i>
<i>Tabla 6. Base de cálculo para la determinación de la demanda bioquímica de las muestras de agua.</i>	<i>73</i>
<i>Tabla 7. Resultados de la determinación de sulfatos en las muestras de agua por método gravimétrico.</i>	<i>75</i>
<i>Tabla 8. Resultados de la determinación de fosfatos en las muestras de agua, obtenidos por la aplicación de la metodología HACH.</i>	<i>76</i>
<i>Tabla 9. Resultados de la determinación de sustancias activas al azul de metileno, obtenidos por la aplicación de la metodología HACH.</i>	<i>77</i>
<i>Tabla 10. Resumen de la medición de los parámetros pH, Sulfatos, Fosfatos, Demanda bioquímica de oxígeno y Sustancias activas al azul de metileno en las aguas antes y después de entrar en contacto con los materiales modificados.</i>	<i>79</i>
<i>Tabla 11. Porcentajes de remoción de contaminantes.</i>	<i>80</i>

Índice de apéndice

<i>Figura A 1. Espectro Infrarrojo del Bagazo sin modificar.</i>	<i>94</i>
<i>Figura A 2. Espectro infrarrojo del material modificado con Ácido Clorhídrico.....</i>	<i>94</i>
<i>Figura A 3. Espectro infrarrojo del material modificado con Ácido Nítrico.</i>	<i>95</i>
<i>Figura A 4. Espectro infrarrojo del material modificado con Ácido Acético Glacial.</i>	<i>95</i>

Resumen

El presente trabajo muestra la modificación de un residuo agroindustrial, en este caso el bagazo de malta de cerveza, el cual se modificó mediante una metodología de química verde para obtener un material que se utilizó para remediar agua gris. La aplicación de la metodología de química verde para la modificación del bagazo de malta residual en la preparación de cerveza fue efectiva, comprobándose mediante los espectros de infrarrojo en donde se observaron cambios en varias de las señales correspondientes a proteínas, lignina y celulosa que presentaba este residuo después de modificarse.

Los materiales obtenidos presentaron diferentes cargas superficiales, siendo el material M3 HCl el que presentó una carga superficial positiva, mientras que M3 HNO₃ y M3 CH₃COOH presentaron cargas superficiales negativas, presentando esto diferentes efectos durante la remediación del agua gris.

Los resultados obtenidos en la remediación del agua gris al aplicar los tres materiales fueron variados. Los tres materiales le aportaron un pH ácido al agua y un cambio de color, mientras que en la demanda bioquímica de oxígeno se observó un aumento por la naturaleza orgánica del material.

Todos los materiales resultaron eficientes en la remoción de sulfatos y fosfatos, siendo el material M3 HCl el que presentó los mejores porcentajes de remoción. Respecto a la remoción de sustancias activas azul de metileno, los materiales que presentan una carga superficial negativa aportan un incremento en este parámetro, mientras que el material M3 HCl, que presenta una carga superficial positiva, resultó eficiente en la disminución de sustancias aniónicas en el agua que pudieran reaccionar con el azul de metileno. Por último, los materiales mostrados en este trabajo podrían ser una alternativa en la remediación de aguas grises, lo cual ayudaría a disminuir el estrés hídrico que aqueja a esta región al reutilizar esta agua.

Capítulo I.

Introducción

Capítulo I. Introducción

I.1 Justificación

Sobre la remediación de aguas grises con un residuo agroindustrial modificado químicamente, primeramente:

➤ ¿Qué son las aguas grises?

El agua gris es aquella agua residual generada en las actividades cotidianas de aseo personal y del hogar, aquellas que provienen de lavabos, fregaderos, lavaderos, regaderas y lavadoras, también se les conoce como aguas jabonosas, que si bien no suponen un peligro a la salud y el medio ambiente tan grave como las aguas negras (provenientes de inodoros) generan efectos nocivos al medio ambiente como la eutrofización (Maldonado, M., 2021).

La eutrofización es el enriquecimiento de nutrientes en agua, lo que favorece un crecimiento excesivo de materia orgánica como algas verdes y otros microorganismos, lo que provoca fangos, destrucción de ecosistemas, atrae especies invasoras, emisión de olores desagradables, pérdidas económicas por el mantenimiento que requieren las tuberías taponeadas, e incluso enfermedades respiratorias (Santos, J., 2015).

➤ ¿Qué es un residuo agroindustrial?

Los residuos agroindustriales son generados por la industria agrícola, de transformación y alimentaria, estos consisten en desperdicios orgánicos como hojas, raíces, tallos, cortezas, bagazo, semillas, rastrojo de maíz, lacto suero, residuos hortofrutícolas, entre muchos otros.

Estos residuos, por su naturaleza orgánica, suponen diversos conflictos para la correcta gestión, transporte, manejo y disposición final, lo que incide directamente en la contaminación ambiental.

De la mano de la investigación, estos residuos pueden aprovecharse como biocombustibles, bioplásticos, alimentos funcionales, entre otras alternativas que permitirán el desarrollo sostenible de la sociedad, el medio ambiente y la economía circular (Aguilar et al., 2022).

➤ ¿Por qué remediación y no tratamiento?

El tratamiento de agua es un conjunto de procedimientos físicos, químicos y microbiológicos que permite obtener agua potable, al tratarse de agua residual, esta debe cumplir con ciertos parámetros establecidos en la normatividad mexicana NOM-003-SEMARNAT-1997 que establece los límites máximos permisibles de contaminantes en aguas residuales tratadas que se reúsen en servicios públicos. Norma de observancia obligatoria para entidades públicas responsables de su tratamiento y reúso, siendo en el caso de Tijuana, la Comisión Estatal de Servicios Públicos de Tijuana (CESPT).

Adicionalmente a la normatividad mexicana aplicable, el tratamiento de aguas residuales hace alusión a diversos y complejos procedimientos con el objetivo de obtener agua purificada. En el caso de la presente investigación, lo que se pretende es evaluar las propiedades de remoción de contaminantes del agua a través de un material adsorbente obtenido por la modificación química de un residuo agroindustrial.

Simplificando, en un contexto ambiental, la remediación se refiere a la remoción de contaminantes aplicando a los diferentes medios suelo, agua y aire; más no supone el retorno a las condiciones iniciales o una total purificación del medio (Garrido, I., 2016).

➤ ¿Por qué llevar a cabo una modificación química?

Se han reportado diferentes investigaciones sobre desechos agrícolas como cáscaras de avellana y almendra (Bulut y Tez, 2007) que son utilizadas para el control de contaminantes en aguas residuales, como son:

- Metales como plomo, cobre, cadmio, plata (Lu y Gibb, 2008; Li et al., 2009, Low et al., 2000)
- Colorantes orgánicos como AO7 (Silva et al., 2004)
- Inmovilizadores de microorganismos como levaduras (Branyik et al., 2001)

Todos estos estudios proponen la modificación química de diferentes residuos agroindustriales, los cuales son procesos complejos que requieren el uso de equipos y recursos costosos o que suponen una contaminación adicional como la emisión de gases de combustión, la generación de diferentes residuos peligrosos y el consumo de diversos reactivos.

Esta investigación se realizó siguiendo los principios de la química verde, buscando alternativas que generen un menor impacto al medio ambiente, utilizando menor cantidad de sustancias químicas y energía, minimizando la generación de residuos. Con la intención de respetar el medio ambiente y generar una ruta de modificación sostenible.

I.2 Objetivo general

Evaluar la eficiencia de un material adsorbente, preparado a partir de la modificación química de un residuo agroindustrial, en la remoción de contaminantes en agua gris, con la finalidad de obtener agua con calidad aceptable para su reutilización.

I.3 Objetivos específicos

1. Obtener un material adsorbente a partir de la modificación química del bagazo residual de malta de cerveza.
2. Caracterizar el material adsorbente para corroborar su modificación química, a través de la espectroscopía infrarroja y el potencial Z.
3. Llevar a cabo el muestreo del agua gris, proveniente del lavado de ropa en lavadora doméstica, que se pretende remediar.
4. Remediar con el material adsorbente el agua gris.
5. Analizar las propiedades fisicoquímicas del agua antes y después de la interacción con el material adsorbente, evaluando los parámetros pH, Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO_5), concentración de Sulfatos (SO_4^{2-}), Fosfatos (PO_4^{3-}) y Sustancias Activas al Azul de Metileno (SAAM).
6. Interpretar los resultados y cuantificar la eficiencia de remoción de contaminantes.
7. Establecer conclusiones sobre la efectividad del material adsorbente en la remoción de contaminantes del agua residual de lavadora.

I.4 Metas

- Obtener un material adsorbente, mediante la aplicación de una metodología de química verde, en la modificación química de un residuo agroindustrial.
- Obtener una fuente de agua con calidad aceptable para su uso o reutilización, con ética y respeto al medio ambiente.
- Divulgar los resultados en diferentes foros locales, regionales o nacionales.

I.5 Hipótesis

La modificación química del bagazo residual de la elaboración de cerveza resultará en un material capaz de adsorber contaminantes presentes en el agua gris proveniente del lavado de ropa, como son sulfatos, fosfatos y colorantes.

Capítulo II.

Antecedentes

Capítulo II. Antecedentes

La Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible establece una serie de retos para la comunidad mundial, para los cuales se plantearon los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS), en donde se incluyen metas para el acceso al agua y al saneamiento seguros y una mejor gestión del agua, al igual que objetivos para afrontar la desigualdad y la discriminación, incluyendo propósitos generales para “no dejar a nadie atrás” y “llegar primero a los más rezagados” (WWAP, 2019).

En el contexto global, 3 de cada 10 personas carecen de acceso a servicios de agua potable seguros, además de que la escasez del agua afecta a más del 40% de la población mundial y se prevé que este porcentaje aumente. Más de 1700 millones de personas viven actualmente en cuencas fluviales en las que el consumo de agua supera la recarga y para empeorar la situación, 6 de cada 10 personas carecen de acceso a instalaciones de saneamiento gestionadas de forma segura, lo cual se relaciona con los 4 billones de personas que carecen de acceso a servicios básicos de saneamiento, como retretes o letrinas (Naciones Unidas, 2018).

El suministro de agua potable es fundamental para la salud, la industria y la agricultura. Según World Resources Institute (2018) más de 3 500 millones de personas podrían sufrir escasez de agua en el año 2025, es decir, la mitad de la población mundial no tendrá acceso al agua.

El estrés hídrico, incluido el acceso insuficiente a los servicios de agua y saneamiento, se ha asociado con malestar social, conflicto e incluso violencia y, en última instancia, con tendencias crecientes en el desplazamiento de personas y migración (Miletto et al., 2017).

En la actualidad, 2 mil millones de personas viven sin acceso a agua potable (ONU, 2023). Y aunque en el año 2015, el mundo se comprometió con los Objetivos de Desarrollo Sustentable, como parte de la Agenda 2030, en que todos tendrían agua y saneamiento gestionados de forma segura para ese año, hoy en día estamos lejos de conseguirlo.

A nivel mundial, el 44% de las aguas residuales domesticas no se tratan de forma correcta (UNESCO, 2023).

En México, el 77% del agua potable disponible se utiliza en riego, 14% en abastecimiento público urbano y 9% en usos industriales (Conagua, 2011).

La reutilización del 44% de las aguas domesticas mal gestionadas, podría suponer el aprovechamiento del 6.16% del agua disponible en México (UNESCO, 2023).

El acceso mejorado al agua y al saneamiento, la gestión y gobernanza del agua y los múltiples beneficios que traen consigo, pueden contribuir significativamente a una transformación positiva para las personas marginadas (WWAP, 2019).

El saneamiento por sí mismo representa un reto, pues existen alrededor de 3 960 plantas de tratamiento de aguas residuales en el país, de las cuales 1 500 están fuera de operación (Cerveceros de México, 2022).

El 4.9% de agua en México es utilizada por la industria autoabastecida y, de este porcentaje, el 0.5% corresponde a la producción de cerveza, representando el 0.02% del total de agua de la nación (Cerveceros de México, 2022).

México es el cuarto productor de cerveza a nivel mundial, siendo el país número uno en exportación de cerveza a nivel mundial desde el 2010. En 2021, la producción de cerveza a nivel nacional fue de 134.7 millones de hectolitros; siendo necesarias casi 550 000 toneladas de malta en 2021 (Cerveceros de México, 2022).

El bagazo de malta cervecera es uno de los subproductos industriales de importancia en la búsqueda de alternativas de uso verde, solo en Baja California se producen más de 150 mil toneladas de malta residual (Cerveceros México, 2021).

El alto nivel de humedad en el bagazo residual implica que su transporte sea costoso y además lo vuelve susceptible al crecimiento y deterioro por microorganismos, restringiendo su adecuado manejo (Mussatto et al., 2006).

Aunque el bagazo es utilizado comúnmente para alimentación de ganado, se han registrado otros usos como es su aplicación en el sector alimentario humano, debido a que es considerado una fuente de antioxidantes naturales (Aguilar, S., 2022).

La producción de biocombustibles también es una estrategia sustentable que puede llevarse a cabo. Diferentes investigaciones han evaluado la producción de biogás, obteniendo como resultado un alto contenido de metano (Cater et al., 2015).

La generación de bagazo residual en la ciudad de Tijuana puede generar problemas sanitarios debido a su nulo tratamiento y reutilización. Al tener similitud con otros desechos agrícolas como las cáscaras de avellana y almendra (Bulut y Tez, 2007), podría ser utilizada como material adsorbente en el control de contaminantes en agua.

II.1 Gestión del agua en Tijuana

En los últimos 50 años, se han incrementado los índices de explotación y contaminación de fuentes de agua subterránea y superficial. En un contexto global, la escasez del recurso hídrico se convierte en una amenaza para los países que han llegado al límite de sus propias fuentes.

La ciudad de Tijuana es una de las ciudades con más dinamismo en el crecimiento poblacional y económico, lo que genera una alta demanda en los servicios urbanos, siendo el abastecimiento del agua uno de los servicios más importantes. El crecimiento en la demanda y uso de agua también representa un crecimiento en la generación de aguas residuales, de las cuales un gran porcentaje no se tratan adecuadamente (Navarro-Chaparro, K., et al., 2016)

Lamentablemente, Tijuana no cuenta con disponibilidad natural de fuentes de agua, ni superficial o subterránea, esta ciudad depende del abasto de agua del Río Colorado.

En 1982, inicio en operación el Acueducto Río Colorado Tijuana, el cual abastece de agua a las ciudades de Tijuana, Tecate y Playas de Rosarito. Este inicia en el canal Alimentador del Distrito No. 14 del Río Colorado en el Valle de Mexicali, atraviesa el desierto, sube las montañas de la rumorosa, se entrega en la presa “El Carrizo”, continua a la potabilizadora “El Florido” y alimenta a la red de Tijuana (CEA, 2016).

Desde entonces y hasta 2017, el sistema de abasto y distribución de agua potable ha sido ampliado 4 veces, al igual que los volúmenes de extracción, utilizando el máximo de agua que le corresponde a la ciudad por parte de la cuota del Río Colorado.

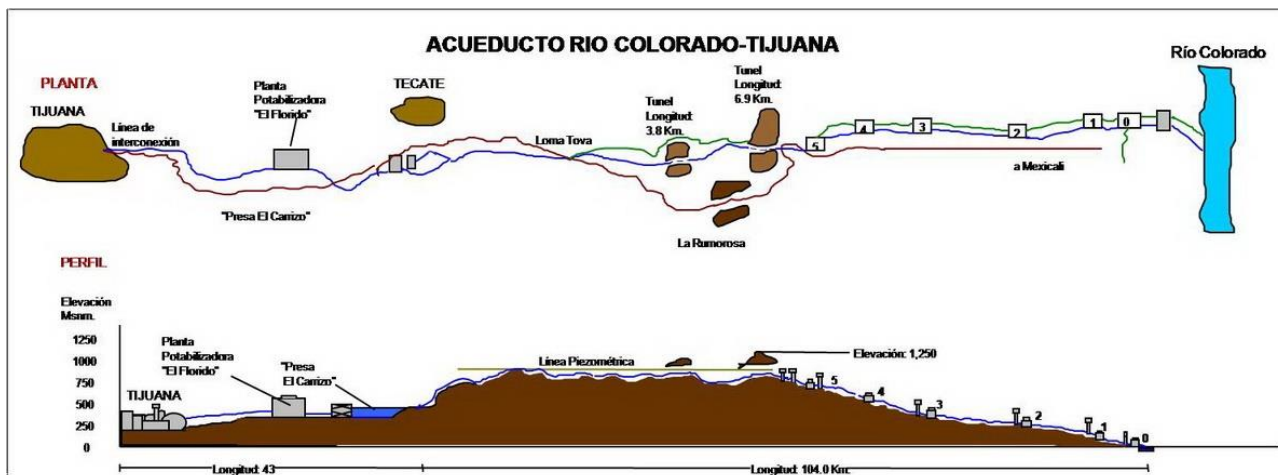


Figura 1. Acueducto Río Colorado – Tijuana. Imagen obtenida del portal digital de la Comisión Estatal de Agua (CEA, 2016).

El abasto del Río Colorado representa el 96.2% del agua en la ciudad de Tijuana, lo que corresponde al 5.3% del agua asignada a México por el “Tratado relativo al aprovechamiento de las aguas de los ríos Colorado y Tijuana y del Río Bravo (Grande) desde Fort Quitman, Texas, hasta el Golfo de México entre los Estados Unidos Mexicanos y los Estados Unidos de América” suscrito en 1944. Con esto entendemos que la gestión del agua tiene afectaciones regionales y transfronterizas.

Desafortunadamente, desde 2018, se presenta una mayor demanda de agua en comparación con la cantidad disponible que pueden ofrecer a la ciudad de Tijuana, esto debido al crecimiento poblacional, por lo que, a finales del año 2019, el servicio de agua potable ha sido suministrado por tandeo. Actualmente, 2023, se ha vuelto común la falta de abastecimiento de agua en cientos de colonias, sin previo aviso y hasta por más de 75 horas.

En Tijuana existe una mala gestión sobre el tratamiento de agua, si bien se ha intentado implementar un manejo integral sobre el tratamiento y reúso del agua, la infraestructura no cuenta con las condiciones para tratar toda el agua residual generada en la ciudad.

En 2021, bajo el gobierno de Jaime Bonilla, y en plena pandemia COVID-19, fue noticia nacional que las plantas de tratamiento de la ciudad no estaban en funcionamiento porque la empresa contratada por la CESPT no podía operarlas debido la falta de mantenimiento en las mismas, lo que por consecuencia llevo a la descarga de miles de metros cúbicos de agua sin tratar a las playas del estado, poniendo a la playa Blanca como la más contaminada del país según la Comisión Federal para la Protección contra Riesgos Sanitarios (COFEPRIS, 2023).

Se tiene monitoreos desde 2014 por The Swim Guide, una asociación gubernamental encargada de realizar monitoreos de diversas playas alrededor del mundo (Canadá, Mexico, US, Costa Rica, Francia, Australia, entre otros), encontrándose poco o nulo cumplimiento de las pruebas de calidad del agua, lo cual supone enfermedades gastrointestinales y respiratorias agudas para la población y el turismo.

La actual directora de políticas públicas del gobierno del estado de Baja California, Fey Crevoshay, afirmo que la dirección de Jaime Bonilla freno un proyecto en el cual se entregaban las plantas de tratamiento para limpiar el 100% de las aguas residuales y darles una reutilización, como el riego en el Valle de Guadalupe (El Imparcial, 2023).

Se menciona esto, para demostrar que la correcta gestión del agua en el Estado no ha sido prioridad de ningún gobierno en, al menos, los últimos 10 años.

Esta investigación pretende demostrar la eficiencia de un material en la remediación de aguas grises, con el fin de reutilizar el agua o al menos, disminuir la carga de contaminantes que llegan a las plantas de tratamiento de aguas residuales, pues enviar una menor carga de agua residual a las plantas de tratamiento permite un mejor funcionamiento de éstas.

II.2 Industria cervecera en la región.

Durante los últimos 25 años, la producción de cerveza artesanal ha aumentado exponencialmente, siendo Baja California el 2do estado con mayor producción de este producto.

Si bien se tiene la idea generalizada de que la industria cervecera consume mucha agua, en base al reporte anual de la Cámara Nacional de la Industria Cervecera y de la Malta (2022), esta agroindustria en México se caracteriza por implementar tecnologías, capacitaciones e infraestructura con la finalidad de garantizar la sostenibilidad del recurso agua.

En estricto apego normativo, la agroindustria trata el 100% del agua residual generada, misma que reutilizan en diversos usos, como el riego de áreas verdes o son donados para diferentes actividades económicas y sociales, evitando la extracción del recurso de cuencas y acuíferos (Cerveceros de México, 2022).

Sin embargo, para la producción de cerveza se requieren grandes cantidades de materia prima que terminan convertidas en toneladas de desechos, los cuales repercuten en el medio ambiente, la economía y la sociedad.

La producción de cerveza se divide en dos grupos: Industrial y artesanal, los cuales varían en la cantidad de insumos utilizados, pero ambos procesos se caracterizan por requerir agua, carbohidratos fermentables (cebada), lúpulo y levaduras (Giovenzana et al., 2014).

La primera etapa de la elaboración de cerveza es el malteado, el cual consiste en la germinación controlada de los granos de cebada, con la finalidad de desarrollar enzimas amilolíticas como alfa y beta amilasa, que vuelven el almidón más suave y

soluble. Los granos son sumergidos en agua potable de 4 a 5 días (Días, 2014; Martines-Muñoz, 2015).

Posteriormente pasan a la fase de secado, donde la germinación se detiene por el aumento de temperatura, de acuerdo con Martines-Muñoz (2015), la cervecería artesanal opta por comprar la materia prima ya malteada.

La cebada malteada pasa a la siguiente etapa que es la preparación del mosto, la cual consiste en transformar la malta en azúcares simples para ser utilizadas como sustrato para las levaduras fermentables.

El producto de esta fase tiene una gran cantidad de residuos sólidos, por lo cual las mismas cáscaras de la malta son utilizadas como filtro, recirculando el mosto a través de ellas hasta clarificar la bebida, como resultado se obtiene un residuo denominado bagazo de malta, siendo generado por cervecerías industriales y artesanales (Días, 2014).

La tercera etapa consiste en la fermentación y maduración de la bebida, las levaduras transforman el mosto en alcohol y otros compuestos que brindan propiedades organolépticas a la cerveza (Días, 2014).

Los subproductos de la producción de cerveza tienen gran potencial para ser utilizados como alimento para ganado, no obstante, debido al alto contenido de humedad y azúcares fermentables, este uso presenta grandes desafíos.

La descomposición rápida por la actividad microbiana imposibilita el transporte del residuo por grandes distancias, así como su almacenamiento por más de 3 días.

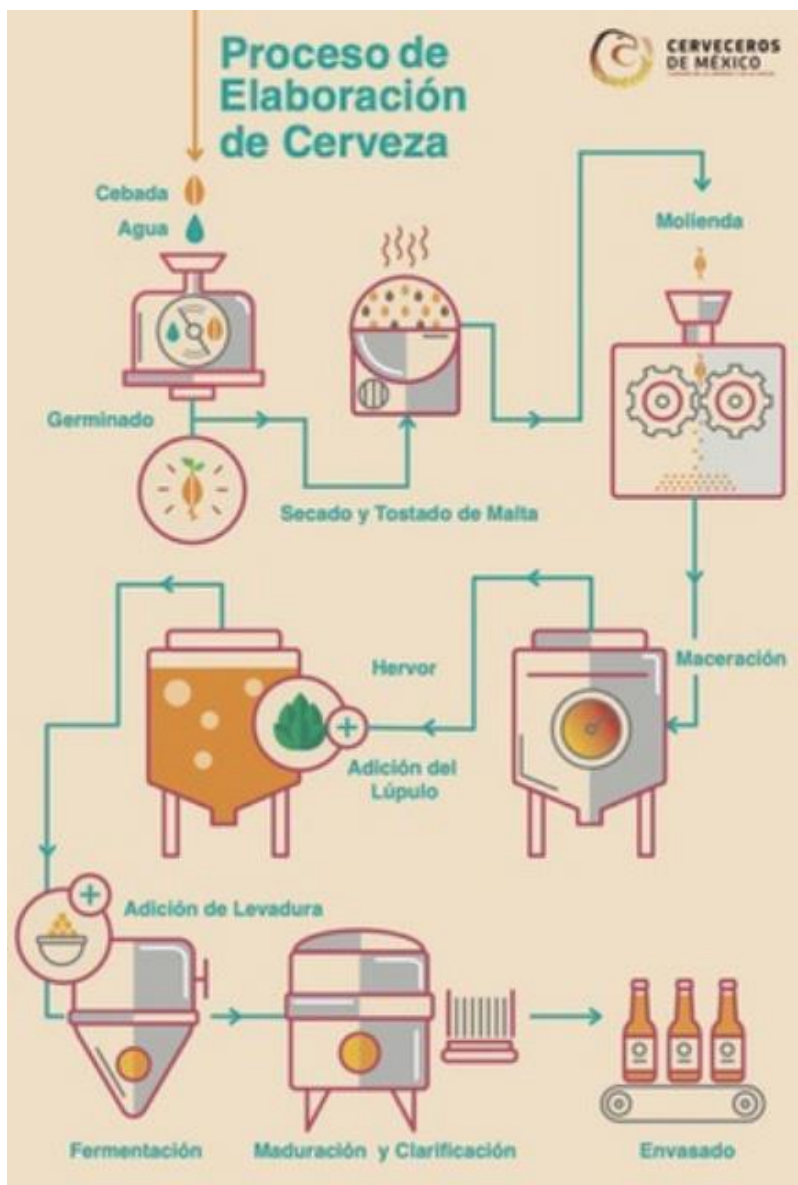


Figura 2. Procedimiento ilustrado de la elaboración de cerveza. Obtenido del portal digital de Cerveceros de México, 2022.

Como se mencionó anteriormente, investigaciones como la de Chand Nimura et al. (2008), son la base para la modificación química del bagazo residual de la elaboración de cerveza, en específico el procedimiento planteado para la modificación de bagazo de uva el cual plantea la molienda del bagazo y mezclado con ácido sulfúrico concentrado, en relación 4:6 (4 gramos de bagazo con 6 mililitros de ácido) durante 24 horas. Para posteriormente ser filtrado y lavado con HCl

concentrado y agua caliente, se hornea el producto por 24 horas a una temperatura de 60 °C.

No es la única metodología de su estilo, pues el método utilizado por Rojas-Chamorro et al. (2019), plantea la modificación de bagazo residual del proceso de elaboración de cerveza mediante la metodología de mezclar el bagazo con ácido sulfúrico en una proporción 1:8 (1 gramo de bagazo con 8 mililitros de ácido sulfúrico) manteniendo en agitación y calentamiento de 5 °C por minuto hasta llegar a 130 °C, durante 40 minutos.

Si bien estas metodologías han logrado obtener resultados positivos para diversas aplicaciones como son la remoción de metales en agua y suelos. Los procedimientos pueden simplificarse de tal forma que se evite la generación de nuevos residuos, como son las emisiones generadas por el horneado y el uso de reactivos en exceso.

Esto es por lo que se plantea seguir los principios de química verde, intentando implementar una metodología que brinde resultados positivos, utilizando menos reactivos, y minimizando la generación de residuos. Con la intención de establecer un procedimiento amigable con la salud y el medio ambiente.

Con la realización de este proyecto, planteamos encontrar una manera de solucionar la falta del recurso agua, probando la eficiencia en la remoción de contaminantes de aguas residuales domésticas con diferentes materiales adsorbentes preparados a partir de la modificación química de un residuo agroindustrial (malta de cerveza), para de esta forma obtener agua con la calidad adecuada para uso directo o indirecto.

Capítulo III.

Procedimiento Experimental

Capítulo III. Procedimiento Experimental

El presente estudio se realizó en la ciudad de Tijuana, Baja California, la cual es una ciudad fronteriza ubicada en el noroeste del país, donde predomina el clima árido, muy seco, con temperatura media anual de 19 °C. Las lluvias son muy escasas, presentándose alrededor de 200 mm de precipitación total anual (INEGI, 2020).

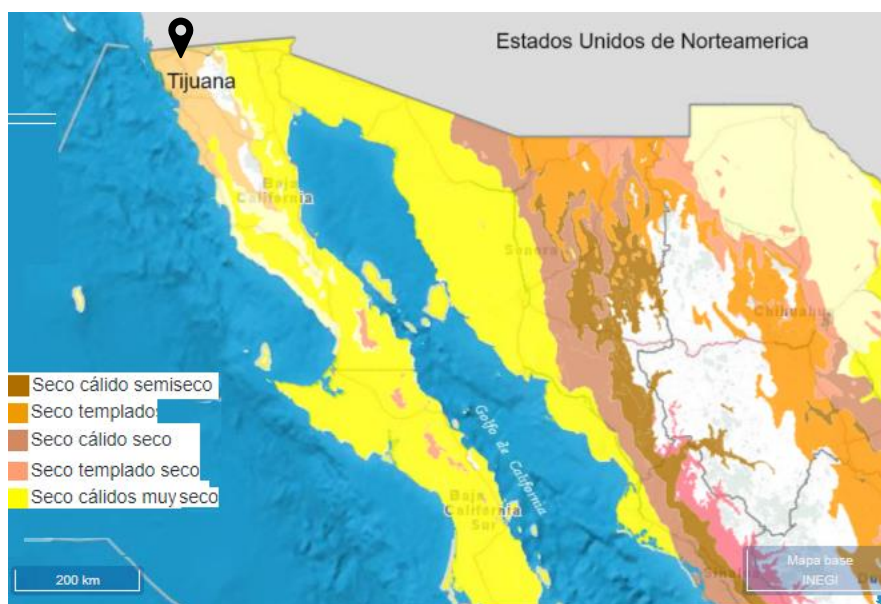


Figura 3. Mapa cartográfico del noroeste de México que integra los diferentes climas de la región. Obtenido del portal digital INEGI, 2020.

Los procedimientos de modificación, caracterización y análisis de muestras fueron llevadas a cabo en el laboratorio de investigación ambiental de posgrado en la Universidad Autónoma de Baja California, campus Otay, en la Facultad de Ciencias Químicas e Ingeniería.

Todos los procedimientos planteados en esta investigación se realizaron bajo la supervisión de los académicos con gran experiencia en los diferentes ámbitos del análisis químico, procurando llevar a cabo prácticas seguras, haciendo uso del

equipo de protección personal pertinente, y ambientalmente responsable utilizando la menor cantidad posible de reactivos y por consecuencia minimizando la generación de residuos.

III.1 Muestreo y modificación de la malta residual.

Se utilizó bagazo del proceso de elaboración de cerveza en una cervecería artesanal local, la cual se compone de malta de cebada y un 8% de maíz. El bagazo se secó al aire libre, extendiéndose sobre mantas, removiendo la humedad de ella, este proceso se realizó en aproximadamente de 10 días. Una vez seco el material, procedió a molerse en mortero para llevar a cabo su modificación.

El bagazo seco se sometió a modificación química, con 3 diferentes ácidos concentrados: Ácido Clorhídrico (HCl al 37% o 12 Molar), Ácido Nítrico (HNO₃ al 37 % o 15.9 Molar) y Ácido Acético Glacial (CH₃COOH al 99.9 % o 17.4 Molar).

La modificación química consistió en la agitación prolongada del bagazo seco con el ácido concentrado en una proporción 1:4 (por cada gramo de bagazo seco se utilizaron 4 mL de ácido concentrado correspondiente).

Se colocaron 20 gramos de bagazo seco en 3 matraces Erlenmeyer de 500 mL, a cada matraz fue agregado un ácido diferente, añadiendo así 80 mL de Ácido Clorhídrico (HCl 37% o 12 Molar) al primer matraz, 80 mL de Ácido Nítrico (HNO₃ al 37 % o 15.9 Molar) al segundo matraz y 80 mL de Ácido Acético Glacial (CH₃COOH al 99.9 % o 17.4 Molar) al tercer matraz.

La adición del ácido fue realizada con probeta graduada, procurando que el ácido cayera a través de las paredes del matraz a una velocidad lenta, pues al ser ácidos concentrados es peligrosa la rápida adición.

A cada matraz se le colocó una barra magnética de agitación mediana o grande, según la disponibilidad del material, con la intención de mantener en agitación todo el fondo del matraz.

Después los matraces se colocaron en un agitador magnético, manteniendo en agitación constante por 24 horas a 3000 rpm. Una vez pasado el tiempo, se agregaron 100 mL de agua destilada a cada matraz, manteniendo la agitación por 15 minutos más.

Se procedió a filtrar el líquido con papel filtro cualitativo por gravedad durante 24 horas, dentro de la campana de extracción, con la finalidad de obtener el material sólido lo más seco posible. Posteriormente y con la finalidad de eliminar la humedad y trazas del ácido que pudiera contener el material adsorbente se coloca en un horno por 24 horas a una temperatura constante de 85 °C. Los residuos generados corresponden a soluciones ácidas diluidas que se dispusieron en el contenedor correspondiente que se encuentra fuera del laboratorio.

III.2 Caracterización de la malta residual antes y después de su modificación.

Con la finalidad de confirmar la modificación del material, se caracterizó el bagazo antes de su modificación química y los tres productos modificados, los cuales se identificaron como M3 HCl, M3 HNO₃ y M3 CH₃COOH.

III.2.1 Espectroscopía Infrarroja

La espectroscopía infrarroja se fundamenta en la absorción de la radiación infrarroja de las moléculas, lo cual las hace vibrar. Pueden distinguirse dos categorías básicas de vibración: de tensión y de flexión.

Las vibraciones de tensión son cambio en la distancia interatómica a lo largo del eje del enlace entre 2 átomos. Las vibraciones de flexión se originan por cambios en el ángulo que forman dos enlaces.

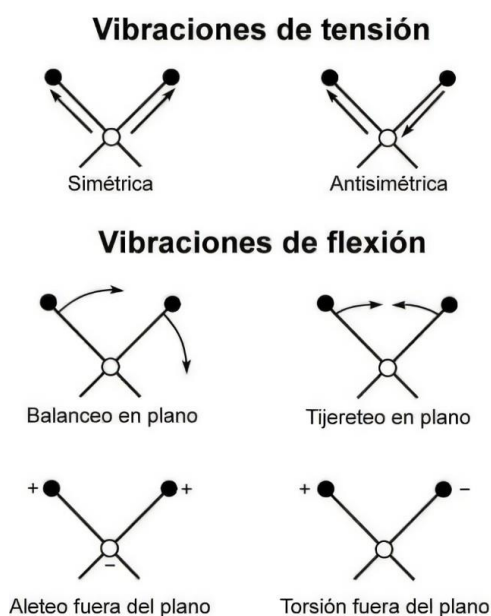


Figura 4. Ilustración de los dos tipos de vibración en las moléculas, generadas por la absorción de energía infrarroja. Ilustración obtenida de: Artículo de divulgación CIATEJ (Mongragon, P., s.f.)

En principio, cada molécula presenta un espectro IR característico, debido a que las moléculas tienen algunas vibraciones que al activarse provocan la absorción de una determinada longitud de onda en la zona del espectro electromagnético correspondiente al infrarrojo.

Una condición necesaria para que se produzca una vibración en una molécula es la presencia de momentos dipolares. Si el momento dipolar es nulo, no hay absorción de energía infrarroja; en caso contrario, habrá absorción de energía. Por lo tanto, algunas especies homonucleares, como el O_2 y Br_2 , no presentan vibraciones.

La espectroscopía infrarroja tiene su aplicación más inmediata en el análisis de cualitativo de materiales. En la zona del espectro electromagnético infrarrojo, entre 4000 y 1300 cm^{-1} , se suelen observar una serie de bandas de adsorción provocadas por las vibraciones entre únicamente dos átomos de la molécula.

Existe una gran variedad de bibliografía con tablas de asignación de bandas o picos de absorción, con la finalidad de facilitar la explicación de un espectro infrarrojo. Las hay organizadas por compuestos, grupos de familias químicas, entre otras.

Para la interpretación de este análisis, se tomó como referencia la siguiente tabla de interpretación de bandas, construida a partir de los diferentes artículos científicos relacionados a la modificación de residuos agroindustriales.

Tabla 1. Compendio de referencias para la interpretación de bandas del espectro IR del bagazo residual de elaboración de cerveza.

Lectura (cm ⁻¹)	Grupo funcional	Asociación	Referencia
3287	O-H (Alcohol)	Fenoles, agua, esteres	Iqbal, M. S., Akbar, J., Hussain, M. A., Saghir, S., & Sher, M. (2011).
	N-H (Amina)	Proteína	Iqbal, M. S., Akbar, J., Hussain, M. A., Saghir, S., & Sher, M. (2011).
2922	C-H (Alkano)	Lípido	Hromádková, Paulsen, Polovka, Košťálová, & Ebringerová 2013; Iqbal et. Al. 2011
2853	C-H (Alkano)	Lípido	Hromádková, Paulsen, Polovka, Košťálová, & Ebringerová 2013; Iqbal et. Al. 2012
1743	C=O (Ester, Carboxílico)	Lignina y Hemicelulosa	Ravindran, R.; Jaiswal, S.; Abu-Ghannam, N.; Jaiswal, A.K. et. Al. 2018
1645	nC=O (Amida)	Proteína	Mussatto, S.I.; Dragone, G.; Roberto, I.C. et. Al. 2006
1532	C=C (Anillo aromático)	Lignina	Borel, L.D.M.S.; Lira, T.S.; Ribeiro, J.A.; Ataíde, C.H.; Barrozo, M.A.S., et. Al. 2008
1373	C=O (Carboxílico)	Arabinoxilano	Hromádková, Z., Paulsen, B. S., Polovka, M., Košťálová, Z., & Ebringerová, A. (2013).
1237	C-H (Alkano)	Celulosa	Borel, L.D.M.S.; Lira, T.S.; Ribeiro, J.A.; Ataíde, C.H.; Barrozo, M.A.S., et. Al. 2008
1032	C-H (Alkano)	Celulosa	Borel, L.D.M.S.; Lira, T.S.; Ribeiro, J.A.; Ataíde, C.H.; Barrozo, M.A.S., et. Al. 2008

Procedimiento:

- Haciendo uso de un espectrofotómetro infrarrojo THERMO SCIENTIFIC NICOLET IS5 con accesorio ID5 ATR, se encendió el equipo y ejecuto el software en la computadora.
- Se introdujo un espectro de fondo en el software, siguiendo las instrucciones en la pantalla.
- Se colocó una pequeña cantidad de muestra directo en el cristal, cubriendo la parte expuesta del mismo y se ejerce presión con el brazo ubicado en la parte superior del disco, girando hasta escuchar 2 clics.
- Se realizó el escaneo, el equipo realiza una serie de escaneos, mostrando en pantalla el resultado promedio de los escaneos.

Se retiró la muestra de la placa y procedió a limpiarse con un pañuelo humedecido en alcohol.

III.2.2 Potencial Z

El potencial Zeta (ζ) es un potencial eléctrico generado por la distribución de cargas en una interfase sólido-líquido. Es una función de la superficie cargada de una partícula, cualquier capa adsorbida en la interfase y la composición del medio en el que la partícula está suspendida.

El potencial Z, es un indicador la que capa superficial de un material, la química de su superficie, la hidrofobicidad o hidrofiliidad de la superficie y como se llevan a cabo los procesos de adsorción en el material.

El experimento se realiza dentro de una celda que permite medir la movilidad electroforética de las partículas. Al aplicar un campo eléctrico, las partículas suspendidas serán atraídas al electrodo de carga opuesta.

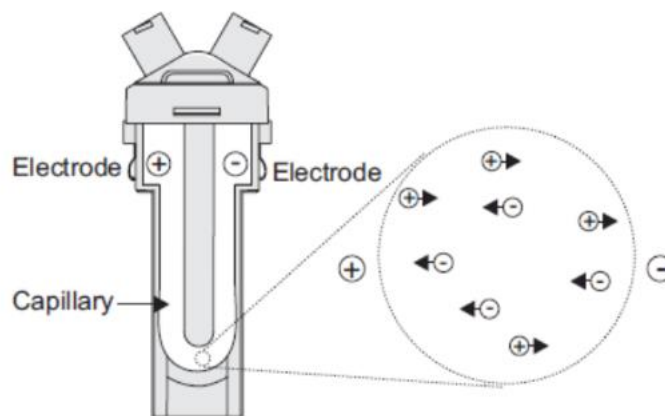


Figura 5. Representación del funcionamiento de una celda eléctrica para la cuantificación del potencial Zeta. Ilustración obtenida de Sumbarda, E., 2019.

Cuando se alcanza el equilibrio entre las fuerzas viscosas del líquido y las fuerzas electroforéticas de las partículas, su velocidad se vuelve constante.

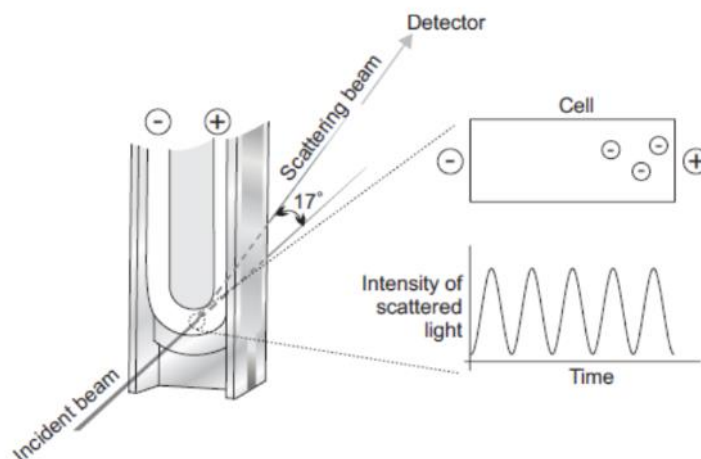


Figura 6. Representación del funcionamiento del equipo Zeta-Meter para la cuantificación del potencial Zeta de un material suspendido. Ilustración obtenida de Sumbarda ,E., 2019.

Procedimiento:

- El equipo utilizado fue Zeta-Meter 3.0, se encendió el equipo y se ejecutó el programa asociado en la computadora.
- Mientras se preparaba el equipo, se realizaron las dispersiones de las muestras, utilizando 25 mg de muestra sólida finamente molida en mortero.
- Se añadió la muestra a 25 mL de solución dispersante.
- Se ingresó la muestra en solución a ultrasónico por 30 minutos.
- Se inyectó la muestra en la celda.
- Se colocó la celda en el equipo y se realiza la medición del potencial Zeta.
- Las mediciones se realizaron por triplicado, para cada muestra.

III.3 Muestreo de agua residual de lavadora.

La muestra de agua se tomó en un hogar directamente de agua residual generada en el lavado de ropa la cual se caracteriza por contener tensoactivos, residuos de jabón, grasas, pelos, pelusa, microorganismos, gran contenido de sales disueltas, entre otros.

Se siguió el procedimiento establecido en la norma mexicana NMX-AA-003-1980 para el muestreo del agua residual.

Procedimiento:

- Identificar la descarga.
- Asignar un numero a la muestra.
- Documentar fecha y hora del muestreo.
- Coordenadas del muestreo.
- Medir la temperatura de la muestra.
- Nombre y firma del responsable del muestreo.

Tomando en cuenta que la muestra debe ser representativa de las características del efluente total que se descarga y tener el volumen suficiente para efectuar las determinaciones correspondientes.

El recipiente muestreador, debe enjuagarse repetidas veces antes de efectuar el muestreo. Una vez efectuado el muestreo, los recipientes de plástico deben cerrarse de tal forma que se evite el derrame de la muestra.

Para preservar la muestra durante el transporte, se utilizó un baño de hielo para su posterior refrigeración a 4 °C. Procurando que el intervalo de tiempo entre la extracción de la muestra y su análisis sea el menor posible.

El agua gris corresponde a una muestra compuesta por 50% de agua residual del drenado de agua jabonosa y 50% del drenado de agua con suavizante, esto con la finalidad de que sea representativa de las características totales de la descarga.

El lavado de ropa se llevó a cabo en una lavadora Whirlpool con capacidad máxima de 22 kg, en el modo carga completa, con la sucesión: lavado, drenaje, enjuague y drenaje. Se preparo la carga con ropa color negra, especialmente ropa que presentaba mucha suciedad, con el fin de que la carga orgánica en el agua fuera significativa, y se procedió a lavar de manera común, agregando 2 tapas de detergente líquido 123 ®, aproximadamente 50 mL y 1 tapa del jabón para ropa oscura, aproximadamente 25 mL.

El suavizante es un producto que se utiliza comúnmente en el lavado de ropa, este cuenta con tensoactivos que se adhieren a las fibras de la ropa, brindando volumen y suavidad. Contribuye a la reducción de arrugas y brinda un olor agradable a las prendas por la gran diversidad de fragancias que existen en el mercado. Para el lavado de ropa se utilizaron 2 tapas de suavizante en el enjuague, aproximadamente 30 mL, marca Ensueño ® fragancia “Lichi+Argan”.

Los ingredientes de cada producto se enlistan a continuación:

Tabla 2. Ingredientes de los productos utilizados en el lavado de ropa, correspondiente a Detergente 123 ®, Jabón para ropa oscura y Suavizante de telas Ensueño ®.

Detergente 123 ®	Jabón para ropa oscura	Suavizante Ensueño ®
Agua, Tensoactivos aniónicos, sal, fragancia, conservador, abrillantador, enzima, colorante azul, Lauril Éter Sulfato de sodio 4-15% Dodecibenceno sulfonato de sodio 0.9-5%.	Agua, surfactantes aniónicos y no iónicos, amidas de coco, aroma, ayudas de proceso, fijador de color, conservador, color, protector UV.	Agua, agentes suavizantes, fragancia con extractos naturales, microcápsulas de fragancia, conservador, agente eliminador de espuma, ayuda de proceso, colorante.

III.4 Remediación del agua gris con el material adsorbente resultante de la modificación química del bagazo residual.

Una vez realizado el muestreo y la modificación química del material adsorbente, se procedió a poner en contacto este material con el agua gris.

Procedimiento:

- Sacar del refrigerador el agua gris muestreada, y permitir su atemperación.
- Medir con probeta graduada 500 mL de agua gris y colocarlos en un matraz Erlenmeyer, se repite por cada material modificado, es decir, se tomaron 3 matraces Erlenmeyer con 500 mL de agua gris cada uno.
- Se pesaron 20 gramos de cada material adsorbente, es decir, 20 gramos de M3 HCl, 20 gramos de M3 HNO₃ y 20 gramos de M3 CH₃COOH.
- Se añadió el material al agua gris, manteniendo los matraces debidamente identificados.
- Se introdujo una barra magnética y procedió a agitarse a 3000 rpm durante 15 minutos.
- Se permitió sedimentar durante 24 horas.
- Posteriormente se filtró con papel filtro cualitativo y se conservó el agua en refrigeración para su posterior análisis.

III.5 Análisis parámetros en agua antes y después de la interacción con material adsorbente.

Los parámetros analizados en el agua antes y después de la interacción con el material adsorbente fueron: pH, Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO_5), concentración de Sulfatos (SO_4^{2-}), Fosfatos (PO_4^{3-}) y Sustancias Activas al Azul de Metileno (SAAM).

III.5.1 Medición de pH

El pH se define como la actividad relativa de los iones de Hidrógeno en disolución. Se expresa como el logaritmo base 10 de la inversa de la concentración molar de iones de hidrógeno en una disolución.

$$pH = -\log a_H$$

Donde:

a_H : es la actividad relativa del ion hidrogeno en base molar según la Norma Mexicana NMX-AA-008-SCFI-2016.

El valor de pH varía de 0 a 14, siendo 7 un valor medio o “neutro” mientras que de 0 a <7 indica un valor ácido y de >7 a 14 indica un valor básico. Valores muy altos o bajos de pH en aguas residuales, implican una toxicidad para el medio ambiente acuático, directa o indirectamente. La medición del pH es importante para el funcionamiento efectivo de procesos de tratamiento y control de contaminantes en aguas residuales.

En las aguas naturales, principalmente, los equilibrios del ácido carbónico (diácido débil) imponen el valor de pH, sin embargo, otras especies presentes en el agua pueden tener un efecto apreciable, como puede ser los equilibrios del ácido

fosfórico, del ion amonio o de algunos compuestos orgánicos. Debido a los equilibrios de disociación, el valor de pH es dependiente de la temperatura del agua, por lo que siempre que se reporte el pH de una muestra se debe reportar la temperatura de esta.

La norma mexicana NMX-AA-008-SCFI-2016, análisis de agua -Medición de pH en aguas naturales, residuales y residuales tratadas-, impone la medición de pH mediante el método potenciométrico con electrodo de vidrio.

Este método mide la diferencia de potencial existente entre un electrodo de vidrio y otro de referencia, ambos sumergidos en la misma solución, según la expresión de Nernts, el potencial del electrodo está relacionado con la concentración de los iones de hidrógeno presentes en la muestra.

$$E_H = E_0 - 2.303 \frac{RT}{F} \log[H^+]$$

Donde:

E_H : Potencial medido.

E_0 : Potencial constante de lectura.

R : Constante de los gases ideales ($8.314 \frac{J}{mol K}$).

F : Constante de Faraday ($96484.556 \frac{C}{mol}$).

$\log[H^+]$: Logaritmo base 10 de la concentración de iones hidrógeno.

Misma ecuación que podemos simplificar de la siguiente manera:

$$E_H = E_0 + (0.0001984) T pH$$

Donde:

0.0001984: es el valor simplificado de las constantes en Volt/Kelvin (V/K)

T: temperatura en Kelvin.

pH: potencial de hidrógeno, valor sin unidad.

Observando la ecuación de Nernst es posible darse cuenta de que el valor de pH es dependiente de la temperatura. Por tal motivo, los equipos comerciales para la medición de pH contienen implementado un compensador automático de temperatura (ATC), conteniendo dentro del mismo electrodo un medidor de temperatura.

Además de lo anterior, el valor de pH puede cambiar rápidamente en una muestra de agua como resultado de procesos químicos, físicos y/o biológicos, especialmente en aguas residuales. Por esta razón, es recomendable medir el pH directamente de la descarga, si no es posible, se lleva a cabo el muestreo y se toma lectura del pH sin exceder 6 horas de la toma.

Procedimiento:

- Para asegurar el buen funcionamiento del electrodo de pH, se debe realizar mantenimiento, limpieza y verificación de acuerdo con las instrucciones del fabricante.
- Utilizar soluciones patrón de referencia para la calibración y verificación del correcto funcionamiento del potenciómetro. Tomando en cuenta que la solución patrón no debe variar en $\pm 5^{\circ}\text{C}$.
- Una vez que la calibración se ha realizado de manera exitosa, esta se deberá comprobar, realizando al menos 3 lecturas de cada una de las soluciones patrón de referencia. Llevando a cabo lecturas independientes, enjuagando el electrodo con agua destilada o desionizada entre cada lectura.
- Una vez que el equipo esta calibrado y verificado, se procedió a realizar la medición de la muestra.

- Se sumergió el electrodo en la muestra, agitando levemente, se espera a que la lectura de pH se estabilice, se registraron 3 lecturas sucesivas e independientes, enjuagando el electrodo con agua destilada entre cada lectura.
- Se reporta el promedio obtenido en unidades de pH a una temperatura de 20 °C.

III.5.2 Demanda Bioquímica de Oxígeno

La demanda bioquímica de oxígeno (DBO_5) constituye una prueba para el estudio de la destrucción de la materia orgánica de manera natural en el agua. Las dificultades de aplicación, interpretación de resultados y reproducibilidad están vinculadas al carácter biológico del método.

A continuación, se presenta un ejemplo de curva de DBO para un efluente urbano, en ella se observa como la curva del consumo de oxígeno se eleva rápidamente hasta una meseta. La oxidación de la materia orgánica no es el único fenómeno que consume oxígeno, también se oxidan nitritos y sales amoniacales.

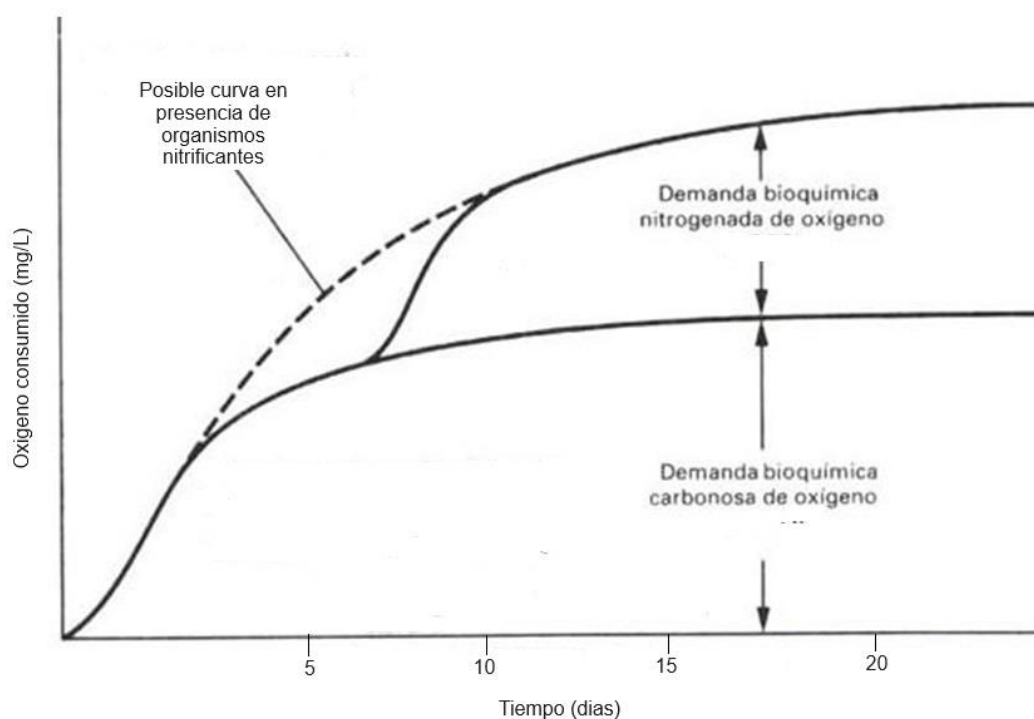


Figura 7. Curva de DBO generalizada para un efluente urbano. Obtenida de Rodier, J., Legube, B., Merlet, N. (2009) *Análisis del agua*. 9na edición Omega. Paris. ISBN: 978-84-282-1530-5

La etapa de nitrificación toma en cuenta sales amoniacales formadas en la oxidación del carbono, lo que podemos resumir en la siguiente ecuación:

Materia Orgánica + Oxígeno + Microorganismos + Elementos nutritivos → Subproductos de biodegradación (CO_2 , H_2O , NH_3) + Biomasa bacteriana.

Pero la medida de DBO no debe tomar en cuenta la nitrificación, es por esto que se mide DBO_5 , es decir, la demanda bioquímica a 5 días.

La determinación de la DBO esta igualmente influenciada por la naturaleza y la cantidad de microorganismos presentes. Por otra parte, es importante realizar la determinación con organismos adaptados a la naturaleza de la materia orgánica presente en la muestra. Esta exigencia de flora apta es fácil de realizar en aguas residuales que ya contienen esta flora, pero eso puede ser delicado con algunas aguas residuales urbanas, que además de no albergar microorganismos susceptibles de biodegradar los compuestos presentes, pueden contener sustancias inhibidoras o poseer del medio inadecuado para la supervivencia. Todos estos elementos se deben tomar en cuenta para efectuar una medida realista de la DBO.

La DBO se define como la cantidad de oxígeno consumido en las condiciones del ensayo, es decir, después de incubar durante 5 días a 20 °C en la oscuridad, por la degradación de materia orgánica presente en el agua muestra.

Procedimiento:

Para la determinación de la demanda bioquímica de oxígeno de las muestras de agua antes y después de entrar en contacto con las maltas modificadas M3 HCl, M3 HNO₃ y M3 CH₃COOH, se llevó a cabo el procedimiento establecido en la Norma Mexicana NMX-AA-028-SCFI-2001, análisis de agua -Determinación de la demanda bioquímica de oxígeno en aguas naturales, residuales (*DBO₅*) y residuales tratadas, según el numeral 10.7.2 Diluciones preparadas directamente en frascos tipo Winkler:

- Utilizando una pipeta volumétrica, se añade el volumen de muestra deseado a frascos Winkler individuales de 300 mL.
- Se añaden cantidades adecuadas del material de siembra a los frascos tipo Winkler o al agua de dilución.
- Se llenaron los frascos con suficiente agua de dilución, de forma que la inserción del tapón desplace todo el aire, sin dejar burbujas. Evitando realizar diluciones mayores de 1:300 (1 mL de la muestra en un frasco).
- Se determinó el OD inicial en uno de los frascos de cada una de las diferentes diluciones.
- En los frascos de los duplicados de cada una de las diluciones, ajustar herméticamente el tapón, poner un sello hidráulico y la contratapa, y se incubó durante 5 días a 20 °C.
- Después de 5 días de incubación, se determinó el Oxígeno Disuelto (OD) en las disoluciones muestra, inmediatamente después de

destapar la botella Winkler, para evitar la absorción de oxígeno del aire.

La determinación de oxígeno disuelto se llevó a cabo mediante el procedimiento establecido en la norma mexicana NMX-AA-012-SCFI-2001, Análisis de agua - Determinación de Oxígeno disuelto en aguas naturales, residuales y residuales tratadas-, siguiendo el método yodométrico.

Procedimiento:

- Para fijar el oxígeno disuelto, adicionar 2 mL de sulfato manganoso a la botella tipo Winkler.
- Agregar 2 mL de disolución alcalina yoduro-azida.
- Tapar la botella tipo Winkler, agitar vigorosamente y dejar sedimentar el precipitado.
- Añadir 2 mL de ácido sulfúrico concentrado, volver a tapar y mezclar hasta la disolución completa del precipitado.
- Titular 100 mL de la muestra con la disolución estándar de tiosulfato de sodio de concentración conocida, agregando el almidón hasta el final de la titulación, cuando se alcance un color amarillo pálido. Continuar hasta la primera desaparición del color azul.
- Las botellas Winkler contienen 300 mL cada una, por lo que la titulación se realizó por triplicado para cada botella.
- Se midió el oxígeno disuelto en las botellas antes de incubar y después de incubar durante 5 días a 20 °C.

Calculo de OD:

$$\text{OD mg/L} = (M \times \text{mL de Tiosulfato} \times 8 \times 1\,000) / 98,7$$

Donde:

OD: Oxígeno disuelto en miligramos por litro de muestra.

M: molaridad de tiosulfato de sodio.

mL de tiosulfato: son los mililitros de tiosulfato utilizados durante la titulación

8: gramos/equivalente de oxígeno.

98.7: es el volumen corregido por el desplazamiento de los reactivos agregados a la botella tipo Winkler.

Cálculo de DBO₅:

$$\text{DBO}_5 \text{ (mg/L)} = \frac{\text{ODi mg/L} - \text{OD}_5 \text{ mg/L}}{\% \text{ de dilución expresado en decimales}}$$

Donde:

DBO₅: Demanda bioquímica de oxígeno en miligramos por litro de muestra.

ODi: Oxígeno disuelto inicial en miligramos por litro.

OD₅: Oxígeno disuelto en la muestra después de incubar 5 días, en miligramos por litro.

% dilución: porcentaje de dilución de la muestra expresado en decimales, es decir, si se tomó un alícuota de 3 mL, corresponde al 1% de la botella, que expresado en decimal es 0.01.

III.5.3 Concentración de sulfatos

El sulfato es la forma más abundante e inocua del azufre en el agua. Su concentración depende de la actividad microbiana y el oxígeno disuelto; puede desencadenar problemas de corrosión, mal olor y sabores desagradables en el agua, también puede tener un efecto laxante a altas concentraciones.

La concentración de sulfatos en agua se determina mediante un método turbidimétrico, utilizando cloruro de bario a la muestra para generar un precipitado de sulfato de bario que enturbia la muestra y se lee la absorción de luz a 420 nm. Se cuantifica la concentración utilizando una curva de calibración.

El método de prueba establecido por la NMX-AA-074-SCFI-2014, medición del ion sulfato en aguas naturales, residuales y residuales tratadas, es aplicable a muestras con una concentración de sulfatos en el intervalo de 1 a 40 mg/L de SO_4^{2-} , así mismo la materia suspendida y el color pueden causar interferencias en el resultado por método turbidimétrico. Además de esto, no existen otros iones además del sulfato que formen compuestos insolubles con bario, bajo condiciones ácidas.

Debido a la naturaleza del agua gris, conociendo que, al ser agua jabonosa, se esperaba obtener una concentración de sulfatos mucho mayor a 40 mg/L. Lo cual se confirmó al intentar llevar a cabo el procedimiento por método turbidimétrico, sin embargo, no se logró obtener resultados a través de este por interferencia del color de las muestras.

Por lo cual, se llevó a cabo la determinación de sulfatos por método gravimétrico, el cual consiste en separar los sulfatos formando un precipitado difícil de disolver con cloruro de bario, en medio ácido.

Procedimiento:

- Se filtró la muestra de agua con la intención de evitar posibles interferencias por la materia suspendida.
- Se midió el pH, y de ser necesario se acidifica con 1 gotas de Ácido clorhídrico concentrado.
- Se colocaron 50 mL de agua muestra sobre una cápsula de porcelana, previamente llevada a peso constante según las instrucciones de la norma mexicana NMX-AA-034-SCFI-2001, Análisis de agua - Determinación de sólidos y sales disueltas en aguas naturales, residuales y residuales tratadas- en su apartado 9.1 preparación de cápsulas de porcelana.
- Se colocó la cápsula con la muestra sobre una estufa y se calienta hasta 80 °C.
- Se agitaba con varilla de vidrio mientras se añadió gota a gota una solución de cloruro de bario de concentración conocida, teniendo cuidado de no arrastrar sólidos con la varilla de vidrio fuera de la cápsula de porcelana.
- Se observa que al añadir la gota de cloruro de bario se forma un precipitado blanco, se continuo hasta que al agregar la gota no se forme precipitado.
- Se mantuvo en calentamiento hasta que el volumen de agua fuera mínimo. Se procedió a llevar la cápsula de porcelana a 80 °C en horno durante 1 hora, para eliminar toda la humedad del precipitado sin provocar hervor.

- Pasado el tiempo, se enfrió la cápsula de porcelana en desecador durante 30 minutos.
- Se pesó y repitió el procedimiento, hasta obtener un peso constante.
- Se determinó el contenido de sulfatos a partir del peso de sulfato de bario obtenido.

Cálculos:

$$\text{Factor gravimétrico (FG)} = \frac{\text{Masa Molar del } SO_4^{2-}}{\text{Masa Molar del } BaSO_4}$$

$$\% SO_4^{2-} = \frac{FG \times \text{peso del precipitado}}{\text{volumen de la muestra}} \times 100$$

Donde:

Masa molar del ion sulfato: 96.06 g/mol.

Masa molar del sulfato de bario: 233.39 g/mol.

Factor gravimétrico (FG): 0.41158.

III.5.4 Concentración de fosfatos

Los fosfatos pueden encontrarse en las aguas residuales en forma de sales minerales (ortofosfatos, polifosfato) y también en forma de compuestos orgánicos, provenientes de detergentes, escorrentías agrícolas y otros procesos biológicos.

El fósforo es un nutriente esencial para el crecimiento de organismos, por lo que la descarga de fosfatos en cuerpos de agua puede estimular el crecimiento de macro y microorganismos fotosintéticos en cantidades nocivas para el equilibrio ecológico.

La norma mexicana NMX-AA-029-SCFI-2001, análisis de agua -Determinación de fósforo total en aguas naturales, residuales y residuales tratadas- establece dos métodos de análisis:

1. Método cloruro estañoso:

Este método se basa en la reacción del fósforo contenido en la muestra como ortofosfato con el ácido molíbdico para formar el ácido 12-molibdofosfórico, el cual es reducido por el cloruro de estaño a azul de molibdeno, la intensidad del color azul depende de la concentración de fosfatos.

2. Método ácido vanadomolibdofosfórico:

Es una disolución diluida de ortofosfatos, el molibdato de amonio reacciona en condiciones ácidas con el vanadato para formar un heteropoliácido, el ácido vanadomolibdofosfórico, color amarillo, la intensidad del color es directamente proporcional a la concentración de fosfatos.

Ambos métodos presentan una variabilidad en la longitud de onda a medir, según el intervalo esperado de concentración de fosfatos. Siendo la concentración mínima de 1 mg/L.

Si bien, se esperaba obtener una alta concentración de fosfatos en el agua gris, los detergentes utilizados contienen una nota de “Libres de fosfatos”, por lo que el rango de detección muy probablemente no logre determinar la concentración de fosfatos en el agua.

Debido a esto, fue utilizado el procedimiento HACH 8178, para la detección de fósforo en aguas, aguas residuales y aguas de mar, siendo un método adaptado de *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater* (métodos estándar para el análisis de aguas y aguas residuales). El cual tiene un intervalo de detección de 0.04 mg/L a 30 mg/L de PO_4^{-3} (fosfatos).

Procedimiento:

- Se enciende el equipo e ingresar el número del programa integrado en el software.
- Se llenó una probeta con 25 mL de muestra.
- Se agregó 1 mL del reactivo de molibdato.
- Se agregó una bolsa de polvo reactivo de aminoácido para determinación de fosfatos #193432
- Se permite un periodo de reacción de 10 minutos.
- Se prepara el blanco con agua desionizada y lee el cero en el equipo.
- Se leyeron las muestras, los resultados fueron arrojados por el equipo en mg/L de PO_4^{-3} .

III.5.5 Sustancias Activas al Azul de Metileno

Los tensoactivos entran en las aguas limpias y residuales principalmente por la descarga de residuos acuosos del lavado domestico e industrial de ropa y otras operaciones de limpieza.

Un tensoactivo combina en una sola molécula un grupo hidrófobo con uno hidrófilo. Estas moléculas tienden a congregarse en las interfases entre el medio acuoso y las otras fases del sistema, como aire, líquidos oleosos y partículas, formando espuma, emulsificación y suspensión de partículas.

Un alto contenido de detergentes en agua puede provocar formación de espuma, toxicidad para la vida acuática y crecimiento desmesurado de la flora acuática. El contenido de detergentes se puede determinar por su reacción con el azul de metileno.

La norma mexicana NMX-AA-039-SCFI-2001, análisis de agua -Determinación de sustancias activas al azul de metileno (SAAM) en aguas naturales, potables, residuales y residuales tratadas- establece la medición de este parámetro mediante método espectrofotométrico.

El principio del método se basa en la formación de un par iónico extraíble con cloroformo de color azul por la reacción del azul de metileno catiónico y un tensoactivo aniónico, como pueden ser el Sulfonato de Alquilbenceno Lineal, otras sulfonatos y esteres de sulfonato.

El cloroformo retiene los pares iónicos altamente hidrófobos que pueden formarse por sustancias que interfieren. Mientras que la fase orgánica se mide espectrofotométricamente a una longitud de onda de 652 nm y es proporcional a la cantidad de agentes surfactantes aniónicos presentes.

Procedimiento:

- Preparó una curva de calibración mínima de 4 puntos en el intervalo de 0.01 a 0.20 mg de Sulfonato Alquilbenceno Lineal (SAL).
- Se tomó un volumen de muestra, en base a la concentración de SAAM estimada, y colocar en un embudo de separación de 500 mL.
- Se ajustó el pH con fenolftaleína, añadiendo hidróxido de sodio para producir un color rosa y luego adicionar gota a gota solución diluida de ácido sulfúrico hasta la desaparición de color.
- Se adicionaron 25 mL de la disolución de azul de metileno y mezclar.
- Se adicionaron 10 mL de cloroformo y agitar durante 30 segundos, liberando la presión en el embudo.
- Se permite la separación de las fases y drenar el cloroformo.
- Se repitió la extracción con dos porciones adicionales de cloroformo.
- Se añadieron 20 mL de cloroformo al segundo embudo de separación y repetir la agitación.
- Se transfirió la fracción orgánica a un matraz volumétrico y aforar a 100 mL con cloroformo.
- Se midió la absorbancia a 652 nm, con cero de cloroformo. Se debe medir en un periodo de 30 min después de su formación.

Si bien este procedimiento se encuentra normado, existen procedimientos actualizados que permiten analizar el contenido de SAAM en muestras de agua sin gastar grandes volúmenes de reactivos.

Se llevo a cabo el procedimiento HACH TNT874, descrito en el manual del espectrofotómetro DR 5000 (HACH, 2006), el cual consiste en la utilización de almohadillas HACH preparadas con azul de metileno.

Procedimiento HACH:

- Se preparo la curva de calibración en el intervalo de 0.01 a 0.20 mg de SAL.
- Se tomaron 75 mL de muestra en un embudo de separación y añadir 2 mL de buffer pH 2 y agitar 5 segundos.
- Se agrega una almohadilla de polvo reactivo de azul de metileno y se agitó hasta disolver.
- Se añadieron 7.5 ml de cloroformo y agitar 1 minuto.
- Se separan fases y se realizó un segundo lavado con 5 mL más de cloroformo.
- Se lee la fase orgánica color azul a 652 nm en espectrofotómetro DR 5000.

El equipo contiene integrado un software con diversos análisis preestablecidos, uno de ellos es el análisis de SAAM, siendo posible arrojar el resultado en mg/L.

Capítulo IV.

Resultados y discusión

Capítulo IV. Resultados y discusión

IV.1 Muestreo y modificación de la malta residual

Se muestreó el bagazo residual de la elaboración de cerveza de una cervecería local, este bagazo se compone de malta de cebada con un 8% en peso de maíz. Se extendió sobre mantas durante 10 días, con la finalidad de secarlo.

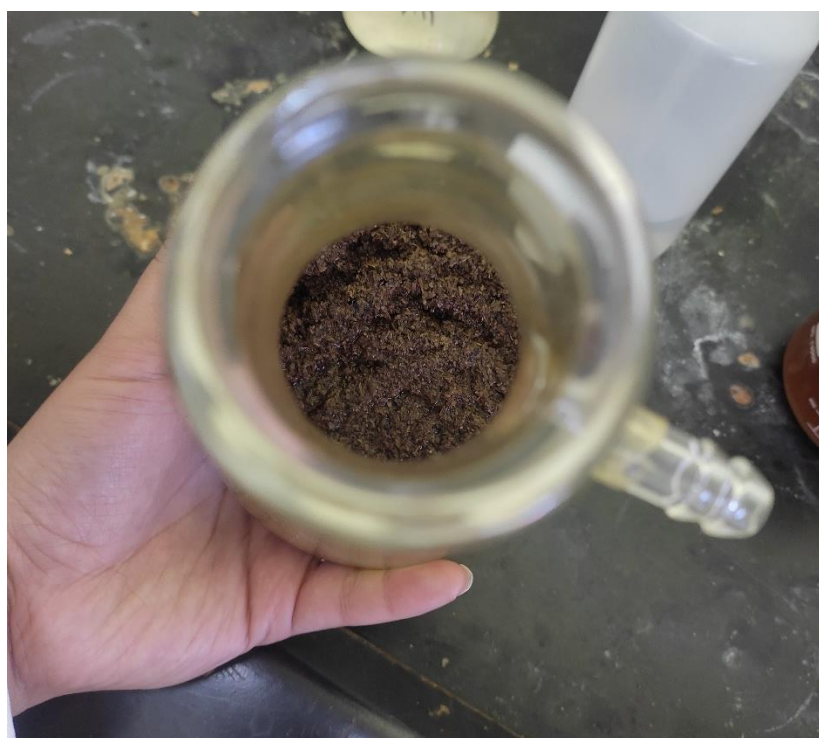


Figura 8. Bagazo seco de malta de cebada más 8% de maíz, antes de su modificación química.

Una vez seco, se sometió a tratamiento químico con 3 diferentes ácidos concentrados: Ácido Clorhídrico (HCl 37% o 12 Molar), Ácido Nítrico (HNO_3 al 37 % o 15.9 Molar) y Ácido Acético Glacial (CH_3COOH al 99.9 % o 17.4 Molar).

Identificando a los tres materiales resultantes como: M3 HCl , M3 HNO_3 y M3 CH_3COOH .



Figura 9. Imagen de la modificación química del bagazo residual con ácido nítrico concentrado.

Como producto de las modificaciones químicas se obtuvieron 3 materiales sólidos, con características muy peculiares, los materiales M3 HCl, M3 HNO₃ presentan gran capacidad higroscópica, es decir, adsorben agua del ambiente creando una pasta.

Si bien no se evaluaron las propiedades de esta pasta, fue un indicio de que el material es muy afín al agua, sin disolverse en ella, lo que lo vuelve el material ideal para la remediación de aguas residuales.

IV.2 Caracterización de la malta residual antes y después de su modificación

IV.2.1 Espectroscopía Infrarroja

En Excel, se trataron los datos presentados en el Apéndice A, normalizándolos para disminuir las señales de interferencia por ruido en el equipo y poder comparar en un mismo gráfico las modificaciones realizadas en los materiales.

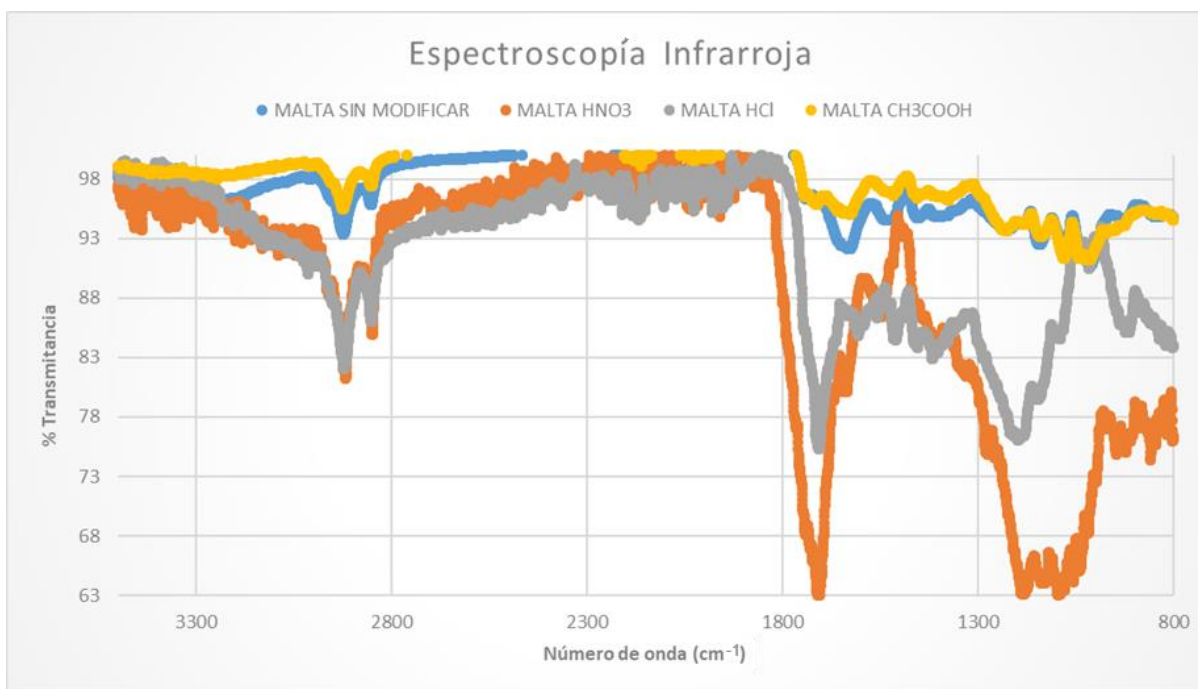


Figura 10. Gráfico de los espectros infrarrojos normalizados.

La modificación más notoria es la banda a 3200 cm⁻¹, la cual nos habla del enlace O-H, el cual se le puede asignar a alcoholes, agua, éteres, y compuestos relacionados (Iqbal et al., 2011); lo cual tiene sentido, pues el material modificado, en especial M3 HCl y M3 HNO₃ son muy higroscópicos; además de la desaparición del pico a 1620 cm⁻¹ asociado a la proteína de la malta (Mussatto et al., 2006).

Se observa también, que el espectro de M3 CH₃COOH es el más parecido al del bagazo sin modificar, encontrando modificaciones muy sutiles, como la desaparición del pico a 1620 cm⁻¹, lo cual nos habla de una digestión de la proteína de la malta, siendo congruente con la modificación química realizada.

La región de 1200 a 900 cm⁻¹ es característica de polisacáridos (Hromadkova et al., 2013), misma que se encuentra aumentada en los materiales modificados. De igual forma, se puede observar que en el espectro de la malta sin tratar se identifica alrededor de los 1500 y 1530 cm⁻¹ el pico correspondiente al enlace doble carbono-carbono de la fracción aromática de la lignina y a los 1200 cm⁻¹ el pico que corresponde al enlace sencillo carbono-hidrógeno de la celulosa, señales que se ven modificadas en los espectros de las muestras tratadas con los tres ácidos.

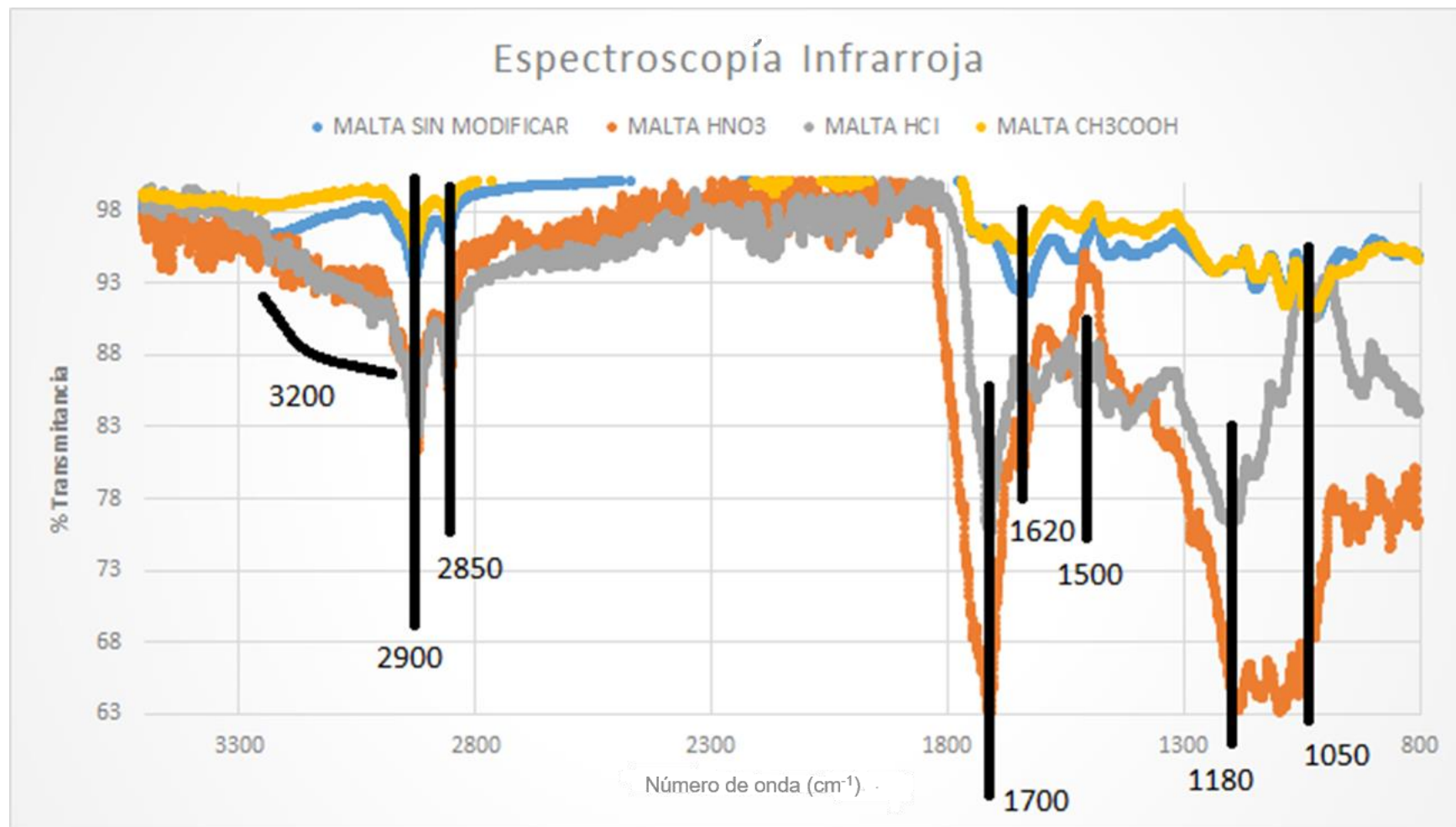


Figura 11. Gráfico de los espectros infrarrojos normalizados, señalando las bandas características que afirman la modificación química del material.

IV.2.2 Potencial Z

Las mediciones de potencial Zeta, realizadas por el equipo Zeta-Meter 3.0, fueron documentados e importados de un archivo Excel, mismo que se simplifica a continuación por medio de una tabla.

Tabla 3. Resultados obtenidos por la medición del potencial Z de las muestras en el equipo Zeta-Meter 3.0.

<i>Record</i>	<i>Type</i>	<i>Sample Name</i>	<i>Measurement Date and Time</i>	<i>T °C</i>	<i>ZP mV</i>	<i>Mob $\mu\text{mcm/Vs}$</i>	<i>Cond mS/cm</i>
1	Zeta	agua 1	viernes, 10 de marzo de 2023 01:10:13 p.m.	25	-1.02	-0.07997	0.00268
2	Zeta	agua 2	viernes, 10 de marzo de 2023 01:17:42 p.m.	25	-6.71	-0.5258	0.00301
3	Zeta	agua 3	viernes, 10 de marzo de 2023 01:20:43 p.m.	25	-0.531	-0.04161	0.00286
4	Zeta	CH ₃ COOH 1	viernes, 10 de marzo de 2023 01:29:32 p.m.	25	-17.9	-1.404	0.0491
5	Zeta	CH ₃ COOH 2	viernes, 10 de marzo de 2023 01:32:39 p.m.	25	-16.8	-1.318	0.0491
6	Zeta	CH ₃ COOH 3	viernes, 10 de marzo de 2023 01:33:20 p.m.	25	-17.4	-1.366	0.0492
7	Zeta	HNO ₃ 1	viernes, 10 de marzo de 2023 01:37:15 p.m.	25	-29.1	-2.285	0.405
8	Zeta	HNO ₃ 2	viernes, 10 de marzo de 2023 01:40:15 p.m.	25.1	-28.7	-2.253	0.412
9	Zeta	HNO ₃ 3	viernes, 10 de marzo de 2023 01:40:56 p.m.	25	-28.9	-2.269	0.416
10	Zeta	HCl 1	viernes, 10 de marzo de 2023 01:46:33 p.m.	25	23.7	1.861	0.405
11	Zeta	HCl 2	viernes, 10 de marzo de 2023 01:49:32 p.m.	25.1	25.5	2.003	0.413
12	Zeta	HCl 3	viernes, 10 de marzo de 2023 01:50:13 p.m.	25	26.3	2.059	0.417

Las muestras de nombre “agua” se refieren al blanco utilizado de agua desionizada. Se midió el potencial Zeta de cada muestra por triplicado, y a partir de ello, se generó un promedio del valor de potencial Zeta.

Tabla 4. Valor promedio del potencial zeta de cada material modificado.

Muestra	Potencial Z
<i>M3 HCl</i>	+25.5
<i>M3 HNO₃</i>	-28.9
<i>M3 CH₃COOH</i>	-17.4

El potencial Z, es un indicador la que capa superficial del material, la química de su superficie, la hidrofobicidad o hidrofiliidad de la superficie y como se llevan a cabo los procesos de adsorción en el material.

El resultado importante de esta prueba es conocer la carga superficial del material modificado, lo cual representa su forma de interactuar con el medio acuoso, siendo así los materiales M3 HNO₃ y M3 CH₃COOH, atrayentes de cationes y M3 HCl repelente de cationes.

Esto puede explicarse por la naturaleza de la modificación del material M3 HCl, dado que el ion cloruro es fácilmente disuelto en agua caliente, además del tamaño de partícula, es mucho más probable que el ion cloruro sea removido del material al filtrarse, quedando la superficie de este material con mayor presencia de protones (iones H₃O⁺) provenientes del HCl.

En el caso de los materiales M3 HNO₃ y M3 CH₃COOH, sus superficies posiblemente contengan una cantidad considerable de los iones nitrato (NO₃⁻¹) y acetato (CH₃COO⁻¹), los cuales quedaron incrustados en el material, lo que permite atraer con mayor facilidad sustancias contaminantes catiónicas en el agua.

IV.3 Muestreo de agua residual de lavadora

- Identificar la descarga.

El muestreo se llevó a cabo directamente a la salida de la manguera de dren de agua de una lavadora doméstica. Esta agua residual se caracteriza por contener detergentes, materia suspendida, sales, grasas, entre otros.

- Asignar un número a la muestra.

La muestra fue recolectada en un recipiente de plástico, previamente identificado como “Agua gris”, la muestra fue compuesta por 50% agua de dren jabonosa y 50% agua de dren de enjuague.

- Documentar fecha y hora del muestreo.

El muestreo se llevó a cabo el día 20 de octubre 2022, aproximadamente a las 11:35 horas.

- Coordenadas del muestreo.

Por cuestiones de seguridad, no es posible compartir las coordenadas exactas del muestreo, pues se trata de un domicilio particular. Sin embargo, se puede comentar que fue realizado en la Delegación La presa Abelardo L. Rodríguez, ubicada en la zona este de la ciudad de Tijuana, Baja California.

- Nombre y firma del responsable del muestreo

El muestreo fue llevado a cabo por su servidora, Karen Joselyne Gomez Palacios.

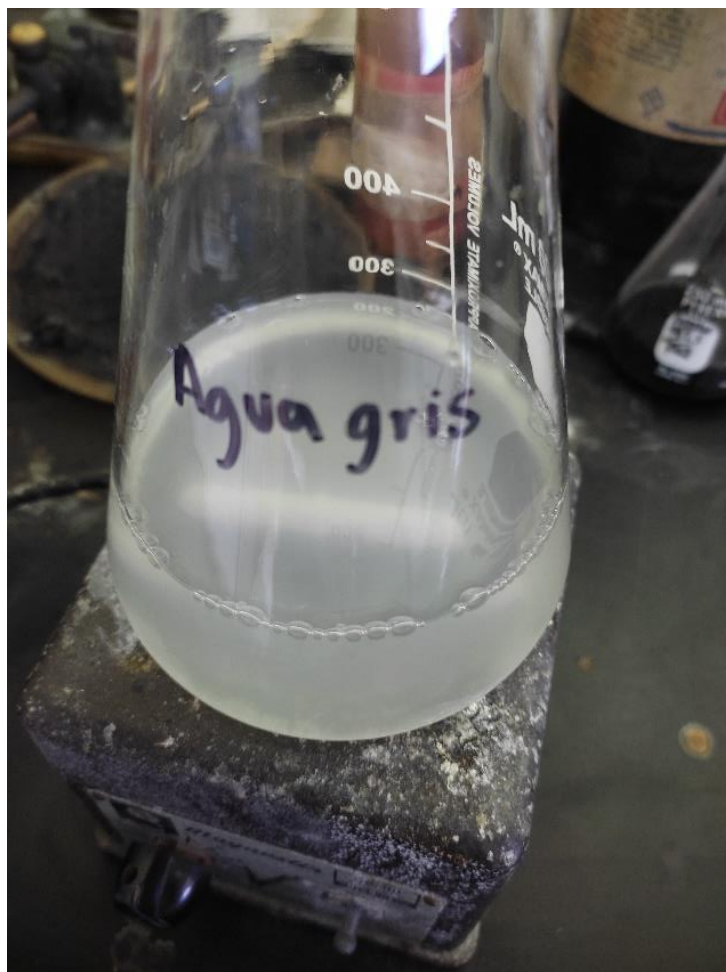


Figura 12. Fotografía del agua gris antes de ponerse en contacto con el material adsorbente.

IV.4 Remediación del agua gris con el material adsorbente resultante de la modificación química de la malta residual.

Se tomaron las siguientes fotografías de los sistemas después de seguir el procedimiento descrito anteriormente.

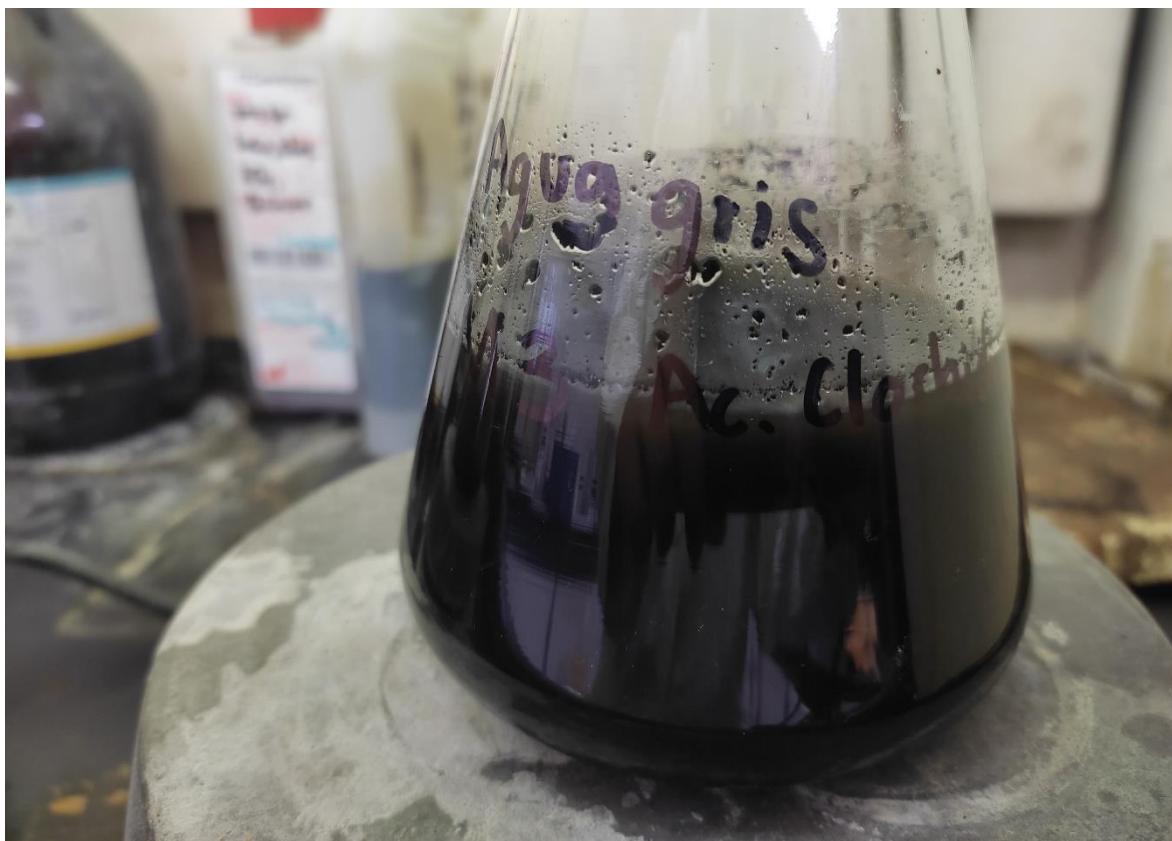


Figura 13. Fotografía del cambio de color observable en el agua gris al entrar en contacto con el material modificado con Ácido Clorhídrico.

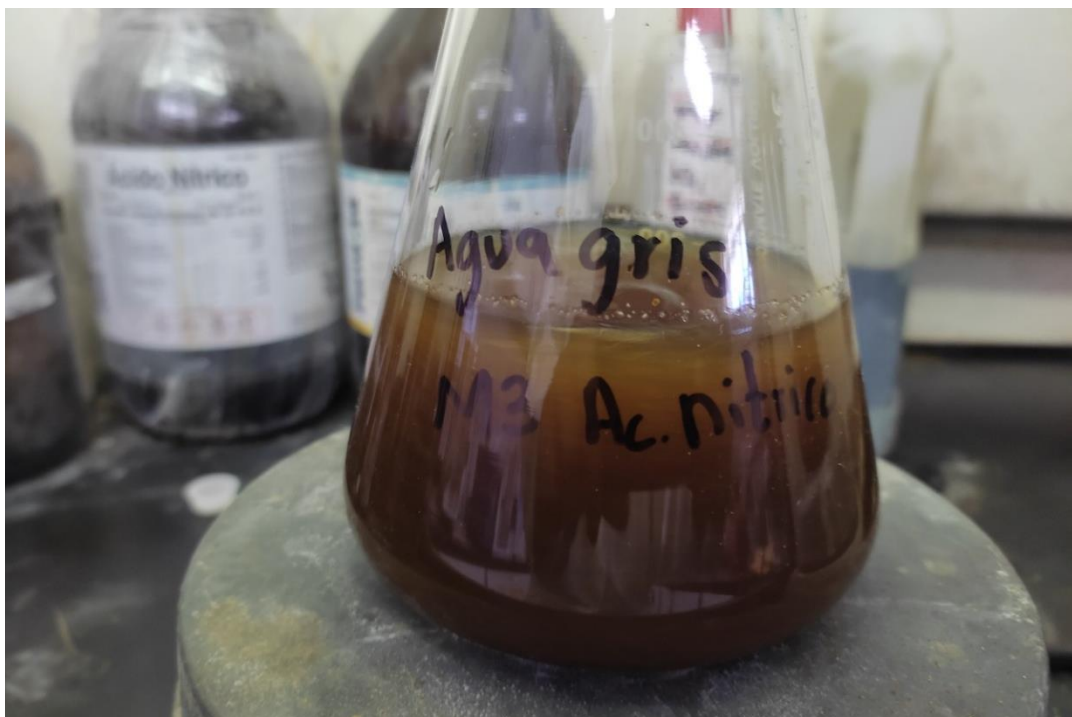


Figura 14. Fotografía del cambio de color observable en el agua gris al entrar en contacto con el material modificado con Ácido Nítrico.

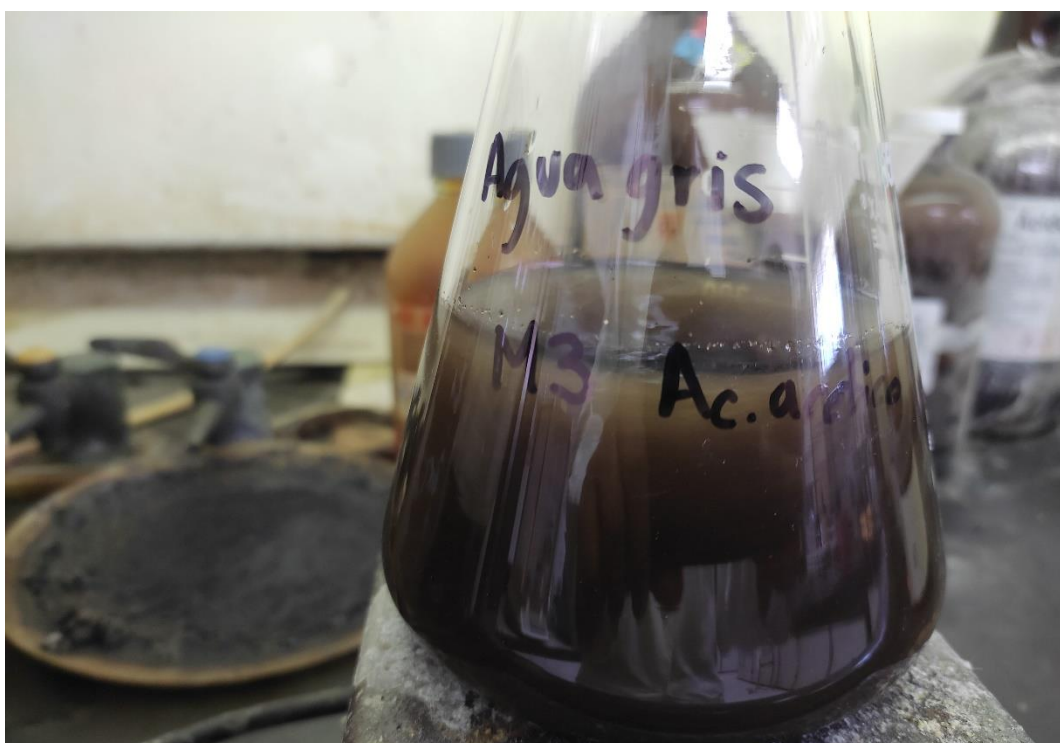


Figura 15. Fotografía del cambio de color observable en el agua gris al entrar en contacto con el material modificado con Ácido Acético Glacial.



Figura 16. Fotografía de las muestras M3 HCl, M3 HNO₃, M3 CH₃COOH, después de los 15 minutos de agitación con el agua gris, para proceder a sedimentar durante 24 horas.

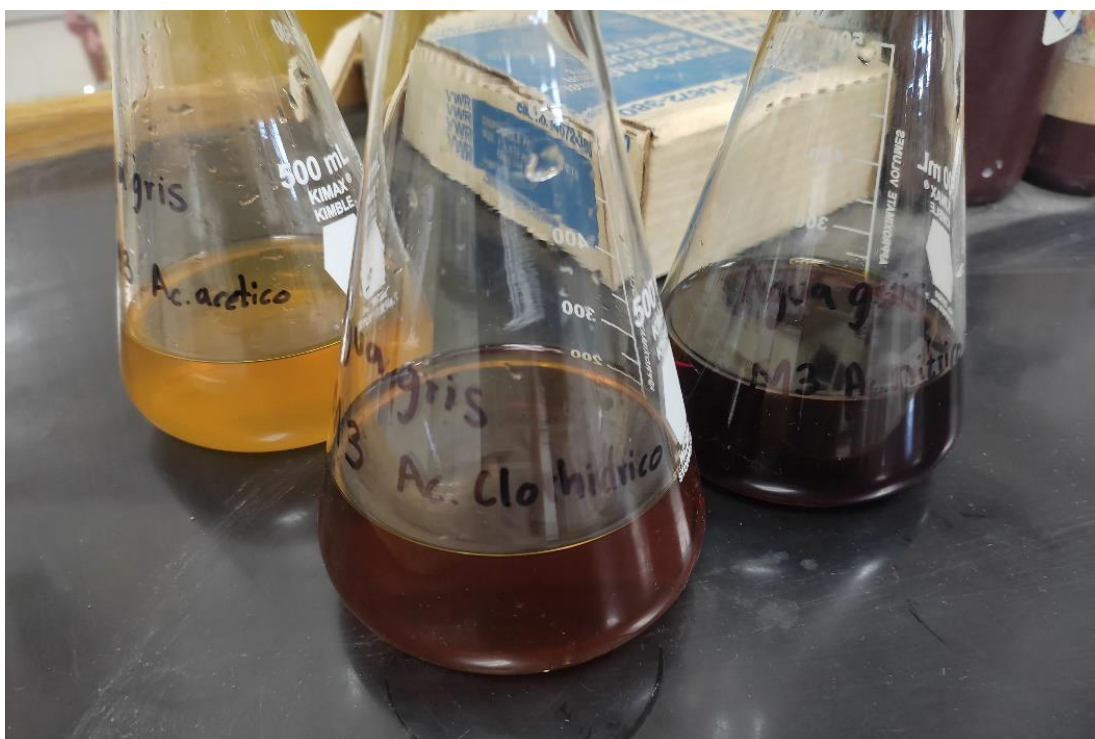


Figura 17. Fotografía de las muestras M3 HCl, M3 HNO₃, M3 CH₃COOH después de filtrar el material residual.

IV.5 Análisis de parámetros en agua antes y después de la interacción con material adsorbente.

IV.5.1 Medición de pH

Se realizaron las mediciones el día 26 de octubre de 2022, utilizando un potenciómetro portátil HANNA HI8424, calibrada a dos puntos con buffers de pH 4.01 y pH 7.01, obteniendo los siguientes resultados.

Tabla 5. Mediciones de pH realizadas a las muestras de agua.

Muestra	Medición 1	Medición 2	Medición 3	Temperatura
Agua gris	7.00	6.90	7.05	15
M3 HCl	2.05	2.01	2.03	20
M3 HNO ₃	2.12	1.97	2.06	20
M3 CH ₃ COOH	4.12	4.00	4.09	20

Los resultados son congruentes, al tratar el material con diferentes ácidos, se espera que aporte acidez al agua después de estar en contacto con éste. Además, podemos observar como las características de cada ácido se ven presentes en el nivel de acidez brindado al agua, siendo la muestra M3 HCl la que presenta un valor más ácido, seguido de la muestra M3 HNO₃ por una mínima diferencia en los valores, mientras que la muestra M3 CH₃COOH presenta un valor menor de acidez correspondiente a su naturaleza de ácido débil.

IV.5.2 Demanda Bioquímica de Oxígeno

Los resultados de la Demanda Bioquímica de Oxígeno de las muestras de agua gris antes y después de ponerlas en contacto con los materiales modificados se muestran a continuación.

Tabla 6. Base de cálculo para la determinación de la demanda bioquímica de las muestras de agua.

	mL muestra	OD inicial	OD inicial	OD inicial	OD final	OD final	OD final	OD inicial-OD final			Δ OD/Dilución			
M3 HCl	1	16.68085	17.15745	16.68085	13.82127	13.82127	13.82127	2.85957	3.33617	2.85957	857.87	1000.85	857.87	Promedio
M3 HCl	3	16.68085	16.68085	16.68085	8.10212	8.10212	8.10212	8.57872	8.57872	8.57872	857.87	857.87	857.87	864.23 mg/L
M3 HCl	5	16.20426	16.20426	16.20426	2.38297	2.38297	2.38297	13.82128	13.82128	13.82128	829.28	829.28	829.28	
M3 HNO ₃	1	16.20426	16.20426	16.20426	12.39148	12.39148	12.39148	3.81276	3.81276	3.81276	1143.83	1143.83	1143.83	
M3 HNO ₃	3	16.68085	16.68085	16.68085	6.67234	6.67234	6.67234	10.00851	10.00851	10.00851	1000.85	1000.85	1000.85	1019.91 mg/L
M3 HNO ₃	5	16.68085	16.68085	16.68085	1.42978	1.42978	1.42978	15.25106	15.25106	15.25106	915.06	915.06	915.06	
M3 CH ₃ CCOH	1	17.15745	17.15745	17.15745	14.77446	14.77446	14.77446	2.38298	2.38298	2.38298	714.89	714.89	714.89	
M3 CH ₃ COOH	3	16.68085	16.68085	16.68085	10.48510	10.48510	10.48510	6.19574	6.19574	6.19574	619.57	619.57	619.57	654.52 mg/L
M3 CH ₃ COOH	5	16.68085	16.68085	16.68085	6.19574	6.19574	6.19574	10.48511	10.48511	10.48511	629.11	629.11	629.11	
Agua gris	1	17.15745	17.15745	17.15745	14.29787	14.29787	14.29787	2.85957	2.85957	2.85957	857.87	857.87	857.87	
Agua gris	3	17.15745	17.15745	17.15745	10.48510	10.48510	10.48510	6.67234	6.67234	6.67234	667.23	667.23	667.23	718.07 mg/L
Agua gris	5	17.15745	17.15745	17.15745	6.67234	6.67234	6.67234	10.48511	10.48511	10.48511	629.11	629.11	629.11	

[Tiosulfato de sodio] 0.0588M

Jueves 17 de noviembre 2022

Responsable: Gomez Palacios Karen Joselyne

Martes 22 de noviembre 2022

Responsable: Gomez Palacios Karen Joselyne

Los resultados de DBO_5 indican un aumento en el consumo de oxígeno disuelto, lo que está directamente relacionado con un aumento de la carga orgánica en las muestras M3 HCl y M3 HNO_3 con respecto a la muestra original de agua gris con un 20.35% y 43.03% respectivamente, a diferencia de la muestra M3 CH_3COOH la cual disminuye el consumo de oxígeno disuelto en el agua con un 8.85%.

Si bien es comprensible el aumento de la carga orgánica en el agua que tuvo contacto con el material adsorbente, esto debido a la composición del material, la cual como observamos anteriormente contiene carbohidratos digeridos por el ácido, entre más fuerte el poder del ácido se ve relacionada una mayor digestión del material (Espinosa et al., 2021).

Por lo que podemos aseverar que la aparente mínima disminución de la carga orgánica por parte del material M3 CH_3COOH se debe a su poder de ácido débil que no digiere por completo carbohidratos complejos, por lo que no los transfiere al agua con la que tuvo contacto.

IV.5.3 Concentración de sulfatos

Se intento realizar la determinación de sulfatos por el método de prueba establecido por la NMX-AA-074-SCFI-2014, medición del ion sulfato en aguas naturales, residuales y residuales tratadas; debido a la naturaleza del agua gris, la cual contiene materia suspendida, color y en teoría una alta concentración de sulfatos por los detergentes utilizados no fue posible obtener resultados consistentes por el método turbidimétrico.

Sin embargo, al no existir otros iones que formen compuestos insolubles con bario, en condiciones ácidas, fue posible realizar la determinación de sulfatos por método gravimétrico, utilizando una disolución de Cloruro de Bario al 5% (BaCl_2 0.24 M), obteniéndose los resultados presentados en la tabla 7.

Tabla 7. Resultados de la determinación de sulfatos en las muestras de agua por método gravimétrico.

Muestra	Concentración de SO_4^{-2} (mg/L)
<i>Agua gris</i>	1 074.63
<i>M3 HCl</i>	134.39
<i>M3 HNO₃</i>	205.19
<i>M3 CH₃COOH</i>	175.71

Podemos observar una gran remoción de sulfatos en todas las muestras, siendo la muestra M3 HCl la que presento un porcentaje de remoción mayor con un 87.49%, seguido de la muestra M3 CH₃COOH con un 83.64% y por último la muestra M3 HNO₃ con un 80.90%. Este resultado posiblemente se deba al carácter ácido de los materiales, además de que potencializó su poder de remoción la carga superficial presente en M3 HCl por presentar una magnitud positiva, mientras que los dos restantes fue ligeramente menos su capacidad de remoción por presentar una carga superficial con magnitud negativa.

IV.5.4 Concentración de fosfatos

La concentración de fosfatos analizada mediante método HACH arrojó los siguientes resultados mostrados en la tabla 8.

Tabla 8. Resultados de la determinación de fosfatos en las muestras de agua, obtenidos por la aplicación de la metodología HACH.

Muestra	Concentración de PO_4^{-3} (mg/L)
<i>Agua gris</i>	0.45
<i>M3 HCl</i>	Menor a 0.04
<i>M3 HNO₃</i>	Menor a 0.04
<i>M3 CH₃COOH</i>	0.09

El método de medición HACH fue utilizado debido a que presentaba un intervalo de detección mayor, en comparación con otros métodos. Sin embargo, aun siendo un método muy preciso, el valor arrojado por el equipo para las muestras M3 HCl y M3 HNO₃ fue inferior al límite de detección, es decir, menor a 0.04 mg/L.

Esto implica que la remoción de fosfatos en el agua gris es más eficiente en aquellas muestras modificadas con ácidos fuertes, a comparación de la muestra modificada con ácido acético. Aun así, la muestra M3 CH₃COOH presenta una gran disminución de la concentración de fosfatos en el agua, presentando un porcentaje de remoción del 80%. Al igual que en la remoción de sulfatos, los materiales presentaron este resultado posiblemente por su carácter ácido aunado a sus cargas superficiales.

IV.5.5 Sustancias Activas al Azul de Metileno

Las sustancias activas al azul de metileno se analizaron siguiendo el método HACH, obteniendo resultados directamente del equipo en mg/L. Los resultados se muestran en la tabla 9.

Tabla 9. Resultados de la determinación de sustancias activas al azul de metileno, obtenidos por la aplicación de la metodología HACH.

Muestra	Concentración de SAAM (mg/L)
<i>Agua gris</i>	1.427
<i>M3 HCl</i>	1.004
<i>M3 HNO₃</i>	1.919
<i>M3 CH₃COOH</i>	1.469

Este análisis corresponde a las sustancias que son capaces de formar un par iónico con el azul de metileno, siendo el azul de metileno un compuesto catiónico, las sustancias activas al azul de metileno deben ser aniónicas, como lo son los tensoactivos aniónicos presentes en el detergente del agua gris.

Dado a que los materiales M3 HNO₃ y M3 CH₃CHOOH, en base a los resultados de potencial Z, presentaron una carga superficial negativa, esto tuvo por consecuencia que generaran un aumento en los pares iónicos formados con el azul de metileno aumentando este parámetro en el agua gris.

Como se puede observar, los resultados obtenidos son congruentes a los resultados obtenidos de la preparación de un material modificado de la cascara de yuca con ácido fosfórico a diferentes concentraciones, el cual presentó un 99.9% de remoción de azul de metileno (Albis et al., 2017), es decir, presenta una carga superficial aniónica pues remueve el catión azul de metileno.

En caso contrario, el material M3 HCl, según su potencial Z, tiene una carga superficial positiva, lo que captura tensoactivos aniónicos retirándolos del agua disminuyendo su concentración, obteniéndose un 29.64% de remoción.

IV.6 Resumen de resultados y cuantificación de la eficiencia de remoción de contaminantes.

Tabla 10. Resumen de la medición de los parámetros pH, Sulfatos, Fosfatos, Demanda bioquímica de oxígeno y Sustancias activas al azul de metileno en las aguas antes y después de entrar en contacto con los materiales modificados.

Parámetro	Método	Agua gris	M3 CH ₃ COOH	M3 HCl	M3 HNO ₃
pH	NMX-AA-003-1980	6.98 unidades	4.07 unidades	2.03 unidades	2.05 unidades
Sulfatos	NMX-AA-074-SCFI-1981	1074.63 mg/L	175.71 mg/L	134.39 mg/L	205.19 mg/L
Fosfatos	HACH	0.45 mg/L	0.09 mg/L	Menor a 0.04 mg/L	Menor a 0.04 mg/L
<i>DBO₅</i>	NMX-AA-012-SCFI-2001 NMX-AA-028-SCFI-2001	718.07 mg/L	654.52 mg/L	864.23 mg/L	1019.91 mg/L
SAAM	HACH TNT874	1.427 mg/L	1.469 mg/L	1.004 mg/L	1.919 mg/L

En base a los resultados obtenidos, se cuantifico la eficiencia de remoción de los contaminantes en base a la fórmula para calcular el porcentaje de remoción.

$$\%R = \frac{(C_0 - C)}{C_0} \times 100\%$$

Donde:

%R: es el porcentaje de remoción del contaminante.

Co: es la concentración del contaminante en el agua gris.

C: es la concentración del contaminante en cada una de las muestras de agua después de la remediación.

Tabla 11. Porcentajes de remoción de contaminantes.

Contaminante	M3 CH ₃ COOH	M3 HCl	M3 HNO ₃
Sulfatos	83.65%	87.49%	80.90%
Fosfatos	80%	>91.11%	>91.11%
<i>DBO₅</i>	8.85%	- 20.35%*	-42.03%*
SAAM	-2.94%*	29.64%	-34.47%*

*Valores negativos de remoción implican un aumento en la concentración de los contaminantes.

Capítulo V.

Conclusiones

Capítulo V. Conclusiones

En este trabajo se mostraron los resultados de la aplicación de un material preparado a partir de un residuo agroindustrial para la remediación de aguas grises. Los espectros de infrarrojo obtenidos confirman la modificación química del bagazo residual de la elaboración de cerveza, comprobándose la efectividad de la metodología de química verde aplicada.

La caracterización del material obtenido mediante la técnica del potencial Z nos arroja que el material M3 HCl presenta una capa superficial positiva, siendo esta la explicación del porque puede adsorber contaminantes aniónicos en el agua. Además, el potencial Z nos confirma que los materiales tienden a ser hidrofílicos, independientemente de su carga superficial, son capaces de dispersarse en el agua, arrojando valores diferentes a 0.

Poner en contacto los diferentes materiales modificados con el agua gris, resulto en un cambio de color del agua, así como en una disminución del pH de esta. Los resultados de demanda bioquímica de oxígeno se ven aumentados en aquellas muestras modificadas con ácidos fuertes, esto debido a la digestión del bagazo por acción del ácido, aportando materia orgánica soluble al agua.

Todos los materiales resultaron eficientes en la remoción de sulfatos y fosfatos debido a su carácter ácido, pero el material M3 HCl presento mejores porcentajes de remoción de estos dos parámetros debido a su carga superficial positiva.

Los materiales que presentan una carga superficial negativa aportan aniones al agua, lo que incrementa la concentración de sustancias que generan par iónico con el azul de metileno. Mientras que el material M3 HCl, que presenta una carga superficial positiva, resulto eficiente en la disminución de sustancias aniónicas en el agua que pudieran reaccionar con el azul de metileno.

El material modificado con ácido acético glacial (CH_3COOH) disminuyó el pH del agua gris de 6.98 a 4.07, disminuyó la concentración de sulfatos en el agua un 83.65%, también disminuyó la concentración de fosfatos en un 80% y fue el único que disminuyó el DBO_5 del agua en un 8.85%, mientras que aumentó la concentración de sustancias activas al azul de metileno en un 2.94%.

El material modificado con ácido clorhídrico (HCl) disminuyó el pH del agua gris de 6.98 a 2.03, disminuyó la concentración de sulfatos en el agua un 87.49% y la concentración de fosfatos en un porcentaje mayor a 91.11%, debido a que la concentración fue indetectable por el equipo, así como también disminuyó la concentración de sustancias activas al azul de metileno un 29.64%. Sin embargo, aportó carga orgánica al agua aumentando la Demanda Bioquímica de Oxígeno en el agua un 20.35%.

El material modificado con ácido nítrico (HNO_3) disminuyó el pH del agua gris de 6.98 a 2.05, disminuyó la concentración de sulfatos en el agua un 80.90% y la concentración de fosfatos en un porcentaje mayor a 91.11% debido a que la concentración fue indetectable por el equipo. Sin embargo, aumentó la concentración de sustancias activas al azul de metileno en el agua un 34.47%, y aportó carga orgánica al agua aumentando la Demanda Bioquímica de Oxígeno en un 42.03%.

Partiendo de este resumen de resultados, podemos concluir que el material más eficiente en la remediación de aguas grises pudiera tratarse del material modificado con ácido clorhídrico. Sin embargo, esto es muy ambiguo, pues el material modificado con ácido acético glacial presentó las mismas propiedades de remoción con un pH más amigable para la reutilización del agua.

Capítulo VI.

Trabajo a futuro

Capítulo VI. Trabajo a futuro

Independientemente del pH del agua resultante, es más sencillo y económico neutralizar el agua que implementar un sistema capaz de remover sulfatos, fosfatos y tensoactivos aniónicos.

La realización de esta investigación nos da como resultado 3 diferentes materiales obtenidos de la modificación química de un residuo agroindustrial como es el bagazo de malta de cerveza, capaz de remover contaminantes presentes en agua gris de los hogares.

Al obtener resultados positivos, la investigación puede continuar hacia diferentes ramas, como puede ser la formulación de un dispositivo implantable en el punto de generación del agua jabonosa, con la intención de reutilizarse en el lavado de patios o simplemente disminuir la carga de contaminantes a las plantas de tratamiento de agua residual en Tijuana.

Así como investigar el aprovechamiento de esta agua acida para el tratamiento y acondicionamiento de suelos alcalinos, dado que según la Organización de Alimentación y Agricultura (FAO, 2023), suelos ácidos son ideales para cultivos como el arroz, la yuca, el mango, cítricos, arándanos, entre otros. Además de requerir un alto contenido de materia orgánica, propiedades que el material modificado puede cumplir fácilmente.

La investigación se puede ampliar para encontrar ámbitos de aplicación de esta agua tratada, como puede ser las ya mencionadas o aplicaciones industriales, con la finalidad de disminuir el consumo del agua potable.

Capítulo VII.

Referencias Bibliográficas

Capítulo VII. Referencias Bibliográficas

Alberto Albis A.; Alexandra J. López; María C. Romero (2017) Remoción de azul de metileno de soluciones acuosas utilizando cáscara de yuca (*Manihot esculenta*) modificada con ácido fosfórico. *Prospectiva*, vol. 15, núm. 2, pp. 60-73, Universidad Autónoma del Caribe.

Aguiar, S., Enríquez, M., Uvidia, H. (2022) Residuos agroindustriales: su manejo, impacto y aprovechamiento. Universidad Estatal Amazónica, Ecuador. DOI: <https://doi.org/10.26621/ra.v1i27.803>

Branyik. T., Vicente, A., Teixeira, J. (2001) Fermentação Primária da Cerveja em Contínuo - Cinética de Imobilização da Levedura e Qualidade do Produto. Universidade do Minho, Portugal.

Cater, M., Fanel, L., Malovrh, N., Marinko-Logar, R. (2015) Biogas production from brewery spent grain enhanced by bioaugmentation with hydrolytic anaerobic bacteria. *Bioresource Technology*, v. 186, p. 261-269. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2015.03.029>

Cerveceros de México (2022) Gestión del agua en la agroindustria cervecera. Reporte 2022. Cámara Nacional de la Industria de la Cerveza y de la Malta. https://cervecerosdemexico.com/wp-content/uploads/2023/05/Gestion_del_agua_en_la_agroindustria_cervecera_0910_2023.pdf

Cerveceros de México (2022) La agroindustria cervecera en México. Reporte anual 2021. Cámara Nacional de la Industria de la Cerveza y de la Malta. <https://cervecerosdemexico.com/revistas/reporte-enero-marzo-2022.pdf>

Chand, R., Narimura, K., Kawakita, H., Ohto, K., Watari, T., Inoue, K. (2008) Grape waste as a biosorbent for removing Cr (VI) from aqueous solution. Japan. Journal of Hazardous Materials 163 p. 245-250. Elsevier.

Claire Bougrier, Delphine Dognin, Cécile Laroche, Jesús Andrés Cacho Rivero. (2018). Use of trace elements addition for anaerobic digestion of brewer's spent grains. Journal of Environmental Management, Volume 223, p. 101-107. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2018.06.014>

Comisión Estatal de Agua, CEA. (2016). <http://www.cea.gob.mx/pages/arct/volumen.html>

Comisión Estatal de Servicios Públicos de Tijuana (CESPT). (2014). http://www.cespt.gob.mx/ServNoticias/VerNoticia.aspx?id=616file:///C:/Users/Diego%20Rodriguez/Downloads/CESPT_BC.pdf

Comisión Nacional del Agua (CONAGUA). (2017). Estadísticas del Agua en México, Edición 2017. www.gob.mx/conagua.

Dias, P. (2014) Analise de viabilidade da utilizacao do biogas gerado na digestao anaerobica de levedura residual de cervejaria para geracao de energia. Universidade de São Paulo, Brasil.

Espinosa, A., Lopez, L., Casdelo, N. (2021) PRETREATMENT OF LIGNOCELLULOSIC BIOMASS: A BRIEF REVIEW OF THE PRINCIPAL METHODS APPLIED. Cuba. Versión On-line ISSN 2223-4861

FAO (2023) Manejo de suelos problemáticos: suelos ácidos. Organización de las naciones unidas para la alimentación y la agricultura. <https://www.fao.org/soils-portal/soil-management/manejo-de-suelos-problematicos/suelos-acidos/es/>

Garrido Martin, I. (2016) Aplicación de técnicas de remediación para minimizar la presencia de residuos de insecticidas en agua y suelo. Universidad de Murcia.

<http://hdl.handle.net/10803/396153>

Gijzen H. (2001). Low-Cost Wastewater Treatment and Potentials for Re-use. A Cleaner Production Approach to Wastewater Management, International Institute for Hydraulic, Infrastructural and Environmental Engineering, Delft, Holanda.

Giovenzana, V., Beghi, R., Guidetti, R. (2014) Rapid evaluation of craft beer quality during fermentation process by vis/NIR spectroscopy. Journal of Food Engineering, v. 142, p. 80-86. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2014.06.017>

H. Hasar. (2003). Adsorption of nickel(II) from aqueous solution onto activated carbón prepared from almond husk, J. Hazard. Mater. B97, 49–57.

Inglethorpe, S.D.J., Morgan, D.J., Higley, D.E. and Bloodworth, A.J. (1993). Industrial mineral laboratory manual: bentonite”. Technical Report WG/93/20, mineralogy and petrology series, British geological survey. London p. 116.

Low, K. S., Lee, C. K., Liew, S. C. (2000) Sorption of cadmium and lead from aqueous solutions by spent grain, Process Biochemistry, Vol. 36, p. 59-64.

Lu, S., Gibb, S. W. (2008) Copper removal from wastewater using spent grain as biosorbent. Bioresource Technology, Vol. 99, p. 1509-1517.

Maldonado Lopez, M. (2021) “Aguas grises” como mecanismos de reducción del consumo personal del agua. Departamento de Ecología y Espacio de la Cultura del Agua. <http://sapam.gob.mx/site/aguas-grises-como-mecanismos-de-reduccion-del-consumo-personal-del-agua/>

Martines-Muñoz, A. (2015) Análisis comparativo de compuestos bioactivos en cerveza artesanal y cerveza industrial [Tesis Nutrición Humana y Dietética]. Universidad de Lleida, Facultad de Medicina. España

Miletto, M., Caretta, M. A., Burchi, F. M. y Zanlucchi, G. (2017). Migration and its Interdependencies with Water Scarcity, Gender and Youth Employment. WWAP. París, UNESCO. ISBN: 978-92-3-100235-9

Mondragon Cortez, P. (s.f.) ESPECTROSCOPIA DE INFRARROJO PARA TODOS. Centro de Investigación y Asistencia en Tecnología y Diseño del Estado de Jalisco (CIATEJ). ISBN 978-607-97548-4-6

Mussato, S.I., Dragone, G., Roberto, I. (2006) Brewers spent grain: generation, characteristics and potential applications. Journal of Cereal Science 43, p. 1-14.

NOM-003-SEMARNAT-1997, que establece los límites máximos permisibles de contaminantes en aguas residuales tratadas que se reusen en servicios públicos

NMX-AA-003-1980, para el muestreo del agua residual.

NMX-AA-008-SCFI-2016, análisis de agua -Medición de pH en aguas naturales, residuales y residuales tratadas-,

NMX-AA-028-SCFI-2001, análisis de agua -Determinación de la demanda bioquímica de oxígeno en aguas naturales, residuales (DBO_5) y residuales tratadas-

NMX-AA-029-SCFI-2001, análisis de agua -Determinación de fosforo total en aguas naturales, residuales y residuales tratadas-

NMX-AA-039-SCFI-2001, análisis de agua -Determinación de sustancias activas al azul de metileno (SAAM) en aguas naturales, potables, residuales y residuales tratadas-

NMX-AA-074-SCFI-2014, medición del ion sulfato en aguas naturales, residuales y residuales tratadas

ONU (2015) La agenda 2030 para el desarrollo sostenible. Naciones Unidas
<https://documents-dds-ny.un.org/doc/UNDOC/GEN/N15/291/93/PDF/N1529193.pdf?OpenElement>

Rodier, J., Legube, B., Merlet, N. (2009) Análisis del agua. 9na edición Omega. Paris. ISBN: 978-84-282-1530-5

Rojas-Chamorro, J., Romero, I., Lopez-Linares, J., Castro, E. (2019) Brewer's spent grain as a source of renewable fuel through optimized dilute acid pretreatment. Espana. Renewable Energy 148 p. 81-90. Elsevier.

Rumi Chand, Kenji Narimura, Hidetaka Kawakita, Keisuke Ohto, Takanori Watari, Katsutoshi Inoue. (2009). Grape waste as a biosorbent for removing Cr(VI) from aqueous solution. Journal of Hazardous Materials 163, 245–250. doi: 10.1016/j.jhazmat.2008.06.084

Sanchez, G. (2023) Esta en Tijuana la playa más contaminada de México. Usando datos de COFEPRIS, Periódico El Imparcial.

Santos Hernández, J. (2015) Desarrollo de un proceso para la remoción de sulfatos y fosfatos por adsorción con arcilla natural modificada en efluentes de aguas residuales tratadas. Universidad Autonoma de Baja California. Mexico.

Silva, J. P., Sousa, I., Goncalves, J. J., Porter, S., Ferreira (2004) Sep, Purif. Technol. 40, 163.

Sumbarda, E. (2019) Potencial Z, un mundo de posibilidades. Universidad Autónoma de Baja California. México.

Swim Guide (2014-2023) Playa Blanca, Tijuana, Baja California. The RBC Foundation. <https://www.theswimguide.org/beach/6364>

UNESCO (2019) Informe Mundial de las Naciones Unidas sobre el desarrollo de los recursos hídricos 2019: No dejar a nadie atrás. París.

UNESCO (2023) Informe Mundial de las Naciones Unidas sobre el Desarrollo de los Recursos Hídricos 2023: alianzas y cooperación por el agua; datos, cifras y ejemplos de acción.

WRI (2018) Ross Center for Sustainable Cities' Water and Sanitation 15-City Study. World Resources Insititute; <https://www.wri.org/>

Y. Bulut, Z. Tez. (2007). Adsorption studies on ground shells of hazelnut and almond, J. Hazard. Mater. 149, 35–41.

Capítulo VIII.

Apéndices

Capítulo VIII. Apéndice A

A continuación, se muestran los espectros infrarrojos individuales de cada material modificado.

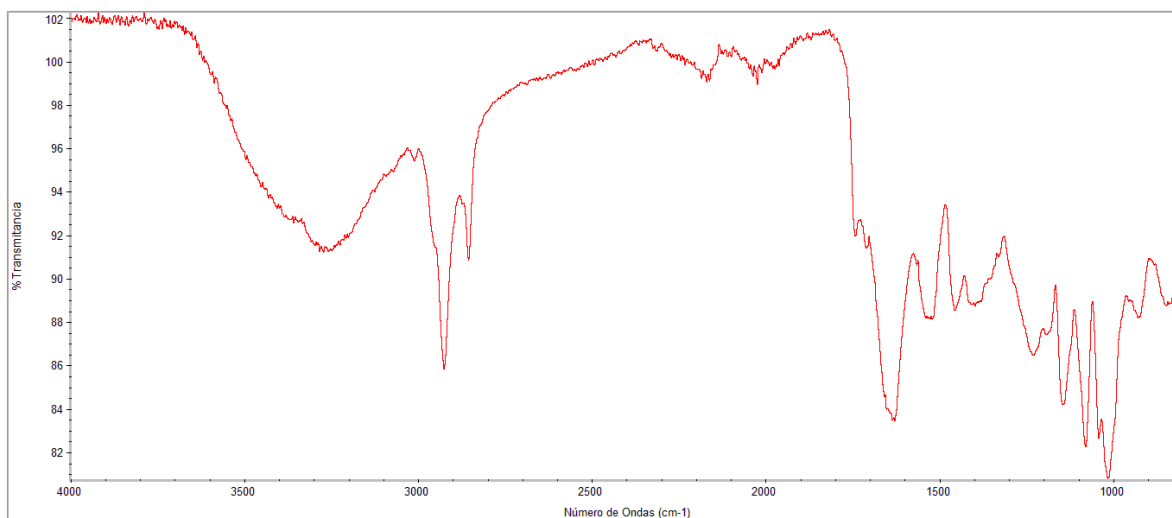


Figura A 1. Espectro Infrarrojo del Bagazo sin modificar.

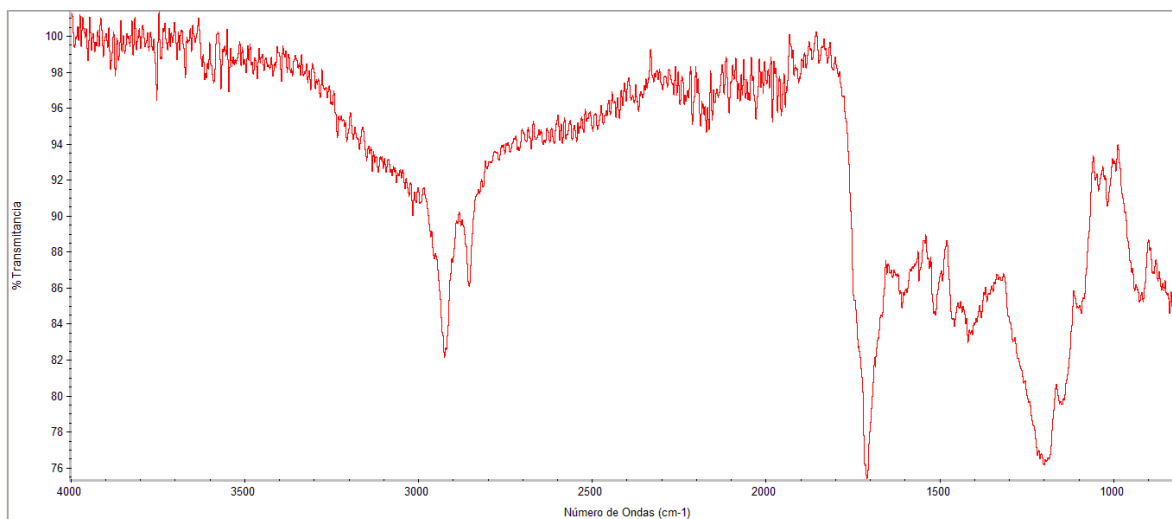


Figura A 2. Espectro infrarrojo del material modificado con Ácido Clorhídrico.

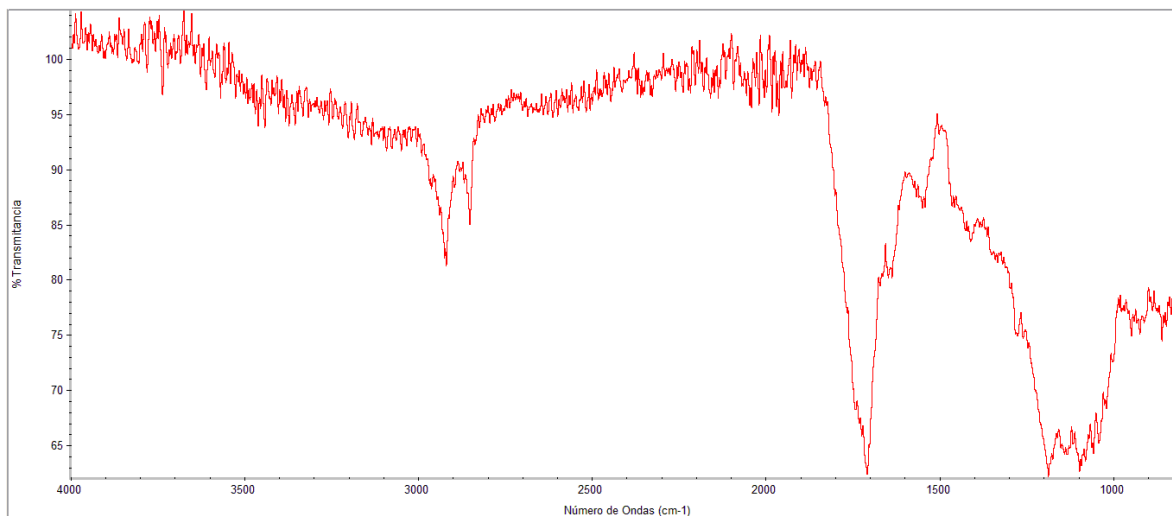


Figura A 3. Espectro infrarrojo del material modificado con Ácido Nítrico.

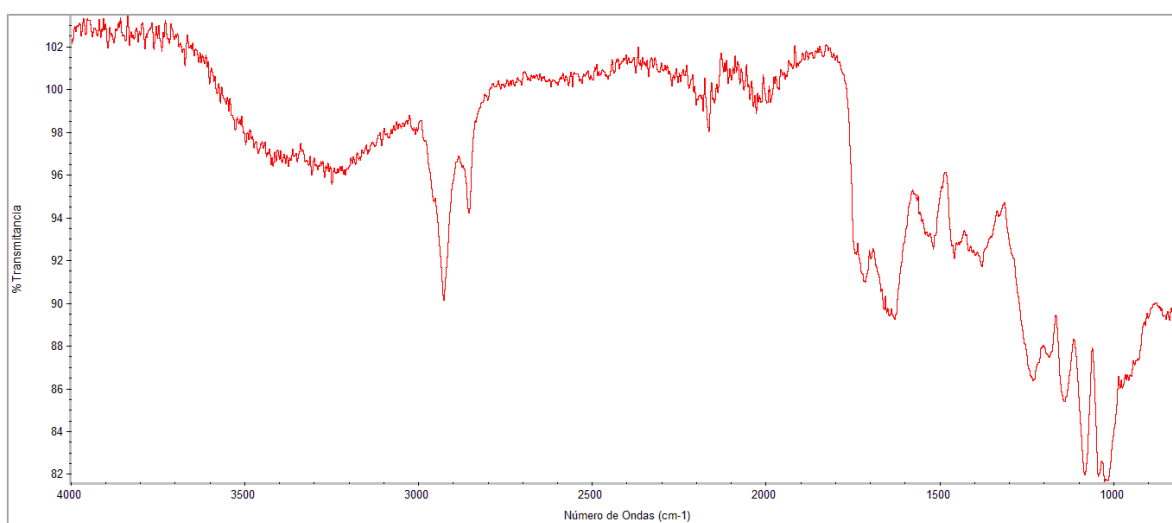


Figura A 4. Espectro infrarrojo del material modificado con Ácido Acético Glacial.