



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE QUÍMICA

**Métodos de tratamiento alternos tanto biológicos como
físicoquímicos, para el reaprovechamiento de vinazas
provenientes de una planta cooperante productora de bioetanol**

TESIS

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE

INGENIERA QUÍMICA

P R E S E N T A:

ROSARIO ELIZABETH CORREA LÓPEZ



CIUDAD DE MÉXICO

2022



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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

JURADO ASIGNADO:

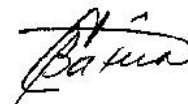
PRESIDENTE: Durán Domínguez de Bazúa María del Carmen
VOCAL: García Gómez Rolando Salvador
SECRETARIO: García Reynoso José Agustín
1ER. SUPLENTE: Ramírez Burgos Landy Irene
2DO. SUPLENTE: Bernal González Marisela

SITIO DONDE SE DESARROLLÓ EL TEMA:

Laboratorios 301, 302 y 303 de Ingeniería Química Ambiental y de Química Ambiental. Departamento de Ingeniería Química, Facultad de Química, UNAM. Ciudad Universitaria, Ciudad de México, 04510. México.

ASESOR DEL TEMA:

Dr.-Ing. María del Carmen Durán Domínguez de Bazúa



SUPERVISOR TÉCNICO:

Dra. en Ing. Marisela Bernal González



SUSTENTANTE:

Rosario Elizabeth Correa López



DECLARATORIA

Declaro conocer el Código de Ética de la Universidad Nacional Autónoma de México, plasmada en la Legislación Universitaria en las definiciones de integridad y honestidad ahí especificadas, aseguro mediante mi firma al calce que el presente trabajo es original y enteramente de mi autoría. Todas las citas de, o referencias a, la obra de otros autores aparece debida y adecuadamente señalados, así como acreditadas mediante los recursos editoriales convencionales.



Sustentante
Rosario Elizabeth Correa López

Reconocimientos institucionales

A la Facultad de Química y a la UNAM que, a través de los dineros de todos los mexicanos (de donde viene el presupuesto de la UNAM), me ha brindado todos los materiales e instrumentos para llevar a cabo mi aprendizaje de la carrera y para la realización de este trabajo.

A la Facultad de Química de la UNAM que, a través de la Secretaría Académica de Investigación y Posgrado, SAIP, dio apoyo para reactivos y materiales a través de los profesores Carmen Durán y Enrique Bazúa, claves 5000-9065 y 5000-9067, los cuales apoyaron la fase experimental de la tesis teórica que yo realicé.

Al Jurado designado por la Facultad de Química de la UNAM, quienes revisaron y aprobaron este documento.

Al Ing. Manuel Enríquez Poy, del Ingenio Central Motzorongo, por su apoyo logístico, por la información sobre el proceso y los datos del agua proveniente de la primera columna de destilación y, especialmente, por el envío de las muestras para la realización experimental de esta investigación, aunque la parte que me correspondió fue teórica ya que estamos en tiempos de la pandemia del Covid-19.

Al personal administrativo y académico de los Laboratorios 301, 302 y 303 de Ingeniería Química Ambiental y de Química Ambiental del Departamento de Ingeniería Química de la Facultad de Química de la UNAM quienes apoyan la parte experimental de esta investigación, aunque como ya mencioné yo realicé una parte teórica basada mucho en esa información experimental que se realiza en los Laboratorios.

Agradecimientos

A la Dra. María del Carmen Durán Domínguez de Bazúa y a la Dra. Marisela Bernal González por brindarme su asesoría, apoyo y colaboración para la realización de este trabajo de tesis. De igual manera agradezco por paciencia, sus valiosas aportaciones y toda la ayuda que me han brindado.

Al jurado del examen profesional por su apoyo académico de revisión de este trabajo y sus valiosas aportaciones al mismo.

De igual manera agradezco a todo el personal académico quienes con su apoyo y enseñanzas constituyen la base de mi formación profesional.

A mis padres que siempre me impulsaron a estudiar y me han apoyado en todo momento a lo largo de mi vida, y que siempre han sido un soporte importante para mí.

Y a mis amigas, amigos y compañeros que me han acompañado a lo largo de mi vida académica brindándome su apoyo incondicional.

Dedicatorias

A mi madre Rosario, a mi padre José, a mi hermana Guadalupe y a mi hermano Marco que siempre han sido mi inspiración, apoyo y fortaleza a lo largo mi vida siendo los mejores guías, y que han recorrido conmigo esta etapa de mi vida siendo el motor que me impulsa a continuar con mis sueños, gracias por su cariño, su apoyo incondicional y motivación para la culminación de mis estudios.

A mis amigos con los que compartí dentro y fuera de las aulas que me ayudaron de manera desinteresada a lo largo de mi formación académica, y que me han ayudado a crecer como persona, gracias infinitas por todo su apoyo.

Índice

	Página
Glosario de términos	XI
Resumen	1
Capítulo I. Planteamiento del problema	2
1.1. Introducción	2
1.2. Hipótesis	4
1.3. Justificación	4
1.4. Objetivos	7
1.4.1. Objetivo general	7
1.4.2. Objetivos particulares	7
Capítulo II. Metodología	8
2.1. Metodología empleada	8
Capítulo III. Revisión bibliográfica	9
3.1. Proceso de producción de etanol	9
3.1.1. Antecedentes	9
3.1.2. Composición de la caña de azúcar	10
3.1.3. Melazas	13
3.1.4. Fases del proceso de producción de bioetanol a partir de caña de azúcar	16
3.1.4.1. Obtención de bioetanol de primera generación (melaza)	16
3.1.4.2. Proceso de producción de bioetanol a partir de melaza	19
3.1.4.3. Subproductos obtenidos del proceso de producción de bioetanol	21
3.2. Vinazas	22
3.2.1. Caracterización de vinazas	23
3.2.2. Normatividad ambiental	24
3.3. Tratamientos y métodos de recuperación de las vinazas	29
3.3.1. Remoción de polifenoles presentes en las vinazas	29
3.3.2. Tratamientos biológicos de otros componentes de las vinazas	32
3.3.2.1. Tratamiento anaerobio	32
3.3.2.2. Tratamiento aerobio	34
3.3.3. Tratamientos fisicoquímicos	34
3.3.3.1. Coagulación-Floculación	36
3.3.3.2. Electrocoagulación	37
3.3.3.3. Procesos de filtración y ósmosis inversa	40

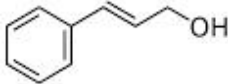
	Página
3.3.3.4. Evaporación	41
3.3.3.5. Incineración y concentración	42
3.3.4. Procesos de oxidación avanzada	43
3.3.5. Separación por adsorción de los polifenoles una vez que las vinazas han sido tratadas anaerobiamente usando carbón activado	46
3.3.6. Adsorción de polifenoles en carbón activado	51
3.3.7. Tratamientos combinados	55
Capítulo IV. Resultados y discusión	57
4.1. Resultados	57
4.2. Discusión final	58
Capítulo V. Conclusiones y recomendaciones	61
5.1. Conclusiones	61
5.2. Recomendaciones	62
Anexos	63
Anexo 1. Producción bioquímica de etanol y de su subsecuente obtención de metano a partir de las vinazas de la primera torre de destilación	64
Anexo 2. Descripción abreviada del proceso de producción bioquímica de etanol a partir de las vinazas de la primera torre de destilación empleando residuos lignocelulósicos (segunda generación)	65
Anexo 3. Disposición controlada de los residuos producidos en esta investigación	67
Bibliografía	68
Índice de Tablas	Página
Tabla 3.1. Reacciones de los glúcidos provenientes del jugo de caña de azúcar	20
Tabla 3.2. Caracterización fisicoquímica de vinazas provenientes de melazas de caña de azúcar de acuerdo con diferentes autores	25
Tabla 3.3. Límites máximos permisibles para contaminantes básicos (DOF, 1996a)	26
Tabla 3.4. Límites máximos permisibles para metales pesados y cianuro (DOF, 1996a)	27
Tabla 3.5. Límites máximos permisibles (DOF, 1996b)	28
Tabla 3.6. Límites máximos permisibles de contaminantes (DOF, 1997)	28

Índice de Tablas		Página
Tabla 3.7.	Límites máximos permisibles (DOF, 1994)	29
Tabla 3.8.	Eficiencias y características del tratamiento de vinazas mediante procesos biológicos anaerobios	33
Tabla 3.9.	Eficiencias y características de los procesos de tratamientos aerobios de vinazas	35
Tabla 3.10.	Eficiencias y características del tratamiento de vinazas mediante el proceso de coagulación floculación (C-F)	37
Tabla 3.11.	Eficiencias y características del tratamiento de vinazas mediante el proceso de electrocoagulación	38
Tabla 3.12.	Eficiencias y características del tratamiento de vinazas mediante procesos de filtración y ósmosis inversa	40
Tabla 3.13.	Eficiencias y características del tratamiento de vinazas mediante procesos de oxidación avanzada	44
Tabla 3.14.	Caracterización de corrientes de vinaza: Proveniente del ingenio azucarero-alcoholero cooperante (VC), diluida al 50% (VD), diluida al 25% (VD65) y para efluentes de reactores a 45, 55 y 65°C (Tomada de Contreras-Contreras, 2019)	47
Tabla 3.15.	Cuantificación de polifenoles en muestras de vinaza en mg de ácido gálico equivalente, eq. AG, por litro (Tomada de Contreras-Contreras, 2019)	49
Tabla 3.16.	Ajuste de los modelos de isoterma para los datos experimentales obtenidos (Tomada de Contreras-Contreras, 2019)	51
Tabla 3.17.	Eficiencias y características del tratamiento de vinazas mediante procesos combinados	56
Tabla 3.18.	Eficiencias y características del tratamiento de vinazas mediante procesos combinados	
Tabla A.2.1.	Producción de bioetanol a partir de melazas por microorganismos	65

Índice de Figuras		Página
Figura 2.1.	Diagrama de flujo para desarrollar la revisión bibliográfica	8
Figura 3.1.	Estructura de la cadena celulosa (Intriago-García y Sabando Solórzano, 2017)	11
Figura 3.2.	Estructura de alcoholes cinamílicos: a) Tipos de monolignoles más comunes encontrados en los bloques de construcción de la lignina: 1: alcohol p-cumarílico, 2: alcohol coniferílico, 3: alcohol sinapílico, b) Otros tipos de monolignoles (coniferil-derivados): 4: coniferaldehído, 5: alcohol dihidroconiferílico, 6: alcohol coniferil-9-acetato, 7: alcohol 5-hidroconiferílico (Adaptada de Gellerstedt y Henrinksson, 2008 por Chávez-Sifontes y Domine, 2013)	12

Figura 3.3.	Estructuras de principales hexosas y pentosas presentes en la hemicelulosa (Wikipedia)	13
Figura 3.4.	Clasificación de tratamientos de vinaza	30
Figura 3.5.	Análisis de varianza para polifenoles en muestras de vinaza (SV, vinazas de la industria de la caña de azúcar y el etanol; DV, vinazas diluidas en agua del grifo 50:50 del influente del reactor; 45°CR, efluente del reactor operando a 45°C; 55°CR, efluente del reactor operando a 55°C, DV65, efluente del reactor operando a 55°C, DV65, efluente del reactor operando a 65°C, GA, mg eq de ácido gálico/L) (Tomado de Contreras-Contreras, 2019)	49
Figura 3.6.	Isotermas experimentales e isotermas considerando los modelos de Langmuir, Freundlich y Dubinin-Radushkevich (C es la concentración de equilibrio, mg/L; q es la eficiencia de adsorción, mg/g) (Tomado de Contreras-Contreras, 2019)	51
Figura 3.7.	Relación entre el número de etapas y la masa de carbón activado, CA, añadida al proceso de adsorción en función de la relación: Masa de la solución inicial (L) y masa de carbón activado (M) (Tomado de Contreras-Contreras, 2019)	53
Figura 4.1.	Propuesta de aprovechamiento integral de las sustancias contenidas en vinazas provenientes de la primera torre de destilación de la obtención de etanol de mieles de jugo de caña	59
Figura A.1.	Diagrama de bloques del proceso de producción bioquímica de etanol y de su subsecuente obtención de metano a partir de las vinazas de la primera torre de destilación	65

Glosario de términos

Aerobio	Que necesita oxígeno para vivir o desarrollarse, del griego aeros = aire y bios = vida
Agua residual	Cualquier tipo de agua cuya calidad está afectada negativamente por la influencia antropogénica
Alcohol de cinamilo o cinamílico	Alcohol de cinamilo es un compuesto orgánico que se encuentra esterificado formando el estoraque, el bálsamo del Perú y las hojas de canela. Forma un sólido cristalino blanco cuando es puro, o un aceite de color amarillo cuando es ligeramente impuro. Puede ser producido por la hidrólisis del estoraque (Wikipedia)
	
Anaerobio	Que puede vivir sin oxígeno, del griego aeros = aire y bios = vida con la letra alfa privativa que significa sin y que pasó al latín como el prefijo an-aero-bio
Anisotrópico	La anisotropía es la propiedad general de la materia según la cual cualidades como elasticidad, temperatura, conductividad, velocidad de propagación de la luz, etc., varían según la dirección en que son examinadas. Algo anisótropo podrá presentar diferentes características según la dirección (Wikipedia)
Bálsamo del Perú	El bálsamo del Perú es originario de El Salvador y México. Se obtiene por medio de incisiones practicadas en el árbol <i>Myroxylon balsamum</i> . Recibe su nombre debido a que fue importada a España desde Perú. A consecuencia de su elevado precio, el bálsamo del Perú se ha falsificado con frecuencia con aceite de oliva y esta falsificación es difícil de reconocer. Es un líquido viscoso de naturaleza oleosa y de color pardo oscuro. Es un material casi insoluble en agua. Contiene cinameína, benzoato de bencilo, ácido benzoico y pequeñas cantidades de vainillina (Wikipedia)
Bioetanol	Alcohol etílico producido por microorganismos (<i>Saccharomyces cerevisiae</i>) y no por reacciones químicas (como el etanol de refinación), de alta pureza, anticorrosivo y oxigenante que puede ser empleado como combustible mezclándolo con naftas en diferentes proporciones
Coagulante	Compuestos que anulan las fuerzas repulsivas entre las partículas coloidales, iniciando la formación de microflóculos
DBO	Demanda bioquímica de oxígeno. Parámetro que mide la cantidad de oxígeno requerido para la oxidación bioquímica de la materia orgánica biodegradable,

	presente en una muestra de agua realizada por microorganismos
Digestión	Degradación de materia orgánica mediante calor, reactivos químicos o microorganismos en ausencia de oxígeno
DQO	Demanda química de oxígeno. Parámetro que mide de manera global la cantidad de sustancias susceptibles de ser oxidadas por medios químicos que hay disueltas y/o en suspensión en una muestra líquida de agua
Efluente, influente, afluente	Efluente, fluido saliente de un sistema ya sea líquido o gaseoso; influente, fluido entrante a un sistema ya sea líquido o gaseoso; afluente, fluido secundario que se une a una corriente principal, generalmente un influente, para formar una nueva corriente ya sea líquida o gaseosa
Electrocoagulación	Proceso de desestabilización de los contaminantes del agua ya sea que estén en suspensión, emulsionados o disueltos, mediante la acción de corriente eléctrica directa de bajo voltaje y por la acción de electrodos
Estoraque	Del latín <i>storax</i> , - <i>cis</i> , y este del gr. ὄστυραξ, - <i>akos</i> . 1. m. Árbol de la familia de las estiracáceas, de cuatro a seis metros de altura, con tronco torcido, hojas alternas, blandas, ovaladas, blanquecinas y vellosas por el envés, flores blancas en grupos axilares, y fruto algo carnoso, elipsoidal, con dos huesos o semillas. Con incisiones en el tronco se obtiene un bálsamo muy oloroso, usado en perfumería y medicina. 2. m. Bálsamo del estoraque. Hay dos clases: <i>Ámbar líquido</i> , que se destila de <i>Liquidambar styraciflua</i> y <i>estoraque ordinario</i> que proviene del <i>Styrax officinale</i> (https://dle.rae.es/estoraque?m=form)
Evaporación	Proceso de separación mediante el uso de evaporadores al vacío, a presión ambiente o a presión superior al ambiente
Filtración	Proceso de separación de partículas sólidas de un líquido utilizando un material poroso llamado filtro
Floculante, agente	Compuesto o compuestos que favorecen el proceso de formación del flóculo, actuando de puente o unión para captar mecánicamente las partículas en suspensión
Glúcidos	Sustancia orgánica sólida, blanca y soluble en agua, que constituye las reservas energéticas de las células animales y vegetales. También se conocen como hidratos de carbono. Hay monoglúcidos como la glucosa, la fructosa y la galactosa, diglúcidos como la sacarosa (azúcar) o la lactosa y poliglúcidos como el almidón o la celulosa. No es correcto llamarlos <i>azúcares</i> porque no provienen del azúcar sino de la glucosa
Incineración	Proceso que transforma los residuos en gases de

	combustión, escorias y cenizas mediante calor en presencia de oxígeno. En ausencia de este comburente se denomina pirólisis
Masa versus peso	La masa es la cantidad de materia que contiene un cuerpo (kg), el peso es la fuerza de atracción que la Tierra u otro astro ejerce sobre cualquier objeto (N)
Materia orgánica	Toda materia compuesta químicamente en torno al carbono como sus átomos fundamentales
Material lignocelulósico	Material con tres tipos diferentes de polímeros, celulosa, hemicelulosa y lignina
Melaza	Residuo de cristalización final de la producción de azúcar, de los cuales no se puede obtener más azúcar de manera física
Microorganismos	Organismos microscópicos que, de acuerdo con la biología formaban parte de algunos de los cinco grandes grupos llamados reinos, el reino animal (animales), el reino vegetal (plantas), el reino hongos (setas, mohos y levaduras), el reino protocistas (protozoos y algas) y el reino moneras (bacterias). Actualmente, hay al menos uno más, el reino de las arqueas
Oxidante	Sustancia que causa oxidación en otras sustancias en reacciones electroquímicas o de reducción y oxidación
pH	Potencial de hidrógeno. Medida de acidez o alcalinidad (basicidad) de una disolución
Polifenoles	Grupo de sustancias químicas encontradas en plantas caracterizadas por la presencia de más de un grupo fenol por molécula
<i>Saccharum officinarum</i>	Nombre científico de la planta perteneciente a la familia de las <i>poáceas</i> , conocida como caña de azúcar
UNAM	Universidad Nacional Autónoma de México
Vinaza	Líquido oscuro que proviene de la corriente del fondo de la primera torre de destilación en el proceso de producción de bioetanol
Vinazas crudas	Líquido anterior sin tratamiento

Glosario de símbolos, fórmulas químicas y unidades

%	Porcentaje
°C	Grado Celsius
µm	Micrómetros
Al ₂ (SO ₄) ₃	Sulfato de aluminio
Au	Oro
Ca	Calcio

Ca²⁺	Ion calcio
CaO	Óxido de calcio
CH₄	Metano
cm	Centímetros
CO₂	Dióxido de carbono
COT	Carbono orgánico total
Cu	Cobre
Cu²⁺	Ion cobre (II)
Da	Dalton, unidad de masa atómica
DBO	Demanda bioquímica de oxígeno
DBO₅	Demanda bioquímica de oxígeno en 5 días
DQO	Demanda química de oxígeno
DQO₀	Demanda química de oxígeno inicial
EO	Siglas en inglés para oxidación electroquímica
Fe²⁺	Ion hierro (II) o ferroso
Fe³⁺	Ion hierro (III) o férrico
FeCl₃	Cloruro férrico
FeSO₄	Sulfato ferroso
g	Gramos
gHbu	Unidad de gramos de ácido butírico
H	Horas
h	Huevos de helmintos
H₂O	Agua
H₂O₂	Peróxido de hidrógeno
H₂SO₄	Ácido sulfúrico
K	Potasio
K⁺	Ion potasio
kg	Kilogramo
L	Litros
m³CH₄	Unidad de metro cúbico de metano
Mg	Magnesio
mg	Miligramos
Mg²⁺	Ion magnesio
Min	Minutos
mL	Mililitros
mLCH₄	Mililitros de metano
Mn²⁺	Ion manganeso (II)
N	Nitrógeno
NK	Nitrógeno Kjeldahl
Na⁺	Ion sodio
NaOH	Hidróxido de sodio
nm	Nanómetros
NT	Nitrógeno total
NTU	Unidad de turbidez (<i>Nephelometric Turbidity Unit, por sus siglas en inglés</i>)
O₂	Oxígeno molecular
OH	Radical hidroxilo

P	Fósforo
P⁻³	Ion fosforo
PAC	Siglas en inglés para el policloruro de aluminio
PACI	Otra forma de escribir el policloruro de aluminio
PAM	Siglas en inglés para la poliacrilamida catiónica
Pb	Plomo
Pd	Paladio
PES	Poliétersulfona
PGA	Siglas en inglés para el ácido poli-g-glutámico
pH	Siglas para el potencial de hidrógeno
POA	Procesos de oxidación avanzada
Pt	Platino
PVDF	Siglas en inglés para el fluoruro de polivinilideno
Ru	Rutenio
S⁻²	Ion sulfuro
SDT	Sólidos disueltos totales
SO₂	Dióxido de azufre
SO₄⁻²	Ion sulfato
SS	Sólidos suspendidos
SST	Sólidos suspendidos totales
ST	Sólidos totales
STV	Sólidos totales volátiles
Ti	Titanio
TFC-PA	Siglas en inglés para <i>thin film composite</i> (compuesto de película delgada) de poliamida
TiO	Óxido de titanio (II)
TiO₂	Óxido de titanio (IV)
UV	Ultravioleta
Zn²⁺	Ion zinc
ZrO	Óxido de zirconio (II)
ZrO₂	Óxido de zirconio (IV)

Símbolos

°	Grados
%	Porcentaje
+	Más
-	Menos
±	Más / Menos
=	Igual
>	Mayor que
<	Menor que

Notas:

Esta tesis usa el punto decimal de acuerdo con la norma oficial mexicana correspondiente (DOF, 2009).

En esta tesis los guarismos se ponen junto a los °C y %

RESUMEN

México es uno de los países de mayor producción de azúcar a partir de la caña de azúcar (*Saccharum officinarum*). Mediante el proceso físico milenario se obtiene como residuo un líquido denominado melaza que es aprovechado para la producción de bioetanol mediante su fermentación debido a su alto contenido de glúcidos, específicamente glucosa. En el proceso de producción de bioetanol a partir de melaza se obtiene como líquido del fondo de la primera torre de destilación a la vinaza ya que a la corriente que entra se le llama coloquialmente vino. Actualmente, no se aprovecha y por ello es considerada como una corriente residual que representa un problema ambiental debido a su alta demanda bioquímica de oxígeno (DBO), alta demanda química de oxígeno (DQO) y por tener un pH ácido. Es por ello que la industria del bioetanol requiere desarrollar un sistema de aprovechamiento de ese efluente con opciones económicas, rápidas y amigables con el ambiente. Actualmente ya se cuenta con procesos disponibles para la transformación de los compuestos disueltos provenientes del jugo de la caña en productos con valor. El tratamiento anaerobio ha sido el más utilizado al ser un método eficaz para convertir parte de la materia orgánica de las vinazas en metano. Hay otros tratamientos biológicos y varios métodos fisicoquímicos tales como adsorción, coagulación-floculación, ozonización, oxidación electroquímica, electrocoagulación y procesos combinados, que han demostrado ser eficaces en la transformación de los componentes de las vinazas. En esta investigación teórica se hizo la recopilación de información sobre los diversos métodos de transformación de los componentes disueltos en las vinazas mediante una revisión bibliográfica, comparando las eficiencias de conversión con ellos, resultando ser el más idóneo un proceso que combina la coagulación-floculación y la ultra y nanofiltración, con eficiencias medidas de remoción de 99.5% para la demanda química de oxígeno (DQO) y de 99.9% para el parámetro color aunque no reaprovechando cabalmente todo su potencial. Por ello, alternativamente se plantea usar esta opción química después del tratamiento anaerobio para la obtención de biogás rico en metano y la separación por adsorción física de los polifenoles sobre carbón activado de bagazo de caña pudiendo entonces tener un tratamiento completo.

Palabras clave: Bioetanol, caña de azúcar (*Saccharum officinarum*), melaza, vinaza, procesos biológicos, procesos fisicoquímicos

Capítulo I

Planteamiento del problema

1.1. Introducción

En el proceso de producción de bioetanol de la primera torre de destilación se genera una corriente líquida. A este efluente se le conoce como vinaza porque al mosto fermentado se le llama vino en las plantas azucareras-alcoholeras y como no se aprovecha, a pesar de las propuestas hechas por Bailey y Ollis desde los años ochenta del siglo XX (1986), es considerado un residuo contaminante. La vinaza se puede definir como un líquido de color marrón oscuro que contiene compuestos orgánicos, ácidos y sulfatos, así como sales minerales y orgánicas (Contreras-González, 2017; Lira-Rodríguez, 2013). En un proceso convencional de producción de bioetanol, la producción de vinazas oscila entre 13 y 15 L por cada litro de etanol dependiendo de la materia prima y el proceso de destilación utilizado (Castro-Moreno, 2009).

La vinaza tiene un alto contenido de materia orgánica lo que hace que la concentración de la demanda química de oxígeno (DQO), se encuentre en valores entre 12.53 a 299.25 g/L, una demanda bioquímica de oxígeno (DBO) de 5.94 a 96 g/L y una concentración de sólidos totales (ST) entre 1.5 a 81.5 g/L (Hoarau et al., 2018; Mancini-Coelho et al., 2018; Parsaee et al., 2019; Sandoval-Rojas, 2016), excediendo las concentraciones indicadas en la norma mexicana NOM-001-SEMARNAT-1996 (DOF, 1996a) para disponerlas en un cuerpo receptor, pues en ella se establece que el límite máximo permitido promedio mensual en aguas residuales que son descargadas en ríos de uso agrícola de 150 mg/L para la DBO y 150 mg/L para los ST, excediendo estos valores. El valor más alto de la DQO en casi dos mil veces y en el valor alto de los ST prácticamente en 500 veces. También las vinazas tienen un pH ácido por la adición de ácido sulfúrico para promover valores de pH de 3 o menos donde solamente la levadura cervecera

Saccharomyces cerevisiae, que es la que convierte a la glucosa en etanol, puede proliferar (Ahmed et al., 2020). Esto hace del líquido del fondo de la primera torre de destilación un material corrosivo, provocando un cambio ambiental en el ecosistema si es descargado sin modificaciones a suelos o cuerpos de agua (Carhuás-Pérez y Velásquez-Gutiérrez, 2018). En estos cuerpos receptores puede alterar la densidad y capacidad de infiltración del suelo, la muerte de animales y plantas acuáticas, el incremento en la acidez y turbidez del agua, entre otras afectaciones (Carhuás-Pérez y Velásquez-Gutiérrez, 2018; Sandoval-Rojas, 2016). La composición de las vinazas obtenidas en la primera torre de destilación depende del producto obtenido en la fermentación de las melazas que, por la información previa, alcanzan valores muy altos de DQO y DBO, se tienen registros en donde las concentraciones de nitrógeno Kjeldahl (NK), fósforo (P^{-3}), potasio (K^{+}), calcio (Ca^{2+}), magnesio (Mg^{2+}), sodio (Na^{+}), hierro (Fe^{2+}), manganeso (Mn^{2+}), zinc (Zn^{2+}), cobre (Cu^{2+}) y sulfato (SO_4^{-2}) son altas (Santana-Junior et al., 2019); Además, presentan concentraciones altas de otros compuestos provenientes de las tinajas de fermentación, tales como glúcidos residuales no convertidos a etanol, compuestos orgánicos como glicerol, sorbitol, ácido láctico y succínico y pueden contener otros alcoholes, aldehídos, cetonas y ésteres (Ahmed et al., 2020; Santana-Junior et al., 2019).

Esta composición es variable según de donde provenga de melaza, jugo o la mezcla de ambos. De acuerdo con análisis realizados en varios países productores (Brasil, Cuba, México, etc.), la vinaza que proviene de melaza presenta los mayores contenidos de materia orgánica y elementos minerales (Castro et al., 2014; Meza-Pérez et al., 1996; Montoya-Rodríguez y Quintero-Suárez, 2005; Rodríguez-Pérez et al., 2005).

A todo lo mencionado arriba se acumulan metales en disolución ya que por el valor ácido van corroyendo los materiales de recipientes y tuberías. Como se mencionó al inicio, tiene una coloración café debido a la presencia de material húmico que son sustancias parcialmente aromáticas y alifáticas, polimerizadas

aleatoriamente durante la concentración de los jugos en los evaporadores para producir la miel fina de donde se cristaliza el azúcar por sobre-saturación (Contreras-Contreras, 2019). Este material polifenólico, de alta masa molecular, con características polianiónicas en soluciones neutras o alcalinas, amorfas, ácidas, parcialmente hidrofílicas e hidrofóbicas y complejas químicamente tiene un olor dulce (Meza-Pérez et al., 1996).

1.2. Hipótesis

Se encontrarán diversos métodos alternos para el aprovechamiento eficiente de los materiales presentes en las vinazas provenientes de una planta cooperante productora de bioetanol a través de una investigación bibliográfica exhaustiva.

1.3. Justificación

La vinaza por ser un subproducto de la obtención de etanol es calificada como un residuo líquido industrial y de ahí que algunos de sus usos tienen su origen más como opciones de disposición final que como opciones de aprovechamiento. Sin embargo, puesto que su origen es vegetal, la vinaza está compuesta por materiales orgánicos y nutrientes minerales, así como constituyentes vegetales como aminoácidos, proteínas, lípidos, ácidos diversos, enzimas, bases, ácidos nucleicos, clorofila, lignina, quinonas, ceras, glúcidos y hormonas (Intriago-García y Sabando-Solórzano, 2017). La naturaleza en forma normal descompone estos materiales en procesos microbiológicos y recicla los elementos minerales, lo que hace lógico pensar que el destino final de la vinaza deba ser su regreso al suelo (Bautista-Zúñiga et al., 2000; Bautista-Zúñiga y Durán-de-Bazúa, 1998).

En los últimos 50 años, los fabricantes de alcohol etílico han estado considerando a la vinaza como materia prima para diversos procesos: Producción de energía (Bailey y Ollis, 1986; López-Hernández, 1991), la acidogénesis para la producción de hidrógeno, pues 1 kg de hidrógeno contiene la misma cantidad de energía que

la contenida en 8 kg de gasolina (Dávila-Vázquez et al., 2008). Estas técnicas no se han llevado a cabo a nivel industrial y solamente existen a escala de laboratorio. Otros ejemplos son la producción de alimento para animales. En los estudios por Susial-Badajoz et al. (2001), mencionan que las vinazas contienen un valor alimenticio alto y una digestibilidad adecuada para los animales, del 50%, razón por la cual se ha utilizado en proporciones del 10% en la comida diaria de los rumiantes y de hasta el 30%, en la alimentación diaria de los cerdos. Se han realizado estudios adicionales sobre la alimentación de las ovejas, mezclando su alimento diario con vinazas (Fernández et al., 2009). Estos autores concluyen que las ovejas no pueden ser alimentadas con una relación vinaza/alimento mayor al 13%.

El tratamiento anaerobio es uno de los métodos más empleados para la vinaza ya que, además de su bajo costo de operación y su baja producción de residuos, tiene la ventaja de la producción de corrientes valiosas, como el gas metano. Tiene alta eficiencia para el tratamiento de la fracción orgánica biodegradable de las vinazas, pero no de los componentes que lleguen a ser recalcitrantes, como las melanoidinas y los fenoles, que resultan inhibidores para las bacterias metanogénicas (Contreras-Contreras et al., 2020; Mainardis et al., 2020).

La transformación de los componentes disueltos por la vía de bioconversiones microbianas fue abordada a nivel de planta piloto vía tratamientos anaerobio, aerobio y anaerobio - aerobio llegando a reducir el contenido de la materia orgánica disuelta hasta en 90% (De-Bazúa et al., 1991; Durán-de-Bazúa et al., 1988,1994). Por lo anterior, el tratamiento de las vinazas ha sido motivo de varias investigaciones subsecuentes a escala de laboratorio, en las cuales se ha encontrado que el 10% restante es material no biodegradable (polifenoles) por los métodos convencionales de biotransformación, por lo que es necesaria la aplicación de un tratamiento terciario para recuperarlo (Contreras-Contreras, 2019; Gaspar-Mendoza, 2022) o su disposición en suelos (Bautista-Zúñiga y Durán-de-Bazúa, 1998).

Cambiando ahora a procesos químicos, uno de los sistemas utilizados es la coagulación-floculación según Íñiguez y Hernández (2010). López-López (2009) señalan que el tratamiento fisicoquímico de coagulación-floculación es el más utilizado, tanto a escala de laboratorio como industrial, utilizando $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ como agente coagulante y un pH de 6, con lo cual, se obtienen remociones del 70% de color y 30% de sólidos suspendidos que quedan como sólidos precipitables. La electrocoagulación-electroflotación es un tratamiento utilizado para vinazas previamente tratadas (Dávila-Rincón et al., 2011). Sin embargo, de acuerdo con Dávila-Rincón et al. (2010), este sistema resulta ser ineficiente debido a que se obtienen remociones del 58%. En estos procedimientos no se reaprovechan los polifenoles sino que se convierten en un nuevo desecho.

La flotación con aire disuelto no es comúnmente utilizada a escala industrial, pero en los casos donde se ha llegado a utilizar es necesaria la adición de un polímero para la aceleración de la separación de los sólidos suspendidos, con lo cual se llega a remociones del 80% (López-López et al., 2015). Las lagunas de sedimentación son generalmente utilizadas para el almacenamiento de las vinazas, pero se han llegado a utilizar adicionalmente como sedimentadores primarios, ya que se logran remociones de más del 90% de los sólidos suspendidos presentes en las vinazas (Íñiguez-Covarrubias y Peraza-Luna, 2007).

Debido a que el ozono se considera un oxidante fuerte, comúnmente es utilizado para degradar el color, fenoles y plaguicidas como un pre o post tratamiento de un proceso biológico (Goyes y Bolaños, 2005). Por otra parte, estudios realizados por Siles et al. (2011), demostraron que con 15 minutos de ozonación la concentración de fenoles en la vinaza se redujo aproximadamente en un 40%. Nuevamente, no hay un reaprovechamiento de estos materiales orgánicos.

A continuación, y con base en esta introducción se presentan los objetivos de esta investigación teórica.

1.4. Objetivos

1.4.1. Objetivo general

Realizar una revisión bibliográfica sobre los métodos de tratamiento alternos más prometedores, tanto bioquímicos como fisicoquímicos, para el reaprovechamiento de las vinazas provenientes de una planta cooperante productora de bioetanol empleando mieles de caña de azúcar (*Saccharum officinarum*).

1.4.2. Objetivos particulares

-) Realizar una revisión de material bibliográfico acerca del proceso de producción de bioetanol, los subproductos que se obtienen y su caracterización fisicoquímica, además del impacto ambiental que tienen estos subproductos (vinazas) si no son reaprovechados
-) Documentar una revisión de material bibliográfico acerca de los métodos y procesos bioquímicos para el aprovechamiento de las vinazas
-) Efectuar una revisión de material bibliográfico acerca de los métodos y procesos alternos fisicoquímicos para el aprovechamiento de las vinazas
-) Evaluar los procesos físicos, químicos y bioquímicos con base en la literatura consultada para justificar el proceso más idóneo en el aprovechamiento de los componentes de las vinazas.

Capítulo II

Metodología

2.1. Metodología empleada

En la Fig. 2.1. Se presenta el diagrama de flujo que se aplicó para el desarrollo de la revisión bibliográfica.



Fig. 2.1. Diagrama de flujo para desarrollar la revisión bibliográfica

Capítulo III

Revisión bibliográfica

3.1. Proceso de producción del etanol

3.1.1. Antecedentes

Actualmente el bioetanol se obtiene a través del proceso de fermentación de glucosa presente en la melaza de jugo de caña de azúcar. Existen diferentes fuentes de glucosa para obtener bioetanol. Una de las clasificaciones se basa en la tecnología usada para producir biocombustibles. Se divide en cuatro generaciones y depende del tipo de materia prima empleada (Álvarez-Maciel, 2009; Ortiz-Gallardo, 2017; Percival-Zhang et al., 2006; Ramos y Gil, 2017).

Los procesos para producir bioetanol de primera generación provienen de materias primas derivadas de partes alimenticias de las plantas con alto contenido de almidón, glúcidos en general y aceite, como caña de azúcar, sorgo, maíz, yuca y agave, entre otros. Los de segunda generación son los que utilizan residuos de cultivos como madera, pajas y pastos usando la celulosa hidrolizada como materia prima para la producción de bioetanol. Los de tercera generación utilizan biomasa adaptada o modificada para obtener el bioetanol, como el caso de las microalgas. Los de cuarta generación utilizan como materia prima bacterias modificadas y alguna fuente de carbono para la obtención de biocombustibles dependiendo del tipo de materia prima que se tenga disponible para la producción de bioetanol (Al-Arni, 2018; Álvarez-Maciel, 2009; Dong et al., 2019).

En esta etapa de la investigación solamente se considerará la producción de bioetanol de primera generación. En el Anexo 1 se muestran, de todas maneras, las primeras tres opciones o generaciones de producción de etanol ya que la

propia caña podría incluirse en ellas con todas sus partes anatómicas. Y, en el Anexo 2, se da un breve ejemplo de los de segunda generación.

El bioetanol comercial es producido principalmente a partir de caña de azúcar (*Saccharum officinarum*), es decir, se utilizan tecnologías de primera generación. Dentro del proceso de producción de bioetanol de este tipo se pueden señalar 5 etapas principales para su obtención. De forma general, se pueden describir como: (a) Llevar a cabo la entrega de fuente de carbono a la planta, (b) realizar un pretratamiento de la fuente de carbono, (c) provocar una hidrólisis para tener glucosa, que es lo que las levaduras convierten en bioetanol, (d) la fermentación y, finalmente, (e) la concentración del etanol para su uso final (Al-Arni, 2018; Álvarez-Maciel, 2009; Dong et al., 2019; Fanelli et al., 2020; Khatiwada et al., 2016; Ortiz-Gallardo, 2017).

3.1.2. Composición de la caña de azúcar

La caña de azúcar (*Saccharum officinarum*) está compuesta en 20% de lignina y 80% entre celulosa y hemicelulosa, además de algunos compuestos misceláneos (Intriago-García y Sabando-Solórzano, 2017). A medida que la caña de azúcar madura, se crean paredes celulares secundarias entre la pared celular primaria y la membrana plasmática, que consisten en celulosa, hemicelulosa y lignina (Gregg y Saddler, 1995; Khattab y Watanabe, 2019; Kumar et al., 2019, 2020; Percival-Zhang et al., 2006; Phuphaphud et al., 2020; Singels et al., 2021).

Celulosa

La celulosa es un polímero sintetizado en la naturaleza de cadenas lineales de monómeros de D-glucosa (Figura 3.1). La estructura de la celulosa se forma por la unión de moléculas de β -glucosa a través de enlaces β -1,4-glucosídico. La celulosa tiene una estructura lineal o fibrosa, en la que se establece múltiples puentes de hidrógeno entre los grupos hidroxilo de distintas cadenas yuxtapuestas de glucosa, debido a esto posee la propiedad de ser insoluble en agua (Baduí-

Dergal, 2016; Damodaran et al., 1992; Gañán et al., 2017; Intriago-García y Sabando-Solórzano, 2017).

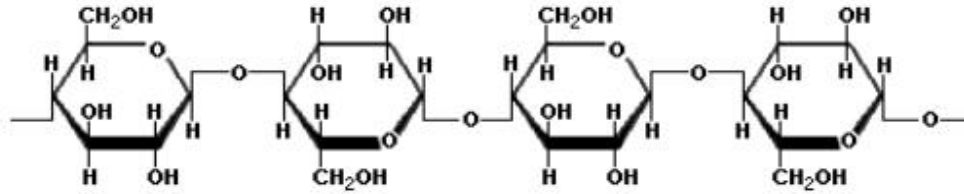


Figura 3.1. Estructura de la cadena celulosa (Intriago-García y Sabando-Solórzano, 2017)

Las moléculas de celulosa se unen formando moléculas más largas conocidas como protofibrillas y estas a su vez están empaquetadas en unidades mayores que se denominan microfibrillas (Rodríguez-García, 2015). La estructura molecular de la celulosa es un aspecto de gran importancia ya que esto determina el pretratamiento de hidrólisis que se le debe realizar a la celulosa que es parte de la caña de azúcar (Percival-Zhang y Lynd, 2004) si se usara para la producción de bioetanol de segunda generación. En cuanto más ordenada y cristalina se encuentre la celulosa es menos soluble en agua y aumenta el grado de dificultad para degradar la molécula, de la cual se obtiene el etanol (Eichhorn et al., 2010; Rodríguez-García, 2015).

Lignina

La lignina es un polímero aromático de estructura tridimensional compleja, ramificada y amorfa (Percival-Zhang y Lynd, 2004). Su función dentro de las plantas es proteger la celulosa de ataques microbianos, mantener unidas las fibras celulósicas y brindar permeabilidad a las mismas (Rodríguez-García, 2015). La lignina es el tercer polímero natural más abundante en la naturaleza tras la celulosa y la quitina (Galbe y Zacchi, 2002). Está formada por monómeros básicos, llamados alcoholes de cinamilo o cinamílicos¹ (Figura 3.2), diferenciados por las sustituciones que presenta el anillo aromático (Chávez-Sifontes y Domine, 2013; Torres-Ramos et al., 2015).

¹ Ver Glosario al inicio de esta tesis

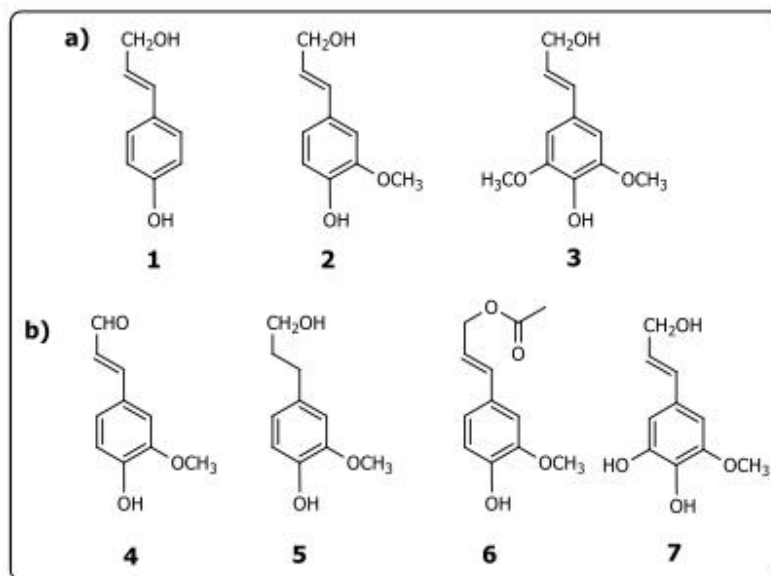
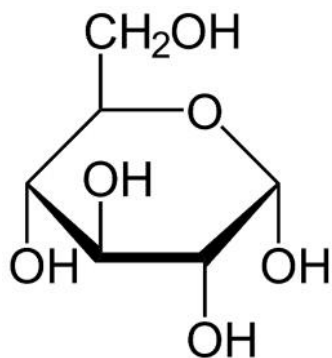


Fig. 3.2. Estructura de alcoholes cinamílicos: a) Tipos de monolignoles más comunes encontrados en los bloques de construcción de la lignina: 1: alcohol p-cumarílico, 2: alcohol coniferílico, 3: alcohol sinapílico, b) Otros tipos de monolignoles (coniferil-derivados): 4: coniferaldehído, 5: alcohol dihidroconiferílico, 6: alcohol coniferil-9-acetato, 7: alcohol 5-hidroxiconiferílico (Adaptada de Gellerstedt y Henricksson, 2008 por Chávez-Sifontes y Domine, 2013)

Hemicelulosa

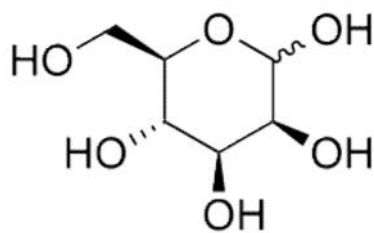
Es un carbohidrato complejo y heterogéneo ya que su estructura posee diferentes polímeros formados por más de un tipo de glúcido, tales como la D-xilosa, L-arabinosa, D-galactosa, D-xilulosa, etc. Su principal función es proporcionar la unión entre la celulosa y la lignina (Intriago-García y Sabando-Solórzano, 2017; Martín y Secades, 1994; Rivas-Siota, 2014).

Además, dentro de la hemicelulosa existen diferentes polímeros como pentosas (xilosa y arabinosa), como hexosas (manosa, glucosa y galactosa), azúcar y ácidos, entrelazadas entre sí glucosídicamente. Las unidades de los monómeros que constituyen las hemicelulosas son principalmente monoglúcidos y ácidos urónicos. Los monoglúcidos principales que se encuentran en las hemicelulosas son tres hexosas: glucosa, manosa y galactosa que se muestran en la Figura 3.3 (Galbe y Zacchi, 2002; Rivas-Siota, 2014).



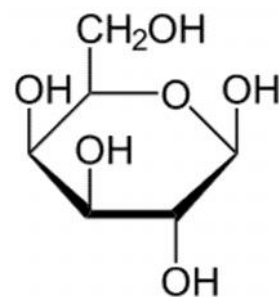
Glucosa

(<https://es.wikipedia.org/wiki/Glucosa>)



Manosa

(<https://es.wikipedia.org/wiki/Manosa>)



Galactosa

(<https://es.wikipedia.org/wiki/Archivo:Beta-D-Galactopyranose.svg>)

Figura 3.3. Estructuras de principales hexosas y pentosas presentes en la hemicelulosa (Wikipedia)

Otros compuestos

Dentro de los otros componentes que forman la caña de azúcar se encuentran aquellos que no forman parte de la estructura de la pared vegetal y son los que le proporcionan a la planta el color, olor y resistencia al marchitamiento (Rodríguez-García, 2015). Constituyen una gran variedad de compuestos orgánicos tales como grasas, ceras, alcaloides, proteínas, fenoles, glúcidos simples, pectinas, mucilagos, gomas, resinas, terpenos, etc. (Larrañondo, 2017; Rodríguez-García, 2015). La mayoría de estos tienen como funciones principales las de ser intermediarios metabólicos, ser reservas de energía y formar parte de los mecanismos de defensa contra los ataques microbianos y de otras plagas (Villarreal, 2006; Yao et al., 2015).

3.1.3. Melazas

Las melazas pueden considerarse como materia prima para la producción de bioetanol de primera generación mediante su fermentación. Se les conoce también como miel final y son un líquido denso y viscoso de color oscuro, que se obtiene como subproducto de la cristalización durante la fabricación del azúcar a partir de

la caña de azúcar (Gilces-Farías y Veloz-Pinto, 2006; Rabassa-Olazábal et al., 2016; Velásquez-Ramírez, 2008).

El proceso de obtención de las melazas se inicia con la preparación de la caña, su molienda (propriadamente prensado), la purificación del jugo extraído mecánicamente, después se le elimina gran parte de agua usando evaporación para ser llevada la miel fina a cristalización donde se obtiene un líquido (melaza o miel final) y cristales sólidos (azúcar o masa cocida), llevando estos productos a una máquina centrífuga para su separación (Carbajal-Cedillo et al., 2008; Navarrete-Prida et al., 2016). Los cristales son lavados con agua fría para quitar la película de miel que tienen y secados para eliminar el exceso de agua (Córdova-Coronel, 2017). La melaza se considera como corriente residual cuando ya no es posible recuperar los cristales de sacarosa que contiene (Carbajal-Cedillo et al., 2008; Rabassa-Olazábal et al., 2016).

Para la producción de etanol a partir de caña de azúcar es común usar el jugo de caña para su fermentación (Gilces-Farías y Veloz-Pinto, 2006). En México, durante el gobierno de Lázaro Cárdenas se promovió el uso de la melaza para la producción de alcohol etílico dejando el jugo exclusivamente para la producción de azúcar como fuente de energía para la población con mayores problemas de desnutrición (Frausto-Guerrero, 2020). Por ello, se usa en México como materia prima la melaza ya que contiene la mayor parte de los glúcidos simples presentes en el jugo, especialmente la glucosa. La composición de la melaza y la cantidad de glucosa que contiene depende de 3 factores: Las condiciones en las que se encuentra la caña de azúcar, el tipo de planta procesadora en la industria azucarera y el método de manejo de la melaza (almacenamiento y transporte) (Carbajal-Cedillo et al., 2008; Gilces-Farías y Veloz-Pinto, 2006; López et al., 2018; Navarrete-Prida et al., 2016).

Uno de los principales obstáculos para la generación en masa de biocombustibles es el alto costo de producción (Velásquez-Ramírez, 2008). Una forma de reducir

los costos es reducir el costo de fermentación utilizando materia prima con un alto contenido de glucosa y reutilizando la biomasa microbiana como biofertilizante o alimento de animales (Gabra et al., 2019).

A diferencia del uso directo de jugo de caña de azúcar la melaza tiene algunas ventajas, como ser relativamente más barata y adecuada para operar como un líquido, sin necesidad de procesos de hidrólisis antes de su uso, su disponibilidad es universal ya que depende de los ingenios azucareros, es un coproducto muy valioso porque tiene un alto contenido de hidratos de carbono que la convierte en un sustrato ideal y sostenible en los procesos de fermentación para la producción de bioetanol (López et al., 2018; Navarrete-Prida et al., 2016).

La composición de glúcidos simples en la melaza depende de diversos factores. Se tienen las características de algunas melazas. Según un estudio realizado por Bouallagui et al. (2013), la melaza que obtuvieron a partir de caña de azúcar cultivada en Cuba tiene la siguiente composición: Materia seca (72.2%), glúcidos totales (48.5%), contenido de cenizas (6.7%) y pH de 7.9.

En otro estudio, realizado por Ghorbani et al. (2011), la melaza obtenida de caña de azúcar en Irán contiene alrededor de 51.50% de sacarosa, 4.05% de fructosa y 9.59% de glucosa, así como un pH de 6.2.

Hernández-Vázquez (1988) reporta en su estudio que las melazas producidas en San Luis Potosí, México, tienen un contenido de glúcidos totales entre 50 y 55% y el pH entre 5.5 y 6.6. Los factores más comunes son las condiciones de producción del azúcar ya que estas provocan cambios en los glúcidos del jugo de caña reduciendo la eficiencia del proceso y aumentando los cambios en las mieles finales o melazas.

3.1.4. Fases del proceso de producción de bioetanol a partir de caña de azúcar

3.1.4.1. Obtención de bioetanol de primera generación (melaza)

Para tener un amplio panorama de cómo se lleva a cabo en la industria el proceso de producción de bioetanol a partir de caña de azúcar (*Saccharum officinarum*) como materia prima, se describirán las etapas necesarias para la obtención de este biocombustible a partir de la entrega de biomasa (caña de azúcar) a la planta.

La tecnología para realizar los pretratamientos necesarios, para disponer correctamente de la caña de azúcar, se puede clasificar en tratamientos físicos, químicos o ambos. Los pretratamientos de la materia prima son de suma importancia debido a que de estos dependerá la efectividad con la que se obtengan altos rendimientos durante la conversión de la glucosa a etanol durante la reacción de fermentación para la producción de bioetanol a partir de biomasa lignocelulósicas que deben ser hidrolizadas para liberar las moléculas de glucosa, como lo es la de la caña de azúcar (Fuentes-Navarro, 2006; Intriago-García y Sabando-Solórzano, 2017; López et al., 2018; Shivaji-Jagtap et al., 2019; Velásquez-Ramírez, 2008).

Para obtener azúcar primeramente la materia prima (caña de azúcar) es pasada por procesos de pretratamiento mecánico que consisten en trituración o pulverización mecánica con el fin de extraer el jugo azucarado. La caña es recolectada y lavada con agua a una temperatura alrededor de 40°C y es llevada a desfibradoras donde se cortan los tallos y desfibrilan la caña para poder extraer su jugo. Posteriormente es pasada por un grupo de molinos donde es exprimido, se agrega agua para extraer la mayor cantidad de sacarosa, que se llama agua de imbibición (Carbajal-Cedillo et al., 2008; Khattab y Watanabe, 2019; López et al., 2018; Navarrete-Prida et al., 2016; Ramos-de-Andrade et al., 2013).

Este jugo obtenido en el proceso de tratamiento mecánico es sometido a una depuración y, para producir lo que en México se llama azúcar estándar, se lleva a cabo la operación unitaria llamada 'sulfitación' en los ingenios azucareros. Se realiza un precalentamiento entre 65 y 70°C y se adiciona SO₂ con el fin de disminuir la formación de color, eliminar microorganismos, disminuir la viscosidad entre otros (Montoya-Rodríguez y Quintero-Suárez, 2005). Posteriormente, se neutraliza con CaO y, finalmente, se lleva a los clarificadores donde mediante floculación y sedimentación se retiran los lodos clarificados que se componen de arena, arcilla silicatos, hidróxido de calcio, etc. Estos son extraídos utilizando bombas y se 'secan' en un filtro rotatorio donde todavía se recupera algo de jugo clarificado. A la torta de los filtros se le conoce en los ingenios azucareros mexicanos como 'cachaza', la cual tiene otros usos (Carbajal-Cedillo et al., 2008; Jiménez-López, 2016).

El jugo obtenido clarificado o mezclado, como se le conoce en algunos ingenios azucareros mexicanos, tiene una composición entre 11 y 15% en masa de sacarosa (Montoya-Rodríguez y Quintero-Suárez, 2005).

Este jugo obtenido de la clarificación posee alrededor de 85% de agua por lo que se requiere un proceso de evaporación para su eliminación y que se alcance en las meladuras o mieles finas una composición que llegue de 58 hasta 62% de sólidos (Córdova-Coronel, 2017). Comúnmente, en la industria se utilizan evaporadores de múltiple efecto en donde se llevan a cabo dos etapas. En la primera se vaporizan alrededor de dos terceras partes de agua obteniendo como producto la meladura y en la segunda etapa se lleva a cabo la evaporación de múltiple efecto al vacío (Carbajal-Cedillo et al., 2008; Córdova-Coronel, 2017). Operar con evaporadores de múltiple efecto ayuda a que se trabaje con temperaturas menos peligrosas y, a su vez, se evitan las pérdidas de sacarosa al transformarse en caramelos cuando las temperaturas son altas. La meladura obtenida pasa a la última etapa de separación de agua y donde obtendrá la concentración máxima en la que empiezan a formarse cristales de azúcar. Se

hace mediante un equipo parecido a los evaporadores y, en los ingenios mexicanos, el aparato se denomina 'tacho'. De esta operación final depende la calidad de la azúcar (Córdova-Coronel, 2017; Fuentes-Navarro, 2006; Navarrete-Prida et al., 2016; Romero-Agreda, 2010).

Después de pasar la meladura por el 'tacho', se envía a un equipo de cristalización, se lleva a cabo en un sistema constituido por un eje y aspas en el cual se favorece el intercambio de calor para el enfriamiento de la meladura. De esta manera se cristaliza el azúcar adicionando cristales muy pequeños que sirven de semilla para formar cristales más grandes (Carbajal-Cedillo et al., 2008; Navarrete-Prida et al., 2016). El material resultante son los cristales de azúcar llamado masa cocida (*masse cuite* en francés) y el líquido que se denomina miel mezclada o meladura o melaza, objeto de esta parte de la investigación (Fuentes-Navarro, 2006; Romero-Agreda, 2010).

El siguiente paso es la separación por centrifugación teniendo por un lado los cristales de azúcar húmedos cubiertos con una fina película de miel y las melazas por el otro. La máquina centrifugadora usa altas velocidades y, dependiendo de la calidad de azúcar que se quiera obtener, se usan diferentes ciclos de lavado con agua fría, para obtener azúcar blanca (realmente estándar) o morena (Carbajal-Cedillo et al., 2008; López et al., 2018; Navarrete-Prida et al., 2016; Romero-Agreda, 2010).

Aunque ya no procede para esta investigación, se mencionará que, finalmente, los cristales de azúcar obtenidos se envían a secado para evitar que se formen terrones. El secador comúnmente es un cilindro rotatorio en contacto con aire tibio y seco hasta alcanzar bajas concentraciones de agua en los cristales (entre 0.02 a 0.04%). El producto está listo para ser empacado y llevado a comercialización (Córdova-Coronel, 2017; Fuentes-Navarro, 2006; López et al., 2018; Rabassa-Olazábal et al., 2016).

3.1.4.2. Proceso de producción de bioetanol a partir de melaza

Previamente se ha descrito cómo se obtiene la melaza en el proceso de producción de azúcar comercial. La melaza es la materia prima más adecuada para obtener etanol debido a su alto contenido de glucosa (Aguilar-Rivera y Canizales-Leal, 2004; Bouallagui et al., 2013; Reddy et al., 2020).

El proceso de producción de bioetanol a partir de melazas obtenidas con caña de azúcar se inicia con un pretratamiento de la misma donde entra de manera diluida en tanques diseñados para la eliminación de lodos, cenizas y otras partículas, se añade hexametáfosfato de sodio y se ajusta el pH entre 4.0 a 4.5 con ácido sulfúrico (H_2SO_4) comercial que convierte el Ca^{2+} en sulfato de calcio y mantiene un pH ácido para promover el desarrollo solamente de las levaduras e hidrolizar la sacarosa que permanezca. Además, se agregan nutrientes (urea, amonio, fosfato o sulfato de amonio) a la materia prima diluida para después enviarla a los fermentadores. Posteriormente, se hace la preparación del inóculo que serán las levaduras utilizadas para la fermentación (Aguilar-Rivera y Canizales-Leal, 2004; Alfonso-Cardero et al., 2021; Amid et al., 2021; Bautista-da-Silva et al., 2012; Bouallagui et al., 2013; Khattab y Watanabe, 2019; Mainardis et al., 2020; Manmai et al., 2020; Moodley y Kana, 2019; Ramos y Gil, 2017).

En el proceso de fermentación se utiliza un reactor intermitente (tipo *batch* en inglés) donde la temperatura se mantiene a $32\pm 1^\circ C$ y se utiliza agitación constante. Para controlar la formación de espuma se utiliza un agente antiespumante a base de sílice.

El fermentador se llena 16 h después de la transferencia de inóculo (25%) con melaza adecuadamente diluida. Se pueden describir en la Tabla 3.1 algunas de las reacciones llevadas a cabo dentro del fermentador (Arshad et al., 2017;

Bouallagui et al., 2013; Dias et al., 2009; Junior-Letti et al., 2012; Moodley y Kana, 2019; Santosh et al., 2017).

Tabla 3.1. Reacciones de los glúcidos provenientes del jugo de caña de azúcar

Reacción (autores)	Reacciones
1. (Arias-Giraldo y López-Velasco, 2019)	Sacarosa + H ₂ O → Glucosa + Fructosa
2. (Gilces-Farías y Veloz-Pinto, 2006)	Glucosa → 2 Etanol + 2 CO ₂
3. (Aya-Arias et al., 2006)	Glucosa → CO ₂ + Acetaldehído + Glicerol
4. (Aya-Arias et al., 2006)	Glucosa → CO ₂ + Alcohol isoamílico + 1.5 O ₂

Nota: Las reacciones aquí señaladas requieren de “catalizadores” químicos y/o bioquímicos provenientes de la levadura *Saccharomyces cerevisiae* o de otros microorganismos oportunistas que están en los biorreactores ya que en muchas empresas no están cerrados ni en condiciones estériles para que el inóculo de *S. cerevisiae* sea el único que proliferare

El alcohol etílico producido por la fermentación contiene una parte significativa de agua ya que siendo el producto metabólico de la levadura es tóxico para ella y por eso su concentración nunca excede de 14 a 18% en volumen (Bazúa y Wilke, 1975). Esta agua debe ser removida para poder ser usado como biocombustible o para otros usos. Para ello se utiliza un proceso de destilación aprovechando que el etanol tiene un punto de ebullición menor (78.3°C) que el agua (100°C) a condiciones normales de presión (1 atm = 101.325 kPa).

En la primera torre de destilación se transfiere a la columna el fluido fermentado (conocido coloquialmente como vino) y se aplica vapor desde el fondo. De esta manera la temperatura se mantiene en un intervalo de 78 a 80°C (Arshad et al., 2017). El líquido resultante se vuelve a hervir en una columna de depuración para eliminar impurezas y se alimenta a la columna de rectificación llegando a una concentración de etanol de alrededor de 96.0 a 96.4% en volumen o fracción mol (Arshad et al., 2017; Dias et al., 2009). En este tren de destilación se alcanza una concentración cercana a la azeotrópica, con una concentración en los fondos de las columnas que no sobrepasa de 0.1% de etanol en masa.

El proceso de destilación del etanol fermentado para biocombustible es muy similar al convencional o comercial para bebidas alcohólicas, pero se le agrega un

paso de deshidratación para eliminar esa última fracción de agua y poder ser usado como carburante. Para lograr esa deshidratación se pueden utilizar varios métodos (Conde-Mejía et al., 2016; Dias et al., 2009; Errico y Rong, 2012; Kiran y Jana, 2015; Kiss y Suszwalak, 2012; Pacheco-Basulto et al., 2012; Siqueira et al., 2008; Wu et al., 2020).

En la destilación y deshidratación se recupera del 'vino' alcanzando una concentración en masa del 99.5% en volumen o fracción mol de etanol. Para remover el agua restante de la mezcla se emplea adsorción en fase vapor en dos lechos de tamices moleculares con los que se alcanza la pureza deseada (Conde-Mejía et al., 2016; Errico y Rong, 2012; Montoya-Rodríguez y Quintero-Suárez, 2005; Pataro et al., 2020; Singh et al., 2019; Tgarguifa et al., 2017).

En la destilación y deshidratación se recupera el producto destilado de etanol llegando hasta una concentración en masa del 99.5%. Especificando lo señalado arriba, en la segunda torre de destilación se remueve el CO₂ disuelto y la mezcla destilada llega a una concentración del 50% de pureza, después en la tercera columna de destilación alcanza una concentración de etanol cercana a la azeotrópica de hasta 91% en masa. Finalmente, para remover el agua restante de la mezcla, uno de los métodos usados es la adsorción en fase vapor en dos lechos de tamices moleculares para alcanzar la pureza deseada (Conde-Mejía et al., 2016; Montoya-Rodríguez y Quintero-Suárez, 2005; Kiss y Suszwalak, 2012; Pataro et al., 2020; Siqueira et al., 2008; Singh et al., 2019; Tgarguifa et al., 2017).

3.1.4.3. Subproductos obtenidos del proceso de producción de bioetanol

De la corriente residual que se obtiene del proceso de obtención de etanol a partir de caña de azúcar, las de mayor significancia por el volumen en la que se genera es la obtenida de la primera torre de destilación, conocida como vinaza por nombrarse al líquido fermentado que entra a esa columna como 'vino', como ya se mencionó. Debido a su alto contenido de compuestos carbonosos se ha planteado

su recuperación transformándolos en metano en reactores anaerobios (Ahmed et al., 2020; Bailey y Ollis, 1986; Bettani et al., 2019; Mancini-Coelho et al., 2018). Si no se aprovechan pueden causar daños ambientales por este contenido de materia orgánica y su pH tan ácido. La vinaza también puede usarse para la producción de bioetanol de segunda generación usando otros microorganismos que puedan transformar otros compuestos carbonosos, además de sólidos en suspensión, sólidos disueltos, residuos de levaduras, sales minerales, glúcidos residuales, proteínas, grasas, ceras, nutrientes residuales y glúcidos no fermentados (Amid et al., 2021; Ariadji et al., 2020; Montoya-Rodríguez y Quintero-Suárez, 2005; Priharto et al., 2019; Rivière et al., 2021; Rodríguez-García, 2015; Troiano et al., 2020).

3.2. Vinazas

A medida que aumenta la demanda de etanol en el mercado también aumenta la preocupación del impacto ambiental que genera la producción de esta corriente del fondo de la primera columna. Por ello, su manejo adecuado y deseable aprovechamiento son algunas de las principales inquietudes en el proceso de producción de etanol (Ahmed et al., 2020; Fukushima et al., 2019; Prazeres et al., 2019; Soares-Santos et al., 2019).

Las vinazas actualmente son consideradas como aguas residuales y no como un subproducto con valor económico. Se les cataloga como uno de los residuos más contaminantes debido a sus altos valores de demanda bioquímica de oxígeno (DBO) y demanda química de oxígeno (DQO) y se caracterizan por tener un pH ácido. Lo deseable sería, si se le considera un residuo, reducir su volumen de producción, darle un tratamiento adecuado o aprovecharlo como fuente de energía y otros productos, como los polifenoles (Bettani et al., 2019; Contreras-Contreras et al., 2020; Christofolletti et al., 2013; Cortes-Rodríguez et al., 2018; Hoarau et al., 2018; Mancini-Coelho et al., 2018).

Pero las tendencias actuales de la economía circular afortunadamente están cambiando el concepto de residuos por el de nuevos productos, una filosofía existente desde hace 20 años (Braungart y McDonough, 2002).

3.2.1. Caracterización de vinazas

Las características de la vinaza pueden variar dependiendo de la materia prima utilizada para la producción de etanol y de la alimentación en el proceso de fermentación, en el caso de la vinaza proveniente de caña de azúcar presentan un alto contenido en compuestos orgánicos y nutrientes como calcio, magnesio, potasio, nitrógeno y fósforo, así como ácidos orgánicos como lactato y acetato, compuestos orgánicos complejos, alcoholes como glicerol y etanol y cantidades variables de fenoles dependiendo de la oxidación enzimática al extraer el jugo y de la descomposición del azúcar en los evaporadores (Tabla 3.2) (Ahmed et al., 2020; Contreras-González, 2017; De-Jesus et al., 2019; Hoarau et al., 2018; Parsaee et al., 2019).

La composición de las vinazas obtenidas en la primera torre de destilación depende del producto obtenido en la fermentación de las melazas (Contreras-González, 2017) y se tienen diversos registros de su contenido.

En algunos lugares la disposición final de las vinazas es su vertimiento en ríos, lagos, presas y en canales sin recuperación alguna de sus compuestos valiosos, convirtiéndose en gran medida en una fuente de contaminación con alto impacto en el ambiente, como se mencionó al inicio (Iñiguez y Hernández, 2010; Lira-Rodríguez, 2013; Merino-Núñez y Valderrama-Lara, 2017). Es por ello de gran interés para la industria desarrollar un sistema de reaprovechamiento de estos efluentes con opciones económicas y amigables con el ambiente (López-López, 2009; Merino-Núñez y Valderrama-Lara, 2017; Villalobos-Castillejos, 2009).

3.2.2. Normatividad ambiental

Actualmente en México no existe una norma específica que indique la regulación del vertido de vinazas o de aguas residuales de la industria del alcohol. Actualmente, existen normas mexicanas que regulan los límites permitidos de los contaminantes en aguas residuales.

De acuerdo con la normativa de la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, SEMARNAT, existen tres opciones de descarga de las aguas residuales que son ríos o arroyos, drenaje urbano y sobre suelos o terrenos (Lira-Rodríguez, 2013; Merino-Núñez y Valderrama-Lara, 2017). La norma oficial mexicana NOM-001-SEMARNAT-1996 (DOF, 1996a) es la que establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en aguas y bienes nacionales, los cuales no deben exceder los límites indicados en la primera y tercera tabla de dicha norma (Tabla 3.3 y 3.4). Se establece que las aguas residuales pueden ser descargadas en un cuerpo de agua si no exceden de 150 mg/L de DBO₅, 150 mg/L de sólidos suspendidos totales (SST) y 1 mL/L de sólidos sedimentados (SS), como también se mencionó al inicio de esta investigación (DOF, 1996a).

La norma oficial mexicana NOM-002-SEMARNAT-1996 (DOF, 1996b), que establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales a los sistemas de alcantarillado urbano o municipal, los límites en esta norma se especifican en la primera Tabla de su contenido (Tabla 3.5), las grasas y aceites, sólidos sedimentados y metales, entre otros (DOF, 1996b).

La norma oficial mexicana NOM-003-SEMARNAT-1997, establece los límites máximos permisibles de contaminantes para las aguas residuales tratadas que se reutilicen (la norma dice reusen) en servicios al público. Los límites se encuentran especificados en esta norma en su primera tabla (Tabla 3.6), donde indica una DBO₅ de 20-30 mg/L y SST de 20-30 mg/L, también sobre grasas y aceites, coliformes fecales y huevos de helminto (DOF, 1997).

Tabla 3.2. Caracterización fisicoquímica de vinazas provenientes de melazas de caña de azúcar de acuerdo con diferentes autores

DBO (g/L)	DQO (g/L)	N (g/L)	P (g/L)	Ca (g/L)	Mg (g/L)	K (g/L)	ST (g/L)	STV (g/L)	pH	Referencia
39	85-95	0.153-1.23	0.01-0.19	n.d.	n.d.	4.89-11	1.5-3.48	n.d.	4-4.5	Ahmed et al., 2020
7.9	n.d.	0.543	0.085	0.680	0.270	3.92	26.8	n.d.	4.3	Bettani et al., 2019
5.85	12.533	n.d.	0.0116	0.527	0.269	2.66	n.d.	n.d.	4.14	Mancini-Coelho et al., 2018
-	85	n.d.	0.08	4.5	0.6	n.d.	2.4-4.3%	n.d.	n.d.	Contreras-González, 2017
5.046	13.380	n.d.	0.190	0.719	0.237	2.06	n.d.	n.d.	3.9	Christofolletti et al., 2013
8.846	13.252	0.027	0.0328	0.687	n.d.	0.90	n.d.	n.d.	3.26	De-Castro-Marcato et al., 2019
13.619	n.d.	0.543	0.085	0.680	0.38	n.d.	26.8	2.8	4.5	De-Jesus et al., 2019
19.8	45	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	4.8-8.5%	n.d.	3.5-5	Fukushima et al., 2019
46.1-96	104-134.4	1.66	4.2	0.22-3.03	n.d.	9.6-17.47	n.d.	n.d.	3.9-4.5	Hoarau et al., 2018
n.d.	32.917	n.d.	0.044	0.683	0.182	2.73	5.3	4.7	5.5	Magalhães et al., 2020
5.04-47.63	27.5-299.25	0.221-0.302	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	27-81.5	19-22	2.25-4.97	Parsaee et al., 2019
15.467	31.17	0.489	0.051	0.605	0.444	2.48	22	14.4	4.29	Prazeres et al., 2019
n.d.	45	0.47	0.068	0.003 2	0.001	88	41.3	31.8	3-5	Santana-Junior et al., 2019
8.79-23.18	42.93-58.53	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	14.89-21.56	3.34-4.63	Soares-Santos et al., 2019

n.d.: no determinado

Tabla 3.3. Límites máximos permisibles para contaminantes básicos (DOF, 1996a)

TABLA 2
LIMITES MAXIMOS PERMISIBLES PARA CONTAMINANTES BASICOS

PARAMETROS (miligramos por litro, excepto cuando se especifique)	RIOS						EMBALSES NATURALES Y ARTIFICIALES				AGUAS COSTERAS				SUELO						
	Uso en riego agrícola (A)		Uso público urbano (B)		Protección de vida acuática (C)		Uso en riego agrícola (B)		Uso público urbano (C)		Explotación pesquera, navegación y otros usos (A)		Recreación (B)		ESTUARIOS (B)		Uso en riego agrícola (A)		HUMEDALES NATURALES (B)		
	P.M.	P.D.	P.M.	P.D.	P.M.	P.D.	P.M.	P.D.	P.M.	P.D.	P.M.	P.D.	P.M.	P.D.	P.M.	P.D.	P.M.	P.D.	P.M.	P.D.	
Temperatura °C (1)	N.A.	N.A.	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	N.A.	N.A.	40	40
Grasas y Aceites (2)	15	25	15	25	15	25	15	25	15	25	15	25	15	25	15	25	15	25	15	25	
Materia Flotante (3)	ausente	ausente	ausente	ausente	ausente	ausente	ausente	ausente	ausente	ausente	ausente	ausente	ausente	ausente	ausente	ausente	ausente	ausente	ausente	ausente	
Sólidos Sedimentables (ml/l)	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	N.A.	N.A.	1	2	
Sólidos Suspendedos Totales	150	200	75	125	40	60	75	125	40	60	150	200	75	125	75	125	N.A.	N.A.	75	125	
Demanda Bioquímica de Oxígeno ₅	150	200	75	150	30	60	75	150	30	60	150	200	75	150	75	150	N.A.	N.A.	75	150	
Nitrógeno Total	40	60	40	60	15	25	40	60	15	25	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	15	25	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	
Fósforo Total	20	30	20	30	5	10	20	30	5	10	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	5	10	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	

(1) Instantáneo

(2) Muestra Simple Promedio Ponderado

(3) Ausente según el Método de Prueba definido en la NMX-AA-006.

P. D. = Promedio Diario; P.M. = Promedio Mensual;

N.A. = No es aplicable.

(A), (B) y (C): Tipo de Cuerpo Receptor según la Ley Federal de Derechos

Nota de la autora: Los errores ortográficos son los de la propia norma

Tabla 3.4. Límites máximos permisibles para metales pesados y cianuro (DOF, 1996a)

TABLA 3

LIMITES MAXIMOS PERMISIBLES PARA METALES PESADOS Y CIANUROS																				
PARÁMETROS (*) (miligramos por litro)	RIOS						EMBALSES NATURALES Y ARTIFICIALES				AGUAS COSTERAS						SUELO			
	Uso en riego agrícola (A)		Uso público urbano (B)		Protección de vida acuática (C)		Uso en riego agrícola (B)		Uso público urbano (C)		Explotación pesquera, navegación y otros usos (A)		Recreación (B)		ESTUARIOS (B)		Uso en riego agrícola (A)		HUMEDALES NATURALES (B)	
	P.M.	P.D.	P.M.	P.D.	P.M.	P.D.	P.M.	P.D.	P.M.	P.D.	P.M.	P.D.	P.M.	P.D.	P.M.	P.D.	P.M.	P.D.	P.M.	P.D.
Arsénico	0.2	0.4	0.1	0.2	0.1	0.2	0.2	0.4	0.1	0.2	0.1	0.2	0.2	0.4	0.1	0.2	0.2	0.4	0.1	0.2
Cadmio	0.2	0.4	0.1	0.2	0.1	0.2	0.2	0.4	0.1	0.2	0.1	0.2	0.2	0.4	0.1	0.2	0.05	0.1	0.1	0.2
Cianuro	1.0	3.0	1.0	2.0	1.0	2.0	2.0	3.0	1.0	2.0	1.0	2.0	2.0	3.0	1.0	2.0	2.0	3.0	1.0	2.0
Cobre	4.0	6.0	4.0	6.0	4.0	6.0	4.0	6.0	4	6.0	4	6.0	4.0	6.0	4.0	6.0	4	6.0	4.0	6.0
Cromo	1	1.5	0.5	1.0	0.5	1.0	1	1.5	0.5	1.0	0.5	1.0	1	1.5	0.5	1.0	0.5	1.0	0.5	1.0
Mercurio	0.01	0.02	0.005	0.01	0.005	0.01	0.01	0.02	0.005	0.01	0.01	0.02	0.01	0.02	0.01	0.02	0.005	0.01	0.005	0.01
Níquel	2	4	2	4	2	4	2	4	2	4	2	4	2	4	2	4	2	4	2	4
Plomo	0.5	1	0.2	0.4	0.2	0.4	0.5	1	0.2	0.4	0.2	0.4	0.5	1	0.2	0.4	5	10	0.2	0.4
Zinc	10	20	10	20	10	20	10	20	10	20	10	20	10	20	10	20	10	20	10	20

(*) Medidos de manera total.

P.D.= Promedio Diario P.M.= Promedio Mensual N.A.= No es aplicable

(A), (B) y (C): Tipo de Cuerpo Receptor según la Ley Federal de Derechos.

Nota de la autora: Los errores ortográficos son los de la propia norma

Tabla 3.5. Límites máximos permisibles (DOF, 1996b)

Parámetros (mg/L)	Promedio mensual	Promedio diario	Instantáneo
Grasas y aceites	50	75	100
Sólidos sedimentables	5	7.5	10
Arsénico total	0.5	0.75	1
Cadmio total	0.5	0.75	1
Cianuro total	1	1.5	2
Cobre total	10	15	20
Cromo hexavalente	0.5	0.75	1
Mercurio total	0.01	0.015	0.02
Níquel total	4	6	8
Plomo total	1	1.5	2
Zinc total	6	9	12

Tabla 3.6. Límites máximos permisibles de contaminantes (DOF, 1997)

Tipo de 'reúso'	Promedio mensual				
	Coliformes Fecales NMP/100 mL	Huevos de helminto h/L	Grasas y aceites mg/L	DBO₅ mg/L	SST mg/L
Servicio al público con contacto directo	240	1	15	20	20
Servicio al público con contacto indirecto u ocasional	1000	5	15	30	30

NMP: Número más probable; mL; Mililitros; h: Huevos de helminto; L: Litro; mg: Miligramos; DBO₅: Demanda bioquímica de oxígeno a 5 días; SST: Sólidos suspendidos totales

Antes de aparecer las NOM-001, 002 y 003 se aplicaba la norma oficial mexicana NOM-064-ECOL-1994, que establecía los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales a cuerpos receptores provenientes de la industria de la destilería.

Las descargas de aguas residuales provenientes de la industria de la destilería debían cumplir con las especificaciones que se indicaban en la primera tabla de dicha norma (Tabla 3.7) (DOF, 1994).

Pero, desde la instalación del Tratado de Libre Comercio de América del Norte, TLCAN, las cancelaron y pusieron las actualmente vigentes.

Tabla 3.7. Límites máximos permisibles (DOF, 1994)

Parámetro	Promedio diario	Instantánea
pH (unidades de pH)	6-9	6-9
Demanda bioquímica de oxígeno (mg/L)	200	240
Demanda química de oxígeno (mg/L)	260	360
Grasas y aceites (mg/L)	10	20
Sólidos sedimentables (mL/L)	1	2
Sólidos suspendidos totales (mg/L)	200	240
Fósforo total (mg/L)	5	6
Nitrógeno total (mg/L)	10	12

mg: Miligramos; L: Litros; mL: Mililitros

3.3. Tratamientos y métodos de recuperación de las vinazas

3.3.1. Remoción de polifenoles presentes en las vinazas

En muchas destilerías las vinazas son almacenadas debido a las restricciones ambientales existentes, por lo que se requiere que se les dé un tratamiento adecuado mediante un sistema que ofrezca una opción rápida, económica y amigable con el ambiente (Merino-Núñez y Valderrama-Lara, 2017; López-López, 2009; Villalobos-Castillejos, 2009).

Existen una serie de procesos disponibles para el tratamiento de aguas residuales que funcionan para la recuperación de vinazas (Figura 3.4). Se utilizan tratamientos biológicos y varios métodos fisicoquímicos tales como coagulación-floculación, adsorción, electrocoagulación, oxidación electroquímica y ozonización, los cuales han demostrado ser eficaces en la remoción de materia orgánica y en el refinado de color (Carhuás-Pérez y Velásquez-Gutiérrez, 2018; Villalobos-Castillejos, 2009). El tratamiento anaerobio ha sido el más utilizado al ser de los procesos más eficaces para reducir los compuestos carbonosos en las vinazas (Bailey y Ollis, 1986; Lira-Rodríguez, 2013).

Uno de los componentes de la vinaza que representa retos para su separación bioquímica son los polifenoles, que son sustancias tóxicas para los microorganismos y que pueden llegar a inhibir la acción de los microorganismos usados en los bio-tratamientos (Contreras-Contreras, 2019; García-García et al., 1997; Retes-Pruneda, 2014). Por ello es necesario que se remuevan del efluente antes de llevar a cabo un tratamiento biológico o, si no lo afectan, después de éste. Los polifenoles incluyen ácidos fenólicos, flavonoides y taninos, que son incoloros, pero se oxidan por exposición al aire a compuestos de colores amarillo y marrón. Estos ácidos pueden ser modificables por procesos oxidativos, cambios de pH, en condiciones aerobias empleando algunas especies de hongos, entre otros tratamientos (Baldiris et al., 2012; Becerra-Ospina, 2014; Retes-Pruneda, 2014).

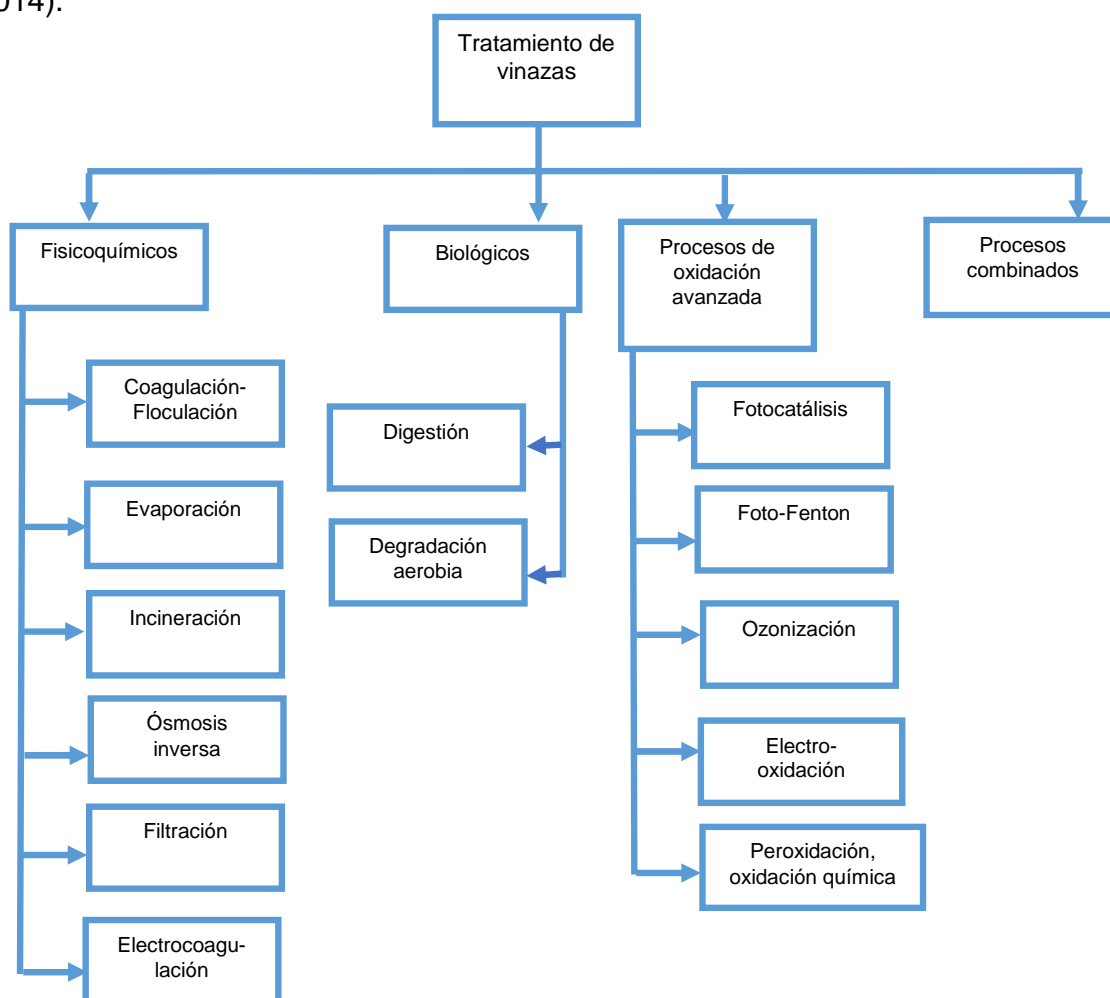


Figura 3.4. Clasificación de tratamientos de vinaza

Baldiris et al. (2012) reportan datos sobre biodegradación de la vinaza de caña de azúcar en presencia de cepas de los hongos *Schyzophyllum commune* y *Trichoderma viride*, reportando gran capacidad del sistema *S. commune*/vinaza para reducir la turbidez en ambos medios, siendo un buen degradador de materia orgánica (DQO), fenoles, K y un fijador potente de nitrógeno. Se reporta una remoción de fenoles de hasta un 60.5% y remoción de DQO de alrededor de 75%. En otro estudio realizado, Durán et al. (2015) reportan que para el tratamiento de vinazas realizaron un pretratamiento para la remoción de compuestos fenólicos utilizaron un proceso de oxidación avanzado (POA) que consiste en ozonólisis, considerando provocar el menor cambio en su composición orgánica, para que la vinaza sea aprovechada en el tratamiento anaerobio, el estudio se realizó con variaciones de pH y se obtuvieron remociones de compuestos fenólicos de hasta 48.33% y de DQO de 33.53%. Aquí los polifenoles no se aprovechan y además se convierten en un residuo.

Por otro lado, Moreno-Simón (2020) indica que los polifenoles de las vinazas sí podrían ser degradados anaerobiamente, ya que obtuvo una reducción de hasta un 82.5% de estos. Sin embargo, el proceso debe operarse a bajas concentraciones, ya que su constante de inhibición está comprendida entre 110 y 130 mg/L, por lo que, a mayor concentración inicial de polifenoles, menor resulta la actividad microbiana en el proceso anaerobio.

También, Paz-Pino (2013) reporta que al darle a la vinaza un tratamiento de electrocoagulación-floculación se lograron eficiencias de remoción en un intervalo de 29 al 52% de la DQO y entre 80 al 92% de los fenoles totales, mientras que con electrocoagulación-floculación se logró una eficiencia de remoción del 83.2% de la DQO y alrededor de 99% de los compuestos fenólicos iniciales. Al igual que en los procedimientos anteriores no se menciona el destino final de este coproducto de la vinaza y los materiales con los que se coaguló y se floculó.

Finalmente, para separarlos después del tratamiento anaerobio pueden usarse sistemas de adsorción y posterior desorción con objeto de recuperarlos debido a su posible valor comercial precisamente para atacar microorganismos como hongos y bacterias e incluso virus (Contreras-Contreras, 2019; Gaspar-Mendoza, 2022; Leyra-Tobilla, 2016; Mhatre et al., 2020).

3.3.2. Tratamientos biológicos de otros componentes de las vinazas

Los tratamientos biológicos consisten en la transformación de la materia orgánica biodegradable de las vinazas mediante la acción de microorganismos, ya sea que se mantienen en suspensión o se adhieran en un soporte sólido para formar una capa o biopelícula. Los procesos biológicos se clasifican principalmente en dos, anaerobio y aerobio. Para altos contenidos de materia orgánica se emplean los sistemas anaerobios y para aguas con bajas concentraciones de materia orgánica se usan los sistemas aerobios (Lira-Rodríguez, 2013; Villalobos-Castillejos, 2009).

3.3.2.1. Tratamiento anaerobio

Los sistemas de tratamiento anaerobio son eficientes para reaprovechar la alta carga orgánica de aguas que contengan materia carbonosa y nitrogenada, principalmente. El tratamiento anaerobio es uno de los procesos ecológicos más adecuados para la bioconversión de los compuestos orgánicos presentes en las vinazas de las destilerías donde son digeridas por microorganismos. El proceso se utiliza principalmente para producir biogás -metano, amoníaco, ácido sulfhídrico- (desde CH₄ 60% y CO₂ 40% hasta 80 y 20%, respectivamente) dependiendo del tipo de materia orgánica presente (Chowdhary et al., 2018; De-Bazúa et al., 1991). El tratamiento anaerobio consiste de reacciones metabólicas que ocurren en ausencia de oxígeno y que tienen lugar sucesivamente a través de las etapas de hidrólisis, acetogénesis / acidogénesis y la metanogénesis. Estas etapas promueven la biodegradación microbiana de la materia orgánica para producir diferentes moléculas y precursores de la bioenergía (Maciel-Pinto et al., 2018;

Moraes et al., 2015). En la Tabla 3.8 se pueden observar las eficiencias y características de algunos procesos anaerobios de tratamiento de vinazas, así como su reaprovechamiento medido como producción de metano.

Tabla 3.8. Eficiencias y características del tratamiento de vinazas mediante procesos biológicos anaerobios

<i>Tipo de reactor</i>	<i>Temperatura (°C)</i>	<i>pH</i>	<i>Reducción de DQO (%)</i>	<i>Producción de CH₄ m³CH₄/kgDQO</i>	<i>Referencia</i>
RCTA*	55	6-8.5	55.32- 60.55	0.20329	Alfonso-Cardero et al., 2021
Reactor semicontinuo	25	8.36	59.71	n.r.	Buller et al., 2021
Reactor anaerobio con deflectores (ABR⁺)	37	NA	73	0.40gHbu ^{***} /gDQO	Fuess et al., 2020
RLFI**	30	7	88	0.351	Houbron et al., 2016
UASB reactor⁺⁺	35	7	70	0.35	Lorenzo-Acosta et al., 2015
Reactor de flujo continuo en agitación	55	7-7.79	n.r.	0.14mLCH ₄ /gSV	Maciel-Pinto et al., 2018
UASB reactor⁺⁺	32 – 37	7.28-7.49	82.78	0.42 L/día	Madaleno et al., 2020
UAFF⁺⁺⁺	55	7.5-7.8	87	0.29	Perez et al., 2006
RALLFA^{****}	45, 55 y 65	7.69,7.91 y 6.08	31.9, 45.78, 17.08	9.66 L/día, 10.10 L/día, 1.99L/día	Rojas-Zamudio, 2018
RLFI**	30	7	62.7	n.r.	Sandoval-Rojas, 2016
RLFI** Batch (intermitente)	55	n.r.	88.29	0.238	Sandoval-Rojas, 2016
UASB reactor⁺⁺	55	7.1-7.8	50	0.018-0.149	Santana-Junior et al., 2019
Reactor discontinuo	35	7.4-7.72	80	0.284	Siles et al., 2011

n.r.: no reportado; *RCTA Reactor continuo de tanque agitado; CSTR: *Continuous Stirred Tank Reactor*; +ABR: *Anaerobic Baffled Reactor*; NA: No aparece; ***Hbu: Producción de ácido butírico (en este proceso no se produce CH₄); **RLFI: Reactor de Lecho Fluidificado Inverso; ++UASB: *Up-flow Anaerobic Sludge Blanket Reactor* (en español: ****RALLFA, reactor anaerobio de lecho de lodos de flujo ascendente); +++UAFF: *Upflow Anaerobic Fixed-Film reactor* (en español: RAPFFA, reactor anaerobio de película fija de flujo ascendente)

A pesar de la alta eliminación de DQO en aguas residuales de destilerías, estas siguen manteniendo los polifenoles que inhiben a los microorganismos y que son contabilizados como materia orgánica (medida como DQO). Por lo tanto, se requiere un tratamiento adicional para separarlos, como se mencionó arriba. Hay ya estudios a escala de laboratorio, empleando la adsorción sobre carbón activado, que logra reducir los contenidos de materia orgánica medida como DQO y DBO

(Contreras-Contreras et al., 2020), entre otros (Fuess et al., 2020; Madaleno et al., 2020).

3.3.2.2. Tratamiento aerobio

Los tratamientos biológicos son considerados como eficientes, rentables y que han mejorado para reducir la DQO y la DBO, el color o los compuestos fenólicos en las vinazas (Harirchi et al., 2020). Sin embargo, estos sistemas no pueden eliminar por completo todos los compuestos orgánicos y los inhibidores tóxicos como los fenoles que afectan la tasa de producción de biomasa. Por lo tanto, se considera necesaria la implementación de un sistema de tratamiento aerobio específico que sí pueda hacerlo (Harirchi et al., 2020; Salazar-Batres, 2017).

En un sistema en serie: Anaerobio-aerobio, el sistema anaerobio remueve alrededor de 65% en promedio de materia orgánica del agua residual y el resto de la materia orgánica biodegradable se termina de remover por el sistema aerobio (Salazar-Batres, 2017). El tratamiento aerobio de las vinazas se realiza utilizando géneros de hongos, algas o bacterias que pueden crecer en condiciones suaves. Sin embargo, una de las desventajas que tiene es la limitada capacidad de estos microorganismos para tolerar las duras condiciones industriales como las altas temperaturas (Harirchi et al., 2020; Salazar-Batres, 2017; Seckbach et al., 2013). Se tienen diversos tipos de tratamientos aerobios de los cuales, como se mencionó, pueden ser de ayuda como un tratamiento adjunto al tratamiento anaerobio de las vinazas. En la Tabla 3.9 se muestran varios ejemplos de cómo se implementa el tratamiento aerobio para la transformación de las vinazas.

3.3.3. Tratamientos fisicoquímicos

En los procesos fisicoquímicos se emplean operaciones unitarias utilizando la diferencia entre las propiedades de las partículas y el agua, aplicando principios de separación. En el tratamiento de aguas residuales como las vinazas es común

realizar un tratamiento fisicoquímico previo a su descarga a los cuerpos receptores (ríos, pantanos, mares, etc.) o a la red de alcantarillado, como tratamientos como coagulación-floculación, filtración con membranas, adsorción, incineración, electrocoagulación, electroflotación, sedimentación, evaporación, entre otros (Salazar-Batres, 2017).

Tabla 3.9. Eficiencias y características de los procesos de tratamientos aerobios de vinazas

Característica del tratamiento	Remoción de contaminante	Condiciones	Referencia
Tratamiento combinado anaerobio-aerobio en reactor de biodiscos	Remoción de 69.6% COT	-Remueve K, Ca, Mg -La vinaza obtenida es mejor para suelos que tratada solamente con un proceso anaerobio	Bautista-Zúñiga y Durán-de-Bazúa, 1998
Reactor aerobio	Remoción de 65%-70% de DQO	-pH de 8-8.4 y temperatura de 12 a 15°C	De Bazúa et al., 1991
CSTR bioreactor*	Remoción de 29.2% de DQO	-Proceso a 50°C -Usa <i>polyextremophilic A. pallidus</i> (microorganismo que puede sobrevivir a parámetros extremos)	Harirchi et al., 2020
Tren de tratamiento con bio-reactores aerobios de membranas (BRAM)	Remoción de 96.6% DQO	-Utilizando microfiltración/ultrafiltración se alcanza a remover 98.8% de DQO -Mediante la nanofiltración se remueve 100% de la carga orgánica -Escala laboratorio	Magalhães et al., 2012
Tratamiento combinado anaerobio (UASB**)–aerobio	80% de COT _R Remoción de color y fenoles de 95%	-Usa hongo <i>ligninolítico Pleurotus sp.</i> -Baja la DQO a 5g/L	Perez et al., 2006
Tren de tratamiento con biofiltración aerobia	76% de remoción DQO, 85% del N _{total} , 79% P _{total} y 92% de los SST	-Biofiltros de astilla de madera de mezquite (<i>Prosopis spp.</i>), utilizados para el tratamiento de vinazas tequileras	Salazar-Batres, 2017

*CSTR: *Continuous Stirred Tank Reactor*; Reactor continuo de tanque agitado; COT: Carbón orgánico total; DQO; Demanda química de oxígeno; UASB**: *Up-flow Anaerobic Sludge Blanket*; Reactor Anaerobio de Lecho de Lodos de Flujo Ascendente; BRAM: Bio-reactores aerobios de membranas; N_{total}: Nitrógeno total; P_{total}: Fósforo total; SST: Sólidos suspendidos totales; K: Potasio; Ca: Calcio; Mg: Magnesio

El uso de este tipo de tratamientos es que cuenta con flexibilidad para un diseño de planta a escala industrial. Además, los métodos son menos sensibles a las variaciones del caudal y la composición del influente. Sin embargo, presentan desventajas sobre otros tratamientos debido a los altos costos de operación y a la

dependencia de agentes químicos que deben ser usados en grandes cantidades cuando se realizan a escala industrial, lo que puede generar lodos, siendo otro contaminante adicional y en mayor cantidad (Carhuás-Pérez y Velásquez-Gutiérrez, 2018; Salazar-Batres, 2017).

3.3.3.1. Coagulación-Floculación

La coagulación es la desestabilización de partículas coloidales al neutralizar las fuerzas que las mantienen separadas mediante el uso de agentes coagulantes por adición y dispersión rápida de productos químicos (agentes coagulantes) que neutralizan la carga eléctrica de la materia coloidal. Se utiliza para eliminar sólidos en suspensión y material coloidal. Por otro lado, la floculación es la agrupación de las partículas coloidales desestabilizadas, formando agregados de mayor tamaño denominados “flóculos” (Becerra-Ospina, 2014; Fernández-Huaripata, 2021; Salazar-Batres, 2017).

Varios coagulantes como el sulfato de aluminio, $Al_2(SO_4)_3$, el cloruro férrico, $FeCl_3$, el sulfato ferroso, $FeSO_4$, el alumbre, el hierro y el aluminio, las sales de calcio, el cloruro de polialuminio, *PAC* (en inglés) son adecuados para el tratamiento de aguas residuales de destilerías como las vinazas, mientras que los coagulantes son específicos del pH y su eficacia depende del tipo, concentración y características de las aguas contaminadas a tratar (Tabla 3.10) (Becerra-Ospina, 2014; Chowdhary et al., 2018; Fernández-Huaripata, 2021). El factor determinante del proceso de coagulación es el pH, debido a que afecta a todo el equilibrio de la hidrólisis resultante de la adición del catión metálico. El pH ácido junto con el coagulante son los responsables de que el mecanismo predominante sea el de adsorción-neutralización de cargas (Carhuás-Pérez y Velásquez-Gutiérrez, 2018; Rodríguez-Arreola, 2019).

El uso de tratamientos de coagulación-floculación puede reducir el color, la turbidez y el contenido de materia orgánica medida como DQO de la vinaza; sin

embargo, este proceso por sí solo no es suficiente para lograr los estándares requeridos para la reutilización del agua de acuerdo con la normatividad, por lo que es necesario adicionar a este proceso un tratamiento adicional para complementar el tratamiento de las vinazas (Carhuás-Pérez y Velásquez-Gutiérrez, 2018; Fernández-Huaripata, 2021; Rodrigues et al., 2017).

Tabla 3.10. Eficiencias y características del tratamiento de vinazas mediante el proceso de coagulación floculación (C-F)

Características del proceso	Remoción de contaminante	Referencia
C-F con policloruro de aluminio (PACI) a pH de 6.7	56% DQO y 70% color	Becerra-Ospina, 2014
C-F con coagulante FeCl ₃ y regulando el pH con NaOH	36.5% DQO a pH6 y 52.2% DQO a pH 9	Carhuás-Pérez y Velásquez-Gutiérrez, 2018
C-F con coagulante ácido poli-g-glutámico (PGA) a pH de 2.5-3.5	70 % DQO y 34% Turbidez	Carvajal-Zarrabal et al., 2012
C-F con coagulante quitosana ²	84% DQO	Ferral-Pérez et al., 2016
C-F con coagulante FeCl ₃ a pH de 7	43.6% DQO	Guerreiro et al., 2016
C-F con poliacrilamida catiónica (PAM) como floculante a pH de 7 y NaOH	50.90% DQO	Iñiguez y Hernández, 2010
C-F con coagulante a base de taninos	40% DQO, 80% Color y 70% Turbidez	Padilha et al., 2013
C-F con coagulante FeCl ₃ a pH de 12.49	51% DQO	Prazeres et al., 2019
C-F con mezcla poliacrilamida (PAM)/ cloruro de polialuminio (PAC) con una turbidez de 7245 NTU	78% Turbidez	Rennola et al., 2007
C-F con coagulante FeCl ₃ , la vinaza es proveniente de un tratamiento biológico (12.55 mg/L DQO)	43.6% DQO	Rodrigues et al., 2017
C-F con coagulante Al ₂ (SO ₄) ₃ (14-18) H ₂ O	30% DQO y 70% color	Rodriguez-Arreola et al., 2020
C-F con coagulante FeCl ₃ a pH de 8.4	84% DQO	Zayas et al., 2007

3.3.3.2. Electrocoagulación

La electrocoagulación es un proceso que utiliza la electricidad para eliminar contaminantes en el agua, en donde se le introduce una corriente eléctrica a través de placas metálicas, comúnmente de hierro y aluminio, que proporciona

² La quitosana es una goma derivada de la desacetilación de la quitina, un componente muy abundante en la naturaleza ya que forma parte de los exoesqueletos de insectos y crustáceos. Algunos autores por desconocimiento de una regla establecida en la química de alimentos de adicionar el sufijo -ana a las gomas traducen *chitosan* del inglés como quitosano o incluso quitosán (nota de la asesora)

una fuerza electromotriz provocando las reacciones químicas que desestabilizan las formas en las que los contaminantes se encuentran suspendidos, disueltos o emulsificados, produciendo así agregados y partículas sólidas menos solubles. Son componentes hidrofóbicos que se precipitan y/o flotan y que pueden ser removidos fácilmente por un método de separación secundario (Arango-Ruiz, 2005; David et al., 2015; Díaz-de-los-Ríos y Lorenzo-Acosta, 2018).

Un reactor de electrocoagulación es una celda electroquímica que tiene la capacidad de remover una amplia gama de contaminantes como los sólidos suspendidos, metales pesados, colorantes, materia orgánica, gasas, aceites, iones, etc. (Arango-Ruiz, 2005; Syaichurrozi et al., 2020; Yagual-Romero, 2017).

Dentro de las ventajas del proceso de electrocoagulación presentado en la Tabla 3.11, se encuentran que es un tratamiento instantáneo que no requiere la adición de productos químicos, requiere obra civil en menor escala, es un sistema automático y posibilita el tratamiento de múltiples contaminantes dentro de la misma fábrica y los costos de la operación en comparación de otros métodos fisicoquímicos son menores (Dávila-Rincón et al., 2010; Díaz-de-los-Ríos y Lorenzo-Acosta, 2018; Yagual-Romero, 2017; Yavuz, 2007).

Tabla 3.11. Eficiencias y características del tratamiento de vinazas mediante el proceso de electrocoagulación

Características del proceso	Remoción de contaminante	Referencia
Electrodos de aluminio a 1cm de separación a pH cercano a 7	37% de sólidos totales	Dávila-Rincón et al., 2009
Electrodos de hierro galvanizado a 1cm de separación a pH de 4	61% DQO	Dávila-Rincón et al., 2011
Electrodos de aluminio a 0.5 cm de separación a pH de 7	84.21% DQO y 63.12% color	Jiménez-López, 2016
Electrodos de hierro a 2 cm de separación a pH de 8	70% DQO, 81% color y 99% coliformes totales	Linares-Hernández et al., 2008
Electrodos de hierro y aluminio a 2 cm de separación pH 6.2 para electrodo de Fe pH 6.4 para electrodo de Al	Para electrodo de Fe: 67.1% de COT; 52.22% NT Para electrodo de Al: 55.61% de COT; 42.97% NT	Montaño-Saavedra et al., 2019
Electrodos planos de Al a pH = 8.7	50.6% Sólidos totales	Ojeda-Armaignac et al., 2012
Electrodos de hierro a 5.5 cm de separación a pH de 6	13.93% DQO	Syaichurrozi et al., 2020
Electrodos de hierro y aluminio a 2 cm de separación a pH de 8	97.84% DQO y 98.47% de color	Yagual-Romero, 2017

3.3.3.3. Procesos de filtración y ósmosis inversa

Otra opción para el tratamiento de aguas residuales como las vinazas es el uso de sistemas de filtración (Tabla 3.12), donde se utilizan membranas para concentrar los sólidos suspendidos en una corriente llamada concentrado y para liberar el agua tratada en la corriente de permeado (Castro-Moreno, 2009; Gutiérrez et al., 2009). Procesos, como la microfiltración, la nanofiltración, la ósmosis inversa y los biorreactores con membrana son los que ofrecen diferentes eficiencias de remoción de las partículas contaminantes. Normalmente se usan como una operación intermedia para separar los solutos o como un paso final del tratamiento antes de descargar el agua (Hoarau et al., 2018; Magalhães et al., 2020; Murthy y Chaudhari, 2009; Queiroga et al., 2018; Serrano-Meza et al., 2017).

La microfiltración se ha utilizado para eliminar de manera eficaz los sólidos en suspensión de la vinaza. Es una alternativa para el proceso de evaporación ya que utiliza menos energía para operar y, además, el permeado de la microfiltración tiene una calidad fisicoquímica suficiente para ser utilizado como agua de reutilización (reúso). La ultrafiltración ha sido estudiada para la remoción de carga contaminante, los procesos de membrana de nanofiltración y de ósmosis inversa pueden retener macromoléculas, así como iones inorgánicos disueltos, generando agua de alta calidad.

El proceso de nanofiltración se usa generalmente para tratar el permeado de microfiltración hacia la recuperación de agua y la descarga de líquido (Hoarau et al., 2018; Lebron et al., 2020; Magalhães et al., 2020; Murthy y Chaudhari, 2009; Rennola et al., 2007). La microfiltración se realiza generalmente con membranas porosas simétricas para la separación de coloides, pigmentos, hongos y algunas bacterias. El diámetro de corte oscila entre 0.1 μm y 10 μm (Becerra-Ospina, 2014; Lebron et al., 2020). La ultrafiltración utiliza membranas microporosas, generalmente anisotrópicas, para separar macromoléculas y partículas (Becerra-Ospina, 2014; Magalhães et al., 2020).

Tabla 3.12. Eficiencias y características del tratamiento de vinazas mediante procesos de filtración y ósmosis inversa

Características del proceso	Remoción de contaminantes	Referencia
Ultrafiltración con membrana de poliétersulfona (PES), DQO₀=46.29 g/L	35% DQO 76% Color	Becerra-Ospina, 2014
Biofiltro anaerobio con una DQO₀ = 65 g/L	80%-90% DQO	Belalcazar-de-Galvis, 1991
Ultrafiltración/nanofiltración Membrana comercial de fibra hueca con una composición polimérica a base de fluoruro de polivinilideno con una DQO₀ = 30.04 g/L	87% DQO	Da Silva et al., 2020
Filtración Uso de papel filtro microporoso de 20µm envuelto con una estructura de pantalla metálica, cubierto con gel textil no tejido. DQO₀ = 13.25 g/L	25.07% DQO	De Castro-Marcato et al., 2019
Módulo monotubular de microfiltración-ultrafiltración-nanofiltración de acero inoxidable Membranas de nanofiltración y microfiltración de polietersulfona y membrana de ultrafiltración de TiO₂/ZrO₂ con una DQO₀ = 70.71 g/L	91.8% DQO 85.1% Fenoles totales 85.8% Carbón total	Díaz-Reinoso et al., 2017
Ultrafiltración: Membranas compuestas con material de soporte: Alúmina con capa activa filtrante de óxido de zirconio, DQO₀ de 27.88 g/L	70% DQO 58% Sólidos totales 82% Color	Gutiérrez et al., 2009
Ósmosis inversa, nanofiltración, membranas compuestas de película delgada (TFC) de poliamida, DQO₀ = 100 g/L	Ósmosis inversa: DQO 98.96% Nanofiltración: DQO 99.9%	Kotrappanavar-Nataraj et al., 2006
Microfiltración en un módulo comercial de membrana sumergida (Membranas a base de polieterimida, nanofiltración en membrana NF90 (Dow Filmtec) compuesto de película fina de poliamida, DQO₀ = 29.51 g/L	Microfiltración: 62.1% DQO 26.8% Color Nanofiltración: 99.4% DQO y 99.9% Color	Lebron et al., 2020
Ultrafiltración con membrana ZeeWeed 500D (GE) sumergida (membrana de fibra hueca de fluoruro de polivinilideno (PVDF), ósmosis inversa con membrana de poliamida, nanofiltración con membrana de poliamida, DQO₀ = 29.51 g/L	Ultrafiltración: 43% DQO Ósmosis inversa: 98.7% DQO Nanofiltración: 95.1% DQO	Magalhães et al., 2020
Ósmosis inversa, ultrafiltración Sistema de membranas con 3 capas: Capa de TFC-PA de 5 - 20 µm de espesor Capa de polisulfona de alrededor de 50 µm de espesor y capa de poliéster con un grosor de alrededor de 200 µm con una DQO₀ = 125.5 g/L	Ósmosis inversa: 96.8% de DQO, 97.9% de SDT, 94.75% de Color y 98.27% Sólidos suspendidos Ultrafiltración: 26.7% de DQO y 95.5% SST	Murthy y Chaudhari, 2009
Filtración con membranas tubulares asimétricas de alúmina con DQO₀ = 13.34 g/L	31% DQO 89% Color	Queiroga et al., 2018
Filtración con membrana de ultrafiltración hidrófila de alúmina-alfa de 0.005 µm, con una DQO₀ = 61.174 g/L y Turbidez₀ = 7245 NTU	94% Turbidez	Rennola et al., 2007
Biofiltro anaerobio sumergido, empaquetado con tezontle con DQO₀ = 44.3 g/L	79% DQO	Serrano-Meza et al., 2017

Las membranas de nanofiltración tienen tamaños de poro típicamente de 1 nm lo que otorga un límite de masa molecular de 300 a 500 Da y las membranas de ósmosis inversa son membranas densas no porosas y pueden separar solutos de baja masa molecular, así como iones inorgánicos monovalentes (Magalhães et al., 2020; Lebron et al., 2020).

Una de las desventajas en el tratamiento de aguas es el ensuciamiento de la membrana cuando se remueve materia orgánica. La saturación progresiva de los sitios de adsorción del material de la membrana conduce a constricción o bloqueo de los poros formando una capa gelatinosa y, con ella, una disminución de la efectividad de las membranas (Dong et al., 2012; Gutiérrez et al., 2009; Rennola et al., 2007).

Una última desventaja es la disposición controlada de las membranas y de los sólidos separados que no es mencionada por los autores de esta sección.

3.3.3.4. Evaporación

Entre los métodos de tratamiento de aguas contaminantes más estudiados y empleados a nivel internacional está la evaporación y se ha empleado como método para disminuir el volumen de vinaza y, a su vez, el gasto correspondiente a su transporte (Camaçari-de-Carvalho y da-Silva, 2011). El uso de evaporación involucra el uso de varios equipos en la fábrica, es decir, aumenta el capital invertido, así como eleva los costos de operación de los evaporadores debido al consumo energético utilizado para el proceso global de producción de bioetanol. Por ello, se han buscado diversas alternativas para dar un tratamiento a las vinazas. Otras de las desventajas que posee este proceso es de tener largos períodos de producción, requiriendo una gran cantidad de vapor. Los evaporadores son unidades operativas que consumen una cantidad considerable de energía en las plantas industriales, además de que no se aprovecha toda la

vinaza generada (Castañeda-Paredes, 2011; Castro-Moreno, 2009; Chanfón-Curbelo y Lorenzo-Acosta, 2014; Pina et al., 2017).

De acuerdo con un estudio de Peiter et al. (2019) la eficiencia exergética de un evaporador multiefecto es del 32%, y la exergía térmica de entrada representa el 68% de la corriente de energía de bajo grado. Por otro lado, el vapor que sale del sistema es una fuente importante de calor que se puede reciclar para la planta. En el mismo estudio se muestra que la ósmosis inversa y la biodigestión ofrecen una eficiencia exergética mayor (hasta 62%); sin embargo, en términos económicos los evaporadores resultaron ser más factibles.

3.3.3.5. Incineración y concentración

Mediante el proceso de concentración e incineración de las vinazas se realiza el aprovechamiento integral del residuo y tiene como ventajas la obtención de cenizas potásicas comercializable como fertilizante, la generación de energía y la reducción de los residuos, facilitando así su distribución y transporte debido al poco volumen del material (Estrada-Alonso et al., 2016; Muñoz, 2015).

Los incineradores tienen la ventaja de eliminar en alto nivel la DBO y son excelentes recuperadores de energía para la planta, ya que las vinazas concentradas pueden utilizarse como combustible en la caldera generando vapor y así produciendo electricidad que aprovecha la planta y reduciendo la demanda de agua de manera significativa al aprovechar el condensado del proceso (Castañeda-Paredes, 2011; Cortes-Rodríguez et al., 2018; De-Souza-Oliveira-Filho et al., 2021).

Palacios-Bereche et al. (2020) elaboraron un estudio comparativo del proceso de concentración-incineración y el proceso con biodigestores. Concluyen que con el proceso de concentración-incineración se alcanza la eliminación completa del contaminante y la reducción significativa del volumen de vinaza, bajando así el

costo de transporte para la disposición y mejorando la disponibilidad de agua recuperada. Además, presenta una mejor viabilidad económica, se puede estabilizar la materia orgánica, hay producción de biogás y producción de un mayor excedente de bagazo, favoreciendo la producción de biocombustible.

En otro estudio realizado por Navarro et al. (2000) reportan que la vinaza puede ser concentrada y recirculada en el proceso de producción de bioetanol. Estos autores indican que el reciclaje del 60% de la vinaza generada es técnicamente factible y puede mejorar el proceso de producción de etanol sin efectos inhibidores; Los glúcidos fermentables y los nutrientes todavía presentes en la vinaza se pueden utilizar en fermentaciones posteriores para producir más etanol. En adición a lo anterior, estos autores indican la posible biodegradación de glicerol como subproducto que, al aumentar su contenido, pueda ser de interés para su explotación industrial.

Por otra parte, otros estudios han reportado la eficiencia exergética del proceso, Palacios-Bereche et al. (2020) reportan una eficiencia de 25.7%, en el proceso de cogeneración, mientras que Nakashima y de Oliveira-Junior (2020) reportan eficiencias de 12 a 20% y la concentración de las vinazas pueden estar entre 26% y hasta 48%.

Noa-Bolaño et al. (2020), reportan que la energía que se puede obtener con el uso de la concentración-incineración es alrededor de 2.5 veces más que la generada con los biodigestores, debido al alto poder calorífico que tienen las vinazas (Cortes-Rodríguez et al., 2018; Fukushima et al., 2019; Muñoz, 2015; Nakashima y de Oliveira-Junior, 2020).

3.3.4. Procesos de oxidación avanzada

Los procesos de oxidación avanzada (POA) son una alternativa tecnológicamente viable para el tratamiento de aguas residuales industriales (Tabla 3.13).

Tabla 3.13. Eficiencias y características del tratamiento de vinazas mediante procesos de oxidación avanzada

Característica del proceso	Remoción de contaminante	Referencia
FotoFenton H₂O₂/Fe²⁺ /UV	90% COT	Bauer et al., 1999
Fotocatálisis TiO₂ y UV y 80 min de reacción	83% COT	
Ozonación heterogénea catalítica y UV, la concentración de ozono 30,0 mg L con 40 min de reacción y una DQO₀=37 g/L	50% COD 92% color	Ferral-Pérez et al., 2016
Oxidación en reactor <i>batch</i> a 450°C Peróxido de hidrógeno (H₂O₂) como donante de oxígeno, 3.5 minutos de reacción	97.2 % COT	Goyes y Bolaños, 2005
Oxidación de Fenton con cloruro férrico y H₂O₂, reactor discontinuo con 3 h de reacción Proceso después de biotratamiento, DQO₀ = 6.84 g/L	63.2% DQO 53.2% COT	Guerreiro et al., 2016
Fotocatálisis heterogénea con TiO₂, 30 min de reacción. FotoFenton con UV y iones ferrosos Fe/ H₂O₂, 2 h de reacción DQO₀ = 160 g/L	Fotocatálisis heterogénea: DQO 60% y COT 54% Fotofenton: DQO 95% y COT 98%	Hincapié-Mejía et al., 2011
Ozonización catalítica Ozonización catalítica en presencia de Fe³⁺ 20 minutos de reacción	Respectivamente 18% DQO 55% DQO 66% DQO	Kasprzyk-Hordern et al., 2003
Ozonización catalítica con metal sobre zirconia-alúmina como soporte y 20 minutos de reacción	Respectivamente 88.2% COT 83.5% TOC	Legube, y Vel-Leitner, 1999
Ozonación con 3 h de reacción y DQO₀ = 49.2-56.0 g/L	35% DQO y 75% Color	Medina, 2019
Fotocatálisis con ZnO soportado en zeolita NaA y UV y 48h de reacción	50% DQO	Padilha et al., 2013
Fotocatálisis heterogénea con dióxido de titanio TiO₂, con 60 min de reacción y una DQO₀ = 23 g/L	59% DQO, 62% Fenoles y 40% color	Poblete et al., 2020
Oxidación foto-Fenton, con luz UV y H₂O₂ Reactor discontinuo cilíndrico con 3 h de reacción y una DQO₀=12.55 g/L	83.7% DQO 90.4% COT	Rodrigues et al., 2017
Fotocatálisis heterogénea con óxido de titanio (TiO) y luz UV Reactor tipo <i>batch</i> con 3 h de reacción	70% DQO, 99.4% SST y 86% Color	Rodríguez-Arreola, 2019
Fotocatálisis heterogénea con catalizadores basados en TiO₂ y nanopartículas de Au₅₀Cu₅₀	Producción de 0.77 mL/min de H ₂	Simón-Vicente, 2016
Oxidación electroquímica (EO), con electrólisis potencioestática con un ánodo de Ti/RuPb (40%) Ox y un cátodo de Ti/PtPd (10%) Ox 40 minutos de reacción con un proceso después de biotratamiento y coagulación-floculación, DQO₀ = 1.35 g/L	97.11% DQO 86.95% color 100% polifenoles	Zayas et al., 2007

Estos procesos actúan formando radicales hidroxilos ($\text{OH}\bullet$), que son altamente oxidantes y que contribuyen a la mineralización total de los compuestos contaminantes presentes en los efluentes. Son procesos fisicoquímicos capaces de producir cambios en la estructura química de los contaminantes (Garcés-Giraldo et al., 2004; Hincapié-Mejía et al., 2011; Rodríguez-Arreola, 2019; Terán-Solíz, 2016).

Los POA son utilizados para la degradación de contaminantes y detoxificación de aguas residuales que contienen compuestos recalcitrantes. Algunos POA son la fotocatalisis heterogénea, fotoFenton, la ozonólisis y otras técnicas avanzadas. Estos comúnmente recurren a reductores químicos, como iones metálicos o halógenos, que permiten realizar transformaciones en contaminantes tóxicos poco susceptibles a la oxidación. Además, también se apoyan de catalizadores como el TiO_2 usado por su alta eficiencia fotocatalítica, bajo costo, baja toxicidad y capacidad para degradar diversos contaminantes orgánicos como aromáticos (Garcés-Giraldo et al., 2004; Hincapié-Mejía et al., 2011; Rodríguez-Arreola, 2019; Terán-Solíz, 2016).

En la fotocatalisis heterogénea se generan radicales hidroxilos que promueven reacciones de oxido-reducción que suceden en la superficie de un fotocatalizador debido a la acción de la luz UV (Hincapié-Mejía et al., 2011; Wang y Chen, 2020; Zayas et al., 2007). La reacción de Fenton es un POA en el que la carga contaminante se trata con una combinación de peróxido de hidrógeno y sulfato ferroso (reactivo de Fenton) a presión atmosférica y a una temperatura de entre 20 y 40°C, y se utilizan para reducir la DQO, reduciendo la toxicidad, aumentando su biodegradabilidad, etc. (Hincapié-Mejía et al., 2011; Terán-Solíz, 2016).

La ozonización es otra opción atractiva para el tratamiento de vinazas porque el gas ozono puede descomponerse rápidamente para formar diferentes radicales libres que reaccionan con compuestos orgánicos disueltos en agua como

colorantes, compuestos fenólicos, plaguicidas, organoclorados y compuestos de amonio. Una de las desventajas de estos procesos es su elevado costo por el uso de reactivos y/o el elevado consumo energético (Ferral-Pérez et al., 2016; Wang y Chen, 2020).

3.3.5. Separación por adsorción de los polifenoles una vez que las vinazas han sido tratadas anaerobiamente usando carbón activado

Como ya se mencionó en el inciso 3.3.1 los polifenoles son considerados compuestos valiosos a los que se les pueden dar otros usos como ayudar a recuperar la salud atacando de manera selectiva a bacterias, hongos y virus (Contreras-Contreras, 2019; Gaspar-Mendoza, 2022; Leyra-Tobilla, 2016; Mhatre et al., 2020). Además, pueden ser aprovechados para su inclusión en cosméticos de antienvjecimiento debido a su propiedad antioxidante, captando radicales libres (Leyra-Tobilla, 2016; Soto-Álvarez, 2015). Es por ello por lo que se requiere plantear un proceso para extraer íntegramente los polifenoles presentes en la vinaza para darles un reaprovechamiento adecuado en vez de tratar de deshacerse de ellos. A continuación, se presenta un extracto del artículo publicado en 2020 por Contreras-Contreras y colaboradores producto de su tesis de maestría en Ciencias Químicas de 2019.

“Los resultados de la caracterización de las muestras de vinaza se presentan en la Tabla 3.14. La vinaza que proviene directamente del ingenio azucarero se denomina vinaza de caña de azúcar o SV. La vinaza diluida al 50% alimentada a los reactores a 45 y 55°C se abrevia DV. El 25% de vinaza diluida alimentada al reactor a 65°C se abrevia como DV65. Los efluentes de los tres reactores aparecen con la letra R a continuación de la temperatura”.

“Comparando los resultados antes y después del tratamiento en los reactores UASB a escala de laboratorio, se observa que existe una remoción de la materia orgánica e inorgánica susceptible de oxidación, medida como demanda química de oxígeno (DQO). Hay una remoción promedio de DQO de 58, 54 y 49% en los

reactores que operan a 45, 55 y 65°C, respectivamente. Estos resultados son satisfactorios; sin embargo, se ha demostrado que los reactores UASB pueden eliminar más del 70 % de la DQO en condiciones apropiadas variando la carga de alimentación orgánica y el tiempo de residencia hidráulica como lo indica Utami et al. (2016). Esto es muy importante porque la cantidad de DQO eliminada es directamente proporcional a la producción de metano”.

Tabla 3.14. Caracterización de corrientes de vinaza: Proveniente del ingenio azucarero-alcoholero cooperante (VC), diluida al 50% (VD), diluida al 25% (VD65) y para efluentes de reactores a 45, 55 y 65°C (Tomada de Contreras-Contreras, 2019)

Parámetro	VC	VD	VD65	45°C-R	55°C-R	65°C-R
Temperatura (°C)	17.02 ± 3.19	18.47 ± 3.17	19.473 ± 2.63	45.23 ± 0.81	53.77 ± 1.18	64.031 ± 1.27
pH	4.73 ± 0.157	4.79 ± 0.133	4.837 ± 0.151	7.721 ± 0.181	7.802 ± 0.154	7.529 ± 0.430
Conductividad eléctrica (mS/cm)	20.21 ± 0.24	11.24 ± 0.33	6.689 ± 0.61	11.537 ± 0.43	11.457 ± 0.37	7.4513 ± 0.59
Alcalinidad (mg CaCO₃/L)	1830 ± 390	1012.9 ± 212	747.4 ± 202	5189.8 ± 522	4918.9 ± 345	2848.8 ± 197
Factor de alcalinidad	–	–	–	0.3103 ± 0.043	0.306 ± 0.054	0.516 ± 0.094
DQO (mg/L)	66,791 ± 8256	33,363 ± 6208	17,579 ± 5522	13,895 ± 2658	15,177 ± 3978	8846 ± 2728
DBO₅ (mg/L)	6870 ± 862	6180 ± 675	4818 ± 590	4908 ± 342	3664 ± 539	4238 ± 418
Sulfatos (mg/L)	10,876 ± 532	4881 ± 370	2576 ± 246	3738 ± 202	3689 ± 170	2095 ± 124
Sulfuros (mg/L)	210 ± 80	171 ± 92.8	91.92 ± 31.9	248.8 ± 83.5	254.7 ± 85.6	145.4 ± 67
Fosforo total (mg/L)	192 ± 44.6	120.52 ± 40.8	80.68 ± 34.0	114.46 ± 38.8	108.16 ± 37.9	74.38 ± 27.4
Ortofosfatos (mg/L)	53.94 ± 4.0	24.36 ± 8.3	19.74 ± 6.0	21.454 ± 7.4	19.74 ± 4.5	15.97 ± 6.4
Biogás (mL/h)	–	–	–	214.23 ± 32.4	192.86 ± 30.9	79.75 ± 11.6
Sólidos totales (mg/L)	32,069 ± 4707	29,398 ± 6114	21,361 ± 4274	20,419 ± 2199	20,958 ± 4190	13,458 ± 1367
Sólidos volátiles totales (mg/L)	26,438 ± 6546	10,508 ± 1257	6202 ± 1180	10,252 ± 623	10,286 ± 1038	6100 ± 1114
Sólidos suspendidos totales (mg/L)	5642 ± 2773	2083 ± 633	1267 ± 819	4813 ± 1427	4438 ± 960	2100 ± 813
Sólidos suspendidos volátiles (mg/L)	1517 ± 379	705.6 ± 67	583 ± 268	1875 ± 652	1388 ± 440	887 ± 491

“De igual manera, se presenta una disminución en el contenido de sólidos totales y sólidos totales volátiles, debido a que estos parámetros representan los componentes que pueden ser considerados como fuente de nutrientes para los microorganismos presentes en los reactores. Sin embargo, en el caso de los sólidos suspendidos totales y los sólidos suspendidos volátiles, existe un aumento, posiblemente debido a la biomasa que generan los microorganismos y la precipitación de elementos inorgánicos presentes en las vinazas como sulfuros (Rincón-Acelas, 2008)” (Tomado de Contreras-Contreras, 2019).

“También hay una eliminación de sulfatos porque estos son utilizados por las bacterias sulfatorreductoras en sus procesos metabólicos. Por ello, la concentración de sulfuros es mayor con respecto de las vinazas alimentadas. En cuanto a los valores de fósforo total y ortofosfatos, no existen diferencias significativas respecto a los afluentes. La alcalinidad, así como el pH, son mayores en los efluentes en comparación con las corrientes de entrada, debido a que durante la transformación anaerobia se producen iones bicarbonato, provocando este incremento. Aunque normalmente en los reactores anaerobios no se evalúa la demanda bioquímica de oxígeno a los cinco días (DBO_5) ya que allí no se dispone de oxígeno, en ocasiones es conveniente conocer su valor ya que representa la materia biodegradable disuelta en el agua que se está tratando. En este caso, la salida es menor que la entrada porque la concentración de materia orgánica biodegradable es transformada por los consorcios presentes en los reactores en nueva biomasa y biogás”.

“Las concentraciones de polifenoles presentes en las muestras de vinaza de los influentes y efluentes de los diferentes reactores en comparación con SV se muestran en la Tabla 3.16. Los resultados se reportan en miligramos de ácido gálico equivalente por litro (mg EAG/L)”.

“La hipótesis inicial fue que no existe diferencia entre la concentración de polifenoles que entran y salen del tratamiento bioquímico. Para corroborar esta

hipótesis se realizó un análisis de varianza (p -valor > 0.05). Los resultados (Fig. 3.5) mostraron que, efectivamente, el tratamiento bioquímico en los reactores UASB no redujo significativamente el contenido de polifenoles en las vinazas después del tratamiento ($p < 0.05$)”.

Tabla 3.16. Cuantificación de polifenoles en muestras de vinaza en mg de ácido gálico equivalente, EAG, por litro (Tomada de Contreras-Contreras, 2019)

Muestra	Promedio	Intervalo de confianza al 95%	Desviación estándar
VC, mg eq. AG/L	8600	1018	820
VD, mg eq. AG/L	3622	397	320
R45°C, mg eq. AG/L	3689	395	318
R55°C, mg eq. AG/L	3222.2	244.4	196.4
VD65, mg eq. AG/L	2400	494	398
R65°C, mg eq. AG/L	2266.7	203.5	163.9

Grouping Information Using the Games-Howell Method and 95% Confidence

Factor	N	Grouping
VC	11	A
R45°C	11	B
VD	11	B
R55°C	11	B
VD65	11	C
R65°C	11	C

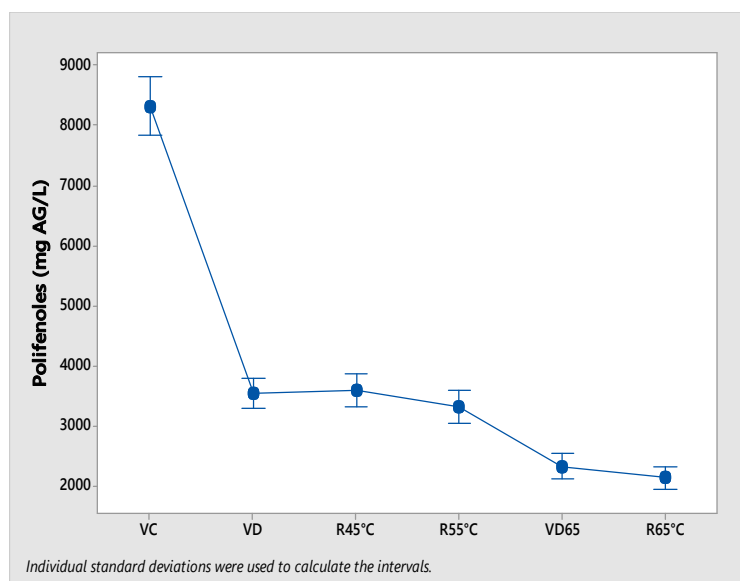


Fig. 3.5. Análisis de varianza para polifenoles en muestras de vinaza (SV, vinazas de la industria de la caña de azúcar y el etanol; DV, vinazas diluidas en agua del grifo 50:50 del influente del reactor; 45°C, efluente del reactor operando a 45°C; 55°C, efluente del reactor operando a 55°C, DV65, efluente del reactor operando a 55°C, DV65, efluente del reactor operando a 65°C, GA, mg eq de ácido gálico/L) (Tomado de Contreras-Contreras, 2019)

“Por tanto, los consorcios de microorganismos presentes en los reactores no pueden utilizar polifenoles como sustratos carbonosos para producir metano y dióxido de carbono. Este comportamiento se debe a las altas concentraciones de polifenoles en las vinazas en tratamiento. Parsaee et al. (2019) mencionaron que la concentración de polifenoles en la vinaza de caña de azúcar se encuentra en un rango de 8000-10000 mg EAG/L. Suhaili et al. (2019) analizaron diferentes muestras de vinazas de remolacha azucarera de una biorrefinería del Reino Unido y presentaron concentraciones de polifenoles de 6000-7000 mg EAG/L. Las concentraciones de polifenoles en el SV son muy similares a las reportadas por estos dos grupos de investigadores”.

“Cuando los contenidos de polifenoles totales son bajos, los consorcios biológicos pueden metabolizar estos compuestos fenólicos y producir metano y dióxido de carbono como productos finales (Knoll y Winter, 1987). Sin embargo, la solución de diluir vinazas no es ni ecológica, ni tecnológica, ni económicamente factible (López-López et al., 2015)”.

“Un artículo reciente menciona el posible uso de polifenoles y catequinas del té para manejar hidrocarburos o carbón para recuperar metano de ellos (Sun et al., 2019). Ese podría ser un enfoque diferente al posible uso de vinazas para aumentar su valor potencial. Este hallazgo podría ser una interesante línea de investigación futura considerando que algunas zonas de México poseen depósitos de metano (gas natural) a bajas temperaturas en la parte norte del país”.

Todos los textos tomados de la tesis de maestría y el artículo publicado refuerzan la posibilidad de recuperar los polifenoles después de haber convertido los compuestos carbonosos que sí fueron metabolizados por las arqueas metanogénicas y obtener dos productos valiosos de las vinazas, el metano y los polifenoles.

3.3.6. Adsorción de polifenoles en carbón activado

El enfoque seguido en esa misma investigación de Contreras-Contreras y colaboradores (2020), derivada de su tesis de maestría fue identificar el mecanismo de adsorción de los compuestos fenólicos que quedaron en las vinazas tratadas anaerobiamente sobre carbón activado determinando los parámetros de sus isothermas. Los autores probaron tres modelos de adsorción recopilando y comparando datos experimentales para obtener las isothermas correspondientes. Los resultados se muestran en la Tabla 3.17 y la Fig. 3.6.

Tabla 3.17. Ajuste de los modelos de isoterma para los datos experimentales obtenidos (Tomada de Contreras-Contreras, 2019)

Ecuación de regresión	Ecuación de la isoterma	Constantes	R ²
$\frac{1}{q} \times 20.472 \frac{1}{C} \Gamma 0.0007$	$q \times \frac{1428.57}{29245.71} \frac{C}{\Gamma C}$	$q_o \times 1428.57 \frac{\text{mg ácido gálico}}{\text{g carbón activado}}$ $K \times 29245.71 \frac{\text{g carbón activado}}{\text{L}}$	0.991
$\ln q \times 0.878 \ln C \Gamma 2.2585$	$q \times 0.1045 \left C^{0.878} \right.$	$n \times 0.878$ $K_f \times 0.1045$	0.973
$\ln q \times 7 \left 10^8 v^2 \Gamma 4.0642 \right.$	$q \times 58.21 e^{\frac{7 \left 10^8 RT \ln \frac{1}{C} \right.}{2}}$	$B \times 7 \left 10^8 \frac{\text{mg}^2 \text{ ácido gálico}}{\text{J}^2} \right.$ $q_m \times 58.21 \frac{\text{mg ácido gálico}}{\text{g carbón activado}}$	0.817

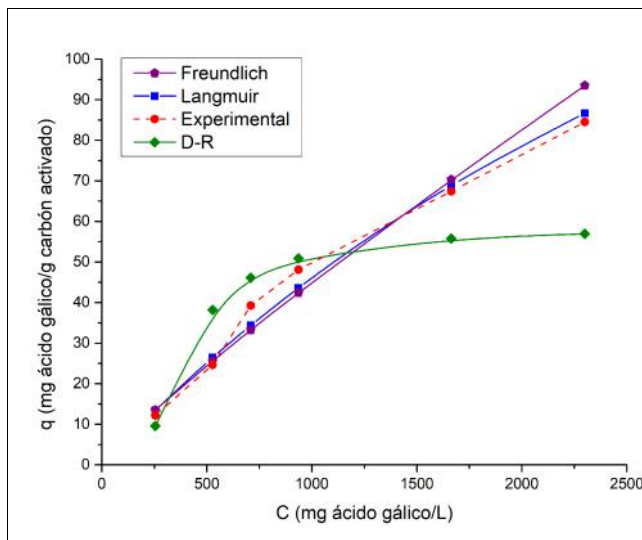


Fig. 3.6. Isothermas experimentales e isothermas considerando los modelos de Langmuir, Freundlich y Dubinin-Radushkevich (C es la concentración de equilibrio, mg/L; q es la eficiencia de adsorción, mg/g) (Tomado de Contreras-Contreras, 2019)

“El modelo que proporciona el mejor ajuste de los datos experimentales es el modelo de Langmuir. Tiene un coeficiente de correlación de 0.991, seguido del modelo de Freundlich y, por último, del modelo de Dubinin-Radushkevich. Esto quiere decir que las suposiciones hechas por Langmuir y de las que deriva su modelo son las que mejor se adaptan a las condiciones experimentales. Este modelo se ajusta a muchos materiales adsorbentes cuando se adsorben polifenoles. Por ejemplo, Liang et al. (2019) analizaron la adsorción de polifenoles del jugo de caña de azúcar utilizando micropartículas compuestas de quitosana magnética y Liu et al. (2019) investigaron la adsorción de compuestos fenólicos en las paredes celulares de variedades de manzana. En ambos casos, la isoterma que mejor se adaptó a los resultados experimentales fue la de Langmuir. Por esta razón, la adsorción de polifenoles probablemente forma una monocapa debido a las interacciones entre las moléculas”.

“Según Marsal et al. (2012), la constante termodinámica de equilibrio puede ser reemplazada por la adsorción constante de Langmuir. De esta forma, la energía libre de Gibbs para el sistema estudiado es $G = -25,06$ kJ/mol. Este valor es similar al informado por Marsal et al. (2012), donde se analizó la adsorción de polifenoles sobre virutas de tenería, y la energía de Gibbs libre para el sistema fue de $-20,86$ kJ/mol. Con estos resultados se puede decir que el proceso de adsorción estudiado es termodinámicamente favorable y espontáneo”.

“Con el balance de masa en el sistema de adsorción y utilizando el modelo de isoterma de Langmuir obtenido a partir de los datos experimentales, fue posible construir un diagrama para conocer el número de etapas necesarias para eliminar el 99.9% de polifenoles totales presentes en las vinazas dependiendo de la cantidad. de carbón activado añadido (Fig. 3.7).

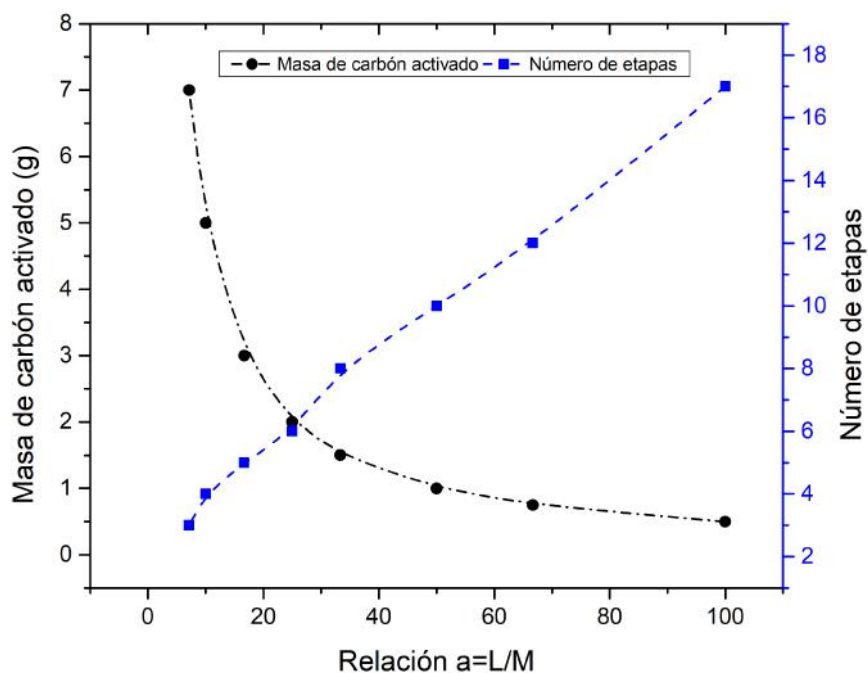


Fig. 3.7. Relación entre el número de etapas y la masa de carbón activado, CA, añadida al proceso de adsorción en función de la relación: Masa de la solución inicial (L) y masa de carbón activado (M) (Tomado de Contreras-Contreras, 2019)

“Experimentalmente, se redujo en promedio un 45.5% de los polifenoles totales presentes en las muestras de vinaza tratada, agregando 1 g de carbón activado por cada 50 mL de muestra de vinaza, y utilizando una sola etapa del proceso. Al aumentar la cantidad de carbón activado a 5 g, en promedio se redujo el 70.2% de los polifenoles totales. Según la Fig. 3.7, teóricamente, es necesario utilizar 10 etapas consecutivas con 1g de CA para eliminar el 99.9% de los polifenoles, mientras que para 5 g serían necesarias 4 etapas consecutivas”.

“Estos resultados son consistentes con la investigación presentada por Suhaili et al. (2019). Estos autores concluyeron que la cantidad de polifenoles removidos por adsorción con carbón activado es proporcional a la cantidad de adsorbente agregado. Yangui y Abderrabba (2018) estudiaron la adsorción de polifenoles sobre carbón activado recubierto con proteínas de leche. Esta técnica mejoró la adsorción y alcanzó valores de remoción superiores al 80%. Sin embargo, en este

caso fue necesario dopar el carbón activado, y esto representa un costo a considerar. Recientemente, métodos alternativos para eliminar polifenoles como el presentado por Fernandes et al. (2019), donde los autores pudieron lograr remociones de polifenoles de hasta el 100% utilizando cultivos discontinuos de biomasa fúngica (*Phlebia rufa*) para tratar vinazas. Sin embargo, la biomasa fúngica debe cultivarse en condiciones asépticas utilizando sustratos costosos (Sankaran et al., 2010). Además, los hongos pueden transformar los polifenoles en metabolitos secundarios tóxicos para los humanos, lo que dificulta la disposición adecuada de las vinazas o su reutilización (Hussein y Brasel, 2001).

De lo contrario, al absorber los polifenoles sobre carbón activado, se pueden recuperar mediante extracciones con solventes no tóxicos como el etanol y darles un valor agregado. En la investigación reportada por Yangui y Abderrabba (2018), se ha demostrado que el hidroxitirosol, un polifenol presente en las aguas residuales de las almazaras, se puede extraer del carbón activado con una alta eficiencia de recuperación del 90.6%”.

“Los polifenoles son uno de los compuestos alimentarios bioactivos más investigados por su amplia distribución en la naturaleza y por su versatilidad como agentes que pueden mejorar la salud humana. De esta forma, en 2015 la producción de polifenoles extraídos industrialmente se estimó en 16,380 toneladas y se prevé que a finales de 2024 la producción aumente a 33,880 toneladas con un valor monetario de 1,330 millones de dólares (Adebooye et al., 2018). Por lo tanto, el proceso de eliminación de polifenoles con AC sería útil a nivel industrial cuando el uso de etapas sucesivas alcanzaría mayores porcentajes de adsorción, optimizando el proceso y obteniendo una relación costo-beneficio que permita su aplicabilidad”.

“El proceso de adsorción consiste en extraer material de una fase concentrándola en la superficie de otra fase que generalmente es sólida como el carbón activado o resinas polimérica, por ello es considerado como un fenómeno subsuperficial. El

proceso esta conformado por el adsorbato que es la sustancia que se concentra en la superficie y por el adsorbente que es la fase sólida que lo retiene. El uso de carbón activado de bagazo de caña para adsorber los polifenoles ayuda a reaprovechar este residuo celulósico para obtener un producto de valor agregado (Soto-Álvarez, 2015)".

"Un estudio realizado por Ziaty et al. (2017) muestra que mediante el uso de carbón activado se pueden extraer de aguas residuales de almazara (procesamiento de aceitunas para obtener aceite de oliva) hasta un 91% de polifenoles en medio ácido y a temperatura ambiente, cabe mencionar que la concentración inicial de estos compuestos era de 5614 mg/L, y una DQO de 7417 mgO₂/L (Ziaty et al., 2017)" (tomado de Gaspar-Mendoza (2022)). La tesis de Gaspar-Mendoza (2022) está evaluando teóricamente la desorción de los polifenoles para que mantengan su actividad antioxidante y antimicrobiana.

3.3.7. Tratamientos combinados

Se han propuesto varios tratamientos de aguas residuales para contender con la concentración de sólidos de las vinazas. Estos ya fueron descritos en los apartados anteriores: los tratamientos fisicoquímicos, la degradación biológica y los procesos avanzados de oxidación son tratamientos adecuados para la remoción de contaminantes. También la digestión ha mostrado grandes porcentajes de eliminación de la carga de materia orgánica (Tabla 3.18).

Algunos de los autores indicaron que no se pueden eliminar totalmente ciertos contaminantes o que los porcentajes de remoción no son considerados tan altos (Ferral-Pérez et al., 2016; Vilar et al., 2018). Por ello se han estudiado procesos combinados, donde alguno de ellos funge como un pre- o post-tratamiento para poder alcanzar porcentajes de remoción más altos de los alcanzados individualmente y así tener una mejor recuperación de los componentes de la vinaza (Carvajal-Zarrabal et al., 2012; Poblete et al., 2020; Vilar et al., 2018).

Tabla 3.18. Eficiencias y características del tratamiento de vinazas mediante procesos combinados

Procesos combinados	Remoción de contaminante	Referencia
Coagulación-floculación y filtrado de arena	79.5% DQO y 70% turbidez	Carvajal-Zarrabal et al., 2012
Coagulación-floculación, ultrafiltración y nanofiltración	94% DQO y 99% color	Da-Silva et al., 2020
Peroxidación y flotación electroquímica	61.2% DQO, 63% ST, 99.7% turbidez y 57% COT	Dávila-Rincón et al., 2011
Coagulación-floculación y ozonación	85.94% DQO con ozonación	Ferral-Pérez et al., 2016
Coagulación-floculación y ozonación catalítica	88.27% DQO con ozonación catalítica	
Coagulación-floculación y fotoFenton	99% color en ambos casos	
Coagulación-floculación y fotoFenton	69.2% DQO y 51.6% COT	Guerreiro et al., 2016
Coagulación-floculación, microfiltración y nanofiltración	99.5% DQO y 99.9% Color	Lebron et al., 2020
Tratamiento anaerobio y ultrafiltración	93.3% DQO, 87.1 COT y 97.6 SST	Magalhães et al., 2020
Electrocoagulación y coagulación-floculación	59% DQO	Ojeda-Armaignac y Hing-Cortón, 2009
Coagulación-floculación y fotocátalisis	70% DQO	Padilha et al., 2013
Tratamiento biológico combinado anaerobio-aerobio	70% DQO y 5% color	Perez et al, 2006
Fotocátalisis y ultrasonido	70% DQO, 68% fenoles y 48% color	Poblete et al., 2020
Coagulación-floculación y filtración con membrana	97% Turbidez y 85% Color	Rennola et al., 2007
Coagulación-floculación y fotoFenton	91% DQO y 95% COT	Rodrigues et al., 2017
Coagulación-floculación y fotocátalisis	70% DQO, 89% color y 89.7% fenoles	Rodríguez-Arreola et al., 2020
Coagulación-floculación y fotocátalisis	79% DQO y 95.8% color	Rodríguez-Arreola, 2019
Tratamiento biológico y electro-oxidación	66% DQO, 100% color, 61% COT y 99% Fenoles	Vilar et al., 2018
Tratamiento anaerobio seguido de adsorción		Contreras-Contreras et al., 2020

Capítulo IV

Resultados y discusión

4.1. Resultados de esta investigación bibliográfica

A continuación se presenta un resumen ejecutivo de los resultados de la investigación bibliográfica realizada.

En este resumen se toma la información extensa obtenida de la lectura de las diferentes propuestas hechas por grupos de investigación, tanto a partir de datos experimentales, como de revisiones bibliográficas de ellos.

-) Se describió en el segundo capítulo de manera amplia el proceso de producción de bioetanol a partir de *Saccharum officinarum*, así como las posibles opciones empleando otras fuentes de carbono y diferentes microorganismos (Tabla A.2.1). También, se describió la obtención de las vinazas y su caracterización que se resumieron en la Tabla 3.3 de acuerdo con diversos autores
-) Se recopiló información de procesos biológicos tanto anaerobios como aerobios que pueden permitir el aprovechamiento integral de los componentes de las vinazas. Las eficiencias de transformación de estos componentes y otras características del proceso se encuentran en la Tabla 3.9 para las bioconversiones anaerobias y en la Tabla 3.10 para las aerobias
-) Se logró recopilar información de transformaciones fisicoquímicos para el reaprovechamiento de las vinazas; sus eficiencias y características especialmente la coagulación-floculación descrita en la Tabla 3.11, así como el uso de la electrocoagulación en la Tabla 3.12 y por filtración y

ósmosis inversa en la Tabla 3.13. Asimismo, se describieron los sistemas de evaporación para concentrar las vinazas y de su incineración para recuperar su energía calorífica

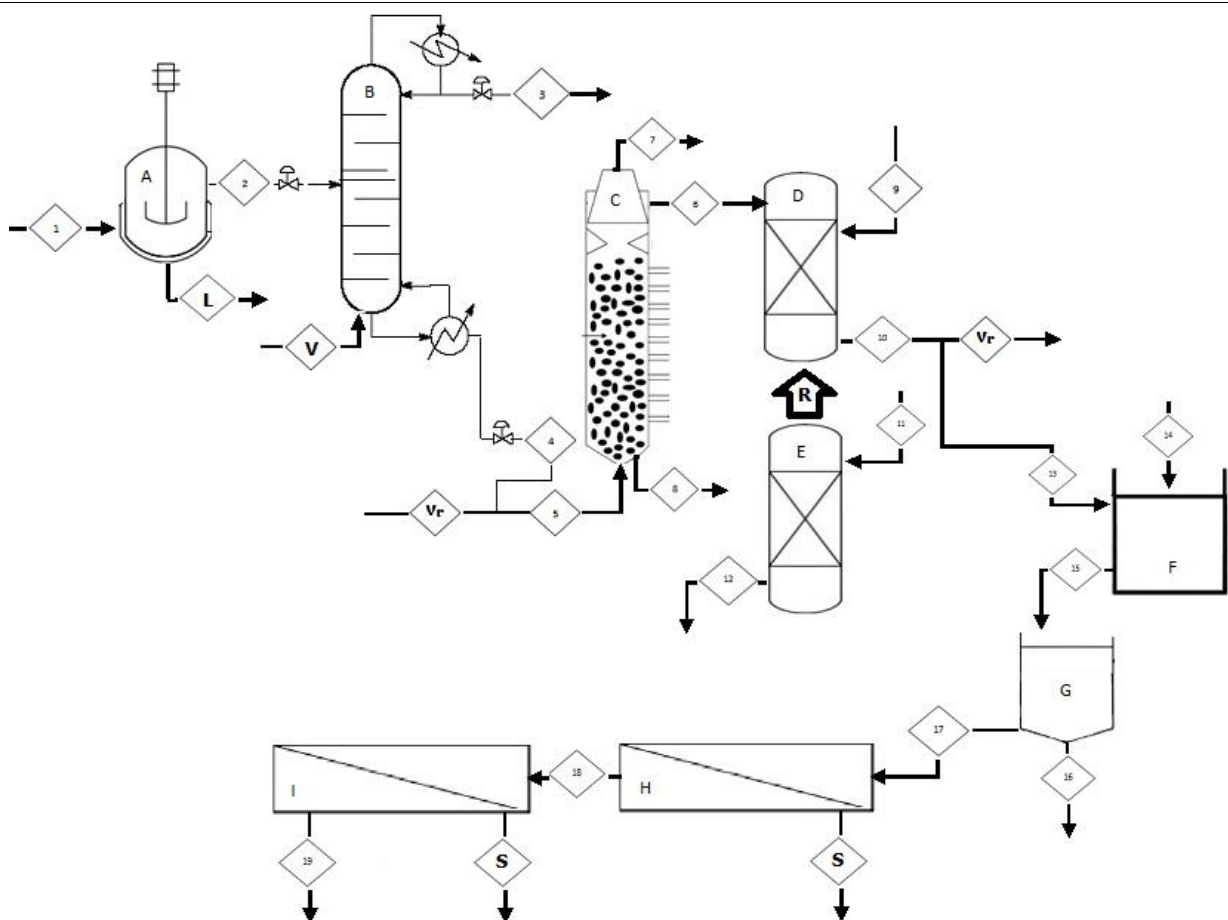
- J Se encontraron, además, procesos de oxidación avanzada y procesos combinados que ofrecen otro acercamiento diferente de los sistemas biológicos y fisicoquímicos convencionales. Las eficiencias y características de esos procesos de oxidación avanzada se encuentran en la Tabla 3.14 y en la Tabla 3.15 para los procesos combinados

- J Los procesos comúnmente usados en la industria actual para la transformación de los componentes de las vinazas son los sistemas biológicos, la separación de los polifenoles empleando carbón activado para su aprovechamiento y la coagulación-floculación para la depuración final cumpliendo cabalmente con la normativa vigente

- J El aprovechamiento de los polifenoles es algo relativamente reciente que no había sido explorado antes. A la luz de algunos artículos y tesis de los últimos cinco años sobre el uso de los polifenoles para atacar a virus, bacterias y hongos, plantea la opción del uso de sistemas que no los descompongan, sino que los recuperen íntegros para su aplicación en la industria farmacéutica (Gaspar-Mendoza, 2022; Leyra-Tobilla, 2016; Mhatre et al., 2020)

4.2. Discusión final

A continuación, con base en esta investigación teórica y los objetivos planteados, se presenta una discusión final que permite avalar la bondad de esta propuesta obtenida de la investigación bibliográfica. Para ello se presenta la opción propuesta en forma esquemática (Figura 4.1).



Identificación de corriente	1	2	3	4	5
Fluido	Melaza	Etanol, vinaza y otros subproductos	Etanol de alta pureza	Vinaza y restos de levadura	Vinaza diluida
Identificación de corriente	6	7	8	9	10
Fluido	Vinaza tratada anaerobiamente	Biogás rico en metano	Exceso de lodos anaerobios	Carbón activado	Vinaza sin polifenoles
Identificación de corriente	11	12	13	14	15
Fluido	Agente desorbedor de polifenoles	Polifenoles desorbidos a purificación	Vinaza tratada (sin polifenoles)	Coagulante y floculante compatibles con suelos cañeros	Vinaza tratada por coagulación
Identificación de corriente	16	17	18	19	
Fluido	Lodos coagulados y floculados a suelos cañeros	Vinaza tratada por coagulación	Vinaza tratada por ultrafiltración	Vinaza tratada por nanofiltración (cumple con la norma oficial correspondiente)	

Identificación de corriente	L	V	V_r	[R]	S
Fluido	Levadura recuperada	Vapor de agua para el arrastre del etanol	Líquido para diluir la vinaza entrante al RALLFA	Regeneración del carbón activado y recuperación de los polifenoles	Sólidos finales a suelos cañeros

Ver continuación en la siguiente página

Figura 4.1. Propuesta de aprovechamiento integral de las sustancias contenidas en vinazas provenientes de la primera torre de destilación de la obtención de etanol de mieles de jugo de caña

Continuación de la Figura 4.1. Propuesta de aprovechamiento integral de las sustancias contenidas en vinazas provenientes de la primera torre de destilación de la obtención de etanol de mieles de jugo de caña

Equipo	A	B	C	D	E
Descripción	Reactor de fermentación de melaza de caña de azúcar	1ª torre de destilación de etanol (por arrastre de vapor)	Reactor anaerobio de lecho de lodos de flujo ascendente para vinaza	Operación de adsorción de polifenoles con carbón activado	Operación de desorción de polifenoles (regeneración del carbón activado)
Equipo	F	G	H	I	
Característica	Tanque de coagulación	Tanque de floculación	Equipo de ultrafiltración	Equipo de nanofiltración	

Con base en este diagrama de flujo podría hacerse un balance de materia para dimensionar los equipos y hacer una pre-evaluación técnico-económica de factibilidad que permita corroborar la bondad del proceso combinado propuesto con base en el posible valor del biogás rico en metano y el de los polifenoles para definir la tasa interna de retorno correspondiente.

En el siguiente y último capítulo de esta tesis se dan las conclusiones derivadas de esta investigación bibliográfica.

Capítulo V

Conclusiones y recomendaciones

5.1. Conclusiones

Considerando el objetivo general de esta investigación: Realizar una revisión bibliográfica sobre los métodos de tratamiento alternos más prometedores, tanto bioquímicos como fisicoquímicos, para el reaprovechamiento de las vinazas provenientes de una planta cooperante productora de bioetanol empleando mieles de caña de azúcar (*Saccharum officinarum*) y los objetivos particulares: Realizar una revisión del material bibliográfico disponible acerca del proceso de producción de bioetanol, los subproductos que se obtienen y su caracterización fisicoquímica, además del impacto ambiental que tienen estos subproductos (vinazas) si no son reaprovechados, documentar una revisión del material bibliográfico acerca de los métodos y procesos bioquímicos para el aprovechamiento de las vinazas, efectuar una revisión de material bibliográfico acerca de los métodos y procesos alternos fisicoquímicos para el aprovechamiento de las vinazas y evaluar los procesos físicos, químicos y bioquímicos con base en la literatura consultada para justificar el proceso más idóneo en el aprovechamiento de las vinazas, se obtuvieron las siguientes conclusiones.

-) Sí se logró realizar la revisión bibliográfica con resultados para ambos tipos de procesos, bioquímicos y fisicoquímicos, que puede ser de interés para la planta cooperante que produce alcohol etílico a partir de la caña de azúcar
-) Respecto del primer objetivo particular, se obtuvo suficiente información sobre la producción de etanol y lo que debe cuidarse para que las vinazas producidas no representen un peligro ambiental
-) Se describieron prolijamente los procesos bioquímicos, físicos, químicos, fisicoquímicos, de oxidación avanzada y combinados que se han estudiado

para la transformación de los componentes de las vinazas y que reportan eficiencias altas

- J) Por último, considerando las condiciones de la región donde se encuentra instalada la planta cooperante podrían ofrecerse procesos combinados de bioquímicos y fisicoquímicos. Sus limitaciones son que la mayoría de estos estudios han sido realizados a escala de laboratorio y su mayor desventaja es que no se ha corroborado experimentalmente la eficiencia de recuperación de los materiales separados.

5.2. Recomendaciones

- J) De acuerdo con los datos recopilados los procesos de transformación de las vinazas que mejor funcionan son los tratamientos combinados por lo que se sugiere continuar con una revisión acerca de la evaluación económica de dichos procesos
- J) Además, podría ser interesante continuar con el estudio de los otros tratamientos, aunque ofrezcan una menor eficiencia de separación de sus componentes, ya que habría nuevos productos que explorar, como los polifenoles (Contreras-Contreras et al., 2020; Gaspar-Mendoza, 2022).
- J) Para la parte experimental en el grupo se tiene planteada la producción de carbón activado a partir del bagazo de la caña de azúcar y adsorber en este material los polifenoles después de una transformación bioquímica de los componentes carbonosos de las vinazas en biogás rico en metano. Una vez recuperados los polifenoles se desorberán del carbón activado para recuperarlos y probarlos en aerosoles con sistemas *in vitro* y, si funcionan, se podría plantear un protocolo médico experimental con modelos animales para corroborar su bondad.

ANEXOS

Anexo 1

Producción bioquímica de etanol y de su subsecuente obtención de metano a partir de las vinazas de la primera torre de destilación

A continuación se presenta en la Figura A.1 un resumen de las posibles formas de producir bioetanol dependiendo de la materia prima disponible.

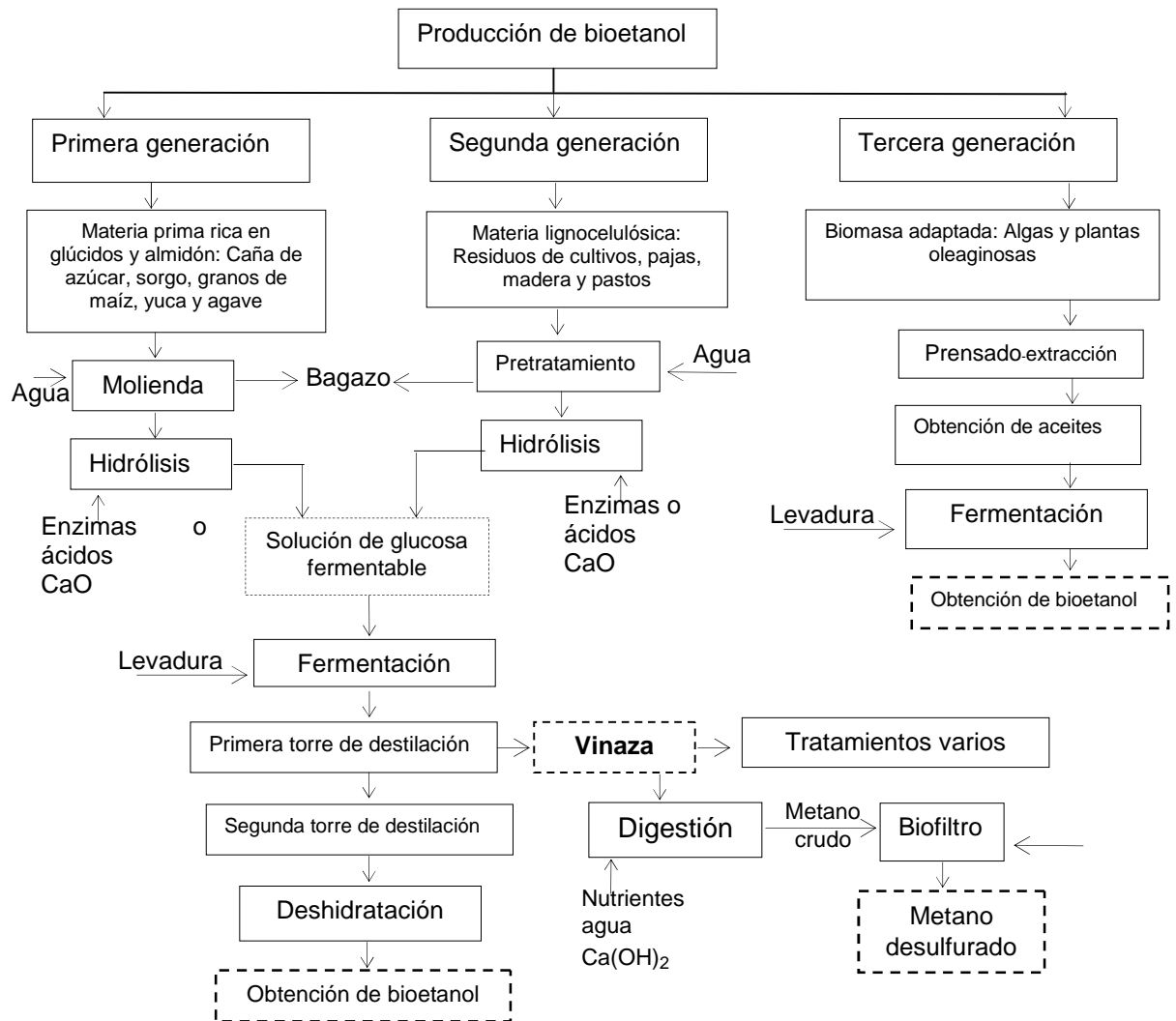


Figura A.1. Diagrama de bloques del proceso de producción bioquímica de etanol y de su subsecuente obtención de metano a partir de las vinazas de la primera torre de destilación

Anexo 2

Descripción abreviada del proceso de producción bioquímica de etanol a partir de las vinazas de la primera torre de destilación empleando residuos lignocelulósicos (segunda generación)

Cuando se utiliza material lignocelulósico como la paja para la producción de bioetanol deben romperse y liberarse las moléculas de glucosa en el pretratamiento e hidrólisis pasando a ser fermentadas las moléculas de glucosa resultantes con lo que se consigue obtener etanol y CO₂. Para lograr esto se utiliza una levadura para llevar a cabo las reacciones de fermentación (Aguilar-Rivera y Canizales-Leal, 2004; Amid et al., 2021; Cazetta et al., 2007; Junior-Letti et al., 2012; Moodley y Kana, 2019; Santosh et al., 2017).

Una de las problemáticas en la producción de bioetanol de segunda generación, como es el caso de la producción a partir de pajas y otros subproductos lignocelulósicos, es el alto costo del proceso de producción de etanol y de las enzimas para la sacarificación de la fuente carbonosa lignocelulósica. Actualmente se hace uso de microorganismos como *Zymomonas mobilis*, *Pichia stipitis*, *S. passalidarum* y sus variantes para reducir los costos de operación que se necesitan para lograr una mayor eficiencia de conversión de glúcidos a etanol aumentando la productividad del sistema (Tabla A.2.1) (Amid et al., 2021; Cazetta et al., 2007; Chamnipa et al., 2018; Claes et al., 2020; Fang et al., 2020; Garrigues y Salazar-Cerezo, 2020; Walker y Walker, 2018; Zhang et al., 2020).

Tabla A.2.1. Producción de bioetanol a partir de melazas por microorganismos

Microorganismo	Concentración de bioetanol (g/L)	Fuente
<i>Z. mobilis</i> ATCC 29191	55.8	Cazetta et al., 2007
<i>P. kudriavzevii</i> RZ8-1	35.09-69.85	Chamnipa et al., 2018
<i>Kluyveromyces marxianus</i>	40	De-Souza-Oliveira-Filho et al., 2021
<i>S. cerevisiae</i> y <i>S. passalidarum</i> NRRL Y-27907	49.2	Farías y Maugeri-Filho, 2019
<i>S. cerevisiae</i> KAM-2GD	40.89	Juneja et al., 2019
<i>Saccharomyces cerevisiae</i> NCIM 3095	28	Kumar et al., 2020
<i>S. cerevisiae</i> MC15	114.71	Li et al., 2021
<i>S. cerevisiae</i>	5.0–18.4	Mancini-Coelho et al., 2018
<i>S. cerevisiae</i> DMKU 3-S087	72.4	Pattanakittivorakul et al., 2019
<i>S. cerevisiae sahand</i> 101	84.6	Razmovski y Vu urovi , 2012
<i>Wickerhamomyces anomalus</i> UCDFST 72-248	9.6	Sitepu et al., 2019
<i>P. fermentans</i> ETP22	0.52- 5.15	Tesfaw et al., 2021
<i>S. cerevisiae</i> ETP53	5.88- 7.5	Tesfaw et al., 2021
<i>K. marxianus</i> ETP87	0.67- 6.96	Tesfaw et al., 2021
<i>S. cerevisiae</i> RSP5-UBC4	21.7- 59.8	Xu et al., 2018
<i>S. cerevisiae</i> RMU Y-10	56.62	Zhang et al., 2020

Anexo 3

Disposición controlada de los residuos producidos en esta investigación

Esta investigación fue teórica y no se produjeron residuos al menos por la parte de lo realizado en el tiempo en que se realizó.

Habría que considerar el uso de la electricidad para los equipos de cómputo y los contaminantes que se producen en las plantas que la generan, sean hidroeléctricas, termoeléctricas, carboeléctricas o nucleoeeléctricas y medir la huella de carbono de esta investigación en esta tesitura, pero esta sería trabajo a futuro otra tesis.

Por último, los equipos en que se trabajó (computadora personal, impresora para entregar los documentos al Departamento de Exámenes Profesionales de la Facultad de Química, etc., etc.) usan partes de recambio que deben disponerse al término de su vida útil. El papel en el que se imprimirá este documento y los que se requieran para la titulación fueron fabricados a partir de una fuente de celulosa y deberá también considerarse el impacto ambiental correspondiente, así como el de los cartuchos de tinta, etc. Esta investigación también sería otra tesis.

Es claro que cualquier actividad que realicen los seres humanos tiene un impacto ambiental y, por ello, debe siempre actuarse de manera responsable y consciente para minimizar este impacto. Esto es lo que se deja al(a) lector(a).

Bibliografía

- Adebooye, O.C., Alashi, A.M., Aluko, R.E. 2018. A brief review on emerging trends in global polyphenol research. *Journal of Food Biochemistry*. 42(4):1–7. <https://doi.org/10.1111/jfbc.12519>.
- Aguilar-Rivera, N., Canizales-Leal, M. 2004. Cinética de la hidrólisis ácida de la cascarilla de cebada. *Revista Mexicana de Ingeniería Química*. 3(3):257-263. <https://www.redalyc.org/pdf/620/62030304.pdf>
- Ahmed, P.M., De Figueroa, L.I., Pajot, H.F. 2020. Dual purpose of ligninolytic-basidiomycetes: Mycoremediation of bioethanol distillation vinasse coupled to sustainable bio-based compounds production. *Fungal Biology Reviews*. 34(1):25-40. <https://doi.org/10.1016/j.fbr.2019.12.001>
- Al-Arni, S. 2018. Extraction and isolation methods for lignin separation from sugarcane bagasse: A review. *Industrial Crops and Products*. 115:330-339. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2018.02.012>
- Alfonso-Cardero, A., Pagés-Díaz, J., Contino, F., Rajendran, K., Lorenzo-LLanes, J. 2021. Process simulation and techno-economic assessment of vinasse-to-biogas in Cuba: Deterministic and uncertainty analysis. *Chemical Engineering Research and Design*. 169:33-45. <https://doi.org/10.1016/j.cherd.2021.02.031>
- Álvarez-Maciel, C. 2009. Biocombustibles: desarrollo histórico-tecnológico, mercados actuales y comercio internacional. *Economía Informa*. UNAM. No. 359:4-8.
- Amid, S., Aghbashlo, M., Tabatabaei, M., Karimi, K., Nizami, A.S., Rehan, M., Hosseinzadeh-Bandbafha, H., Mohamad, M.S., Peng, W., Lam, S.S. 2021. Exergetic, exergoeconomic, and exergoenvironmental aspects of an industrial-scale molasses-based ethanol production plant. *Energy Conversion and Management*. 227:113637. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2020.113637>
- Arango-Ruiz, Á. 2005. La electrocoagulación: una alternativa para el tratamiento de aguas residuales. *Revista Lasallista de Investigación*. 2(1):49-56. <https://www.redalyc.org/pdf/695/69520109.pdf>
- Ariadji, T., Astuti, D.I., Priharto, N., Ananggadipa, A.A., Persada, G.P., Subiantoro, E., Abqory, M.H. 2020. Field implementation of nutrient huff and puff in Bentayan Field, South Sumatra: Towards a low-cost EOR. In *SPE/IATMI Asia Pacific Oil and Gas Conference and Exhibition*. OnePetro. October. <https://doi.org/10.2118/196536-MS>
- Arias-Giraldo, S., López-Velasco, D.M. 2019. Reacciones químicas de los azúcares simples empleados en la industria alimentaria. *Lámpsakos*. (22):123-136. <https://doi.org/10.21501/21454086.3252>
- Arshad, M., Hussain, T., Iqbal, M., Abbas, M. 2017. Enhanced ethanol production at commercial scale from molasses using high gravity technology by mutant *S. cerevisiae*. *Brazilian Journal of Microbiology*. 48(3):403-409. <https://doi.org/10.1016/j.bjm.2017.02.003>
- Aya-Arias, W.A., Pineda, J.C., Sanchez-Toro, O.J., Cardona-Alzate, C.A. 2006. Análisis comparativo de diferentes materias primas amiláceas para la obtención de alcohol carburante. *Memorias del Congreso Colombiano de Ingeniería Química*. ISSN (1692–925X):8.

- <https://doctoradoagrarias.files.wordpress.com/2015/05/anc3a1l-comp-de-dif-mat-primas-amilc3a1ceas-para-obt-etoh.pdf>
- Baduí-Dergal, S. 2016. Química de los alimentos. Pearson Educación. Pp. 78-80. Ciudad de México, México.
- Bailey, J.E., Ollis, D.F. 1986. Biochemical engineering fundamentals. McGraw-Hill. 2a ed. Nueva York, Estados Unidos.
- Baldiris, L.F., López, E., Castillo, J., Caicedo, L. D. 2012. Biodegradación de la vinaza de caña de azúcar con cepas de los hongos *Schyzophyllum commune* y *Trichoderma viride*. Ingenium. 6(14):39-46
<https://repository.usc.edu.co/handle/20.500.12421/722>
- Bauer, R., Waldner, G., Fallmann, H., Hager, S., Klare, M., Krutzler, T., Maletzky, P. 1999. The photo-Fenton reaction and the TiO₂/UV process for waste water treatment – novel developments. Catalysis Today. 53(1):131-144.
[https://doi.org/10.1016/S0920-5861\(99\)00108-X](https://doi.org/10.1016/S0920-5861(99)00108-X)
- Bautista-da-Silva, F., Braz-Romo, B., Cardoso, V.L., Coutinho-Filho, U., Ribeiro, E.J. 2012. Production of ethanol from enzymatically hydrolyzed soybean molasses. Biochemical Engineering Journal. 69:61-68.
<https://doi.org/10.1016/j.bej.2012.08.009>
- Bautista-Zúniga, F., Durán-de-Bazúa, C. 1998. Análisis del beneficio y riesgo potenciales de la aplicación al suelo de vinazas crudas y tratadas biológicamente. Revista Internacional de Contaminación Ambiental. 14(1):13-19.
- Bautista-Zúniga, F., Durán-de-Bazúa, C., Lozano, R. 2000. Cambios químicos en el suelo por aplicación de materia orgánica soluble tipo vinazas. Revista Internacional de Contaminación Ambiental. 16(3):89-101.
- Bazúa, C.D., Wilke, C.R. 1975. Ethanol effects of the kinetics of a continuous fermentation with *Saccharomyces cerevisiae*. Report LBL 4423-U-CAL. 29 pages.
<https://escholarship.org/uc/item/3wf9f3ww>
- Becerra-Ospina, N.L. 2014. Clarificación de vinazas de caña de azúcar por tratamiento fisicoquímico y filtración con membranas. Departamento de Ingeniería Química y Ambiental. Universidad Nacional de Colombia. Pp. 8-30. Colombia.
<https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/51969>
- Belalcazar-de-Galvis, A. 1991. Empleo de filtros anaerobios para reducir la contaminación de las industrias licoreras. Revista Colombiana de Química. 20(1):45-54.
- Bettani, S.R., de-Oliveira-Ragazzo, G., Santos, N.L., Kieckbusch, T.G., Bastos, R.G., Soares, M.R., da-Silva, M.A. 2019. Sugarcane vinasse and microalgal biomass in the production of pectin particles as an alternative soil fertilizer. Carbohydrate Polymers. 203:322-330.
- Bouallagui, H., Touhami, Y., Hanafi, N., Ghariani, A., Hamdi, M. 2013. Performances comparison between three technologies for continuous ethanol production from molasses. Biomass and Bioenergy. 48:25-32.
- Braungart, M., McDonough, W. 2002. Rediseando la forma en que hacemos las cosas: Cradle to Cradle (De la cuna a la cuna). ISBN 84-481-4295-0.
<https://mcdonough.com/writings/cradle-cradle-remaking-way-make-things/>

- Buller, L.S., da Silva Romero, C.W., Lamparelli, R.A.C., Ferreira, S.F., Bortoleto, A.P., Mussatto, S.I., Forster-Carneiro, T. 2021. A spatially explicit assessment of sugarcane vinasse as a sustainable by-product. *Science of The Total Environment*. 765:142717.
- Camaçari-de-Carvalho, T., da-Silva, C.L. 2011. Reduction of vinasse volume by the evaporation process. In 21st Brazilian Congress of Mechanical Engineering, Brazil. October:24-28.
- Carbajal-Cedillo, B., Montes-de-Oca-Lozano, S.G., Rosales-Magno, J.A. 2008. Sistema de control para el proceso de evaporación de la producción de azúcar estándar. Tesis Profesional. Instituto Politécnico Nacional. Pp. 2-27. México.
- Carhuás-Pérez, W. D., Velásquez-Gutiérrez, D. J. 2018. Determinación de las condiciones de operación y diseño del proceso coagulación floculación para el tratamiento de vinazas de Cartavio Rum Company SAC. Tesis Profesional. Universidad Nacional de Trujillo. La Libertad, Perú.
- Carvajal-Zarrabal, O., Nolasco-Hipólito, C., Barradas-Dermitz, D.M., Hayward-Jones, P.M., Aguilar-Uscanga, M. G., Bujang, K. 2012. Treatment of vinasse from tequila production using polyglutamic acid. *Journal of Environmental Management*. 95:S66-S70.
- Castañeda-Paredes, M.E. 2011. Evaluación de los procesos de tratamiento de las vinazas de destilerías, Universidad Nacional de Trujillo. Pp. 3-44. Trujillo, Perú
- Castro, C., Cleenwerck, I., Zuluaga, R., Caro, G., Putaux, J.L., Rojas, O.J., Gañán, P. 2014. Production of bacterial cellulose: use of a new strain of microorganism. In *Handbook of Green Materials: 1 Bionanomaterials: Separation Processes, Characterization and Properties*. Pp. 105-122.
- Castro-Moreno, G.A. 2009. El tratamiento de las vinazas – la recirculación. *Publicaciones e Investigación*. 3(1):51-58.
- Cazetta, M.L., Celligoi, M.A.P.C., Buzato, J. B., Scarmino, I.S. 2007. Fermentation of molasses by *Zymomonas mobilis*: Effects of temperature and sugar concentration on ethanol production. *Bioresource Technology*. 98(15):2824-2828.
- Chamnipa, N., Thanonkeo, S., Klanrit, P., Thanonkeo, P. 2018. The potential of the newly isolated thermotolerant yeast *Pichia kudriavzevii* RZ8-1 for high-temperature ethanol production. *Brazilian Journal of Microbiology*. 49(2):378-391.
- Chanfón-Curbelo, J.M., Lorenzo-Acosta, Y. 2014. Alternativas de tratamiento de las vinazas de destilería. Experiencias nacionales e internacionales. *Revista Centro Azúcar*. 41(2):56-67.
- Chávez-Sifontes, M., Domine, M.E. 2013. Lignina, estructura y aplicaciones: métodos de despolimerización para la obtención de derivados aromáticos de interés industrial. *Avances en Ciencias e Ingeniería*. 4(4):15-46. <https://www.redalyc.org/pdf/3236/323629266003.pdf>
- Chowdhary, P., Raj, A., Bharagava, R. N. 2018. Environmental pollution and health hazards from distillery wastewater and treatment approaches to combat the environmental threats: A review. *Chemosphere*. 194:229-246.

- Christofoletti, C.A., Escher, J.P., Correia, J.E., Urbano Marinho, J.F., Fontanetti, C.S. 2013. Sugarcane vinasse: Environmental implications of its use. *Waste Management*. 33(12):2752-2761.
- Claes, A., Deparis, Q., Foulquié-Moreno, M.R., Thevelein, J.M. 2020. Simultaneous secretion of seven lignocellulolytic enzymes by an industrial second-generation yeast strain enables efficient ethanol production from multiple polymeric substrates. *Metabolic Engineering*. 59:131-141.
- Conde-Mejía, C., Jiménez-Gutiérrez, A., Gómez-Castro, F.I. 2016. Purification of bioethanol from a fermentation process: Alternatives for dehydration. *Computer Aided Chemical Engineering*. 38:373-378.
- Contreras-Contreras, J.A. 2019. Caracterización química de vinazas de torres de destilación y posible remoción de polifenoles de ellas empleando sistemas bioquímicos anaerobios. Tesis de Maestría en Ciencias. UNAM. México.
- Contreras-Contreras, J.A., Bernal-González, M., Solís-Fuentes, J.A., Durán-Domínguez-de-Bazúa, M.d.C. 2020. Polyphenols from sugarcane vinasses, quantification and removal using activated carbon after biochemical treatment in laboratory-scale thermophilic upflow anaerobic sludge blanket reactors. *Water Air and Soil Pollution*. 231(12):401:1-8. <https://doi.org/10.1007/s11270-020-04733-5>
- Contreras-González, N. 2017. Co-Digestión de vinaza y la fracción orgánica de los residuos sólidos urbanos para la producción de metano. Tesis de Maestría en Ingeniería. UNAM, Programa de Maestría y Doctorado en Ingeniería. Pp. 16-20, Ciudad de México, México.
- Córdova-Coronel, M.S. 2017. Modelo de mejora continua para el proceso de molienda en el Ingenio Azucarero Monterrey "MALCA". Tesis de Licenciatura. Universidad del Azuay. Pp. 6-13. Ecuador.
- Cortes-Rodríguez, E.F., Fukushima, N.A., Palacios-Bereche, R., Ensinas, A.V., Nebra, S.A. 2018. Vinasse concentration and juice evaporation system integrated to the conventional ethanol production process from sugarcane – Heat integration and impacts in cogeneration system. *Renewable Energy*. 115:474-488.
- Da-Silva, S.C., Amaral-Moravia Moravia, M.C.S., Fonseca-Couto, C. 2020. Combined process of ultrafiltration and nanofiltration for vinasse treatment with and without pre-coagulation. *Journal of Water Process Engineering*. 36:101326.
- Damodaran, S., Fennema, O. R., Parkin, K. 1992. Química de los alimentos. Acribia. Pp. 246. Zaragoza, España.
- David, C., Arivazhagan, M., Tuvakara, F. 2015. Decolorization of distillery spent wash effluent by electro oxidation (EC and EF) and Fenton processes: A comparative study. *Ecotoxicology and Environmental Safety*. 121:142-148.
- Dávila-Rincón, J.A., Machuca, F., Marrianga, N. 2011. Treatment of vinasses by electrocoagulation–electroflotation using the Taguchi method. *Electrochimica Acta*. 56(22):7433-7436.
- Dávila-Rincón, J.A., Machuca-Martínez, F., Marrianga-Cabrales, N. 2010. Peroxidación y flotación electrolítica de vinazas de destilería. *Revista de Ingeniería*. (32):38-44.

- Dávila-Rincón, J.D., Marriaga-Cabrales, N., Machuca-Martínez, F.M. 2009. Remoción de sólidos totales de vinazas por electrocoagulación-electroflotación. *Dyna*. 76(158):41-47.
- Dávila-Vázquez, G., Arriaga, S., Alatraste-Mondragón, F., de León-Rodríguez, A., Rosales-Colunga, L.M., Razo-Flores, E. 2008. Fermentative biohydrogen production: trends and perspectives. *Reviews in Environmental Science and Bio/Technology*. 7(1):27-45.
- De-Bazúa, C.D., Cabrero, M.A., Poggi, H.M.1991. Vinasses biological treatment, anaerobic-aerobic experiments. Laboratory and pilot plant tests. Part 1. *Bioresource Technology*. 35:87-93.
- De-Castro-Marcato, A.C., Pereira-de-Souza, C., Brandão-de-Paiva, A., Eismann, C. E., Flores-Navarro, F.,Monteiro-Camargo, A.F., Fontanetti, C.S. 2019. Hybrid treatment system for remediation of sugarcane vinasse. *Science of The Total Environment*. 659:115-121.
- De-Jesus, G.C., Bastos, R.G., da Silva, M.A. 2019. Production and characterization of alginate beads for growth of immobilized *Desmodesmus subspicatus* and its potential to remove potassium, carbon and nitrogen from sugarcane vinasse. *Biocatalysis and Agricultural Biotechnology*. 22:101438.
- De-Souza-Oliveira-Filho, J., Queiroz-dos-Santos, O.A., Queiroz-Rossi, C., de Figueiredo-Gomes-Diniz, Y.V., de Souza-Fagundes, H., da-Silva-Rodrigues-Pinto, L. A., Pereira, W., Gervacio-Pereira, M. 2021. Assessing the effects of harvesting with and without burning and vinasse application in sugarcane crops: Evaluation of soil fertility and phosphorus pools in different ethanol production systems. *Agriculture, Ecosystems & Environment*. 307:107233.
- Dias, M.O., Ensinas, A.V., Nebra, S.A., Maciel-Filho, R., Rossell, C.E., Wolf-Maciel, M.R. 2009. Production of bioethanol and other bio-based materials from sugarcane bagasse: Integration to conventional bioethanol production process. *Chemical Engineering Research and Design*. 87(9):1206-1216.
- Díaz-de-los-Ríos, M., Lorenzo-Acosta, Y. 2018. Perspectivas del tratamiento de efluentes de destilerías y plantas de derivados mediante tecnologías de membranas. *Centro Azúcar*. 45(3): 14-23.
- Díaz-Reinoso, B., Moure, A., González, J., Domínguez, H. 2017. A membrane process for the recovery of a concentrated phenolic product from white vinasses. *Chemical Engineering Journal*. 327:210-217.
- DOF. 1994. Norma Oficial Mexicana NOM-064-ECOL-1994, que establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales a cuerpos receptores provenientes de la industria de la destilería. México. Diario Oficial de la Federación.
- DOF. 1996a. Norma Oficial Mexicana NOM-001-SEMARNAT-1996. Que establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en aguas y bienes nacionales. Secretaría de Medio Ambiente y Recurso Naturales. México. Diario Oficial de la Federación.
- DOF. 1996b. Norma Oficial Mexicana NOM-002-SEMARNAT-1996. Que establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales a los sistemas de alcantarillado urbano o municipal. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. México. Diario Oficial de la Federación.

- DOF. 1997. Norma Oficial Mexicana NOM-003-SEMARNAT-1997, Que establece los límites máximos permisibles de contaminantes para las aguas residuales tratadas que se 'reusen' en servicios al público. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. México. Diario Oficial de la Federación.
- DOF. 2009. Diario Oficial (Primera Sección). Modificación del inciso 0, el encabezado de la Tabla 13, el último párrafo del Anexo B y el apartado Signo decimal de la Tabla 21 de la Norma Oficial Mexicana NOM-008-SCFI-2002, Sistema general de unidades de medida. CUARTO.- Se modifica el encabezado de la tabla 13 para quedar como sigue: Tabla 21 – Reglas para la escritura de los números y su signo decimal. Signo decimal: El signo decimal debe ser una coma sobre la línea (,) o un punto sobre la línea (.). Si la magnitud de un número es menor que la unidad, el signo decimal debe ser precedido por un cero. Diario Oficial de la Federación: Jueves 24 de septiembre de 2009. Poder Ejecutivo Federal. Estados Unidos Mexicanos.
- Dong, C., Wang, Y., Wang, H., Lin, C.S.K., Hsu, H.Y., Leu, S.Y. 2019. New generation urban biorefinery toward complete utilization of waste derived lignocellulosic biomass for biofuels and value-added products. *Energy Procedia*. 158: 918-925.
- Dong, M., Gao B., Xu, W., Wang, Y., Mao, R. 2012. Effect of calcium on floc properties and membrane foulings in coagulation–ultrafiltration process by polyaluminum chloride (PACl) of different OH/Al³⁺. Values. *Desalination*. 294: 30–35.
- Durán, M.F., Sanabria, J., Gutiérrez, N. 2015. Evaluación de la producción de metano en la 'digestión anaerobia' de vinazas pretratadas con ozono. *Revista EIA*. 12(24):167-177.
- Durán-de-Bazúa, C., Medellín, P., Noyola, A., Poggi-Varaldo, H., Zedillo, L.E. 1988. Caracterización de vinazas y su degradación en un sistema combinado de tres reactores anaerobios y un reactor aerobio de biodiscos. *Tecnol. Ciencia Ed. (IMIQ)*. 3(2):33-43.
- Durán-de-Bazúa, C., Noyola-Robles, A., Poggi-Varaldo, H., Zedillo-Ponce-de-León, L.E. 1994. Paquete tecnológico para tratar vinazas de ingenios azucareros alcoholeros: sistema anaerobio/aerobio. *Rev. IMIQ*. 35(8):42-47.
- Eichhorn, S.J., Dufresne A., Aranguren, M., Marcovich, N.E., Capadona, J.R., Rowan, S.J., Weder, C., Thielemans, W., Roman, M., Renneckar, S., Gindl, W., Veigel, S., Keckes, J., Yano, H., Abe, K., Nogi, M., Nakagaito, A.N., Mangalam, A., Simonsen, J., Benight, A.S., Bismarck, A., Berglund, L.A., Peijs, T. 2010. Review: Current international research into cellulose nanofibers and nanocomposites. *Journal of Materials Science*. 45(1):1-33
- Errico, M., Rong, B.G. 2012. Synthesis of new separation processes for bioethanol production by extractive distillation. *Separation and Purification Technology*. 96: 58-67.
- Estrada-Alonso, D., Garrido-Carralero, N., Pérez-Ones, O., Zumalacárregui-de-Cárdenas, L. 2016. Alternativas tecnológicas para reducir el volumen de las vinazas de la industria alcoholera y su tratamiento. *Centro Azúcar*. 43(1):70-79.
- Fanelli, A., Reinhardt, L., Matsuoka, S., Ferraz, A., da Franca Silva, T., Hatfield, R. D., Romanel, E. 2020. Biomass composition of two new energy cane cultivars

- compared with their ancestral *Saccharum spontaneum* during internode development. *Biomass and Bioenergy*. 141:105696.
- Fang, T., Yan, H., Li, G., Chen, W., Liu, J., Jiang, L. 2020. Chromatin remodeling complexes are involved in the regulation of ethanol production during static fermentation in budding yeast. *Genomics*. 112(2):1674-1679.
- Farías, D., Maugeri-Filho, F. 2019. Co-culture strategy for improved 2G bioethanol production using a mixture of sugarcane molasses and bagasse hydrolysate as substrate. *Biochemical Engineering Journal*. 147:29-38.
- Fernandes, J.M., Sousa, R.M.O., Fraga, I., Sampaio, A., Amaral, C., Bezerra, R.M., Dias, A.A. 2019. Fungal biodegradation and multi-level toxicity assessment of vinasse from distillation of winemaking by-products. *Chemosphere*. 238(2020): 1–8. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2019.124572>.
- Fernández, B., Bodas, R., López-Campos, Ó., Andrés, S., Mantecón, A.R., Giráldez, F.J. 2009. Vinasse added to dried sugar beet pulp: Preference rate, voluntary intake, and digestive utilization in sheep. *Journal of Animal Science*. 87(6):2055-2063.
- Fernández-Huaripata, L.M. 2021. Optimización de los procesos de coagulación y floculación en los sistemas de las plantas de tratamiento de agua potable, 2010-2020. Una revisión sistemática. Trabajo de Investigación, grado de Bachiller en Ingeniería Industrial. Universidad Privada del Norte. Pp. 7-14. Perú.
- Ferral-Pérez, H., Torres-Bustillos, L.G., Méndez, H., Rodríguez-Santillan, J.L., Chairez, I. 2016. Sequential treatment of tequila industry vinasses by biopolymer-based coagulation/flocculation and catalytic ozonation. *Ozone: Science and Engineering*. 38(4):279-290.
- Frausto-Guerrero, A. 2020. A 50 años Lázaro Cárdenas. Secretaría de Cultura. Instituto Nacional de Estudios Históricos de las Revoluciones de México. México. Pp. 12,14 y 81.
- Fuentes-Navarro, S.E. 2006. Optimización del proceso de fabricación de azúcar blanca para mejorar la calidad, en el ingenio Santa Teresa S.A. Tesis Profesional. Universidad de San Carlos de Guatemala. Pp. 13-32. Guatemala.
- Fuess, L.T., dos Santos, G.M., Delforno, T.P., de Souza-Moraes, B., da Silva, A.J. 2020. Biochemical butyrate production via dark 'fermentation' as an energetically efficient alternative management approach for vinasse in sugarcane biorefineries. *Renewable Energy*. 158:3-12.
- Fukushima, N.A., Palacios-Bereche, M.C., Palacios-Bereche, R., Nebra, S.A. 2019. Energy analysis of the ethanol industry considering vinasse concentration and incineration. *Renewable Energy*. 142:96-109.
- Gabra, F.A., Abd-Alla, M.H., Danial, A.W., Abdel-Basset, R., Abdel-Wahab, A.M. 2019. Production of biofuel from sugarcane molasses by diazotrophic *Bacillus* and recycle of spent bacterial biomass as biofertilizer inoculants for oil crops. *Biocatalysis and Agricultural Biotechnology*. 19:101112.
- Galbe, M., Zacchi, G. 2002. A review of the production of ethanol from softwood. *Applied Microbiology and Biotechnology*. 59(6):618-628. http://cepac.cheme.cmu.edu/pasi2008/slides/stuart/library/reading/Review_production_ethanol_from_softwood.pdf

- Gañán, P., Zuluaga, R., Castro, C., Restrepo-Osorio, A., Cock, J.V., Osorio, M., Montoya U, Álvarez C., Correa C., Molina, C. 2017. Celulosa: Un polímero de siempre con mucho futuro. *Revista Colombiana de Materiales*. (11):1-4.
- Garcés-Giraldo, L. F., Mejía-Franco, E. A., Santamaría Arango, J. J. 2004. La fotocatalisis como alternativa para el tratamiento de aguas residuales. *Revista Lasallista de Investigación*. 1(1):83-9
- García-García, I., Bonilla-Venceslada, J., Jiménez-Peña, P., Ramos-Gómez, E. 1997. Biodegradation of phenol compounds in vinasse using *Aspergillus terreus* and *Geotrichum candidum*. *Water Research*. 31(8):2005-2011.
- Garrigues, S., Salazar-Cerezo, S. 2020. Ethanol Tolerance and Production by Yeasts. *Encyclopedia of Mycology*. 2:447-457.
- Gaspar-Mendoza, L. 2022. Adsorción y desorción de polifenoles para su uso medicinal a partir de vinazas de bioetanol de caña de azúcar (*Sacharum officinarum*) usando carbón activado del propio bagazo de la caña. Tesis de Licenciatura. UNAM, Facultad de Química. Ciudad de México, México. En proceso.
- Ghorbani, F., Younesi, H., Sari, A.E., Najafpour, G. 2011. Cane molasses fermentation for continuous ethanol production in an immobilized cells reactor by *Saccharomyces cerevisiae*. *Renewable Energy*. 36(2):503-509.
- Gilces-Farías, P.E., Veloz-Pinto, P.S. 2006. Estudio del uso de los nutrientes para la levadura en fermentación con el propósito de mejorar la producción del alcohol etílico. Tesis Profesional. Universidad de Guayaquil. Pp. 31-77. Guayaquil, Ecuador.
- Goyes, A., Bolaños, G. 2005. Un estudio preliminar sobre el tratamiento de vinazas en agua supercrítica. In XXIII Congreso Colombiano de Ingeniería Química. Pp. 1-5. Colombia.
- Gregg, D., Saddler, J.N. 1995. Bioconversion of lignocellulosic residue to ethanol: process flowsheet development. *Biomass and Bioenergy*. 9(1-5):287-302.
- Guerreiro, L.F., Rodrigues, C.S., Duda, R.M., de Oliveira, R.A., Boaventura, R.A., Madeira, L.M. 2016. Treatment of sugarcane vinasse by combination of coagulation/flocculation and Fenton's oxidation. *Journal of Environmental Management*. 181:237-248.
- Gutiérrez, C., Grosso, J., Bullón, J., Rennola, L., Salazar, F., Cárdenas, A. 2009. Ultrafiltración de vinazas provenientes de destilerías de etanol. *Ciencia e Ingeniería*. 30(2):121-126.
- Harirchi, S., Etemadifar, Z., Yazdian, F., Taherzadeh, M. J. 2020. Efficacy of polyextremophilic *Aeribacillus pallidus* on bioprocessing of beet vinasse derived from ethanol industries. *Bioresource Technology*. 313:123662.
- Hernández-Vázquez, M. 1988. Diseño de una planta para obtener etanol a partir de melazas en Cd. Valles, S.L.P. Tesis Profesional. Instituto Politécnico Nacional, Escuela Superior de Ingeniería Química e Industrias Extractivas. Pp. 22-26. Ciudad de México, México.
- Hincapié-Mejía, G.M., Ocampo, D., Restrepo, G.M., Marín, J.M. 2011. Fotocatálisis heterogénea y foto-Fenton aplicadas al tratamiento de aguas de lavado de la producción de biodiesel. *Información Tecnológica*. 22(2):33-42.

- Hoarau, J., Caro, Y., Grondin, I., Petit, T. 2018. Sugarcane vinasse processing: Toward a status shift from waste to valuable resource. A review. *Journal of Water Process Engineering*. 24:11-25.
- Houbron, E., Sandoval-Rojas, M.E., Hernández-Muñoz, A.F. 2016. Tratamiento de vinazas en un reactor de lecho 'fluidizado' inverso anaerobio. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*. 32(3): 255-266.
- Hussein, H.S., Brasel, J.M. 2001. Toxicity, metabolism, and impact of mycotoxins on humans and animals. *Toxicology*. 167(2):101–134. [https://doi.org/10.1016/S0300-483X\(01\)00471-1](https://doi.org/10.1016/S0300-483X(01)00471-1).
- Intriago-García, G.A., Sabando-Solórzano, T.A. 2017. Aprovechamiento del residuo del bagazo de la caña de azúcar (*Saccharum officinarum* L.), para la obtención de alcohol del sitio Agua Fría del Cantón Junín. Tesis de Grado de Tercer Nivel previa la obtención del título de Ingeniero en Medio Ambiente. Escuela Superior Politécnica Agropecuaria de Manabí Manuel Félix López, Pp. 4-16. Ecuador
- Íñiguez, G., Hernández, R. 2010. Estudio para la rehabilitación de una planta de tratamiento de vinazas tequileras mediante un floculante polimérico de poliacrilamida (PAM). *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*. 26(4):299-311.
- Íñiguez-Covarrubias, G., Peraza-Luna, F. 2007. Reduction of solids and organic load concentrations in tequila vinasses using a polyacrylamide (PAM) polymer flocculant. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*. 23(1):17-24.
- Jiménez-López, J.E. 2016. Remoción de contaminantes refractarios de las vinazas tequileras por electrocoagulación. Tesis de Maestría. Benemérita Universidad Autónoma de Puebla. Pp. 35-44. Puebla, México
- Juneja, A., Zhang, G., Jin, Y.S., Singh, V. 2019. Bioprocessing and techno-economic feasibility analysis of simultaneous production of d-psicose and ethanol using engineered yeast strain KAM-2GD. *Bioresource Technology*. 275:27-34.
- Junior-Letti, L.A., Karp, S.G., Woiciechowski, A.L., Soccol, C.R. 2012. Ethanol production from soybean molasses by *Zymomonas mobilis*. *Biomass and Bioenergy*. 44:80-86.
- Kasprzyk-Hordern, B., Ziólek, M., Nawrocki, J. 2003. Catalytic ozonation and methods of enhancing molecular ozone reactions in water treatment. *Applied Catalysis B: Environmental*. 46(4):639-669
- Khatiwada, D., Leduc, S., Silveira, S., McCallum, I. 2016. Optimizing ethanol and bioelectricity production in sugarcane biorefineries in Brazil. *Renewable Energy*. 85:371-386.
- Khattab, S.M., Watanabe, T. 2019. Bioethanol from sugarcane bagasse: Status and perspectives. In *Bioethanol Production from Food Crops*. Academic Press. Estados Unidos. Pp. 187-212.
- Kiran, B., Jana, A.K. 2015. A hybrid heat integration scheme for bioethanol separation through pressure-swing distillation route. *Separation and Purification Technology*. 142:307-315.
- Kiss, A.A., Suszwalak, D.J.-P.C. 2012. Enhanced bioethanol dehydration by extractive and azeotropic distillation in dividing-wall columns. *Separation and Purification Technology*. 86:70-78.

- Knoll, G., Winter, J. 1987. Anaerobic degradation of phenol in sewage sludge. *Applied Microbiology and Biotechnology*. 25(4):384–391. <https://doi.org/10.1007/BF00252552>.
- Kotrappanavar-Nataraj, S., Hosamani, K. M., Aminabhavi, T. M. 2006. Distillery wastewater treatment by the membrane-based nanofiltration and reverse osmosis processes. *Water Research*. 40(12):2349-2356.
- Kumar, A., Kumar, V., Singh, B. 2020. Cellulosic and hemicellulosic fractions of sugarcane bagasse: Potential, challenges and future perspective. *International Journal of Biological Macromolecules*. 169:564-582.
- Kumar, R., Ghosh, A.K., Pal, P. 2019. Fermentative ethanol production from *Madhuca indica* flowers using immobilized yeast cells coupled with solar driven direct contact membrane distillation with commercial hydrophobic membranes. *Energy Conversion and Management*. 181:593-607.
- Larrahondo, E. 2017. Composición química de la caña y factores que afectan la determinación de sacarosa y el proceso azucarero. In XIV Congreso de Técnicos Azucareros de Guatemala. Hotel Soleil de Antigua. Pp. 1-7. Guatemala.
- Lebron, Y.A., Moreira, V.R., Furtado, T.P., da-Silva, S.C., Lange, L.C., Amaral, M.C. 2020. Vinasse treatment using hybrid tannin-based coagulation-microfiltration-nanofiltration processes: Potential energy recovery, technical and economic feasibility assessment. *Separation and Purification Technology*. 248:117152.
- Legube, B., Vel-Leitner, N.K. 1999. Catalytic ozonation: A promising advanced oxidation technology for water treatment. *Catalysis Today*. 53(1):61-72.
- Leyra-Tobilla, L. 2016. Obtención de extractos polifenólicos a partir de vinazas mezcaldas y su efecto antiviral en la infectividad del virus sincitial respiratorio. Tesis profesional. UNAM, Facultad de Química. Ciudad de México, México.
- Liang, X.Q., Fan, S.L., Zhang, J.X., Song, X.R. 2019. Polyphenol removal from sugarcane juice by using magnetic chitosan composite microparticles. *Sugar Tech*. 21(1):104-112. <https://doi.org/10.1007/s12355-018-0625-z>.
- Li, L., Wu, M., Song, C., Liu, L., Gong, W., Ding, Y., Yao, J. 2021. Efficient removal of cationic dyes via activated carbon with ultrahigh specific surface derived from vinasse wastes. *Bioresource Technology*. 322:124540.
- Linares-Hernández, I., Barrera-Díaz, C., Roa-Morales, G., Ureña-Núñez, F. 2008. Remoción de contaminantes bio-refractarios en aguas residuales industriales mediante métodos electroquímicos. *Quivera. Revista de Estudios Territoriales*. 10(1):1-15.
- Lira-Rodríguez, M.L. 2013. Tratamiento de una vinaza tequilera empleando procesos fisicoquímicos y de oxidación avanzada. Tesis Profesional. Instituto Politécnico Nacional, Pp. 9-25. Ciudad de México, México.
- Liu, D., Lopez-Sanchez, P., Martinez-Sanz, M., Gilbert, E.P., Gidley, M.J. 2019. Adsorption isotherm studies on the interaction between polyphenols and apple cell walls: Effects of variety, heating and drying. *Food Chemistry*. 282:58–66. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2018.12.098>.
- López, I., Borzacconi, L., Passeggi, M., 2018. Anaerobic treatment of sugar cane vinasse: Treatability and real-scale operation. *J. Chem. Technol. Biot.* 93(5):1320-1327.

- López-Hernández, J. 1991. Treatment of alcohol distillery effluent using sugar cane pith. *International Sugar Journal*. 93(1112):155-158.
- López-López, A., León-Becerril, E., Rosales-Contreras, M.E., Villegas-García, E. 2015. Influence of alkalinity and VFAs on the performance of an UASB reactor with recirculation for the treatment of tequila vinasses. *Environmental Technology*, 36(19), 2468–2476. <https://doi.org/10.1080/09593330.2015.1034790>.
- López-López, A. 2009. Evaluación de alternativas de tratamiento para vinazas tequileras. Proyecto interno CIATEJ-PIVINAZAS/08/PT. Datos inéditos. Jalisco, México.
- Lorenzo-Acosta, Y., Doménech-López, F., Eng-Sánchez, F., Almazán-del Olmo, O., Chanfón-Curbelo, J. M. 2015. Tratamiento industrial de vinazas de destilerías en reactores UASB. *Tecnología Química*. 35(1):32-45.
- Maciel-Pinto, M.P., Mudhoo, A., de Alencar-Neves, T., Donizeti-Berni, M., Forster-Carneiro, T. 2018. Co-digestion of coffee residues and sugarcane vinasse for biohythane generation. *Journal of Environmental Chemical Engineering*. 6(1):146-155.
- Madaleno, L.L., Gomes-de-Barros, V., Kesserling, M.A., Rocha-Teixeira, J., Duda, R.M. Alves-de Oliveira, R. 2020. The recycling of biodigested vinasse in an upflow anaerobic sludge blanket reactor is a feasible approach for the conservation of freshwater in the biofuel ethanol industry. *Journal of Cleaner Production*. 262:121196.
- Magalhães, N.C., Silva, A.F., Cunha, P.V., Drewes, J.E., Amaral, M. C. 2020. Role of nanofiltration or reverse osmosis integrated to ultrafiltration-anaerobic membrane bioreactor treating vinasse for the conservation of water and nutrients in the ethanol industry. *Journal of Water Process Engineering*. 36:101338.
- Magalhães, N.C., Silva, A.L.D., Amaral, M.C.S., Lange, L.C., Neta, L.F. 2012. Treatment of vinasse employing ultrafiltration combined with aerobic bioreactor with membrane and post-treatment with nanofiltration allowing it to reuse. *Procedia Engineering*. 44:1923-1924.
- Mainardis, M., Buttazzoni, M., Goi, D. 2020. Up-flow anaerobic sludge blanket (UASB) technology for energy recovery: A review on state-of-the-art and recent technological advances. *Bioengineering*. 7(2):43. Pp. 1-29. doi: 10.3390/bioengineering7020043
- Mancini-Coelho, M.P., Correia, J.E., Vasques, L.I., de Castro Marcato, A.C., de Andrade Guedes, T., Alfaro-Soto, M., Fontanetti, C.S. 2018. Toxicity evaluation of leached of sugarcane vinasse: Histopathology and immunostaining of cellular stress protein. *Ecotoxicology and Environmental Safety*. 165:367-375.
- Manmai, N., Unpaprom, Y., Ponnusamy, V.K., Ramaraj, R. 2020. Bioethanol production from the comparison between optimization of sorghum stalk and sugarcane leaf for sugar production by chemical pretreatment and enzymatic degradation. *Fuel*. 278:118262.
- Marsal, A., Maldonado, F., Cuadros, S., Bautista, M.E., Manich, A.M. 2012. Adsorption isotherm, thermodynamic and kinetics studies of polyphenols onto tannery shavings. *Chemical Engineering Journal* 183:21–29. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2011.12.012>.

- Martín, C., Secades, P.M. 1994. Biomasa lignocelulósica: polímeros constitutivos: procesos biológicos de degradación de la lignina. Centro de Investigaciones Energéticas, Medioambientales y Tecnológicas. Pp. 12-29. Madrid, España.
- Medina, C.A. 2019. Estudio de la ozonización de la vinaza, como tratamiento complementario para la reducción de la carga orgánica. Tesis de Maestría. Universidad Tecnológica Nacional. San Miguel de Tucumán, República Argentina. Pp. 12-19.
- Merino-Núñez, D.I., Valderrama-Lara, J.L. 2017. Influencia de la temperatura y DQO en el tratamiento 'anaeróbico' de vinazas de Cartavio RUM Company usando un biorreactor UASB. Tesis de Licenciatura. Universidad Nacional de Trujillo. Perú. Pp. 15-39.
- Meza-Pérez, A., Méndez-Briones, R., Ilangovan, K. 1996. Floculación-coagulación como pos-tratamiento del efluente de un reactor anaerobio que trata vinazas tequileras. En Congreso Interamericano de Ingeniería Sanitaria y Ambiental. AIDIS. Pp. 1-7.
- Mhatre, S., Srivastava, T., Naik, S., Patravale, V. 2020. Antiviral activity of green tea and black tea polyphenols in prophylaxis and treatment of COVID-19: A review. *Phytomedicine*. 153286. doi: 10.1016/j.phymed.2020.153286
- Montaño-Saavedra, M.D., Paschino-Bissoto, F., Souza, R.A.D., Cárdenas-Concha, V.O., Gaspar-Bastos, R. 2019. Growth of *Desmodesmus subspicatus* green microalgae and nutrient removal from sugarcane vinasse clarified by electrocoagulation using aluminum or iron electrodes. *Dyna*. 86(211):225-232.
- Montoya-Rodríguez, M.I., Quintero-Suárez, J.A. 2005. Esquema tecnológico integral de la producción de bioetanol carburante. Tesis de Licenciatura. Universidad Nacional de Colombia. Pp.10-30,50, 58. Colombia.
- Moodley, P., Kana, E.G. 2019. Bioethanol production from sugarcane leaf waste: Effect of various optimized pretreatments and fermentation conditions on process kinetics. *Biotechnology Reports*. 22:e00329.
- Moraes, B.S., Zaiat, M., Bonomi, A. 2015. 'Anaerobic'³ digestion of vinasse from sugarcane ethanol production in Brazil: Challenges and perspectives. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 44:888-903.
- Moreno-Simón, M. 2020. Dinámica de los polifenoles procedentes de aguas residuales de la industria vinícola durante el proceso de digestión 'anaerobia'³. Tesis de Licenciatura. Universitat Politècnica de Catalunya, España.
- Muñoz, M. 2015. Potencial energético de la vinaza para su utilización como biocombustible. Documento interno. Centro Guatemalteco de Investigación y Capacitación de la Caña de Azúcar. CENGICANA, Guatemala.
- Murthy, Z.V.P., Chaudhari, L.B. 2009. Treatment of distillery spent wash by combined UF and RO processes. *Global NEST Journal*. 11(2):235-240.

³ Digestion is inherently anaerobic, thus, the adjective is unnecessary / La digestión es inherentemente anaerobia por lo que el adjetivo anaerobio (o, peor aún, anaeróbico, que no debiera existir en español) es innecesario (nota de la asesora)

- Nakashima, R.N., de Oliveira-Junior, S. 2020. Comparative exergy assessment of vinasse disposal alternatives: Concentration, 'anaerobic'³ digestion and fertirrigation. *Renewable Energy*. 147:1969-1978.
- Navarro, A.R., Sepúlveda, M.D.C., Rubio, M.C. 2000. Bio-concentration of vinasse from the alcoholic fermentation of sugar cane molasses. *Waste Management*. 20(7):581-585.
- Navarrete-Prida, J.A., Avante-Juárez, R.A., Rubí-Salazar, A.I. Villanueva-Lagar, J.I. Tornero-Applebaum, F.M., Miranda-Cid, L.A. 2016. Producción de azúcar. Prácticas seguras en el sector agroindustria. Secretaría del Trabajo y Previsión Social. Pp. 15-71. Ciudad de México, México.
- Noa-Bolaño, A., Pérez-Ones, O., Zumalacárregui-de-Cárdenas, L., Pérez-de-los-Ríos, J.L. 2020. Simulation of concentration and incineration as an alternative for vinasses' treatment. *Revista Mexicana de Ingeniería Química*. 19(3):1265-1275.
- Ojeda-Armaignac, E., Hing-Cortón, R. 2009. Tratamiento por electrocoagulación y coagulación-floculación de la vinaza de destilerías. *Tecnología Química*. 29:153-161.
- Ojeda-Armaignac, E., Hing-Cortón, R., González-Díaz, Y. 2012. Estudio de la factibilidad del proceso de electrocoagulación para la obtención de sólidos a partir de la vinaza. *Revista CENIC. Ciencias Químicas*. 43(1):1-14.
- Ortiz-Gallardo, M.G. 2017. Reporte de inteligencia tecnológica "bioetanol". Fondo de sustentabilidad energética. SENER. Gobierno de México. Pp. 20-24.
- Pacheco-Basulto, J.Á., Hernández-McConville, D., Barroso-Muñoz, F.O., Hernández, S., Segovia-Hernández, J.G., Castro-Montoya, A.J., Bonilla-Petriciolet, A. 2012. Purification of bioethanol using extractive batch distillation: Simulation and experimental studies. *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*. 61:30-35.
- Padilha, R.S., Ferrari-Lima, A.M., Seixas, F.L., Batistela, V.R., Fávaro, S.L., Hioka, N., Fernandes-Machado, N.R. 2013. Evaluation of ZnO catalyst supported on zeolite NaA in the photocatalytic degradation of vinasse pretreated by coagulation/flocculation. *Chemical Engineering Transactions*. 32:823-828.
- Palacios-Bereche, M.C., Palacios-Bereche, R., Nebra, S.A. 2020. Comparison through energy, exergy and economic analyses of two alternatives for the energy exploitation of vinasse. *Energy*. 197:117231.
- Parsaee, M., Kiani, M.K.D., Karimi, K. 2019. A review of biogas production from sugarcane vinasse. *Biomass and Bioenergy*. 122:117-125.
- Pataro, I.M., Americano-da-Costa, M.V., Joseph, B. 2020. Closed-loop dynamic real-time optimization (CL-DRTO) of a bioethanol distillation process using an advanced multilayer control architecture. *Computers & Chemical Engineering*. 143:107075.
- Pattanakittivorakul, S., Lertwattanasakul, N., Yamada, M., Limtong, S. 2019. Selection of thermotolerant *Saccharomyces cerevisiae* for high temperature ethanol production from molasses and increasing ethanol production by strain improvement. *Antonie van Leeuwenhoek*. 112(7):975-990.
- Paz-Pino, O.L. 2013. Efectividad de un sistema acoplado electrocoagulación-floculación-biológico para tratamiento de fenoles presentes en vinazas. Tesis de Licenciatura. Universidad del Valle. Colombia.

- Peiter, F.S., Hankins, N.P., Pires, E.C. 2019. Evaluation of concentration technologies in the design of biorefineries for the recovery of resources from vinasse. *Water Research*. 157:483-497.
- Percival-Zhang, Y.H., Himmel, M.E., Mielenz, J.R. 2006. Outlook for cellulase improvement: Screening and selection strategies. *Biotechnology Advances*. 24(5):452-481.
- Percival-Zhang, Y.H., Lynd, L.R. 2004. Toward an aggregated understanding of enzymatic hydrolysis of cellulose: Noncomplexed cellulase systems. *Biotechnology and Bioengineering*. 88(7):797-824.
- Perez, M., Rodriguez-Cano, R., Romero, L.I., Sales, D. 2006. 'Anaerobic'³ thermophilic digestion of cutting oil wastewater: Effect of co-substrate. *Biochemical Engineering Journal*. 29(3):250-257
- Phuphaphud, A., Saengprachatanarug, K., Posom, J., Maraphum, K., Taira, E. 2020. Non-destructive and rapid measurement of sugar content in growing cane stalks for breeding programmes using visible-near infrared spectroscopy. *Biosystems Engineering*. 197:76-90.
- Pina, E.A., Palacios-Bereche, R., Chavez-Rodriguez, M.F., Ensinas, A.V., Modesto, M., Nebra, S.A. 2017. Reduction of process steam demand and water-usage through heat integration in sugar and ethanol production from sugarcane—evaluation of different plant configurations. *Energy*. 138:1263-1280.
- Poblete, R., Cortes, E., Salihoglu, G., Salihoglu, N.K. 2020. Ultrasound and heterogeneous photocatalysis for the treatment of vinasse from pisco production. *Ultrasonics Sonochemistry*. 61:104825.
- Prazeres, A.R., Lelis, J., Alves-Ferreira, J., Carvalho, F. 2019. Treatment of vinasse from sugarcane ethanol industry: H₂SO₄, NaOH and Ca(OH)₂ precipitations, FeCl₃ coagulation-flocculation and atmospheric CO₂ carbonation. *Journal of Environmental Chemical Engineering*. 7(4):103203.
- Priharto, N., Ronsse, F., Prins, W., Hita, I., Deuss, P.J., Heeres, H.J. 2019. Hydrotreatment of pyrolysis liquids derived from second-generation bioethanol production residues over NiMo and CoMo catalysts. *Biomass and Bioenergy*. 126:84-93.
- Queiroga, J., Souza, D.F., Nunes, E.H., Rezende-Silva, A.F., Amaral, M.C., Ciminelli, V.S., Vasconcelos, W.L. 2018. Preparation of alumina tubular membranes for treating sugarcane vinasse obtained in ethanol production. *Separation and Purification Technology*. 190:195-201
- Rabassa-Olazábal, G., González-Suárez, E., Pérez-Sánchez, A., Miño-Valdés, J. E., Pérez-Martínez, A. 2016. Procedimiento para la evaluación de oportunidades de negocio en la industria azucarera. *Visión de Futuro*. 20(2):153-174.
- Ramos, P.M., Gil, J.M. 2017. Biorrefinerías basadas en explotaciones agropecuarias y forestales. Palencia, España: Departamento de Ciencias Agrarias y del Medio Natural Instituto Universitario de Investigación en Ciencias Ambientales de Aragón. Palencia, España. Pp. 8-36.
- Ramos-de-Andrade, R., Maugeri-Filho, F., Maciel-Filho, R., Carvalho-da-Costa, A. 2013. Kinetics of ethanol production from sugarcane bagasse enzymatic hydrolysate concentrated with molasses under cell recycle. *Bioresource Technology*. 130:351-359.

- Razmovski, R., Vu urovi, V. 2012. Bioethanol production from sugar beet molasses and thick juice using *Saccharomyces cerevisiae* immobilized on maize stem ground tissue. *Fuel*. 92(1):1-8.
- Reddy, P.K., Vijay, M., Kusuma, M., Ramesh, K.V. 2020. Optimum parameters for production of ethanol from synthetic molasses by *Saccharomyces cerevisiae*. *Materials Today: Proceedings*. 46. DOI: 10.1016/j.matpr.2020.07.100
- Rennola, L., Yépez, C., Bullón, J., Salazar, F. 2007. Tratamiento de las aguas residuales de una destilería mediante el uso de coagulantes y membranas. *Revista Técnica de la Facultad de Ingeniería Universidad del Zulia*. 30(ESPECIAL):11-19.
- Retes-Pruneda, J.L. 2014. Biorremediación de vinazas de la industria tequilera y mezcalera mediante tratamiento fisicoquímico y biológico. Tesis Profesional. Universidad Autónoma de Aguascalientes. México.
- Rincón-Acelas, I.R. 2008. Kinetics of thermophilic anaerobic degradation of cane vinasse. Master's Thesis. UNAM. Mexico City, Mexico (in Spanish). <http://132.248.9.195/ptd2008/septiembre/0632214/Index.html> Accessed 10 Dec 2018.
- Rivas-Siota, S. 2014. Valorización de hemicelulosas de biomasa vegetal Tesis de Doctorado. Universidad de Vigo. Pp. 19-44. España
- Rivière, G.N., Pion, F., Farooq, M., Sipponen, M.H., Koivula, H., Jayabalan, T., Pandard P, Marlair G., Liao X., Baunberger S., Österberg, M. 2021. Toward waste valorization by converting bioethanol production residues into nanoparticles and nanocomposite films. *Sustainable Materials and Technologies*. 28: e00269.
- Rodrigues, C.S., Neto, A.R., Duda, R.M., de Oliveira, R.A., Boaventura, R.A., Madeira, L.M. 2017. Combination of chemical coagulation, photo-Fenton oxidation and biodegradation for the treatment of vinasse from sugar cane ethanol distillery. *Journal of Cleaner Production*. 142:3634-3644.
- Rodríguez-Arreola, A. 2019. Tratamiento de vinaza de tequila por medio de coagulación-floculación y fotocátalisis heterogénea empleando nanopartículas de TiO₂. Tesis. Universidad de Guadalajara, Centro Universitario de los Valles, Ameca, México.
- Rodríguez-Arreola, A., Sanchez-Tizapa, M., Zurita, F., Morán-Lázaro, J.P., Castañeda-Valderrama, R., Rodríguez-López, J.L., Carreon-Alvarez, A. 2020. Treatment of tequila vinasse and elimination of phenol by coagulation–floculation process coupled with heterogeneous photocatalysis using titanium dioxide nanoparticles. *Environmental Technology*. 41(8):1023-1033.
- Rodríguez-García, S.d.I.M. 2015. Extracción y caracterización de bioetanol a partir de biomasa lignocelulósica de caña de azúcar (*Saccharum officinarum* L.). Tesis de Licenciatura en Ingeniería Agroindustrial e Industrias Alimentarias. Universidad Nacional de Piura, Perú. Pp. 4-27.
- Rodríguez-Pérez, S., Bermudez-Savón, R.C., Giardina, P., Fernández-Boizán, M. 2005. Tratamiento combinado (anaerobio-aerobio) para la decoloración de la vinaza de destilería. *Revista CENIC. Ciencias Biológicas*. 36(No. Especial):1-5. <https://www.redalyc.org/pdf/1812/181220525098.pdf>
- Rojas-Zamudio, M.M. 2018. Arranque y operación de un reactor anaerobio de lecho de lodos de flujo ascendente RALLFA para el tratamiento de un efluente

- proveniente del proceso de destilación del alcohol o “vinaza”. Tesis de Licenciatura. UNAM. México.
- Romero-Agreda, G.G. 2010. Procesos de la industria azucarera, Informe de capacidad profesional. Universidad Nacional de Trujillo. Pp. 6-20. Perú.
- Salazar-Batres, K.J. 2017. Tratamiento por biofiltración aerobia sobre cama orgánica del efluente de la digestión ‘anaerobia’³ de vinazas de tequila. Tesis de Maestría. Instituto Politécnico Nacional, Durango, México.
- Sandoval-Rojas, M.E. 2016. Tratamiento de vinazas provenientes de etanol en un reactor de lecho ‘fluidizado’⁴ inverso. Tesis de Doctorado. Universidad Politécnica de Madrid. España.
- Sankaran, S., Khanal, S.K., Jasti, N., Jin, B., Pometto III, A.L., Van Leeuwen, J.H. 2010. Use of filamentous fungi for wastewater treatment and production of high value fungal byproducts: a review. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*. 40(5): 400–449. <https://doi.org/10.1080/10643380802278943>
- Santana-Junior, A.E., Duda, R.M., de Oliveira, R.A. 2019. Improving the energy balance of ethanol industry with methane production from vinasse and molasses in two-stage anaerobic reactors. *Journal of Cleaner Production*. 238:117577.
- Santosh, I., Ashtavinayak, P., Amol, D., Sanjay, P. 2017. Enhanced bioethanol production from different sugarcane bagasse cultivars using co-culture of *Saccharomyces cerevisiae* and *Scheffersomyces (Pichia) stipitis*. *Journal of Environmental Chemical Engineering*. 5(3):2861-2868.
- Seckbach, J., Oren, A., Stan-Lotter, H., 2013. *Polyextremophiles: Life under Multiple Forms of Stress*. Springer Netherlands. 27:9-29.
- Serrano-Meza, A., Garzón-Zúñiga, M.A., Barragán-Huerta, B.E., Estrada-Arriaga, E., Viguera-Cortés, J.M. 2017. Estrategias para mejorar la calidad del efluente de un sistema de tratamiento por digestión ‘anaerobia’³ de vinazas de tequila. En Congreso Nacional AMICA. Villahermosa, Tabasco, México.
- Shivaji-Jagtap, R., Madhukar-Mahajan, D., Ratilal-Mistry, S., Bilaiya, M., Kumar-Singh, R., Jain, R. 2019. Improving ethanol yields in sugarcane molasses fermentation by engineering the high osmolarity glycerol pathway while maintaining osmotolerance in *Saccharomyces cerevisiae*. *Applied Microbiology and Biotechnology*. 103(2):1031-1042.
- Siles, J.A., García-García, I., Martín, A., Martín, M.A. 2011. Integrated ozonation and biomethanization treatments of vinasse derived from ethanol manufacturing. *Journal of Hazardous Materials*. 188(1-3):247-253.
- Simón-Vicente, P. 2016. Estudio del uso de la fotocatalisis para la degradación de materia orgánica y obtención de H₂ de aguas residuales. Tesis de Maestría. Universitat Politècnica de Catalunya. España.
- Singels, A., Jackson, P., Inman-Bamber, G. 2021. Sugarcane. In *Crop Physiology Case Histories for Major Crops*. Academic Press. Pp. 674-713. Estados Unidos.

⁴ Aviso: La palabra **fluidizado** no está en el Diccionario (<https://dle.rae.es/fluidizado?m=form>). El verbo correcto es fluidificar. 1. tr. Hacer fluido algo (<https://dle.rae.es/fluidificar?m=form>) y, por ende, debiera ser fluidificado, pero los españoles aunque sean de nivel doctoral han preferido olvidar su idioma y adoptar el anglicismo *fluidize* (nota de la asesora)

- Singh, A., da Cunha, S., Rangaiah, G.P. 2019. Heat-pump assisted distillation versus double-effect distillation for bioethanol recovery followed by pressure swing adsorption for bioethanol dehydration. *Separation and Purification Technology*. 210:574-586.
- Siqueira, P.F., Karp, S.G., Carvalho, J.C., Sturm, W., Rodríguez-León, J.A., Tholozan, J.L., Singhanía, R.R., Pandey, A., Soccol, C.R. 2008. Production of bio-ethanol from soybean molasses by *Saccharomyces cerevisiae* at laboratory, pilot and industrial scales. *Bioresource Technology*. 99(17):8156-8163.
- Sitepu, I.R., Enriquez, L.L., Nguyen, V., Doyle, C., Simmons, B.A., Singer, S.W., Boundy-Mills, K. 2019. Ethanol production in switchgrass hydrolysate by ionic liquid-tolerant yeasts. *Bioresource Technology Reports*. 7:100275.
- Soares-Santos, P., Zaiat, M., Oller-do-Nascimento, C.A., Tadeu-Fuess, L. 2019. Does sugarcane vinasse composition variability affect the bioenergy yield in anaerobic systems? A dual kinetic-energetic assessment. *Journal of Cleaner Production*. 240:118005.
- Soto-Álvarez, M.L. 2015. Extracción y purificación de compuestos fenólicos a partir de subproductos de destilería de vino. Tesis Doctoral. Universidad de Vigo. P. p: 48, 80, 108. España.
- Suhaili, N., Cárdenas-Fernández, M., Ward, J.M., Lye, G.J. 2019. Potential of sugar beet vinasse as a feedstock for biocatalyst production within an integrated biorefinery context. *Journal of Chemical Technology & Biotechnology*. 94(3):739–751. <https://doi.org/10.1002/jctb.5819>.
- Sun, Q., Chen, B., Li, Y., Yuan, G., Xu, Z., Guo, X., Yang, L. 2019. Enhanced separation of coal bed methane via bioclathrates formation. *Fuel*. 243:10–14. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2019.01.045>.
- Susial-Badajoz, P., Pérez-Báez, S.O., López-Pérez, L. 2001. Estudio y análisis económico en el tratamiento de vinazas. *Tecnología del Agua*. 21(208): 48-56.
- Syaichurrozi, I., Sarto, S., Sediawan, W.B., Hidayat, M. 2020. Mechanistic model of electrocoagulation process for treating vinasse waste: Effect of initial pH. *Journal of Environmental Chemical Engineering*. 8(3):103756.
- Terán-Solíz, M.C. 2016. Estudio de la aplicación de procesos de oxidación avanzada a aguas contaminadas. Tesis de Licenciatura. Universitat Politècnica de Catalunya. España.
- Tesfaw, A., Oner, E.T., Assefa, F. 2021. Optimization of ethanol production using newly isolated ethanologenic yeasts. *Biochemistry and Biophysics Reports*. 25:100886.
- Tgarguifa, A., Abderafi, S., Bounahmidi, T. 2017. Modeling and optimization of distillation to produce bioethanol. *Energy Procedia*. 139:43-48.
- Torres-Ramos, R., Montero-Alpírez, G., Beleño-Cabarcas M.T., Toscano-Palomar, L., Pérez-Pelayo, L.J. 2015. Lignina obtenida de residuos agrícolas como biocombustible de tercera generación. *Ciencia y Tecnología*. 15:151-164.
- Troiano, M., Cammarota, A., Tregambi, C., Chirone, R., Salatino, P., Solimene, R. 2020. Fluidized bed combustion of solid lignin-rich residues from bioethanol production. *Powder Technology*. 371:170-179.
- Utami, I., Redjeki, S., Astuti, D.H. 2016. Biogas production and removal COD-BOD and TSS from wastewater industrial alcohol (vinasse) by a modified UASB bioreactor. In *MATEC Web of Conferences*, 58:1–5.

- <https://doi.org/10.1051/mateconf/20165801005>.
- Velásquez-Ramírez, D. 2008. Análisis de la capacidad tecnológica de Colombia en la producción de bioetanol a partir de la caña de azúcar utilizando la metodología del Benchmarking. Tesis de Licenciatura. Universidad del Valle. Colombia. Pp. 22-32.
- Vilar, D.S., Carvalho, G.O., Pupo, M.M., Aguiar, M.M., Torres, N.H., Américo, J.H., Cavalcanti, E.B., Eguiluz, K.I.B., Salazar-Banda, G.R., Leite, M.S, Ferreira, L.F. 2018. Vinasse degradation using *Pleurotus sajor-caju* in a combined biological–electrochemical oxidation treatment. *Separation and Purification Technology*. 192:287-296.
- Villalobos-Castillejos, F. 2009. Disminución de la materia orgánica biodegradable presente en vinazas mezcaleras mediante digestión ‘anaerobia’³. Tesis Profesional. Universidad Tecnológica de la Mixteca. México. Pp. 5-15.
- Villarroel, A.E. 2006. Aplicación de técnicas para la clarificación del jugo de caña (*Saccharum officinarum*) como mejorador de sus características organolépticas Tesis de Licenciatura. Universidad Técnica de Ambato. Pp. 14-16. Ecuador.
- Walker, G.M., Walker, R.S. 2018. Enhancing yeast alcoholic fermentations. *Advances in Applied Microbiology*. 105:87-129.
- Wang, J., Chen, H. 2020. Catalytic ozonation for water and wastewater treatment: recent advances and perspective. *Science of the Total Environment*. 704:135249.
- Wu, R., Chen, D., Cao, S., Lu, Z., Huang, R. 2020. Enhanced ethanol production from sugarcane molasses by industrially engineered *Saccharomyces cerevisiae* via replacement of the PHO₄ gene. *RSC Advances*. 10(4):2267–2276.
- Xu, K., Yu, L., Bai, W., Xiao, B., Liu, Y., Lv, B., Li, C. 2018. Construction of thermo-tolerant yeast based on an artificial protein quality control system (APQC) to improve the production of bio-ethanol. *Chemical Engineering Science*. 177:410-416.
- Yagual-Romero, A.P. 2017. Diseño y construcción de un ‘Equipo Didáctico de Electrocoagulación’ para el tratamiento de vinaza proveniente de una destilería. Tesis de Licenciatura. Facultad de Ingeniería Química, Universidad de Guayaquil, Ecuador.
- Yanguí, A., Abderrabba, M. 2018. Towards a high yield recovery of polyphenols from olive mill wastewater on activated carbon coated with milk proteins: experimental design and antioxidant activity. *Food Chemistry*. 262:102–109. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2018.04.091>.
- Yao, S., Nie, S., Yuan, Y., Wang, S., Qin, C. 2015. Efficient extraction of bagasse hemicelluloses and characterization of solid remainder. *Bioresource Technology*. 185:21-27.
- Yavuz, Y. 2007. EC and EF processes for the treatment of alcohol distillery wastewater. *Separation and Purification Technology*. 53(1):135-140.
- Zayas, T., Rómero, V., Salgado, L., Meraz, M., Morales, U. 2007. Applicability of coagulation/flocculation and electrochemical processes to the purification of biologically treated vinasse effluent. *Separation and Purification Technology*. 57(2):270-276.

- Zhang, S., Wang, J., Jiang, H. 2020. Microbial production of value-added bioproducts and enzymes from molasses, a by-product of sugar industry. *Food Chemistry*. 128860.
- Ziati, M., Khemmari, F., Cherifi, O., Didouche, F.Y. 2017. Removal of polyphenols from olive mill wastewater by adsorption on activated carbon prepared from peach stones. *Revue Roumaine de Chimie*. 62(11):865-874.