



UNAM

FACULTAD DE QUÍMICA

**REAPROVECHAMIENTO TERMOFÍLICO DE LAS VINAZAS
DE UNA PLANTA COOPERANTE PRODUCTORA DE
BIOETANOL**

TESIS

**QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE
INGENIERO QUÍMICO**

**PRESENTA
SALVADOR PÉREZ BARRERA**



Ciudad Universitaria, CDMX 2023



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

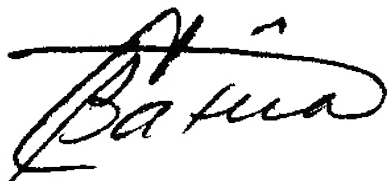
El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición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

Jurado asignado:

PRESIDENTE	Dra. María del Carmen Durán Domínguez de Bazúa
VOCAL	M. en C. Rolando Salvador García Gómez
SECRETARIO	QFB Juan Manuel Díaz Álvarez
1er SUPLENTE	Dr. José Agustín García Reynoso
2do SUPLENTE	Dra. Marisela Bernal González

SITIO DONDE SE DESARROLLÓ EL TEMA:

Laboratorios 301, 302 y 303 de Ingeniería Química Ambiental y de Química Ambiental, Departamento de Ingeniería Química de la Facultad de Química, UNAM, CDMX, México y uso de los servicios digitales de la UNAM debido a la pandemia de SARS-CoV-2.



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



Supervisor técnico
Dra. en Ing. Marisela
Bernal González



Sustentante
Salvador Pérez Barrera

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
Salvador Pérez Barrera

Reconocimientos institucionales

A mi *Alma mater* la UNAM

A la Dirección General de Asuntos del Personal Académico, DGAPA, de la UNAM a través del proyecto Programa de Apoyo a Proyectos para Innovar y Mejorar la Educación (UNAM-DGAPA-PAPIME) Clave PE101822 Innovaciones de docencia para la asignatura Estancia Académica para la carrera de Ingeniería Química ante la problemática del Covid 19: Creación de ejemplos para solucionar problemas reales mediante el empleo de programas de cómputo

Intercambio cultural

Beca de Excelencia Académica

Agradecimientos

A la UNAM y Facultad de Química, por abrirme las puertas siempre de manera generosa para mi formación profesional y académica, exigiéndome a cambio estudio y trabajo.

A la Dra. Marisela, tutora de este proyecto, por sugerirme y permitirme desarrollar este tema de tesis, por su apoyo, interés y tiempo dedicado para culminar este trabajo.

A la Dra. María del Carmen, directora y tutora de este proyecto, por permitirme ingresar a su equipo de trabajo y desarrollar esta investigación, por su constante motivación, entusiasmo, recomendaciones y orientación.

A los profesores sínodos designados para revisar y aprobar esta investigación, les agradezco sus valiosos comentarios que enriquecieron el documento final y me permitieron ampliar mis conocimientos.

A todas aquellas personas que me han impulsado a lograr mis metas y objetivos y por cuestiones de espacio me es imposible mencionar como merecen, gracias por su apoyo y motivación.

Dedicatoria

A mis padres África y Salvador quienes han sido pilares fundamentales de mi formación académica, profesional y, principalmente, personal. Siempre comprometidos con mi crecimiento, me han impulsado a superarme y apoyado a alcanzar cualquier meta que me he propuesto. Lo han dado todo con el único objetivo de verme realizado y feliz. Este logro se los debo y comparto con ustedes.

A mis hermanos Karen, Alejandro y Ximena, cada uno tiene una luz propia que me ha iluminado y acompañado en cada decisión que he tomado.

A mi familia por todo el cariño y palabras de aliento que me han impulsado a superarme y ser un ejemplo de estudio y compromiso.

A mis amigos y compañeros por compartir tantas experiencias que hemos vivido durante esta etapa, sin ellos no hubiese sido lo mismo, por su compañía, consejos y lealtad.

A mis profesores de carrera que en todo momento mostraron compromiso con mi formación académica.

Finalmente, agradezco a la vida el permitirme aprender, disfrutar y cumplir una meta más.

“Por mi raza hablará el espíritu”

Índice

	Página
Declaratoria	III
Reconocimientos institucionales	IV
Agradecimientos	V
Dedicatoria	VI
Glosario	XII
Resumen	XVII
<i>Abstract</i>	XVIII
Capítulo I.	
1.1.	1
1.2.	2
1.3.	4
1.3.1.	6
1.3.2.	6
Capítulo II.	
2.1.	8
2.1.1.	9
2.1.2.	10
2.2.	11
2.3.	14
2.3.1.	14
2.3.2.	15
2.4.	17
2.4.1.	17
2.4.2.	17
2.4.3.	21
2.4.4.	22
2.4.5.	22
2.5.	24
2.5.1.	25
2.5.2.	26
2.5.3.	28
2.6.	28
2.7.	31
2.8.	36
2.9.	38
2.9.1.	39
2.9.2.	39
	41

	Página	
Capítulo III.	Estudio de factibilidad	42
3.1.	Descripción y localización de la planta industrial	43
3.2.	Corriente de entrada	44
3.3.	Diseño de la planta piloto	46
3.3.1.	Primera Etapa: Producción de carbón activado de bagazo de caña	46
3.3.2.	Segunda etapa: Tratamiento de vinaza en un reactor anaerobio tipo RALLFA	47
3.3.3.	Tercera etapa: Adsorción de polifenoles en una torre empacada con carbón activado de bagazo de caña	48
3.3.4.	Cuarta etapa: Desorción de polifenoles	50
3.3.5.	Quinta etapa: Tratamiento de las vinazas pos-tratadas	51
3.3.6.	Propuesta de diagrama de flujo	53
3.3.7.	Simulación del proceso en Aspen Plus®	54
3.4.	Estudio de viabilidad	58
3.4.1.	Viabilidad de mercado	59
3.4.2.	Viabilidad técnica	59
3.4.3.	Viabilidad financiera	60
3.4.4.	Viabilidad ambiental y social	60
3.5.	Estudio económico	61
3.5.1.	Simulación del proceso a escala industrial empleando el programa Aspen Plus®	61
3.5.2.	Costos variables	62
3.5.2.1.	Costos de materia prima	62
3.5.2.2.	Costos de servicios	63
3.5.2.3.	Costo de mano de obra	63
3.5.2.4.	Costo de supervisiones operativas y asistencia administrativa	64
3.5.2.5.	Costo del mantenimiento y muestreo	64
3.5.3.	Costos fijos	65
3.5.3.1.	Costos de financiamiento	65
3.5.3.2.	Costos de investigación y desarrollo	65
3.5.3.3.	Costos de los equipos	65
3.5.4.	Costos totales de explotación	66
3.5.5.	Ingresos	67
Capítulo IV.	Metodología	70
4.1.	Secuencia para realizar la investigación	71
Capítulo V.	Resultados y discusión	73
Capítulo VI.	Conclusiones y recomendaciones	76
6.1.	Conclusiones	77
6.2.	Recomendaciones	79
	Anexos	81
Anexo 1a.	Estimación del costo de las bombas de alimentación	81
Anexo 1b.	Estimación de costo del reactor tipo RALLFA	84
Anexo 2.	Disposición de los residuos generados	86

	Página
Bibliografía	87

Índice de tablas

	Página	
Tabla 2.1.	Composición de melazas provenientes de la caña de azúcar (Vega-Baudrit et al., 2008)	15
Tabla 2.2.	Compendio de características de vinazas de caña de azúcar (Contreras-Contreras, 2019)	18
Tabla 2.3.	Límites permisibles de contaminantes en aguas vertidas a bienes nacionales de la NOM-001-SEMARNAT-2021 (DOF, 2022)	19
Tabla 2.4.	Límites permisibles para metales y cianuros de la NOM-001-SEMARNAT-2021 (DOF, 2022)	20
Tabla 2.5.	Límites máximos permisibles a descargas de aguas a colectores de la NOM-002-SEMARNAT-1996 (DOF, 1996)	21
Tabla 2.6.	Límites máximos permisibles de aguas tratadas de la NOM-003-SEMARNAT-1997 (DOF, 1997)	22
Tabla 2.7.	Clasificación de los flavonoides (Cartaya y Reynaldo, 2001; Escamilla-Jiménez, 2009)	30
Tabla 2.8.	Comparación de extracciones en microdispositivos vs. extracción por lotes (Ortega-Becerril, 2020)	33
Tabla 2.9.	Comparación de extracciones en microdispositivos vs. extracción por lotes vs. extracciones asistidas por ultrasonido, <i>UAE</i> en inglés (Ortega-Becerril, 2020)	34
Tabla 2.10.	Comparación de extracciones asistidas por microondas de compuestos fenólicos (elaboración propia)	34
Tabla 2.11.	Comparación de extracciones asistidas por ultrasonido de compuestos fenólicos (elaboración propia, modificada de Ramón y Gil-Garzón, 2021)	35
Tabla 2.12.	Rendimientos de extracciones hechas con carbón activado de bagazo de caña de azúcar, CAB	36
Tabla 2.13.	Ventajas y desventajas de varios métodos de separación (elaboración propia)	37
Tabla 2.14.	Resultados de purificación tras el paso por una columna de adsorción para los compuestos fenólicos	40
Tabla 2.15	Comparación de microfiltración y ultrafiltración para la extracción de compuestos fenólicos (Beltrán et al., 2016)	41

		Página
Tabla 3.1.	Propiedades de las vinazas diluidas (Contreras-Contreras, 2019)	45
Tabla 3.2.	Eficiencias y características del tratamiento de vinazas mediante procesos combinados (tomada de Correa-López, 2022)	52
Tabla 3.3.	Descripción de corrientes y equipos	54
Tabla 3.4.	Balance de materia del proceso	54
Tabla 3.5.	Costos de los equipos principales	57
Tabla 3.6.	Balance de materia obtenido con Aspen Plus®	58
Tabla 3.7.	Costos de servicios	63
Tabla 3.8.	Costo de mano de obra	64
Tabla 3.9.	Costo de los equipos principales	66
Tabla 3.9bis.	Costo de todos los equipos principales y de sus accesorios	66
Tabla 3.10.	Costos totales de explotación	67
Tabla 3.11.	Ingresos por subproductos	68
Tabla 3.12.	Costos e ingresos	69
Tabla A-1.	Propiedades de la motobomba 1	82
Tabla A-2.	Propiedades de la motobomba 2	83
Tabla A-3.	Propiedades del biorreactor tipo RALLFA	85

Índice de figuras

		Página
Figura 2.1.	Vía metabólica de la fermentación verdadera o alcohólica (De-la-Trinidad-Benítez, 2021)	11
Figura 2.2.	Esquema simplificado del proceso de obtención de bioetanol a partir de melazas de caña de azúcar (Modificado de Contreras-Contreras, 2019; Montoya-M. et al., 2005)	12
Figura 2.3.	Esquema de operación de un reactor anaerobio de lecho de lodos de flujo ascendente o RALLFA (Ojeda-Berra, 2008)	23
Figura 2.4.	Estructura química de polifenoles y fenol (Anónimo, 2020)	25
Figura 2.5.	Beneficios a la salud de los compuestos fenólicos (Elaboración propia con información de Gimeno-Creus, 2004; Ramón y Gil-Garzón, 2021)	27
Figura 2.6.	Compuestos fenólicos encontrados por CLAR (HPLC en inglés) en vinaza de caña de azúcar (Freitas et al., 2018)	28
Figura 2.7.	Estructura de un flavonoide con numeración y	30

	Página
	especificación de cada heterociclo (Escamilla-Jiménez, 2009)
Figura 2.8.	Estructura de los tres principales flavonoides (Grotewold, 2006) 31
Figura 2.9.	Reducción de reactivo de Folin-Ciocalteu debido a la oxidación de compuestos fenólicos (Ford et al., 2019) 39
Figura 3.1.	Localización de la planta piloto 43
Figura 3.2.	Proceso de producción del CA por activación química con H ₃ PO ₄ (Solís-Fuentes y col., 2012) 46
Figura 3.3.	Influencia del pH en la eliminación de polifenoles (tomada de Gaspar-Mendoza, 2021) 49
Figura 3.4.	Influencia de la temperatura en la eliminación de polifenoles (tomada de Gaspar-Mendoza, 2021) 50
Figura 3.5.	Proceso de desorción de polifenoles y reactivación de carbón agotado 51
Figura 3.6.	Diagrama de flujo de proceso, DFP 53
Figura 3.7.	DPF programado en Aspen Plus® 55
Figura 4.1.	Diagrama de etapas de la investigación 62
Figura A-1.	Curva característica de una motobomba centrífuga a velocidad constante de 3450 rev/min 81
Figura A-2.	Precio de una motobomba centrífuga incluida su base de acero y acoplamiento 82
Figura A-3.	Precio de un reactor incluidos sus componentes como agitador, tanque, termómetro, manejo y soporte, enchaquetado y caja de control 84

Glosario

Término	Definición
Ác.	Ácido
ADP	Adenosina difosfato (Adenosine Diphosphate)
AG	Ácido gálico
AGV	Ácidos grasos volátiles
Alcohol de fusel	El aceite de fusel también llamado alcohol de fusel está formado por alcoholes de orden superior (es decir, alcoholes con más de dos átomos de carbono), formado por fermentación y presente en sidra, aguamiel, cerveza, vino y bebidas espirituosas. Los componentes son principalmente: 1-propanol, 2-propanol, butanol (varios isómeros), alcohol amílico, furfural (Wikipedia, 2023)
Amb	Ambiente
ATP	Trifosfato de adenosina (Adenosine Triphosphate)
Azeotropía	Propiedad de una mezcla líquida de dos o más componentes que posee un único punto de ebullición constante y fijo, y que al pasar al estado vapor se comporta como un líquido puro, o sea como si fuese un solo componente (Wikipedia, 2023)
Bm-1	Bomba centrífuga de recirculación
Bm-2	Bomba centrífuga de alimentación
Bm-3	Bomba centrífuga
Bm-4	Bomba centrífuga
C	Concentración
Caña de azúcar	Saccharum officinarum L. La caña de azúcar es una especie de hierba perenne alta que se utiliza para la producción de azúcar. Las plantas miden de 2 a 6 m de altura con tallos robustos, articulados y fibrosos que son ricos en sacarosa, que se acumula en los entrenudos del tallo (Enríquez-Poy, 2021, 2022).
C ₂ H ₅ OH	Etanol
C ₆ H ₁₂ O ₆	Glucosa
CA	Carbón activado
CaCO ₃	Carbonato de calcio
CH ₂ =CH ₂	Etano
CH ₃ CH ₂ OH	Etanol
CH ₄	Metano
CLAR	Cromatografía de Líquidos de Alta Resolución
CML	N ^ε - carboximetilisine en inglés
CO ₂	Dióxido de carbono
COFEPRIS	Comisión Federal para la Protección contra Riesgos Sanitarios (México)
COI	Consejo Oleícola Internacional (Madrid, España)

Término	Definición
COMARNAT	Comité Consultivo Nacional de Normalización de Medio Ambiente y Recursos Naturales (México)
D-1	Desorbedor
DBO	Demanda bioquímica de oxígeno
DFP	Diagrama de flujo de proceso
DQO	Demanda química de oxígeno
Drenes	Dren es cualquier dispositivo que facilita la salida de líquidos o exudados al exterior del organismo, es decir, el drenaje. Estos sistemas de drenaje se refieren básicamente a cuestiones de salud y no de disposición y/o envío de aguas residuales hacia otros lugares
EAG	Equivalentes de ácido gálico
EAM	Extracción asistida por microondas
EÁT	Equivalentes de ácido tánico
ECC	Extracción con calor convencional
EFS	Extracción con Fluidos Supercríticos (por su siglas en inglés <i>SFE Supercritical Fluid Extraction</i>)
EFS	Extracción en Fase Sólida (por su siglas en inglés <i>SPE Solid Phase Extraction</i>)
ELL	Extracción líquido-líquido
ELP	Extracción con Líquidos Presurizados (por su siglas en inglés <i>PLE Pressurized Liquid Extraction</i>)
EM	Extracción en microdispositivos
eq	Equivalentes
ESL	Extracción sólido-líquido
EAU	Extracción asistida por ultrasonido (por su siglas en inglés <i>UAE Ultrasound Assisted Extraction</i>)
F	Frecuencia
FC	Folin-Ciocalteu
Fig.	Abreviatura de la palabra figura
g	Gramos
GAE	Equivalentes de ácido gálico por sus siglas en inglés
Glúcido	Glúcido es un nombre derivado de la palabra glucosa y se da a los también llamados hidratos de carbono o carbohidratos, erróneamente conocidos como sacáridos ya que no se derivan de la sacarosa sino de la glucosa. De hecho, la sacarosa es un glúcido formado por glucosa y fructosa (nota de la asesora)
H ⁺	Protón
H ₂ O	Agua
HPLC	<i>High performance liquid chromatography</i>
ICIDCA	Instituto Cubano de Investigaciones de los Derivados de la Caña de Azúcar (Cuba)
K	Kjeldahl
K	Potasio

Término	Definición
kg	Kilogramo
kHz	Kiloherz
kJ	Kilojoules
kmol	Kilomol
L	Litro
L.D.	Límite de detección
LLE	Extracción Líquido-Líquido por sus siglas en inglés (<i>Liquid-Liquid Extraction</i>)
LLME	Microextracción Líquido-Líquido por sus siglas en inglés (<i>Liquid-Liquid Microextraction</i>)
LPME	Microextracción en Fase Líquida por sus siglas en inglés (<i>Liquid Phase Microextraction</i>)
MAE	Extracción asistida por microondas (<i>Microwave-Assisted Extraction</i>)
Melanoidinas	Las melanoidinas son estructuras poliméricas constituidas por poliglúcidos ¹ , proteínas y productos de degradación de ácidos fenólicos y productos de la reacción de Maillard que están presentes en muchos alimentos y bebidas, como la bebida de café pudiendo llegar a representar el 30% de los sólidos totales dependiendo del tipo de tostado empleado. Se forman al someter determinados alimentos a altas temperaturas. Esto se produce cuando una molécula de hidrato de carbono o glúcido y un aminoácido reaccionan. Este proceso se conoce con el nombre de reacción de Maillard (los dulces de leche son un ejemplo clásico de formación de melanoidinas entre la lactosa y las proteínas de la leche)
mg	Miligramos
MHz	Megahertz
min	Minuto
mL	Mililitro
n	Número de muestras
N	Nitrógeno
n.d.	No determinado
NA	No aplica
NC	No cuantificable
ND	No disponible
nm	Nanómetros
-OH	Grupo hidroxilo
P	Potencia
pH	Potencial de hidrógeno
P _i	Representa a un grupo de fosfato inorgánico (PO ₄ ⁻³) (en inglés <i>Inorganic Phosphate</i>)

¹ Ver definición de glúcido en las páginas anteriores (nota de la asesora)

Término	Definición
Polifenoles	Compuestos que presentan una estructura molecular caracterizada por la presencia de uno o varios anillos fenólicos. Los principales grupos de polifenoles son: Ácidos fenólicos (derivados del ácido hidroxibenzoico o del ácido hidroxicinámico), estilbenos, lignanos, alcoholes fenólicos y flavonoides. “Numerosos estudios han avalado las propiedades biológicas de los polifenoles ^{1,2,3,48,49} . Estos efectos son fundamentalmente consecuencia de sus propiedades antioxidantes que pueden usualmente justificar sus acciones vasodilatadoras y vasoprotectoras, así como sus acciones antitrombóticas, antilipémicas, antiateroscleróticas, antiinflamatorias y antiapoptóticas. ... Los polifenoles son, en realidad, los principales antioxidantes de la dieta y su ingesta es 10 veces superior a la de la vitamina C y 100 veces superior a la de la vitamina E o los carotenoides ⁵⁰ . Algunos alimentos se sabe que destacan por su alto contenido en polifenoles. Entre ellos el té, el vino tinto y el cacao. Los polifenoles contenidos en estos alimentos y bebidas son altamente efectivos como defensa antioxidante ⁵¹ . Flavonoides como la catequina o la quercetina pueden directamente neutralizar especies reactivas de oxígeno (<i>ROS</i> , en inglés <i>-reactive oxygen species-</i>), como el O_2^- , el H_2O_2 ⁵² o el $HClO$ ⁵³ . La quercetina y la miricetina son los flavonoides que poseen mayor actividad neutralizadora de radicales libres. El grupo fenólico que poseen puede actuar directamente capturando electrones desapareados de las <i>ROS</i> y genera así especies menos reactivas ⁵⁴ .” (tomado a la letra de Quiñones et al., 2012, donde pueden verse las referencias citadas)
ppm	Partes por millón
RA-1	Reactor de adsorción 1
RA-2	Reactor de adsorción 2
RA-3	Reactor de adsorción 3
RALLFA	Reactor anaerobio de lecho de lodos de flujo ascendente
Reactivo FC	Reactivo de Folin-Ciocalteu
S	Desviación estándar por sus siglas en inglés (<i>Standard deviation</i>)
S-1	Tanque de separación
SDT	Sólidos disueltos totales
SEMARNAT	Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (México)
SO_4^{2-}	Sulfatos
SST	Sólidos suspendidos totales
SSV	Sólidos suspendidos volátiles
ST	Sólidos totales
SPE	Solid-phase extraction

Término	Definición
SVT	Sólidos volátiles totales
T	Temperatura
t	Tiempo
T _{AMB}	Temperatura ambiente
TE-1	Torre de enfriamiento
TK-1	Tanque de alimentación
Trolox	Ácido 6-hidroxi-2,5,7,8-tetrametilcroman-2-carboxílico es un análogo de la vitamina E
<i>UAE</i>	Extracción Asistida por Ultrasonido por sus siglas en inglés (<i>Ultrasound Assisted Extraction</i>)
<i>UASB Reactor</i>	Reactor RALLFA por sus siglas en inglés (<i>Upflow Anaerobic Sludge Blanket Reactor</i>)
UV	Ultravioleta
V	Volumen
VT	Volumen total
W	Watts
°C	Grados Celsius

Símbolos

°	Grados
%	Porcentaje
+	Más
-	Menos
±	Más/ Menos
=	Igual
<	Menor que
>	Mayor que
ΔH	Entalpía
↔	Reacción reversible
→	Reacción irreversible
μg	Microgramo
μS	MicroSiemens

Notas:

Esta tesis usa el punto decimal de acuerdo con la norma oficial mexicana correspondiente (DOF, 2009). Las abreviaturas derivadas de las locuciones latinas *et cetera* y *et altere*, etc. y et al. van sin cursivas por su uso frecuente. Las unidades °C y % van junto al guarismo o número correspondiente

Resumen

El proceso de producción de etanol juega un papel de suma importancia en la economía mundial y mexicana. Se estima que por cada litro de etanol producido se obtienen alrededor de 12 litros de subproductos fluidos llamados vinazas las cuales son ricas en materiales antioxidantes como los polifenoles y en compuestos carbonosos biodegradables que pueden convertirse en metano. Estudios recientes han demostrado que los polifenoles tienen un impacto positivo sobre aquellos pacientes que han aumentado su ingesta de estos compuestos. Tienen efectos benéficos debido a su poder antioxidante que derivan en sus acciones vasodilatadoras y vasoprotectoras. El objetivo de esta investigación se basa en el reaprovechamiento de las vinazas de caña de azúcar por medio de métodos de bajo costo en cuanto a su construcción, operación y mantenimiento. Se sabe que los reactores anaerobios son una excelente opción para producir metano y en esta investigación se continúa con la línea de proponer una operación unitaria de separación para obtener los polifenoles, la adsorción-desorción con carbón activado. Como es una investigación bibliográfica que puede dar pie a un estudio económico que permita conocer el alcance de dicho proceso y su posible implementación a nivel industrial, se dan las bases para realizarlo en un futuro cercano. Las operaciones unitarias seleccionadas fueron la biodigestión en un reactor anaerobio de lecho de lodos de flujo ascendente, RALLFA o *UASB* en inglés, como pretratamiento para convertir los compuestos carbonosos biodegradables en biogás rico en metano utilizable en la propia planta de producción de etanol, la adsorción usando carbón activado producido con el bagazo de la caña de azúcar por la ventaja económica de que este insumo se tiene en la planta productora de etanol y, finalmente, la desorción usando potasa con agua caliente para desorber los polifenoles de la columna reactivándola para una nueva adsorción. Se encontró en la literatura consultada que el proceso puede ser rentable desde la primera etapa que incluye el uso del reactor tipo RALLFA y la segunda etapa con la adsorción y subsecuente desorción de los polifenoles en carbón activado que puede ser considerado como la segunda etapa.

Palabras clave: Caña de azúcar, melazas, producción del bioetanol, metano y antioxidantes, vinazas, fenoles y polifenoles

Abstract

The ethanol production process plays a very important role in the world and Mexican economies. It is estimated that for every liter of ethanol produced, around 12 liters of fluid byproducts called vinasse or stillage are obtained, which are rich in antioxidant materials such as polyphenols and biodegradable carbonaceous compounds that can be converted into methane. Recent studies have shown that polyphenols have a positive impact on those patients who have increased their intake of these compounds. They have beneficial effects due to their antioxidant power that results in their vasodilatory and vasoprotective actions. The objective of this research is based on the reuse of sugarcane vinasses through low-cost methods in terms of construction, operation, and maintenance. It is known that anaerobic reactors are an excellent option to produce methane and this research continues with the line of proposing a unitary separation operation to obtain polyphenols, adsorption-desorption with activated carbon. As it is a bibliographic research that can lead to an economic study that would allow to know the scope of said process and its possible implementation at an industrial level, the bases are given to carry it out in the near future. The selected unit operations were biodigestion in an upflow anaerobic sludge bed reactor, RALLFA in Spanish or UASB in English, as pretreatment to convert biodegradable carbonaceous compounds into methane-rich biogas usable in the ethanol production plant itself, adsorption using activated carbon produced with sugar cane bagasse due to the economic advantage that this input is available in the ethanol production plant and, finally, desorption using potash with hot water to desorb the polyphenols from the column, reactivating it for a new adsorption. It was found in the literature review that the process can be profitable from the first stage that includes the use of the RALLFA or UASB type reactor and the second stage with the adsorption and subsequent desorption of polyphenols on activated carbon that can be considered as the second stage.

Keywords: *Sugar cane, molasses, bioethanol production, methane and antioxidants, vinasses, phenols and polyphenols*

CAPÍTULO I.
PROBLEMÁTICA

1.1. Introducción al problema

Desde hace varias décadas los residuos agroindustriales han sido un foco de atención para investigadores a nivel mundial. En la década de los años 70 del Siglo Veinte, una parte importante de los biotecnólogos de todo el mundo enfocaron sus investigaciones hacia la utilización y aprovechamiento de los residuos y subproductos agroindustriales para la producción de compuestos útiles como insumos de otros procesos industriales (Da-Silva-Neto et al., 2020). A partir del presente siglo la prioridad se enfoca a la producción de bioenergéticos y a la elaboración de nuevas formulaciones de alimentos para animales (Ajila et al., 2012; Liguori et al., 2013; Rogers et al., 2015). Desde este marco de referencia, se puede plantear que los residuos industriales y agrícolas, como materiales en estado sólido o líquido que se generan a partir del consumo directo de productos primarios o de su industrialización y que ya no son de utilidad para el proceso que los produjo son susceptibles de aprovechamiento o transformación para generar otro producto con valor económico, de interés comercial y/o social (Saval, 2012).

Uno de los subproductos de la obtención del azúcar de caña (*Saccharum officinarum*) son las mieles incristalizables o finales (o también llamadas melazas), las cuales son empleadas como fuente de carbono para producir alcohol etílico mediante un proceso bioquímico anaerobio llamado fermentación por Louis Pasteur. Para concentrar el mosto fermentado se emplea la destilación. En la primera columna de esta operación unitaria se generan entre 12 y 14 litros de subproductos líquidos por litro de alcohol destilado ya que son torres agotadoras que reciben vapor vivo, como se llama coloquialmente al vapor de agua puesto en contacto directo con el material a calentar (López et al., 2018). Este subproducto es conocido con el nombre de vinazas ya que la corriente de entrada a la primera columna de destilación es conocida como vino. Esta corriente líquida contiene, principalmente, compuestos orgánicos como los polifenoles y fenoles producidos por la descomposición del azúcar, sales minerales, materia orgánica de la caña,

que no fue metabolizada por las levaduras y dentro de los polifenoles destacan sustancias parcialmente aromáticas y alifáticas polimerizadas aleatoriamente y de elevada masa molecular, que le confieren su característico color café y aroma dulce (Quintero, 2004). Se caracteriza por tener un pH ácido en un intervalo de 3 a 4, un elevado contenido de materia orgánica e inorgánica disuelta, coloidal y en suspensión (Tabla 1), la cual medida como demanda química de oxígeno (DQO), está entre 50-120 g DQO/L; sulfatos entre 4 a 6 g SO_4^{2-} /L (provenientes del ácido sulfúrico adicionado durante la fermentación para promover el desarrollo de la levadura *Saccharomyces cerevisiae*, responsable de la producción de etanol a partir de glucosa); potasio (K) entre 6 y 8 g/L y sólidos totales (ST) de 60 a 110 g/L y esta composición crea problemas en los cuerpos de agua cuando cuando no son reaprovechados sino evacuados (Soto et al., 2021; Urbano-Marinho et al., 2014). Si se envían a cuerpos de agua sin ningún aprovechamiento o tratamiento provocan una disminución en la luminosidad del sistema, en la actividad fotosintética y en el oxígeno disuelto, produciendo eutrofización y contribuyendo al aumento de poblaciones de insectos y vectores, dando como resultado la proliferación de enfermedades (Zúñiga-Cerón y Gandini-Ayerbe, 2013). Otra problemática que presenta esta corriente acuosa es la elevada temperatura a la cual es evacuada, entre 75 y 85°C, dificultando su biotransformación convencional mediante procesos biológicos aerobios, ya que la temperatura más adecuada para los microorganismos en dicho tratamiento se encuentra entre 30 y 35°C. Para obtener eficiencias de remoción entre 55 y 80% es importante usar sistemas anaerobios ya que hay microorganismos termorresistentes anaerobios (Contreras-Contreras, 2019; Durán-de-Bazúa et al., 1988; 1994).

Se han realizado investigaciones (Soto et al., 2021; Toledo-Cervantes et al., 2018) para reaprovechar dichos compuestos. Para ello, se discuten métodos de transformación efectivos: Biológicos (anaerobios, enzimáticos, etc.), por oxidación química y mediante coagulación o combinaciones (Contreras-González, 2017; Córdova-Mosquera et al., 2019). Estas tecnologías podrían aplicarse a recuperar

los compuestos coloridos como paso final de los tratamientos biológicos, como los anaerobios ya que es justamente el objetivo de esta investigación. Los sistemas biológicos son procesos complejos y en ellos solamente se transforman los compuestos carbonosos biodegradables a biogás y biomasa (Contreras-González, 2017; López et al., 2018). Por lo tanto, los efluentes acuosos de estas industrias biotecnológicas deben ser utilizados como materia prima de la conversión bioquímica de la materia orgánica biodegradable (Toledo-Cervantes et al., 2018; Zacharof, 2017), separando posteriormente los polifenoles para recuperarlos.

1.2. Justificación

Las vinazas son un subproducto que ha sido de gran interés para los investigadores en los últimos años debido a la amplia variedad de componentes como minerales, nutrientes, aminoácidos, lípidos, enzimas, compuestos fenólicos, glúcidos que contiene y también por su alta carga de DQO y DBO que representan una valiosa fuente de materia carbonosa que está siendo desaprovechada (Ossa et al., 2010; Pérez y Gardey, 2019).

Por otro lado, a pesar de su valor potencial, las vinazas son desechadas en su mayoría sin un tratamiento previo y debido a sus características como: Alto pH y coloración chocolatosa se convierten en un fuerte contaminante al ambiente tanto para el suelo, agua, flora o fauna en donde son desechadas (Da-Silva-Neto et al., 2020).

Las vinazas al ser en la actualidad un subproducto no deseado se convierten en un material de interés para el uso en distintos sectores. Debido a su alto contenido nutricional, son empleadas como complemento alimenticio principalmente para animales de granja en forma granular o en polvo (Bermúdez, 1994; Chará y Suárez, 1993). También son empleadas como agua de riego debido a su alta concentración de sales con un predominio del potasio, sodio y nitrógeno actuando

como un mejorador de los suelos (Bautista-Zúñiga et al., 2000a,b; Villatoro-Reséndiz, 1998). Las vinazas pueden ser regadas de forma diluida o directa pero esto implica algunas alteraciones físicas y químicas en la vegetación y suelos donde son regadas.

Otra manera de ser empleadas es en reactores anaerobios para la producción de biogás rico en metano y, de esta manera, se busca disminuir la carga orgánica carbonosa biodegradable presente en las vinazas (Castro-González, 2004). Como, además, salen de la columna de destilación a alta temperatura, los reactores anaerobios podrían operar a temperaturas altas pues hay microorganismos anaerobios termofílicos que pueden desempeñar estas funciones (Contreras-Contreras, 2019).

Para esta investigación se tiene, además, como interés la recuperación de los polifenoles, ya que estos compuestos carbonosos representan la mayor parte de la carga carbonosa recalcitrante al tratamiento biológico de las vinazas por lo que se buscarían métodos no biotecnológicos para realizar esta separación.

Esto es porque se ha observado que los polifenoles brindan beneficios significativos a la salud a aquellos pacientes que han aumentado la ingesta de estos compuestos. Su poder antioxidante ha sido evaluado y algunos de sus efectos han sido los de otorgar protección contra lesiones celulares y subcelulares, inhibir el crecimiento de tumores, activar los sistemas de desintoxicación hepática y bloquear las vías metabólicas que podrían ocasionar carcinogénesis, entre otros más (Fakhri et al., 2022; Shi et al., 2020; Steinmetz y Potter, 1996; Tomás-Barberán, 2003).

El consumo de aditivos ricos en antioxidantes resulta muy atractivo no solamente para el sector alimentario (Adebooye et al., 2016), sino también para el sector farmacéutico (Leyra-Tobilla, 2016). Es por esto que existe una constante

búsqueda de métodos de extracción y purificación de estos compuestos para introducirlos como suplementos en la vida cotidiana de los seres humanos (Robbins, 2003).

Para la extracción de estos polifenoles es importante tomar en cuenta la composición de las vinazas, el tipo de proceso de extracción así como sus características y, principalmente, que sea rentable por lo que un análisis económico preliminar proporciona un panorama más amplio para diseñar un tren de tratamiento óptimo que sea fácil de operar, de bajo costo y con un alto rendimiento.

Como esta investigación se realizó en el entorno de la pandemia provocada por el virus SARS-CoV-2 y su enfermedad llamada en inglés Covid-19, se hizo una revisión bibliográfica exhaustiva desde casa.

1.3. Objetivos

1.3.1. Objetivo general

Realizar el análisis de una investigación bibliográfica de las metodologías para el aprovechamiento integral de las vinazas, subproducto de la destilación de etanol obtenido utilizando melazas de caña de azúcar y levaduras cerveceras, considerando que salen a altas temperaturas de la torre de destilación.

1.3.2. Objetivos particulares

- Revisar la literatura para evaluar los métodos de separación de los compuestos carbonosos biodegradables y el valor agregado de los productos que se formen como el biogás rico en metano

- Revisar la literatura para evaluar los métodos de separación de los compuestos carbonosos recalcitrantes y el valor agregado de los productos que se obtengan como los compuestos fenólicos y que sea factible su recuperación
- Presentar la metodología que debería seguirse en un análisis económico preliminar para determinar si el proceso propuesto podría ser rentable para la industria.

CAPÍTULO II.
FUNDAMENTOS

2.1. Etanol

El alcohol etílico o etanol, comúnmente llamado alcohol, se representa como C_2H_5OH . Es una molécula que adquiere su polaridad gracias a la presencia del grupo hidroxilo. Este grupo es altamente reactivo, por lo que el etanol puede ser transformado en otros compuestos de interés para la industria por medio de reacciones de deshidratación, deshidrogenación, condensación, eterificación y/u oxidación (Castillo-Arteaga y Núñez-Calderón, 2011). Es un compuesto de importancia en diversas industrias debido a su extensa aplicación como solvente, astringente para la piel, preservador en lociones, sanitizantes, antisépticos, etc. (Anónimo, 2021). A partir de la crisis energética de 1970 se re-encontró el uso del etanol como combustible, propuesto desde principios del siglo veinte (Manahan, 1997). Representa una fuente de energía más limpia que los combustibles fósiles. Dado que contiene un 35% de oxígeno se logra una combustión completa. Puede también ser empleado como oxigenador de la gasolina (Ramírez-Méndez, 2020). Se ha observado que al agregar un 10% de etanol a la gasolina se han logrado reducir las emisiones de gases de efecto invernadero en un 12-19% en comparación con los combustibles fósiles (Anónimo, 2021; Ramírez-Méndez, 2020). El uso del etanol como combustible es prácticamente inexistente en México. No obstante, se han creado leyes como la Ley de Desarrollo Sustentable de la Caña de Azúcar de agosto del 2005, que busca introducir al etanol dentro del mercado de los carburantes (Álvarez-Maciel, 2018). En la manufactura del etanol existen dos métodos para su producción, vía química o microbiológica. La síntesis química del etanol se puede llevar a cabo por medio de una hidratación de etileno con vapor presentada en la Ec. 1: (Britannica, 2021):



A continuación, se presenta someramente el segundo método.

2.1.1. Fermentación

La fermentación es un proceso anaerobio con reacción exotérmica que llevan a cabo las levaduras, especialmente las del género *Saccharomyces* (Flores-Peña, 2017). Originalmente se aprovechaba la glucosa, una hexosa, para que la levadura *Saccharomyces cerevisiae* la transformara en etanol y CO₂ (Pacheco-Suárez, 2016), que es la clásica fermentación de Louis Pasteur. Muchos años después se buscó la transformación de compuestos orgánicos, principalmente hexosas, en compuestos más simples como ácido láctico, ácido butírico y etanol. El proceso recibe el nombre del compuesto final del que proviene (De-la-Trinidad-Benítez, 2021; Flores-Peña, 2017).

Los diferentes tipos de biodegradaciones son: Alcohólica, láctica, acética, maloláctica, propiónica y butírica.

La fermentación clásica de Pasteur se define como el proceso en el que moléculas como la sacarosa son separadas a fructosa y glucosa y esta última transformada a etanol y CO₂, por acción de catalizadores producidos por algunos microorganismos específicos. La levadura *Saccharomyces cerevisiae* es la que ha tenido un mejor rendimiento frente a otros microorganismos durante la producción de etanol. Su alta tolerancia al etanol como su producto de reacción y la producción de dos tipos de enzimas: Invertasa y zimasa, la convierten en el candidato idóneo para la fermentación (Acosta-Martínez et al., 2010; Bazúa y Wilke, 1977). Esta biotransformación conlleva múltiples reacciones y la participación de distintos compuestos, pero puede ser representada con la Ec. 2.2 (Karatzos et al., 2014):



Su ruta metabólica se puede representar con la Figura 2.1.

Fermentación alcohólica

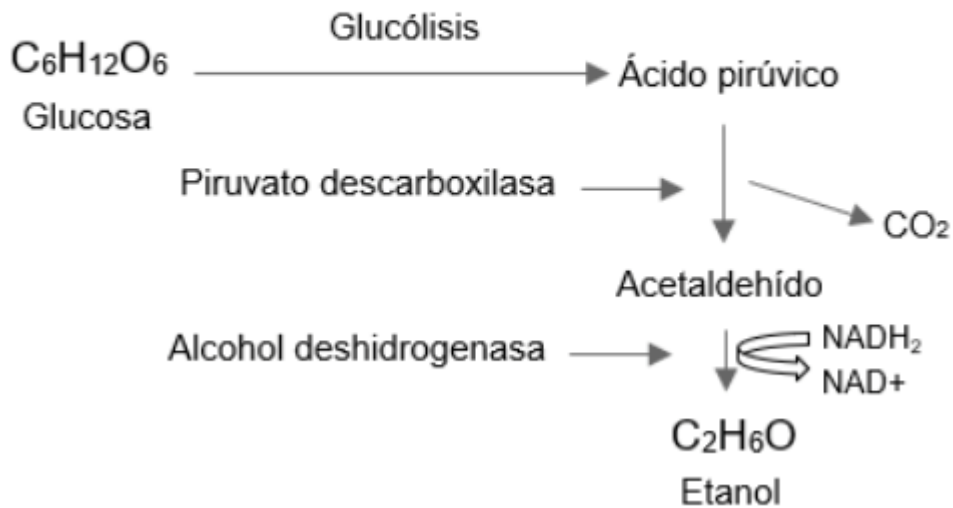


Figura 2.1. Vía metabólica de la fermentación verdadera o alcohólica
(De la Trinidad-Benítez, 2021)

El llamado bioetanol para distinguirlo del de origen petroquímico tiene las mismas propiedades, estructura y composición que el conocido etanol (Gaspar-Mendoza, 2022). La fermentación puede tomar como sustrato distintas fuentes de glucosa como maíz, arroz, centeno, trigo, caña de azúcar, etc. Cada una conlleva un distinto tratamiento. En el caso específico de la caña de azúcar se busca utilizar un subproducto rico en glucosa llamado melaza (Becerra, 2014; CONADESUCA, 2016).

2.1.2. Proceso de producción de bioetanol

El bioetanol es el producto obtenido a partir de la fermentación de glucosa como se muestra en la Figura 2.2. El proceso de producción de bioetanol a partir de la caña de azúcar involucra principalmente 4 etapas (Cardona et al., 2005):

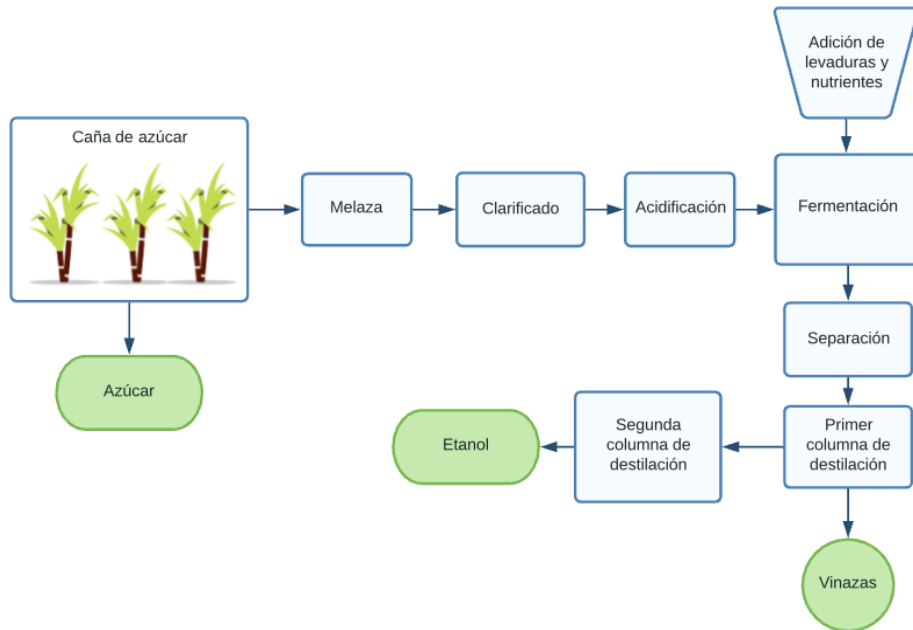


Figura 2.2. Esquema simplificado del proceso de obtención de bioetanol a partir de melazas de caña de azúcar (Modificado de Contreras-Contreras, 2019; Montoya-M. et al., 2005)

Acondicionamiento de la materia prima. En esta se prepara la materia prima, la caña, con procesos físicos de bajo costo para así poder iniciar el proceso de manufactura y preparación. En el caso de la caña de azúcar es sometida a un lavado con agua. Se tritura (molienda) obteniendo el jugo azucarado y el bagazo (Cardona et al., 2005; Zúñiga-Cerón y Gandini-Ayerbe, 2013). El jugo se procesa para concentrarlo y separar por cristalización el azúcar dejando la miel final para la operación de fermentación. Aquí se requiere la adición de nutrientes necesarios para la supervivencia de los microorganismos que van a transformar la glucosa a etanol. El medio de fermentación debe ser diluido con agua y enriquecido con urea y otros nutrientes. Por otro lado, dado que no hay condiciones asépticas en la mayor parte de las plantas productoras de etanol, se acidifica la miel diluida y enriquecida con ácido sulfúrico para que solamente proliferen las levaduras evitando la propagación de microorganismos indeseados (Pacheco-Suárez, 2016).

Fermentación. El extracto azucarado es conducido a los reactores en donde se lleva a cabo la fermentación de la glucosa (Flores-Peña, 2017). Por medio de la levadura *Saccharomyces cerevisiae* se transforma una molécula de glucosa en 2 moléculas de etanol y 2 de dióxido de carbono. A pesar de la adición de ácido sulfúrico proliferan algunos otros microorganismos formando algunos productos secundarios de menor interés como acetaldehído, glicerol, alcohol de fusel, ácidos succínico y láctico (Acosta-Martínez et al., 2010; Cardona et al., 2005).

En esta etapa se emplean principalmente reactores en lote (“*batch*”, en inglés) o continuos o reactores que siguen estos mismos principios. Su eficiencia se debe mayormente a la cantidad y calidad de los glúcidos presentes en el extracto, la eliminación de calor producido por la reacción por métodos controlados, la tolerancia de la levadura al alcohol y a otros componentes inhibidores (Pacheco-Suárez, 2016).

Separación-deshidratación. Son empleados destiladores y absorbedores para recuperar el etanol del caldo de fermentación con los cuales es posible recuperar el etanol con un 95.5% en masa de pureza (Zúñiga-Cerón y Gandini-Ayerbe, 2013). La destilación se lleva a cabo en dos o más columnas. La primera columna se encarga de remover una proporción importante de los componentes que vienen en el mosto fermentado siendo arrastrados por vapor de agua. La segunda o posteriores columnas se encargan de concentrar el etanol a punto casi azeotrópico (Castro-González et al., 2004). Para obtener etanol anhidro debe usarse una operación unitaria distinta para separar ese 4% en volumen de agua (Castro-González, 2004).

Recuperación de subproductos. Durante la producción de etanol a partir de caña de azúcar se tienen subproductos como el bagazo, la cachaza y las vinazas. Estas últimas son el biomaterial de mayor interés para esta investigación y no deben ser consideradas como agentes contaminantes ya que el problema yace en

el inadecuado aprovechamiento (Durán-de-Bazúa, 2005). Estas vinazas, al provenir de la fermentación ácida, tienen un pH muy bajo y contienen todos los compuestos orgánicos e inorgánicos del mosto fermentado con excepción de los más volátiles que el agua.

2.2. Producción de melaza

Las mieles finales o melazas se definen como un subproducto de alto valor resultante del proceso de producción de azúcar a partir de la miel concentrada de la caña de azúcar (Contreras-Contreras et al., 2020). Estas se encuentran como la corriente final de la refinación de sacarosa, glucosa y fructosa de la cual no se puede obtener más azúcar por métodos físicos. Son líquidos densos con una consistencia viscosa y un color oscuro (Ossa et al., 2010). Contienen sustancias no fermentables, compuestos aminados y melanoidinas (ver Glosario), provenientes de la descomposición del azúcar por el aumento de la temperatura y gracias a su alto contenido de azúcar desprenden un olor agradable y poseen un sabor dulce (Ossa et al., 2010; Pérez y Gardey, 2019). Las melazas pueden ser usadas como suplemento alimenticio, para la elaboración de concentrados para animales, para la producción de antibióticos, aminoácidos, etc., o para la industria del etanol (Durán-de-Bazúa, 2005; Pérez y Gardey, 2019). Es una mezcla de compuestos, en su mayoría glúcidos, que pueden ser clasificados según su contenido total o por el porcentaje de materia sólida, también llamado “Brix” (Fajardo-Castillo y Sarmiento-Forero, 2007). Las características de las melazas se presentan en la Tabla 2.1.

2.3. Producción de vinazas

A pesar de los numerosos procesos existentes para la producción de etanol a partir de melazas de caña, todos siguen generando grandes cantidades de efluentes acuosos por el fondo de la primera torre de destilación llamados vinazas.

Estas corrientes acuosas contienen principalmente todos los componentes provenientes del jugo de caña que se acumularon en las melazas o mieles incristalizables (Da-Silva-Neto et al., 2020; Pazuch et al., 2017). Debido a su alto contenido de compuestos carbonosos, nitrogenados, etc., representan una valiosa fuente de materia carbonosa que debe ser aprovechada para evitar la contaminación de los sitios a donde se dispongan, como ríos, lagos, presas canales o suelos dependiendo de su destino final. Durante la concentración del jugo de caña para que cristalice el azúcar por saturación, parte de este glúcido se polimeriza formando los polifenoles, los cuales son una parte importante de las vinazas (Da-Silva-Neto et al., 2020).

Tabla 2.1. Composición de melazas provenientes de la caña de azúcar (Vega-Baudrit et al., 2008)

Componente	Composición (% Masa)
Agua	20
Sacarosa	35
Glucosa o dextrosa	7
Fructosa o levulosa	9
Otras sustancias reductoras	3
Otros carbohidratos o glúcidos	4
Cenizas	12
Compuestos nitrogenados	4.5
Compuestos no nitrogenados	5
Ceras, esteroides y esterofosfolípidos	0.4

2.3.1. Vinaza de caña de azúcar como agente contaminante

En teoría todas las actividades productoras de bienes generan subproductos no deseados que en su mayoría son posibles contaminantes. En México no se han aplicado multas a aquellas empresas que no cumplan con las especificaciones de descarga de aguas residuales por lo que muy pocas industrias cuentan con una

planta de tratamiento para sus aguas residuales (UNESCO, 2017; Virique-Rosas, 2019). Esto conlleva el vertimiento de aguas contaminantes sin tratamiento previo en los cuerpos de aguas nacionales, las cuales pueden lograr infiltrarse en los mantos acuíferos y contaminar los recursos hídricos subterráneos disminuyendo su calidad y disponibilidad (UNESCO, 2017).

La industria del etanol no es una excepción. Debido a la naturaleza de la fermentación, la tolerancia de la levadura al alcohol y a la presencia de inhibidores del proceso de producción de alcohol es necesario diluir la miel final fermentable a no más del 20% en masa y así aumentar su rendimiento (Pacheco-Suárez, 2016). Aunado a esto, para concentrar el etanol de 10 a 96°GL o % en volumen o fracción mol, el mosto fermentado se envía a una columna de destilación agotadora para eliminar todos los componentes del mosto con punto de ebullición mayor que el del agua. Al inyectar vapor vivo al mosto éste se diluye y, por esta razón, por cada litro de etanol producido se obtienen, en promedio, alrededor de 12 litros de vinazas. Como aparentemente no tenían ningún valor agregado, desde el siglo XVI cuando se producía el ron en las zonas cañeras empezaron a verterse a suelos o aguas circundantes sin causar daños aparentes.

Actualmente, por desconocimiento de su valor por parte de los propietarios de las empresas alcoholeras (Contreras-Contreras et al., 2020) se siguen enviando a los cañaverales previamente diluidas para que funcionen como mejoradores de suelo por sus contenidos de nitrógeno, fósforo y potasio, la clásica mezcla fertilizante N-P-K.

En una destilería de tamaño estándar se producen alrededor de 60,000 L/día de bioetanol de caña, lo que resultaría en 720,000 L/día de vinaza, correspondiendo a la contaminación emitida por 85,800 personas por día (Pacheco-Suárez, 2016). Por esta razón, es indispensable crear métodos más eficientes para el

reaprovechamiento de los compuestos contenidos en las vinazas ya que tienen propiedades interesantes (Quiñones et al., 2012).

2.3.2. Caracterización de las vinazas

Las características físicas y químicas de las vinazas dependen de su fuente de procedencia, del tipo de tratamiento, del sistema fermentativo, de los aditivos o compuestos químicos empleados durante la fermentación (ácido y nutrientes), del equipo de destilación, de la levadura empleada, de la calidad del agua, etc. (Pacheco-Suárez, 2016).

Las vinazas que provienen de la caña tienen un alto contenido de materia orgánica que, medida como demanda química de oxígeno o DQO, oscila entre 50-120 g/L, además de una alta demanda bioquímica de oxígeno (DBO) que oscila entre los 25-100 g/L. Tienen, además, un pH ácido entre 3-4 como ya se comentó debido a la adición de ácido sulfúrico. Dentro de sus compuestos orgánicos destacan el glicerol, el ácido acético, los fenoles y los polifenoles (Tabla 2.2). Debido a las características ya mencionadas, las aguas agotadas o vinazas representan un agente contaminante que puede producir graves afectaciones al ambiente cuando son desechadas en vez de ser aprovechadas.

2.4. Normativa

2.4.1. NOM-001-SEMARNAT-2021

El 27 de agosto del 2021 el Comité Consultivo Nacional de Normalización de Medio Ambiente y Recursos Naturales (COMARNAT) aprobó el proyecto de la Norma Oficial Mexicana NOM-001-SEMARNAT-2021 (DOF, 2022). Esta establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en aguas y bienes nacionales (Tablas 2.3. y 2.4.).

Tabla 2.2. Compendio de características de vinazas de caña de azúcar (Contreras-Contreras, 2019)

Parámetros	Rincón-Ácelas, 2008	Castro-González et al., 1997	Detor-Méndez y Hernández-Segoviano, 2012	García et al., 1997	Jiménez et al., 2006	Robles-González et al., 2012	Bautista-Zúñiga et al., 2000a
Alcalinidad, mgCaCO ₃ /L	ND	ND	ND	ND	6000	ND	ND
Azufre, mg/L	9.85X10 ⁻³ %	ND	2.628	ND	ND	ND	ND
Carbono (mg/L)	4.47%	38.18	2.638	ND	ND	ND	ND
Cloruros (mg/L)	5 230	ND	5.5X10 ⁻⁴	ND	ND	ND	ND
Conductividad eléctrica (μS/cm)	2 650	ND	ND	ND	ND	ND	ND
DBO ₅ (mgO ₂ /L)	98 250	91 771	61 440	ND	ND	26 500	31 500
DQO (mgO ₂ /L)	116 250	100 428	72 448.85	75 000	80 500	56 230	58 500
Fenoles (mg/L)	ND	ND	ND	469 total	540 (AG)	478 (AG)	ND
Fosfatos (mg/L)	ND	ND	ND	ND	ND	290	ND
Fructosa (mg/L)	ND	ND	ND	ND	ND	14.8	ND
Hidrógeno (mg/L)	6.77%	44.96	ND	ND	ND	ND	ND
Nitrógeno (mg/L)	6.1%	1.24	1.0037	975 total	1 800 (K)	660 (K)	1400 (K)
Nitrógeno amoniacal (mg/L)	ND	ND	ND	ND	ND	5 000	ND
pH	4.28	4.34	4.986	4.4	5.2	3.7	4.2
SDT (mg/L)	83 683	54 150	ND	ND	ND	ND	ND
SST (mg/L)	7 591	4 300	ND	11 000	3 600	3 130	7950
SSV (mg/L)	ND	4 100	ND	9 000	2 500	1 130	ND
ST (mg/L)	91 227	58 450	65 591	ND	109 000	26 830	ND
SVT (mg/L)	ND	47 250	36 099.33	ND	79 000	ND	ND
Sulfatos (mg/L)	8 150	ND	ND	ND	ND	308	4 450
Sulfuros (mg/L)	69	ND	0.5366	ND	ND	ND	ND

ND: No disponible; AG: ácido gálico; K: Kjeldahl

Tabla 2.3. Límites permisibles de contaminantes de la NOM-001-SEMARNAT-2021 (DOF, 2022)

Parámetros (*) (miligramos por litro, excepto cuando se especifique)	Ríos arroyos, canales, drenajes			Embalses, lagos y lagunas			Zonas marinas mexicanas			Suelos								
	P.M.	P.D.	V.I.	P.M.	P.D.	V.I.	P.M.	P.D.	V.I.	Riego de áreas verdes			Infiltración y otros riegos			Cárstico		
	P.M.	P.D.	V.I.	P.M.	P.D.	V.I.	P.M.	P.D.	V.I.	P.M.	P.D.	V.I.	P.M.	P.D.	V.I.	P.M.	P.D.	V.I.
Temperatura (°C)	35	35	35	35	35	35	35	35	35	35	35	35	35	35	35	35	35	35
Grasas y aceites	15	18	21	15	18	21	15	18	21	15	18	21	15	18	21	15	18	21
Sólidos Suspendidos Totales	60	72	84	20	24	28	20	24	28	30	36	42	100	120	140	20	24	28
Demanda Química de Oxígeno	150	180	210	100	120	140	85	100	120	60	72	84	150	180	210	60	72	84
Carbono Orgánico Total*	38	45	53	25	30	35	21	25	30	15	18	21	38	45	53	15	18	21
Nitrógeno Total	25	30	35	15	25	30	25	30	35	NA	NA	NA	NA	NA	NA	15	25	30
Fósforo Total	15	18	21	5	10	15	15	18	21	NA	NA	NA	NA	NA	NA	5	10	15
Huevos de Helmintos (huevos/litro, HH/L)	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	1								
Escherichia coli, (NMP/100 mL)	250	500	600	250	500	600	250	500	600	250	500	600	250	500	600	50	100	200
Enterococos fecales* (NMP/100 mL)	250	400	500	250	400	500	250	400	500	250	400	500	250	400	500	50	100	200
pH (UpH)	6-9																	
Color verdadero	Longitud de onda									Coeficiente de absorción espectral máximo								
	436 nm									7.0 m – 1								
	525 nm									5.0 – 1								
	620 nm									3.0m – 1								
Toxicidad aguda (UT)	2 a los 15 minutos de exposición																	
NA: No aplica P.M.: Promedio Mensual P.D.: Promedio Diario V.I.: Valor Instantáneo NMP: Número más probable UpH: Unidades de pH UT: Unidades de Toxicidad *Si Cloruros es menor a 1000 mg/L se analiza y reporta DQO *Si Cloruros es mayor o igual a 1000 mg/L se analiza y reporta COT *Si la conductividad eléctrica menor a 3500 µS/cm se analiza y reporta E. coli * Si la conductividad eléctrica es mayor o igual a 3500 µS/cm se analiza y reporta Enterococos fecales Las determinaciones de Conductividad eléctrica y de Cloruros no requieren la acreditación y aprobación de la entidad correspondiente																		

Tabla 2.4. Límites permisibles para metales y cianuros de la NOM-001-SEMARNAT-2021 (DOF, 2022)

Parámetros (miligramos por litro)	Ríos, arroyos, canales, drenes			Embalses, lagos y lagunas			Zonas marinas mexicanas			Suelo								
										Riego de áreas verdes			Infiltración y otros riegos			Cárstico		
	P.M.	P.D.	V.I.	P.M.	P.D.	V.I.	P.M.	P.D.	V.I.	P.M.	P.D.	V.I.	P.M.	P.D.	V.I.	P.M.	P.D.	V.I.
Arsénico	0.2	0.3	0.4	0.1	0.15	0.2	0.2	0.3	0.4	0.2	0.3	0.4	0.1	0.15	0.2	0.1	0.15	0.2
Cadmio	0.2	0.3	0.4	0.1	0.15	0.2	0.2	0.3	0.4	0.05	0.075	0.1	0.1	0.15	0.2	0.05	0.075	0.1
Cianuro	1	2	3	1	1,5	2	2	2,50	3	2	2,5	3	1	1,50	2	1	1,5	2
Cobre	4	5	6	4	5	6	4	5	6	4	5	6	4	5	6	4	5	6
Cromo	1	1.25	1.5	0.5	0.75	1	1	1.25	1.5	0.5	0.75	1	0.5	0.75	1	0.5	0.75	1
Mercurio	0.01	0.015	0.02	0.005	0.008	0.01	0.01	0.015	0.02	0.005	0.008	0.01	0.005	0.008	0.01	0.005	0.008	0.01
Níquel	2	3	4	2	3	4	2	3	4	2	3	4	2	3	4	2	3	4
Plomo	0.2	0.3	0.4	0.2	0.3	0.4	0.5	0.75	1	0.5	0.75	1	0.2	0.3	0.4	0.2	0.3	0.4
Zinc	10	15	20	10	15	20	10	15	20	10	15	20	10	15	20	10	15	20
Parámetros medidos de manera total	P.M: Promedio Mensual P.D: Promedio Diario V.I: Valor Instantáneo																	

Esta nueva versión sustituye a la NOM-001-SEMARNAT-1996 que después de 25 años de existencia dejaba de ser eficiente ante el constante cambio de la tecnología de tratamientos de los cuerpos de agua en México (Anónimo, 2021; DOF, 2022). Las principales modificaciones de dicha actualización se refieren a los parámetros de color verdadero, temperatura, DQO, COT y toxicidad y la desaparición de la DBO (DOF, 2022). Se entienden como bienes nacionales a los bienes cuya administración está a cargo de la Comisión Nacional del Agua en términos del artículo 113 de la Ley de Aguas Nacionales, comprendiendo dentro del territorio nacional aguas de los mares territoriales, aguas marinas interiores, lagunas y esteros que comuniquen con el mar.

2.4.2. NOM-002-SEMARNAT-1996

La NOM-002-SEMARNAT-1996 establece los límites máximos permisibles de contaminantes (Tabla 2.5) en las descargas a los sistemas de drenaje y alcantarillado urbano o municipal de aguas residuales provenientes de la industria, actividades agroindustriales, de servicios y el tratamiento de aguas residuales.

Tabla 2.5. Límites máximos permisibles de la NOM-002-SEMARNAT-1996 (DOF, 1996)

Parámetros (mg/L)	Promedio mensual	Promedio diario	Instantáneo
Grasas y aceites	50	75	100
Sólidos sedimentables (mL/L)	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

Se entienden por aguas industriales a los subproductos generados en la producción industrial resultando en la combinación de residuos líquidos o sólidos de las cuales las industrias están obligadas a reportar sus características físicas, químicas y biológicas.

2.4.3. NOM-003-SEMARNAT-1997

La NOM-003-ECOL-1997 establece los límites máximos permisibles de contaminantes para las aguas residuales tratadas que se reúsen en servicios al público, con el objeto de proteger el ambiente y la salud de la población y es de observancia obligatoria para las entidades públicas responsables de su tratamiento y reutilización. En el caso de que el servicio al público se realice por terceros, éstos serán responsables del cumplimiento de la presente Norma, desde la producción del agua tratada hasta su reutilización o entrega, incluyendo la conducción o transporte de la misma.

Tabla 2.6. Límites máximos permisibles de la NOM-003-SEMARNAT-1997 (DOF, 1997)

Tipo de reutilización	Promedio mensual				
	Coliformes fecales (NMP/100 mL)	Huevos de helminto (HH/L)	Grasas y aceites (mg/L)	DBO ₅ (mg/L)	SST (mg/L)
SERVICIOS AL PÚBLICO CON CONTACTO DIRECTO	240	≤ 1	15	20	20
SERVICIOS AL PÚBLICO CON CONTACTO INDIRECTO U OCASIONAL	1,000	≤ 5	15	30	30

2.4.4. Uso de reactores anaerobios de lecho de lodos de flujo ascendente (RALLFA) como método de bioconversión de sustancias disueltas en aguas

Los sistemas tipo RALLFA (Figura 2.3) son ampliamente usados para el tratamiento de agua con alto contenido de materia orgánica (Cuéllar-Briseño,

2019; Ojeda-Berra, 2008). La principal función de estos sistemas es transformar bioquímicamente compuestos carbonosos biodegradables en biogás rico en metano (Cuéllar-Briseño, 2019). Los reactores a escala de laboratorio empleados durante la experimentación de Contreras-Contreras et al. (2020), permitieron obtener los polifenoles totales de las vinazas prácticamente libres de otros compuestos carbonosos y sin una pérdida representativa de ellos, especialmente cuando los RALLFA operan a 45°C, alrededor de 3700 mg EAG/L, donde EAG son los polifenoles medidos como equivalentes de ácido gálico, tanto a la entrada como a la salida del RALLFA.

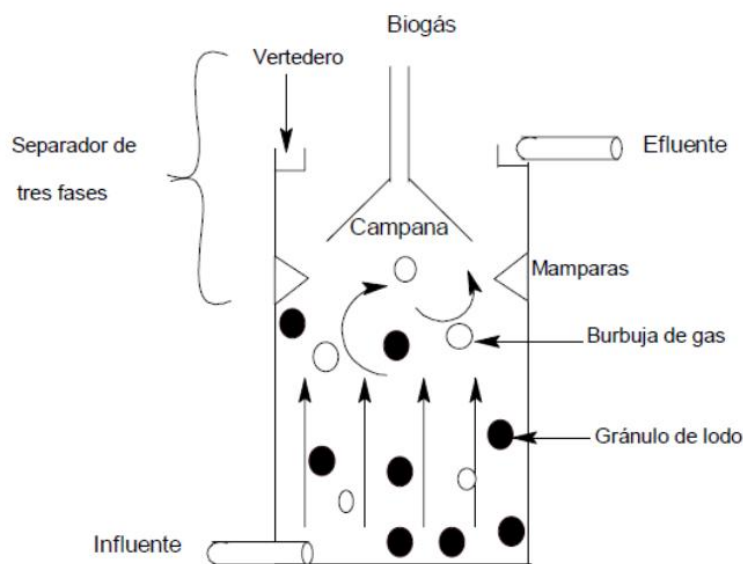
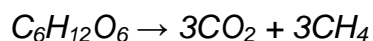


Figura 2.3. Esquema operacional de un RALLFA (Ojeda-Berra, 2008)

El proceso anaerobio es complejo, tanto por el número de microorganismos involucrados como por los metabolitos producidos dentro del reactor. La Ec. 2-3 sintetiza todas las reacciones involucradas (Contreras-Contreras et al., 2020).



Ec. (2-3)

Durante los procesos de degradación anaerobios es importante propiciar las condiciones óptimas para el crecimiento de los microorganismos deseables, así como el seguimiento constante de la temperatura, el pH, el factor de alcalinidad y la producción de ácidos grasos volátiles o AGV (Contreras-Contreras et al., 2020; Cuéllar-Briseño, 2019; Ojeda-Berra, 2008).

2.4.5. Efecto de la temperatura en el desempeño de los RALLFA

La temperatura es un factor crucial en el desempeño de los sistemas vivos. Y, para el caso de los consorcios microbianos presentes en el RALLFA, esto es vital para mantener el equilibrio termodinámico de la transformación bioquímica que desde hace ya casi 90 años se conceptualizó con cuatro etapas: Hidrolítica, acidogénica, acetogénica y metanogénica para pasar de compuestos extraordinariamente complejos a metano (Castro-González, 2004; Martínez-Arellano, 2022).

Para el caso de los RALLFA esta variable representa la posibilidad de obtener una mayor conversión de los compuestos carbonosos biodegradables a metano. Desde las dos últimas décadas del Siglo Veinte y lo que va de este siglo en el grupo de investigación donde se realizó esta investigación bibliográfica se han estudiado acuciosamente reactores operando a 35, 45, 55 y 65°C (Bazúa et al., 1991; Bernal-González, 1997; Bernal-González et al., 2016; Castro-González, 2004; Castro González et al., 1997, 2004; Castro-Villela et al., 1989; Civit et al., 1984; Cordovés-Herrera et al., 1997; Cruz-Rodríguez, 2022; Detor-Méndez y Hernández-Segoviano, 2012; Gaspar-Mendoza, 2021, 2022; Gaspar-Mendoza et al., 2021, 2022; Hernández-González, 2017; Jiménez-Ambriz y Martínez-Garza, 1995; Poblano-Flores, 2015; Rincón-Acelas, 2008; Romero-Soto, 2011; Sánchez-Hernández, 2008; Toscano-Pérez, 2012; Villalobos-Juvenal, 2015; Villegas-Bolaños, 2015; Zámamo-Pérez, 1991) para determinar el intervalo de temperaturas óptimo que transforme los compuestos carbonosos biodegradables a metano en

una mayor proporción y aproveche la energía calorífica que se le dio a las vinazas durante su destilación.

2.5. Polifenoles

Los polifenoles son metabolitos secundarios en las plantas y forman uno de los conjuntos de compuestos más abundantes en la naturaleza, con más de 8000 variantes que se caracterizan por ser largas cadenas con una unidad estructural básica, el fenol (Figura 2.4) (Moreno-Simón, 2020; Naranjo-Martínez, 2016).

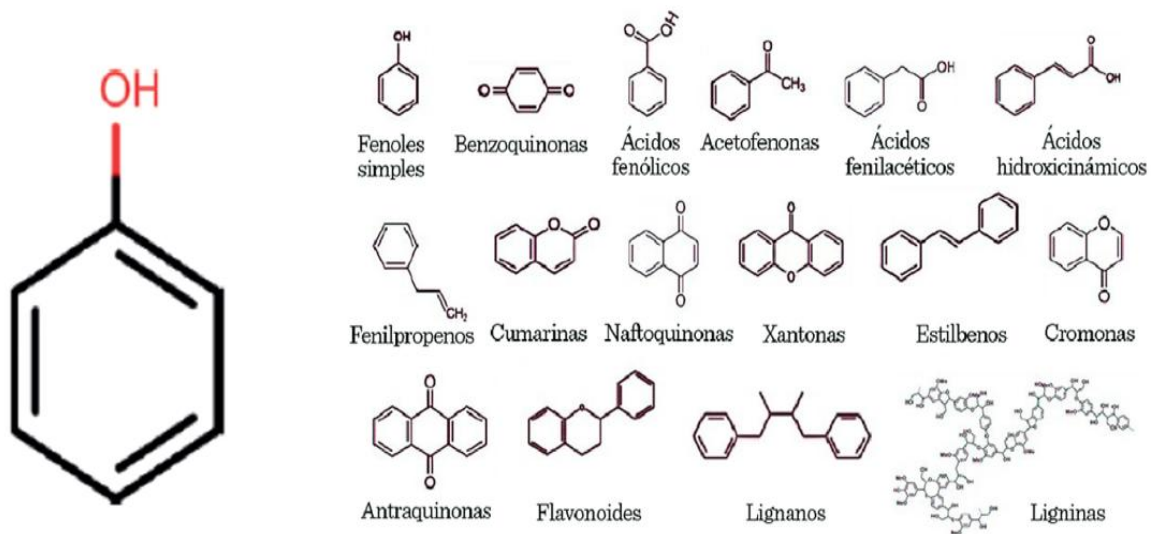


Figura 2.4. Estructura química de polifenoles y fenol (Anónimo, 2020)

Los compuestos fenólicos se localizan en una gran variedad de frutas y verduras pudiendo destacarse: Uvas, semillas de chía, té, romero, orégano, salvia, aceitunas, así como en vinos (Chávez-Ramos, 2017). Estos compuestos juegan un papel de suma importancia dentro del reino vegetal ya que ayudan a su reproducción, brindan pigmentación y participan en la protección contra

depredadores, plagas y agentes patógenos como virus, hongos y bacterias (Moreno-Simón, 2020; Wang et al., 2019).

2.5.1. Beneficios para la salud

Es sabido que las civilizaciones antiguas hacían uso de los componentes de distintas plantas como remedio para una amplia gama de dolencias, trastornos o desequilibrios de salud pero es hasta la actualidad con los avances médicos, bioquímicos y biológicos a nivel molecular que se está relacionando el consumo de los polifenoles contenidos en las plantas con la disminución del riesgo de padecer enfermedades crónicas (Saura-Pujante, 2014).

Se ha observado que los polifenoles brindan ciertos beneficios a la salud, principalmente en el sistema cardiovascular y en el proceso del metabolismo humano, también se ha encontrado que otorgan protección contra lesiones celulares y subcelulares, inhiben el crecimiento de tumores, activan los sistemas de desintoxicación hepática y bloquean las vías metabólicas que podrían ocasionar carcinogénesis. Estos efectos se deben principalmente a su poder antioxidante (Figura 2.5) (Ramón y Gil-Garzón, 2021; Wang et al., 2019) y justifican sus acciones vasodilatadoras y vasoprotectoras, así como sus acciones antitrombóticas, antilipémicas, antiateroscleróticas, antiinflamatorias y antiapoptóticas (Fernández-Salazar, 2020; Quiñones et al., 2012).

Se ha evidenciado que con buenos hábitos y una dieta alta en antioxidantes, como los compuestos fenólicos, se podría conducir al organismo hacia un apropiado balance entre antioxidantes/oxidantes y, consecuentemente, a la prevención de cáncer. Dentro de los antioxidantes evaluados se encuentran las vitaminas antioxidantes A, C y E, la coenzima Q10, los flavonoides, los carotenos y los carotenoides (García-Triana et al., 2013).

El consumo de aditivos ricos en antioxidantes resulta muy atractivo no solamente para el sector alimentario², sino también para el sector farmacéutico. Por ello, existe una constante búsqueda de métodos de extracción y purificación de estos compuestos para introducirlos como suplementos en la vida cotidiana de los seres humanos (Robbins, 2003).

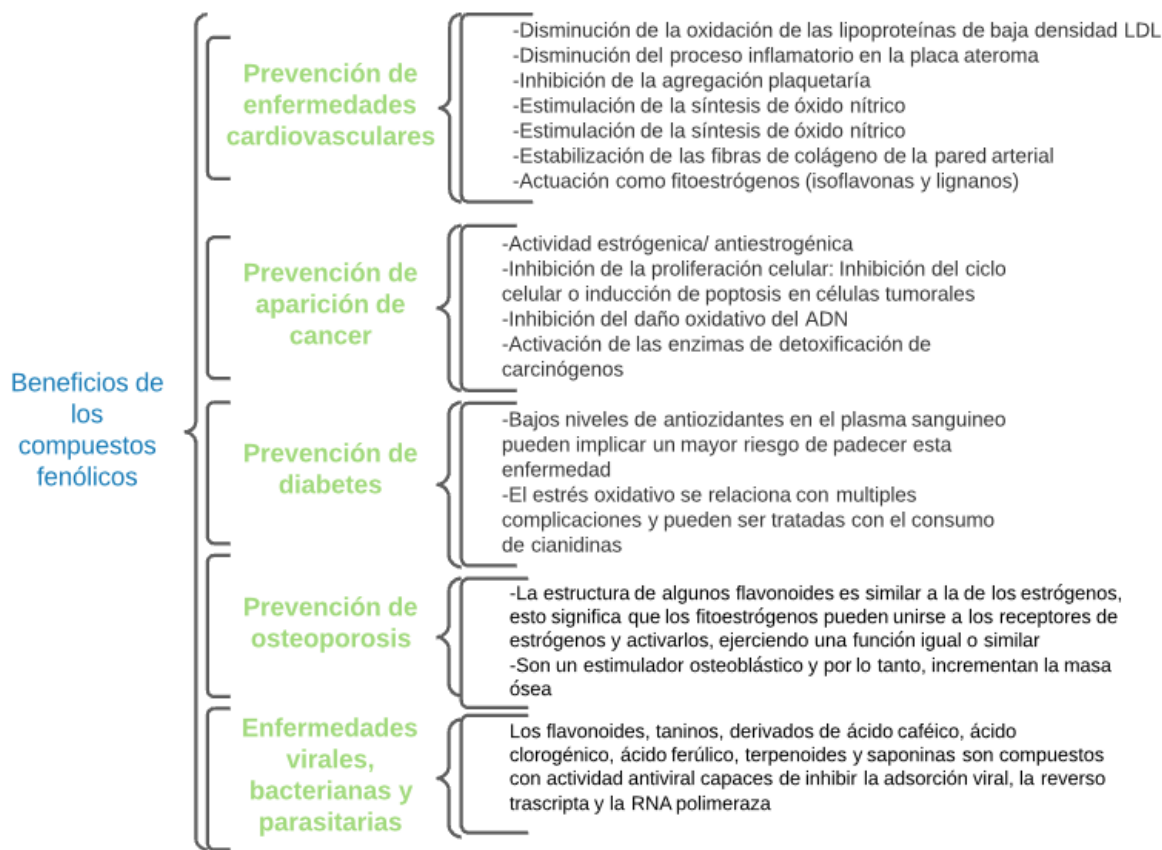


Figura 2.5. Beneficios a la salud de los compuestos fenólicos
(Elaboración propia con información de Gimeno-Creus, 2004; Ramón y Gil-Garzón, 2021)

² Alimentario, adjetivo referente al sector industrial mientras que alimenticio se dirige hacia la cuestión de salud de las personas (nota de la asesora)

2.5.2. Polifenoles contenidos en las vinazas

Los polifenoles contenidos en las vinazas dependen de la calidad de la materia prima y del tratamiento previo que se le dé a estas. En un estudio realizado por Wang et al. (2019), se analizaron las sustancias inhibidoras de N^ε-carboximetilisina (*por sus siglas en inglés, CML*) y se encontraron los siguientes compuestos fenólicos en las vinazas de caña: Catequina, ácido vainílico, ácido siríngico, tricina 7-O-glucósido y ácido p-cumárico. En otro estudio, realizado por Freitas et al. (2018), se detectaron los polifenoles presentes en las vinazas de caña por cromatografía de líquidos de alta resolución, CLAR (*por sus siglas en inglés, HPLC*) y en la Figura 2.6 se presentan algunas de las sustancias encontradas.

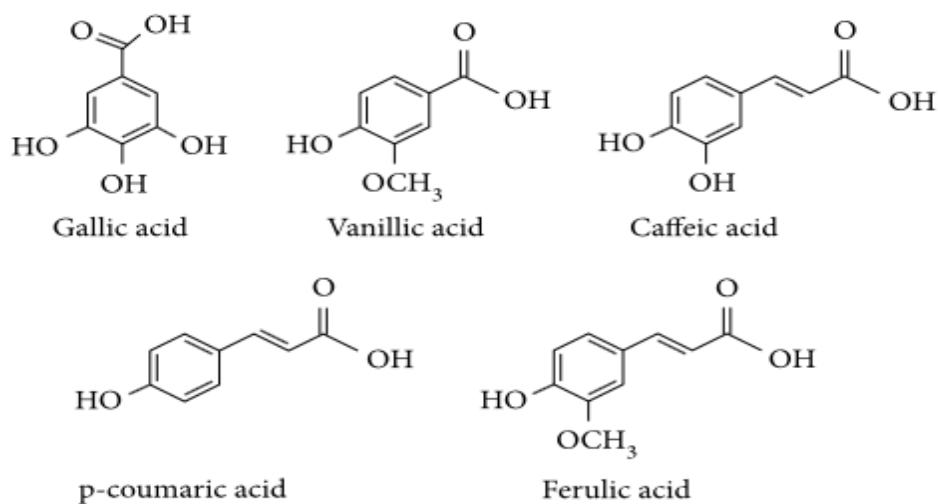


Figura 2.6. Compuestos fenólicos encontrados por CLAR (*HPLC en inglés*) en vinaza de caña de azúcar: Ácidos gálico, vainílico, cafeico, cumárico y ferúlico (Freitas et al., 2018)

2.5.3. Flavonoides y su estructura

El término flavonoides denota un grupo muy amplio de compuestos fenólicos. Éstos juegan un papel importante dentro de la naturaleza de las interacciones de

plantas con animales, ya que estos brindan una amplia gama de colores que son de utilidad para la reproducción de las plantas. Por ejemplo, las antocianinas vacuolares como las pelargonidinas (naranja, salmón, rosa y rojo), las cianidinas (magenta y carmesí) y las delfinidinas (morado, malva y azul) (Mota-Celis, 2010).

Estos compuestos fueron descubiertos en 1930 por el investigador Szent-György quien ganó un Premio Nobel al lograr aislar una sustancia de la cáscara de los limones, la citrina, la cual se encargaba de regular la permeabilidad de los capilares. Como primera instancia se les denominó a los flavonoides como vitaminas P (por permeabilidad) y también como vitamina C₂ por demostrarse que tenían cierta similitud con esta vitamina. Para los años 50 del Siglo Veinte se abandonó esta idea por falta de fundamentos (Martínez-Flórez et al., 2002).

Son compuestos fenólicos que constituyen la parte no energética de la dieta humana (Fernández-Salazar, 2020). El valor medio de ingesta de flavonoides se estima en 23 mg/día, siendo la quercetina la predominante con un valor medio de 16 mg/día. Estos se pueden encontrar en los vegetales, frutas, semillas, té negro, café y en productos procesados como la cerveza y el vino (Fernández-Salazar, 2020; Pérez-Trueba y Martínez-Sánchez, 2001).

La estructura de los flavonoides está constituida por dos anillos fenilos 3 (A y B) ligados mediante un anillo pirano obteniendo un esqueleto de difenilpiranos: C6-C3-C6 (Figura 2.7) común en la mayoría de los flavonoides (Escamilla-Jiménez, 2009). Son estructuras hidroxiladas (-OH) en el anillo aromático y, por lo tanto, son polifenólicas. Estos compuestos pueden ser encontrados como agliconas libres o en forma de O-heterósidos o C-heterósidos, unidos generalmente a glucosa y con base en el número de moléculas se denominan monómero, dímero u oligómero complejos. De los tres anillos, el anillo A se biosintetiza a través de la ruta del ácido shiquímico (Escamilla-Jiménez, 2009; Mota-Celis, 2010).

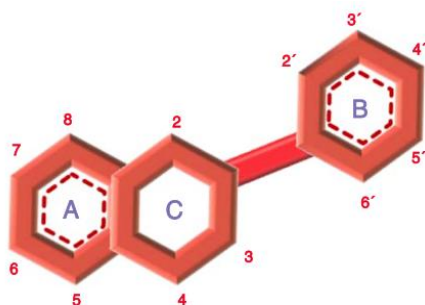


Figura 2.7. Estructura de un flavonoide con numeración y especificación de cada heterociclo (Escamilla-Jiménez, 2009)

Los flavonoides pueden subdividirse de acuerdo con la Tabla 2.7, donde se muestran algunos ejemplos (Pineda-Loperena, 2015). Dependiendo de la posición del anillo aromático (B) con respecto del resto del benzopirano (A y C), este grupo de productos naturales puede dividirse en tres clases (Figura 2.8) (Pineda-Loperena, 2015).

Tabla 2.7. Clasificación de los flavonoides (Cartaya y Reynaldo, 2001; Escamilla-Jiménez, 2009)

Nombre	Descripción	Ejemplo	Estructura
Antocianidinas	Tiene un grupo –OH unido en posición 3 y poseen un doble enlace entre los carbonos 3 y 4 del anillo C	Antocianidina Luteolinidina Cianidina	
Flavanonas	Presencia de un grupo –OH en posición 3 del anillo C	Catequina Hespiridina Naringina	
Flavonas	Poseen un grupo carbonilo en posición 4 del anillo C y carecen del grupo hidroxilo en posición C3	Diosmetina Luteolina Apigenina	
Flavonoles	Grupo carbonilo en posición 4 y un grupo –OH en posición 3 del anillo C	Quercetina Kaemferol Rutina	

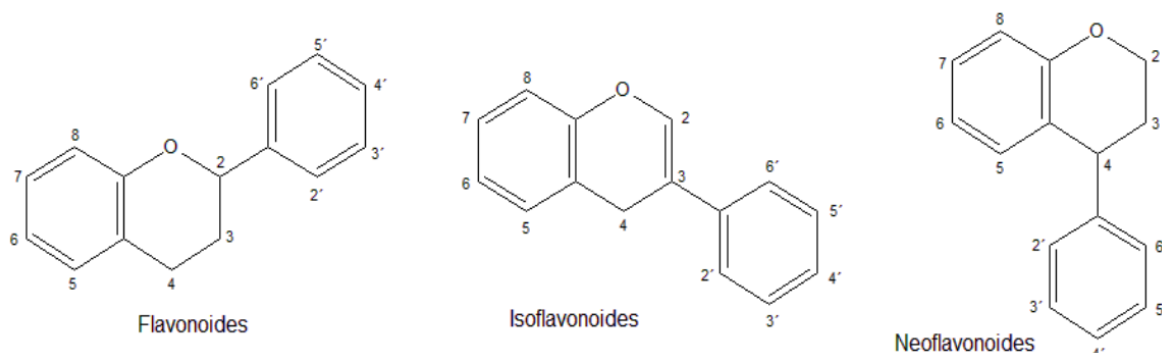


Figura 2.8. Estructura de los tres principales flavonoides (Grotewold, 2006)

2.6. Métodos de extracción para compuestos fenólicos

El objetivo de la extracción es la separación de uno o varios compuestos en específico de una mezcla compleja ya sea líquida o sólida por medio de un disolvente (McMurry, 2004; Naranjo-Martínez, 2016). Toma como base alguna fuente natural la cual contiene una mezcla de diversos componentes entre ellos alguno de interés químico. Además, no solamente permite aislar al componente deseado, sino que elimina a aquellos agentes químicos que podrían interferir en procesos posteriores (Escutia-Guadarrama, 2011).

El proceso de extracción puede ser clasificado de acuerdo con la naturaleza del material extraído o por el tipo de fases en contacto como extracción discontinua, normalmente llamada extracción líquido-líquido (ELL) y continua también llamada extracción sólido-líquido (ESL) (Moreno-Ruiz, 2020).

Considerando la estructura química de los compuestos fenólicos se observa la presencia de múltiples grupos hidroxilo (-OH), los cuales le otorgan a la molécula cambios en su polaridad, por lo que es complicado hablar de una optimización de

procesos de extracción (Chávez-Ramos, 2017). A pesar de esto, existe una constante búsqueda de nuevas técnicas que permitan disminuir tanto el uso de solventes como el tiempo de extracción, reduciendo los costos de operación, al tomar en cuenta las características del sistema como temperatura y pH (Chávez-Ramos, 2017; Ziyaadini et al., 2016).

Las Tablas 2.8 a 2.11 muestran las técnicas modernas que se están empleando: La extracción con calor convencional (ECC); la extracción en fase sólida (EFS) (por sus siglas en inglés, *SPE, solid phase extraction*); la extracción por lotes; la extracción asistida por microondas (por sus siglas en inglés, *MAE, microwave assisted extraction*); la extracción asistida por ultrasonido (EUS) (por sus siglas en inglés, *UAE, ultrasound assisted extraction*); microextracción líquido-líquido (por sus siglas en inglés, *LLME, liquid-liquid microextraction*); extracción en microdispositivos (EM) (Bendini et al., 2003; Chávez-Ramos, 2017; Fernández-Salazar, 2020; Ortega-Becerril, 2020; Ziyaadini et al., 2016).

La Extracción Asistida por Ultrasonido (EUS) tiene por desventaja, además de un menor rendimiento, mayor tiempo de extracción en comparación con la Extracción Asistida por Microondas (EAM) en el cual no se obtiene un extracto puro por lo que es necesario un método para eliminar el disolvente (Rabelo et al., 2015). Por otro lado, la extracción asistida por microondas tiene la ventaja de: Menores tiempos de extracción, menor cantidad de solvente requerido y es un método simple. Su desventaja es el riesgo de explosión (Gharaati-Jahromi, 2019).

El uso de la microextracción tiene varias ventajas frente a otros métodos de extracción líquido-líquido tradicionales. En la microextracción se reducen el número de errores que se podrían cometer al realizar procedimientos multipasos además que se requiere un menor uso de solventes por lo que beneficia al ambiente y a la salud humana (Chávez-Ramos, 2017).

**Tabla 2.8. Comparación de Extracciones en Microdispositivos vs. Extracción por Lotes
(Ortega-Becerril, 2020)**

Aceites	Polifenoles <i>Vitis vinifera</i> ($\mu\text{g EÁT /mL}$) \pm S (n=3)					
	Metanol:Agua		Solución amortiguadora		Etanol:Agua	
	Lote	Microchip	Lote	Microchip	Lote	Microchip
Ajonjolí tostado Del Moro (México)	51.95 \pm 2.02	275.94 \pm 14.66	50.02 \pm 2.13	295.02 \pm 8.13	48.58 \pm 2.01	385.56 \pm 25.35
Ajonjolí puro extra virgen Del Moro (México)	13.05 \pm 1.70	56.53 \pm 2.43	13.08 \pm 0.49	94.61 \pm 7.21	18.46 \pm 1.79	178.73 \pm 12.16
Aguacate Ahuacatlán 100% natural (México)	< L.D	14.94 \pm 1.12	< L.D	15.07 \pm 2.35	< L.D	17.91 \pm 1.79
Linaza extra virgen Inés Aceites Naturales (México)	< L.D	47.75 \pm 2.61	< L.D	87.35 \pm 5.01	< L.D	213.45 \pm 20.00
Linaza extra virgen Enature 100% natural (México)	< L.D	22.80 \pm 1.98	< L.D	31.80 \pm 1.68	< L.D	30.80 \pm 3.94
Pepita de uva refinado Inés Aceites Naturales (Chile)	< L.D	24.61 \pm 2.61	< L.D	89.47 \pm 1.78	< L.D	244.17 \pm 19.64
Pepita de uva puro Del Moro (Chile)	< L.D	15.76 \pm 0.28	< L.D	16.13 \pm 1.56	< L.D	15.48 \pm 2.39
Cacahuete tostado Inés Aceites Naturales (México)	17.68 \pm 1.81	162.44 \pm 11.25	16.77 \pm 1.37	168.30 \pm 8.92	25.81 \pm 0.58	233.29 \pm 11.93
Oliva virgen extra Pons Ecológico Natural (España)	93.61 \pm 4.52	273.16 \pm 13.42	94.22 \pm 6.13	294.36 \pm 10.2	91.74 \pm 2.64	353.78 \pm 26.75
Vegetal comestible Golden Hills (México)	23.10 \pm 1.09	221.56 \pm 16.23	12.09 \pm 1.25	140.14 \pm 9.90	10.24 \pm 0.73	148.22 \pm 13.15

EÁT: Equivalentes de ácido tánico; S: Desviación estandar; L.D., Límite de detección

Tabla 2.9. Comparación de Extracciones en Microdispositivos vs. Extracción por Lotes vs. UAE
(Ortega-Becerril, 2020)

Extracción	Polifenoles totales $\mu\text{g EÁT} / \text{g muestra} \pm \text{S}(n=3)$	
	Aceite de ajonjolí puro	Aceite de oliva extra virgen
Lote	8.74 \pm 0.35	98.16 \pm 5.09
Ultrasonido	4.50 \pm 0.59	63.98 \pm 1.47
Microdispositivo	40.92 \pm 4.47	90.25 \pm 9.87

UAE: por sus siglas en inglés *ultrasound-assisted extraction*; **EÁT:** Equivalentes de ácido tánico; **S:** Desviación estándar

Tabla 2.10. Comparación de Extracciones Asistidas por Microondas de compuestos fenólicos
(Elaboración propia)

Tipo	Matriz de extracción	Parámetros de operación				Contenido de polifenoles totales	Referencia
		F (MHz)	t (min)	T (°C)	P (W)	mg GAE/g	
MAE	Hollejo de uva (solvente) etanol: agua, 1:1	Entrada: 2450 Empleada: 80%	9	60	900	10	(Guntero et al., 2015)
MAE	Hollejo de uva con agua como solvente	Entrada: 2450 Empleada: 80%	6	60	900	17.19	(Guntero et al., 2015)
MAE	Hollejo de uva (solvente) etanol: agua, 3:1	Entrada: 2450 Empleada: 80%	9	60	900	10	(Guntero et al., 2015)
EM	*Aceite de Oliva (solvente) n-Hexano	NA	4	Amb	NA	415.74 \pm 6.39 mg EÁT/kg \pm S(n=3)	(Chávez-Ramos, 2017)
ELL	*Aceite de Oliva (solvente) n-Hexano:agua:etanol	NA	7	Amb	NA	138.19 \pm 11.26 mg EÁT/kg \pm S(n=3)	(Chávez-Ramos, 2017)
SPE	*Aceite de Oliva (solvente) ACT:H ₂ SO ₄ (0.1 mol/L)	NA				72.2% de GAE	(Bendini, 2003)
LLE	*Aceite de Oliva	NA				92.1% de GAE	(Bendini, 2003)

F: Frecuencia; **t:** Tiempo; **T:** Temperatura; **P:** Potencia; *Valores más alto de 6 distintas matrices; **NA:** No aplica; **ND:** No disponible; **T Amb:** Temperatura ambiente; **S:** Desviación estándar; **GAE:** por sus siglas en inglés *gallic acid equivalent*; **EÁT:** Equivalente de ácido tánico

**Tabla 2.11. Comparación de Extracciones Asistidas por Ultrasonido de compuestos fenólicos
(Elaboración propia, modificada de Ramón y Gil-Garzón, 2021)**

Matriz de extracción	Parámetros de operación				Contenido de polifenoles totales (mg GAE/g)	Actividad antioxidante (mg eq Trolox/g)	Ref.
	F (kHz)	t (min)	T (°C)	P (W)			
Orujo de uva blanca (<i>Vitis vinifera</i> L.)	26	30	50	200	95.3	375 mg eq α -tocoferol/g	(Natolino y Da-Porto, 2020)
Orujo de uva roja (<i>Vitis vinifera</i> L.)	20	4	80	80	23.36	44.78 mg eq α -tocoferol/g	(Da-Porto et al., 2015)
Orujo de uva roja (<i>Vitis vinifera</i> L.)	40	25	17	150	0.323	0.412	(González-Centeno et al., 2014)
Extracto de orujo de uva roja (<i>Vitis vinifera</i> L.)	25	60	20	300	438.9 mg GAE/mL	20.95 mg eq α -tocoferol/g	(Drosou et al., 2015)
Extracto de orujo de jugo de uva 70 % Isabel, 15 % Bordô, 10 % Carmem and 5 % Niagara	ND	15	88.1	450	5.3 mg GAE/mL	25.0 μ mol Trolox/mL	(Da-Rocha y Zapata-Noreña, 2020)
Orujo de uva	20	3	20	ND	39.5	68.25	(Marchante et al., 2018)
Orujo de uva	39	50	30	100	21.6	35.8	(González et al., 2020)
Orujo de Uva	25	60	25	ND	4.43	518 μ mol eq Trolox/g	(Marinelli et al., 2015)
Jugo de uva roja variedad (<i>Vitis vinifera</i> L.)	ND	30	40	-ND	30.88	2428 μ mol de Trolox	(Moldovan et al., 2020)
Hollejo de uva (solvente) etanol	40	60	60	70	6.92	ND	(Guntero et al., 2015)
Hollejo de uva (solvente) metanol	40	60	60	70	8.80	ND	(Guntero et al., 2015)
Hollejo de uva (solvente) agua	40	40	60	70	3.48	ND	(Guntero et al., 2015)
Aceite de Oliva (solvente)	ND	15	Amb	ND	233.65 \pm 7.97 mg EÁT/kg \pm S(n=3)	ND	(Chávez-Ramos, 2017)

F: Frecuencia; t: tiempo; T: temperatura; P: potencia; NA: No aplica; ND: No disponible; t Amb: temperatura ambiente; GAE: por sus siglas en inglés *gallic acid equivalent*; EÁT: equivalente de ácido tánico; S: Desviación estándar; Trolox: Ácido 6-hidroxi-2,5,7,8-tetrametilcroman-2-carboxílico es un análogo de la vitamina E; *Valores más altos de 6 distintos tipos de aceites

2.7. Método de extracción por adsorción en carbón activado

Entre las ventajas que ofrece el uso del carbón activado se encuentran su microporosidad elevada, con sus grandes áreas superficiales, bajos costos, el uso para tratamiento de residuos en soluciones acuosas y en procesos de purificación de gases y su alta eficiencia para separar los polifenoles (Tabla 2.12) (Carriazo et al., 2010).

Tabla 2.12. Rendimientos de extracciones hechas con carbón activado, CA

Extracción de compuesto fenólico	Tipo de carbón	Rendimiento de extracción	Referencia
Quercetina	CA modificado con etilendiamina	76.54-86.18%	(Tao y Kyung, 2011)
Polifenoles	CA-GA, industrias Kerm	55-80%	(Garrido-Fernández et al., 1997)
p-cresol	CA combinado con microondas	82-94%	(Kumar-Gupta et al., 2014)
Polifenoles	CA	70.2%	(Contreras-Contreras, 2019)

CA-GA: Carbón activado tipo GA

Según la investigación realizada por Gaspar-Mendoza (2021) teóricamente son necesarias 10 etapas consecutivas con 1 g de CA para remover 99.9% de los fenoles, mientras que esto es posible con 4 etapas consecutivas con 5 g de CA. Estos experimentos podrían realizarse usando carbón activado de bagazo de caña para hacer la adsorción más rentable.

En la Tabla 2.13 se presentan algunas ventajas y desventajas de los métodos de separación ya descritos, adicionando el empleo de fluidos supercríticos, para recuperar los polifenoles que podrían ser aplicables a las melazas de los ingenios azucareros alcoholeros.

Tabla 2.13. Ventajas y desventajas de varios métodos de separación (Elaboración propia)

Método empleado	Ventajas	Desventajas	Referencia
Extracción por fluidos supercríticos	Alta flexibilidad para alterar las propiedades del disolvente, la selectividad, la rapidez de separación de fases y la reducción de la contaminación de los productos, a mayor presión mayor poder de disolución, vaporiza compuestos no-volátiles a moderadas temperaturas reduce el gasto de energía, el disolvente es recuperado fácilmente	La alta inversión requerida para el montaje de un equipo de extracción con fluidos supercríticos y los escasos datos relativos a equilibrios de fases y de transferencia de materia en sistemas complejos	(Valero, 2011)
Extracción microondas asistida	Eficacia elevada debido a las altas temperaturas, tiempo de extracción corto, reducción del consumo de disolvente, proceso simple, bajo costo, técnica rápida y sencilla y tecnología verde	Temperaturas muy elevadas generan compuestos indeseados, necesita filtración posterior, baja eficiencia con disolventes o compuestos objetivo no polares o volátiles	(Nieto-Sanz, 2019)
Extracción de ultrasonidos asistida	Alta recuperación de compuestos, menor consumo de disolvente, disolventes más seguros, análisis de propiedades rápidos, genera compuestos fenólicos menos degradados, reducción del tiempo de extracción, reducción de energía, menor uso de disolvente, reducción de temperatura de extracción, extracción selectiva, reducción	Falta de uniformidad en la distribución de la energía, disminución de la potencia con el tiempo	(Nieto-Sanz, 2019)

Método empleado	Ventajas	Desventajas	Referencia
	del tamaño de los equipos, respuesta rápida y aumento de la producción		
Extracción por carbón activado	Grandes áreas superficiales, el uso para tratamiento de residuos en soluciones acuosas y en proceso de purificación de gases, su microporosidad elevada y bajos costos	Poca selectividad, necesita un proceso de desorción adicional	(Carriazo et al., 2010)
Extracción con micro dispositivos	Requiere bajas cantidades de muestra y de reactivos y, por lo tanto, produce menos desechos, tiempos reducidos de extracción y manipulación mínima por parte del operador	Corto tiempo de vida de cada microchip, aún no se ha escalado a nivel industrial, se requiere de un diseño específico de microchip	(Chávez-Ramos, 2017)

2.8. Cuantificación de polifenoles totales: Método de Folin-Ciocalteu

El método de Folin-Ciocalteu (FC) es comúnmente empleado para la cuantificación y determinación de fenoles totales en alimentos y vegetales.

Se basa en la capacidad de los fenoles para reaccionar con agentes oxidantes (Chávez-Ramos, 2017; Moreno-Ruiz, 2020).

Durante el proceso se usa el reactivo de Folin-Ciocalteu que contiene molibdato y tungstato de sodio solubilizados, los cuales se reducen en medio alcalino al entrar en contacto con cualquier tipo de fenol (Cao et al., 2020; Martins et al., 2021), formando complejos de ácido fosfotúngstico-fosfomolibdico, en donde el tungsteno y molibdeno presentan estado de oxidación 6+.

Esto da como resultado compuestos de color azulado (Chávez-Ramos, 2017), de los cuales, su luz de absorción se encuentra alrededor de 760 nm (Figura 2.9).

El ácido gálico es la molécula de referencia más común para expresar los datos cuantitativos, normalmente mostrado como equivalentes de ácido gálico (*GAE*, por sus siglas en inglés) (Cao et al., 2020; Martins et al., 2021).

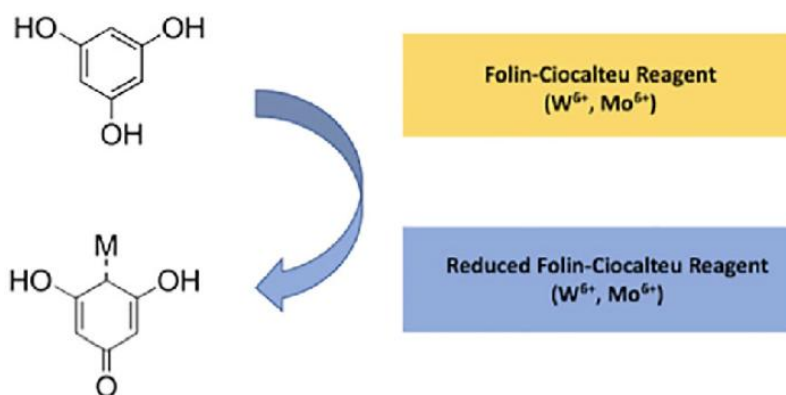


Figura 2.9. Reducción de reactivo de Folin-Ciocalteu debido a la oxidación de compuestos fenólicos (Ford et al., 2019)

2.9. Métodos de purificación

Es el proceso físico en el cual se eliminan aquellos compuestos indeseados o agentes extraños que no son las sustancias puras deseadas. En este proceso se logra aislar cierto componente gracias a sus características químicas o físicas. Para esta investigación se prioriza la separación de los compuestos fenólicos.

2.9.1. Cromatografía de intercambio iónico (columna de adsorción-desorción)

Las resinas de adsorción macro-porosas son polímeros altamente reticulados por lo que tienen una gran área superficial y numerosos poros. En los últimos años se ha comprobado la eficiencia de las resinas en la adsorción de compuestos bioactivos y de metabolitos secundarios en soluciones acuosas, así como de no acuosas. Esto es gracias a su fuerza electrostática, interacciones de puentes de hidrógeno,

complejación y la acción de tamizado por tamaño (Tabla 2.14) (Soto et al., 2017; Xiong et al., 2014).

Tabla 2.14. Resultados de purificación tras paso por columna de adsorción para los compuestos fenólicos

	Pureza inicial (líquido) %	Pureza tras columna (líquido) %	Pureza en producto seco (sólido) %	Rendimiento de recuperación %	Referencia
PF EAG	16.1	78.5	62.2	34,7	(Trillo-Contreras, 2015)
Catequinas	2.5	14.2	10.7	89,8	(Trillo-Contreras, 2015)
Epicatequinas	1.2	7.4	6.34	94,6	(Trillo-Contreras, 2015)
Resveratrol	1.32	ND	23.60	88.33	(Xiong et al., 2014)
Florotaninos	452 mg PGE/g	ND	905 mg PGE/g	92	(Kim et al., 2014)
PT	16.8	ND	ND	55.6	(Yi et al., 2015)
Pinocembrina	5.49	ND	ND	19.8	(Yi et al., 2015)
PT	54.16	ND	216.27	ND	(Beltrán et al., 2016)
Placenta de uva					
PT	36.19	ND	216.27	ND	(Beltrán et al., 2016)
Cáscara					

PT: Polifenoles totales, PGE: Equivalentes de floroglucinol por gramo de muestra, PF EAG: Polifenoles medidos como equivalentes de ácido gálico

En todas estas pruebas se requirieron de solventes distintos al agua, específicamente del etanol en diferentes proporciones. Este método de separación ofrece las siguientes ventajas: Es efectivo, ofrece un efluente puro, de fácil recuperación del adsorbente, alta selectividad, opera con naturalidad gracias a su fuerte afinidad de fuerzas electrostáticas de sus componentes celulares a los iones acuosos, bajos costos de operación y fácil regeneración (Soto et al., 2017).

Algunas de sus desventajas es su elevado costo de instalación, uso de resinas que son vulnerables a la oxidación por agentes químicos, el proceso se ve fuertemente afectado por la presencia de otros cationes y las resinas no son muy tolerantes al cambio de pH (Cárdenas-Salazar y Ortega-Revilla, 2015).

2.9.2. Microfiltración vs. Ultrafiltración

La aplicación de esta tecnología no logra que los distintos tipos de membranas pueden hacer una separación selectiva de los compuestos fenólicos contenidos en la uva, por lo cual se descartó esta tecnología debido a su baja efectividad y poca selectividad (Tabla 2.15) (Beltrán et al., 2016).

Tabla 2.15. Comparación de microfiltración y ultrafiltración para la extracción de compuestos fenólicos (Beltrán et al., 2016)

Tamaño de membrana	Alimentado (mg GAE/mL)	Retenido (mg GAE/mL)	Permeado (mg GAE/mL)
10 µm	38.22	35.29	32.42
0.45 µm	32.58	31.02	0.32
0.2 µm	34.08	32.4	31.66
0.1 µm	34.73	0.21	0.18
300 kDa	35.13	30.6	23.73
150 kDa	33.99	35.38	23.55
50 kDa	35.01	34.92	22.78
15 kDa	33.53	35.1	21.73

GAE: por sus siglas en inglés *gallic acid equivalent*

En el siguiente capítulo se presentan las bases del estudio de factibilidad que será la siguiente etapa de esta investigación bibliográfica.

CAPÍTULO III.
Estudio de factibilidad

3.1. Descripción y localización de la planta industrial

La construcción de esta planta está prevista dentro de las instalaciones de la Alcoholera de Zapopan, S.A. de C.V. la cual fue considerada como la fuente de la vinaza.

Esta empresa tiene distintas sucursales y su planta de producción se encuentra en el kilómetro 8 S/N Int. A Carretera Libre Córdoba – Atoyac Villa General Miguel Alemán (Antes: Potrero Nuevo) Municipio Atoyac, 94965 Veracruz, México. La localización se muestra en la Figura 3.1.

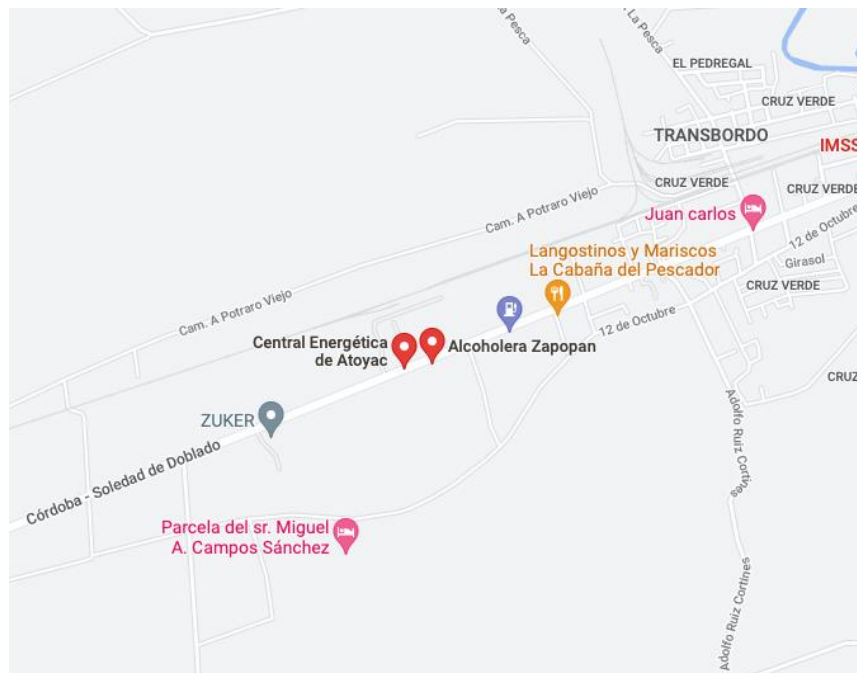


Figura 3.1. Localización de la planta piloto

En la actualidad la empresa tiene una capacidad para moler hasta 2,500 toneladas de caña de azúcar al año, almacenar hasta 7 millones de litros de alcohol y una

producción de 225,000 L/día de etanol y por cada litro de alcohol son generados 12 litros de vinazas por lo que se tiene un flujo de 2,700,000 L/día.

3.2. Corriente de entrada

Es necesario contar con las especificaciones del tipo de vinaza con la que se desea trabajar para determinar si es necesario un pretratamiento adicional que puede ser de tipo mecánico, como la molienda o el tamizado para reducir el tamaño de partícula en el líquido o filtración por medio de membranas para separar las moléculas por su tamaño, gravitacionales, como sedimentación o centrifugación para fraccionar las mezclas heterogéneas (Santos-Buelga et al., 2012).

Para fines de esta investigación se consideraron las características de las vinazas citadas por Robles-González y colaboradores (2012) presentadas en la Tabla 2.2 por tener valores cercanos al promedio reportado por los otros autores.

También se consideró que las vinazas no contienen sólidos sedimentables o materiales sólidos de gran tamaño.

Es importante aclarar que las vinazas crudas no pueden ser alimentadas directamente al reactor ya que pueden provocar inestabilidad, la adaptación de los microorganismos es muy lento, el sistema comienza a acidificarse por la acumulación de ácidos grasos volátiles y la calidad del biogás se puede ver afectada. Contreras-Contreras (2019) recomienda una dilución de las vinazas con agua de la llave y una solución de sulfato ferroso (1 g/L) en una proporción de 45:45:10 respectivamente, a esta solución se le denomina vinazas diluidas (VD) y sus características se describen en la Tabla 3.1.

De hecho, ya en un sistema real se podrían diluir con las propias vinazas tratadas y desfenolizadas para usar el agua eficientemente.

**Tabla 3.1. Propiedades de las vinazas diluidas
(Contreras-Contreras, 2019)**

Parámetro	Valor promedio	Unidades
Temperatura	18.47	°C
Valor de pH	4.79	-
Conductividad eléctrica	11.24	mS/cm
Alcalinidad	1012.9	mg CaCO ₃
DQO	33363	mg/L
DBO	6180	mg/L
Sulfatos	4881	mg/L
Sulfuros	171	mg/L
Fósforo total	120.52	mg/L
Ortofosfato	24.36	mg/L
Sólidos totales	29398	mg/L
Sólidos totales volátiles	10508	mg/L
Sólidos suspendidos totales	2083	mg/L
Sólidos suspendidos volátiles	705.6	mg/L

La conductividad eléctrica, la alcalinidad, la DQO, los sulfatos, los sulfuros, las formas de fósforo y sólidos, reducen su concentración aproximadamente a la mitad respecto de la vinaza cruda.

En caso de ser necesario se puede realizar un proceso de “adecuación del medio de digestión”, aquí se adicionan los nutrientes necesarios (N y P) para el crecimiento microbiano (biomasa), la relación entre DQO:P:N para los sistemas anaerobios debe ser mayor a 900:5:1.7, la relación presente en la VD es de 900:25:3 por lo que cumple con este parámetro (Castro-González, 2004, Contreras-Contreras, 2019). Luego se ajusta el pH con una solución de cal a un valor de pH de 7 para propiciar el crecimiento de las bacterias metanogénicas (se recomienda pH >7). La carga volumétrica de trabajo es del 1% de las vinazas producidas por la destiladora de Zapopan que corresponde a 27000 L de vinaza. Se considera que el reactor logra disminuir la DQO en un 58.3% y la DBO en un 95%, el metano en el biogás es del

70% y la temperatura de trabajo del reactor es de 45°C (Castro-González, 2004, Contreras-Contreras, 2019)

3.3. Diseño de la planta piloto

3.3.1. Primera Etapa: Producción de carbón activado de bagazo de caña

El carbón activado puede obtenerse mediante activación química o física, a partir de biomasa vegetal, como el bagazo de caña. Según las investigaciones realizadas por Gaspar-Mendoza (2022) la activación química del carbón activado con ácido fosfórico al 40% dio un mayor rendimiento de activación del carbón (48.58% de CA) en comparación con activación física, así mismo demostró aumentar la capacidad de retención de polifenoles del CA. Kaushik y colaboradores en 2017 usaron carbón activado obtenido de las cenizas de bagazo de caña de azúcar para la recuperación de melanoidinas, un tipo de polifenoles. El método empleado en la activación química por el grupo de Solís-Fuentes y col. (2012) se ilustra en la Figura 3.2.

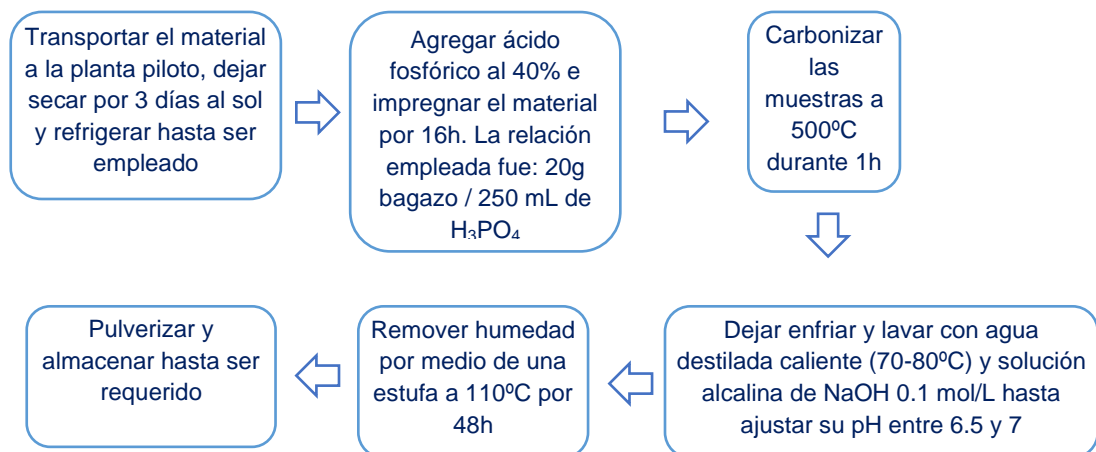
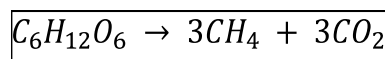


Figura 3.2. Proceso de producción del CA por activación química con H_3PO_4 (Solís-Fuentes y col., 2012)

Se encontró que no hay relación entre la capacidad de remoción de color con la cantidad de activador agregado y el tiempo de impregnación del carbón. El CA de BC logró adsorber hasta el 98.2% del color del guarapo y hasta el 77% de los cromóforos del jugo clarificado de caña (Solís-Fuentes y col., 2012).

3.3.2. Segunda etapa: Tratamiento de vinaza en un reactor anaerobio tipo RALLFA

Como pretratamiento se propone un equipo RALLFA o *UASB* (por sus siglas en inglés), para la remoción de materia orgánica. Se ha observado (Contreras-Contreras, 2019; Sosa-Villalobos, 2014), que algunas de sus características importante incluyen la reducción de la DQO y la DBO, tienen un bajo consumo energético, bajos costos de operación, requieren una menor cantidad de nutrientes y producen metano (fuente potencial de energía), lo cual se potencializa en países con clima tropical como México. Dichas características hacen del proceso anaerobio una alternativa muy atractiva desde el punto técnico-económico-social para el tratamiento de las vinazas. El tratamiento en reactores RALLFA es un proceso de transformación anaerobio en el cual se convierte la materia orgánica biodegradable en biogás constituido principalmente por metano y dióxido de carbono. Este proceso es complejo debido a su número de reacciones y microorganismos involucrados, pero puede ser seccionado en cuatro etapas principales: Hidrólisis, acidogénesis, acetogénesis y metanogénesis. En forma general el proceso puede ser resumido en la siguiente ecuación.



Ec. 3.1

Valor de pH dentro del reactor. El pH resulta ser un parámetro que determinara el tipo de bacterias que podrán proliferar con mayor facilidad dentro del reactor, por lo que un control de este es de suma importancia para asegurar un rendimiento alto y que el proceso de tratamiento de agua sea efectivo. Se recomienda usar un intervalo de pH entre 6-8 ya que dentro de este rango la producción de metano será óptimo.

Biogás. El principal componente de este es el metano el cual es apreciado debido a sus características energéticas. El biogás debe pasar por un tratamiento de purificación compuesto por una torre de lavado y de un reactor de desulfuración para eliminar el sulfuro de hidrógeno (H_2S) posterior a ello es posible su almacenamiento para su venta o utilización como combustible. Para evitar una producción alta de este ácido es necesario tener una relación de DQO/sulfuros mayor a 2.5 (Velasco y col., 2008). Para VD el DQO/sulfatos= 6.8.

Es posible realizar una estimación del gas producido a partir de la diferencia de DQO del influente y efluente de acuerdo con la ecuación 3.2 (Bernal-González y col., 2012):

$$V_{CH_4} = \frac{\Delta DQO(R)(T)}{K_{CH_4}(P)} \quad \text{Ec. 3.2}$$

en donde:

V_{CH_4} - Volumen teórico del metano

R- constante universal de los gases

T- Temperatura absoluta de operación

P- Presión atmosférica

K- es la relación de gramos necesaria de DQO para producir un mol de metano

$$K_{CH_4} = 64 \frac{g \text{ de DQO}}{mol \text{ de } CH_4} \quad \text{Ec. 3.3.}$$

3.3.3. Tercera etapa: Adsorción de polifenoles en una torre empacada con carbón activado

En comparación con los distintos métodos de extracción se propone el uso de una torre de adsorción con carbón activado, debido a la simplicidad del procedimiento, efectividad para remover fenoles, menor intensidad de mano de obra, posibilidad de escalamiento, bajos

costos de operación y oportunidad de reutilización de subproductos industriales como el bagazo de caña de azúcar. El carbón activado es un compuesto con un área superficial muy alta lo cual le concede una excelente capacidad de adsorción y es posible recuperar los compuestos adsorbidos. En la actualidad se ha comprobado que el CA es eficiente para remover metabolitos secundarios de matrices acuosas y son una alternativa muy prometedora para la extracción de compuestos fenólicos. A este tipo de extracción se le considera como sólido-líquido, la elución y retención dependerá del tipo de carbón activado y de su área superficial. El éxito en la etapa de desorción dependerá de la correcta elección de un eluyente y como paso final se recomienda hacer pruebas de actividad antioxidante, cuantificación y caracterización de polifenoles para determinar si es necesario un tratamiento de purificación adicional, evaluar el rendimiento del proceso y proponer posibles modificaciones que aumenten el rendimiento del proceso y calidad de los polifenoles. En las Figuras 3.3 y 3.4 se puede observar que la adsorción en CA se ve fuertemente afectada por un pH básico y altas temperaturas por lo que se recomienda que dentro de la torre se trabaje con un pH=2 y temperaturas de 20-40°C (Kumar-Reddy et al., 2014).

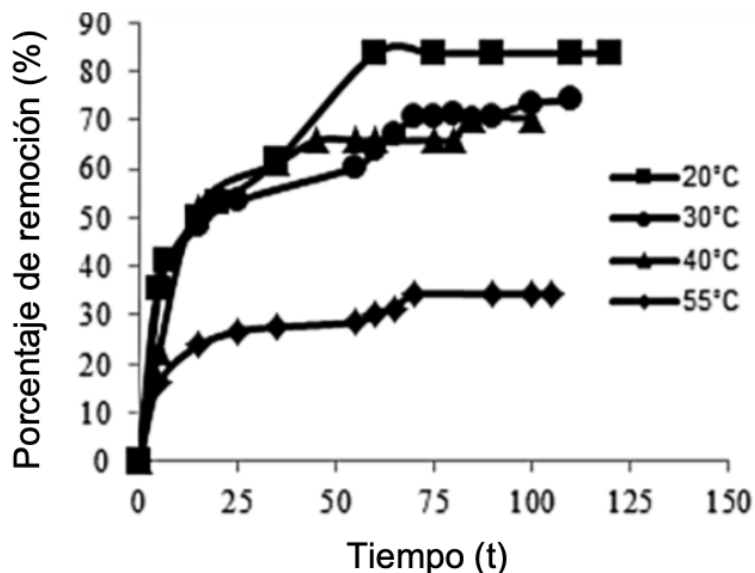


Figura 3.3. Influencia del pH en la eliminación de polifenoles (tomada de Gaspar-Mendoza, 2021)

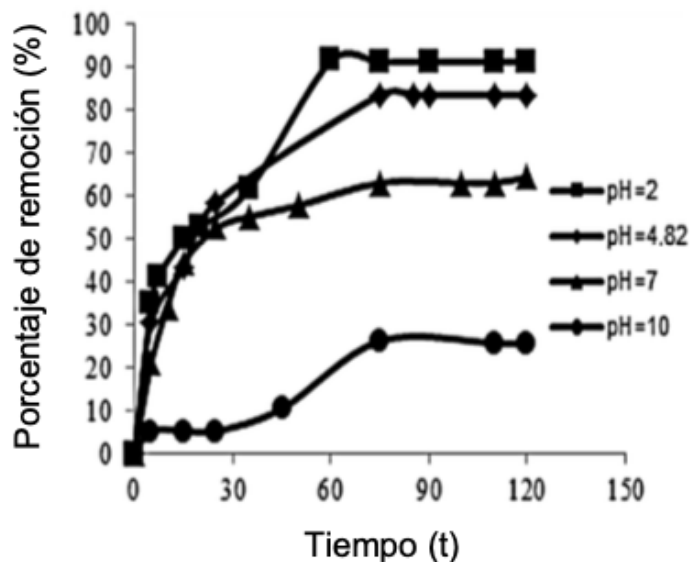


Figura 3.4. Influencia de la temperatura en la eliminación de polifenoles (tomada de Gaspar-Mendoza, 2021)

Contreras-Contreras (2019) encontró que el modelo de adsorción que mejor describía el comportamiento de los polifenoles era el de Langmuir con un coeficiente de regresión de 0.9912. Esto indicaría que hay una posible creación de una monocapa, la existencia de un número de sitios activos y que la adsorción es reversible por lo que existe un equilibrio de reacción.

La energía libre de Gibbs fue negativa en la experimentación realizada por Contreras-Contreras (2019) por lo que la adsorción se considera termodinámicamente favorable. Como se muestra en la Figura 1.1, son necesarias 18 etapas consecutivas en una columna empacada con carbón activado para adsorber el 99.9% de polifenoles, se debe tomar en cuenta que cada una de las etapas necesitará del mismo proceso de desorción y reactivación y que entre mayor sea el carbón dentro del empaque mayor será la cantidad de polifenoles retenidos.

3.3.4. Cuarta etapa: Desorción de polifenoles

Existen 4 métodos principales para la reactivación del carbón agotado: térmica, química, microbiológica y mediante vacío. El método preferido a nivel industrial es la reactivación térmica (Kow y col., 2016). El método empleado para la desorción de los polifenoles se ilustra en la Figura 3.5.

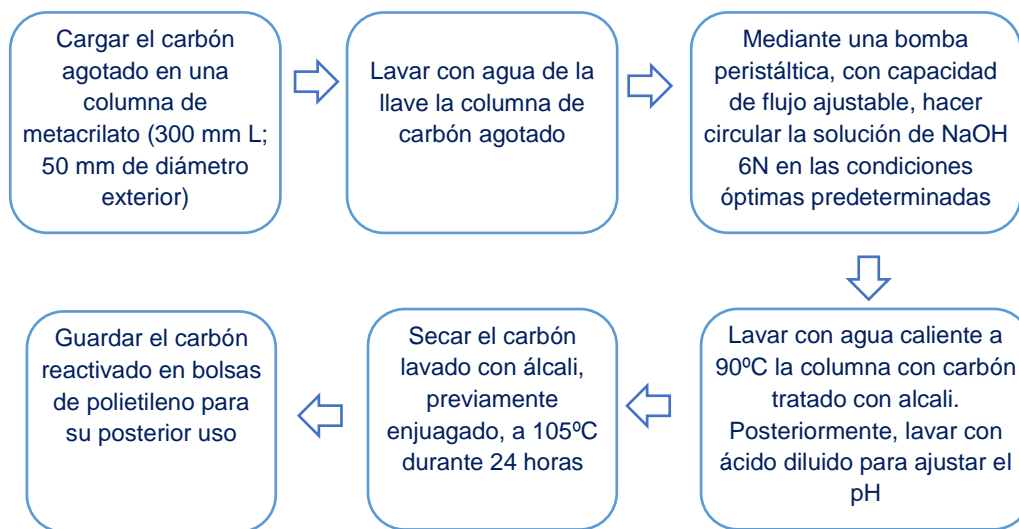


Figura 3.5. Proceso de desorción de polifenoles y reactivación de carbón agotado (Kow et al., 2016)

3.3.5. Quinta etapa: Tratamiento de las vinazas pos-tratadas

Según información recabada por Correa-López (2022), es necesario un tratamiento posterior a la adsorción de polifenoles contenidos en la vinaza para asegurar el cumplimiento de la NOM-003-SEMARNAT-1997, con respecto de los límites permisibles de DBO y DQO.

De acuerdo con la Tabla 3.2 se observa un mayor índice de remoción en el proceso combinado de coagulación-floculación seguido de un proceso de microfiltración y nanofiltración con el 99.5% de remoción en la DQO y un 99.9% de eliminación del color.

Tabla 3.2. Eficiencias y características del tratamiento de vinazas mediante procesos combinados (tomada de Correa-López, 2022)

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-Neto 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 Coagulación-floculación y ozonación catalítica	85.94% DQO con ozonación 88.27% DQO con ozonación catalítica 99% color en ambos casos	Ferral-Pérez et al., 2016
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 en carbón activado	70.2% fenoles como ácido gálico	Contreras-Contreras et al., 2020

Se proponen en la Figura 3.6 y Tabla 3.3 el diagrama de flujo de proceso en donde se describe el tratamiento para las vinazas a través de las 5 etapas detalladas en este documento. El balance de materia mostrado en la Tabla 3.4 se obtuvo a partir de los rendimientos reportados por Contreras-Contreras (2019) y Gaspar-Mendoza (2022). Este punto es clave para la continuación de esta investigación bibliográfica como se verá después.

3.3.6. Propuesta de diagrama de flujo

En la Figura 3.6 se presenta el diagrama de flujo de proceso generado con otra paquetería. Incluye la Tabla 3.3 con la descripción de corrientes y equipos. En la Tabla 3.4 se dan los números estimados del balance de materia del proceso.

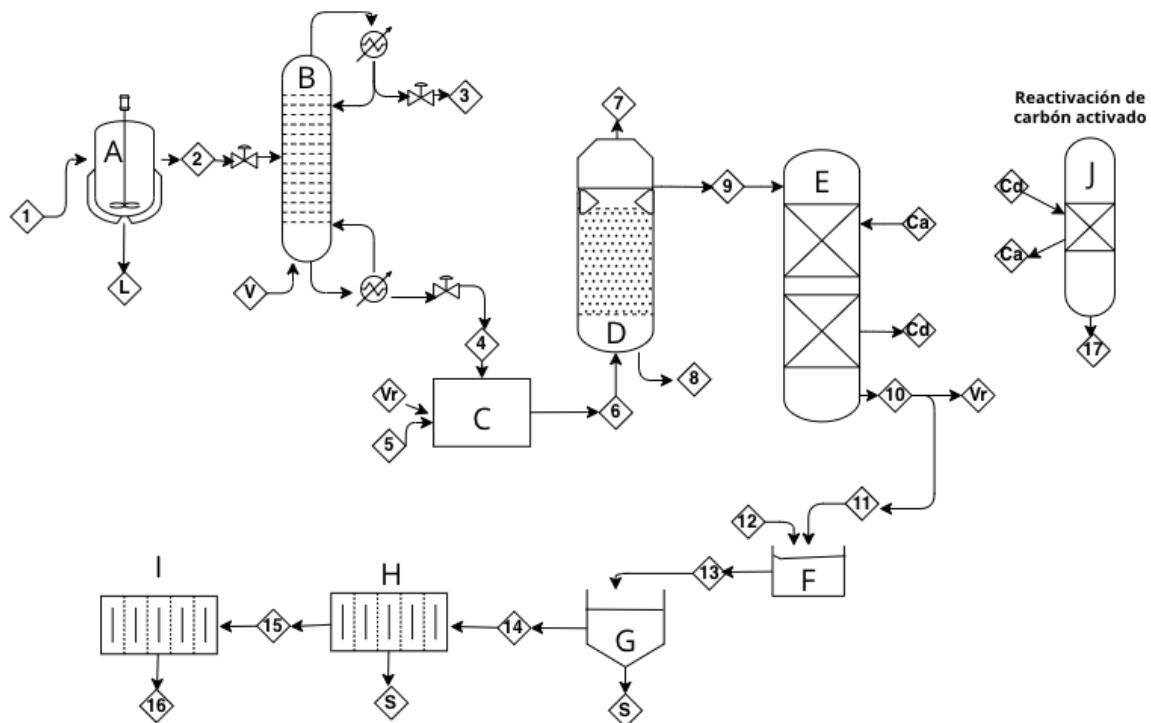


Figura 3.6. Diagrama de flujo de proceso, DPF

Tabla 3.3. Descripción de corrientes y equipos

Corrientes	Corrientes	Equipos
1- Melaza	13- Vinaza pos-coagulación	A- Fermentador
2- Etanol, vinaza y residuos	14- Vinaza pos-floculación	B- Primera torre de destilación
3- Etanol de alta pureza	15- Vinaza sin solidos	C- Tanque de adecuación
4- Vinaza	16- Lodos para suelos cañeros	D- RALLFA
5- Solución de adecuación de las vinazas	17- Vinaza pos-CA	E- Columna de adsorción en CA
6- Vinazas diluidas	L- Levadura recuperada	F- Tanque de coagulación
7- Biogas rico en metano	V- Vapor de agua	G- Tanque de floculación
8- Lodos residuales	Vr- Vinaza de recirculación	H- Ultrafiltración
9- Vinaza pos-bioreactor	Cd- Carbón desgastado*	I- Nanofiltración
10- Vinaza pos-adsorción en CA	Ca- Carbón activado	J- Reactivación de Cd**
11- Vinaza pos-adsorción en CA	S- Sólidos finales para suelos cañeros	
12- Coagulante y floculante		

*Con polifenoles adsorbidos; **Con la recuperación de los polifenoles desorbidos

Tabla 3.4. Balance de materia del proceso

Corrientes	4	6	7	9	10	17
Vinaza (L)	27000	60000	0	ND	ND	0
Metano (L)	0	0	214230.29	0	0	0
Polifenoles (kg de Eq de AG)	232.2	217.32	0	221.34	0.22	221.12
DQO (kg)	1803.09	900.80	0	375.63	ND	0
DBO (kg)	185.49	166.86	0	146.83	ND	0
pH	4.79	7	ND	2	2	ND
Temperatura (°C)	18.47	18.47	ND	45	20	20

Eq de AG: polifenoles medidos como equivalentes de ácido gálico

3.3.7 Simulación del proceso en Aspen Plus®

Se realizó la simulación de tratamiento de vinazas residuales del proceso de producción de etanol partiendo del diagrama presentado en la Fig. 3.7. Para ello se empleó el software de simulación de procesos AspenPlus® de la empresa Aspen Technology.

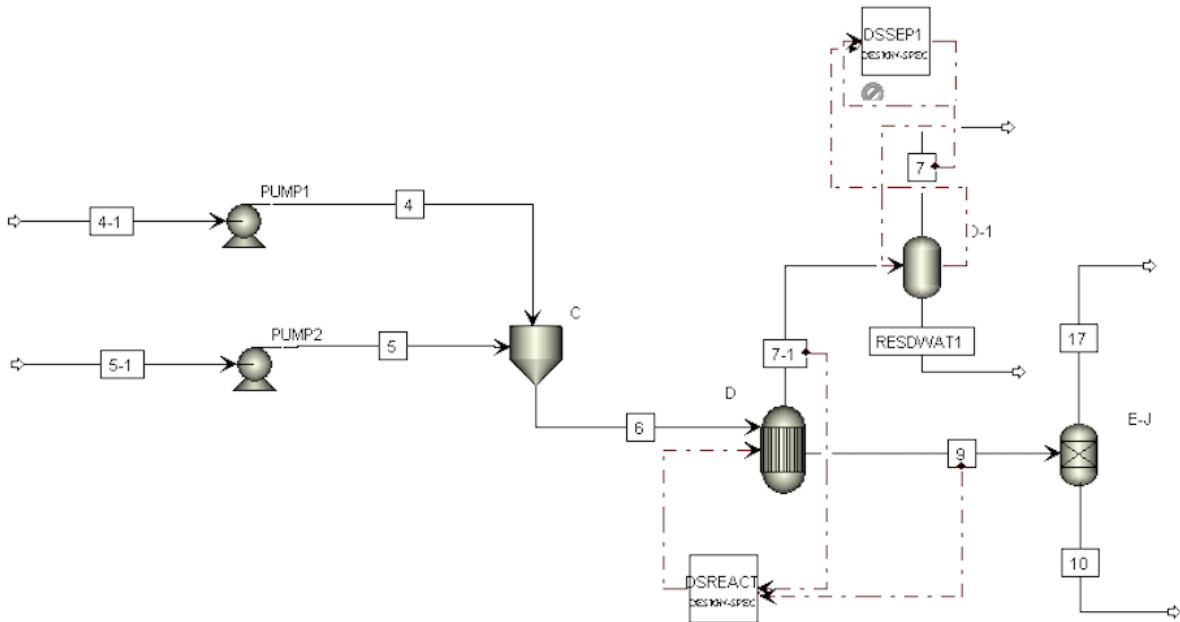


Figura 3.7. DFP programado en Aspen Plus®

Se creó una nueva simulación en blanco con unidades del sistema internacional y se procedió a seleccionar el ambiente de "*Properties*" para introducir la configuración necesaria previa a la simulación:

1. Se introdujeron los siguientes componentes: *Water*, *Methane*, *CO₂*, *Glucose*; que se encuentran en las bases de datos nativas de Aspen Plus®.
2. Se introdujo el componente "*Ac. Galic*" (ácido gálico) de forma manual al sistema. Este componente no se encontró en la base de datos de Aspen Plus® así que se incluyeron como datos de usuario la masa molecular y el punto normal de ebullición para crear la molécula de *Ac. Galic*.

3. En la sección de *Components>Molecular Structure* se introdujo la estructura molecular del *Ac. Galic*. Con estos datos Aspen Plus® es capaz de realizar los cálculos termodinámicos necesarios para la simulación.
4. Se prosiguió a la sección de *Methods>Specifications* donde se eligió el modelo termodinámico adecuado según las condiciones de operación del proceso de tratamiento de vinazas residuales. Se tomaron las siguientes consideraciones:
 - Que era un sistema de tipo químico de acuerdo con sus componentes y que no incluía hidrocarburos y/o refrigerantes.
 - Que la presión en el sistema no era alta (mayor a 10 bar).
 - Que se incluían *Componentes de Henry* (es decir, componentes no condensables).

Como consecuencia de tomar en cuenta las consideraciones previamente señaladas se determinó que el modelo termodinámico que mejor describe sistema es *Non-Random Two Liquids* o *NRTL* con adaptación para componentes de *Henry*.

Con la elección del método termodinámico se terminó la configuración previa para la simulación por lo que se procedió a ir al ambiente de "*Simulation*". Se caracterizaron las entradas: Corriente 4 corresponde a la vinaza cruda, subproducto de la primera torre de destilación y corriente 5 corresponde al agua de dilución con los nutrientes necesarios para el correcto funcionamiento del reactor.

Se empleó un reactor tipo estequiométrico para simular el RALLFA. La mayor ventaja que ofrece este reactor biológico es la reducción de la DBO y DQO para la generación de metano sin afectar la concentración de polifenoles. No hay forma de ingresar DBO o DQO dentro de la simulación de Aspen por lo que se propone usar una fuente de carbono conocida como la glucosa para ejemplificar estos dos

parámetros. A partir de ello se lograron simplificar las múltiples reacciones llevadas a cabo en el reactor con la Ec. 3-4.



El reactor se mantuvo a una temperatura de 45°C necesaria para favorecer la cinética de la reacción de producción de metano. Tiene dos salidas: La corriente 7-1 perteneciente al biogás, donde fue necesario hacer uso de un separador para eliminar los arrastres de agua y la corriente 9 la cual contiene los valiosos polifenoles en las vinazas tratadas.

Debido a los escasos datos reportados para la adsorción de los compuestos polifenólicos en el carbón activado proveniente del bagazo no es posible realizar una simulación detallada en *Aspen Adsorption*. En cambio, fue posible el uso de un separador para aislar a los compuestos fenólicos en la corriente 17.

Los datos presentados en la Tabla 3.6 son los resultados obtenidos a partir de la simulación del proceso en Aspen Plus®. Las corrientes de mayor interés son la corriente 7 que corresponde al biogás producido en el reactor, con una producción de 11.973 kg de metano por hora, la corriente 17 corresponde a los polifenoles de los cuales es posible recuperar 0.455 kg/h y la corriente 10 de las vinazas sin polifenoles con 2.387 m³/h.

No es posible diferenciar la glucosa remanente entre DBO y DQO por medio del programa Aspen, pero gracias a los estudios realizados por Contreras-Contreras es posible estimar que la remoción a la salida del reactor: Será de un 58.3% para el caso de DQO y de 95% para el caso de DBO. Incluso con estos altos porcentajes de remoción, las vinazas procesadas no cumplen con los límites permisibles en la NOM-003-SEMARNAT-1997 y la NOM-001-SEMARNAT-2021 por lo que, para la siguiente

etapa de cálculo, se sugiere generar un tren de tratamiento adicional para cumplir con las normas (Figura 3.6).

Tabla 3.6. Balance de materia obtenido con Aspen Plus®

Corrientes		4	5	6	7	9	10	17
Temperatura	C°	18.48	25.01	22.06	25.00	97.30	97.30	97.30
Presión	bar	1.42	1.42	1.42	1.01	1.01	1.01	1.01
Molar Fracc. Vap.		0	0	0	1	0	0	0
Mass fracc. liq.		1	1	1	0	1	1	1
Flujo Mol	kg/hr	60.13	75.86	135.99	1.56	121.03	121.03	0.0027
Flujo mass	kg/hr	1155.37	1366.69	2522.067	46.641	2210.795	2210.340	0.455
Agua	kg/hr	1075.26	1366.69	2441.95	0.880	2176.94	2176.94	0
Metano	kg/hr	0	0	0	11.973	0.123	0.123	0
CO2	kg/hr	0	0	0	33.788	0.050	0.050	0
Glucosa	kg/hr	79.654	0	79.654	0.000	33.216	33.216	0
Ac. Gálico	kg/hr	0.460	0	0.460	0.000	0.460	0.0046	0.455
Volume Flow	cum/hr	1.125	1.375	2.500	38.236	2.387	2.387	0.000

3.4. Estudio de viabilidad

La creación de un proyecto industrial conlleva cierta incertidumbre, el estudio de viabilidad se realiza una vez armado el proyecto y sirve para evitar un fracaso al comenzar a materializar la idea.

Es necesario evaluar todos los escenarios posibles, perspectivas y detalles específicos debido a que la inversión para este tipo de plantas es elevada y una correcta evaluación de todos los aspectos será esencial para asegurar el éxito. En el presente trabajo, se evalúa la viabilidad de mercado, técnica, financiera y medioambiental-social. Es importante señalar que la evaluación es preliminar.

3.4.1. Viabilidad de mercado

El mercado mundial de los polifenoles se encuentra segmentado por el tipo de presentación (como líquido, polvo, bebidas, píldoras y otros), por procedencia (frutas, verduras, cacao, subproductos de la industria y otros) por aplicación (alimentos funcionales, suplementos dietéticos, bebidas y otros) y por geografía (América del Norte, Europa, Asia-Pacífico, América del Sur, Oriente Medio y África). Se proyecta que el mercado mundial de polifenoles crezca a una tasa compuesta anual de 6.47% durante el período de pronóstico (2021-2026).

Los polifenoles son compuestos que en los últimos años han demostrado brindar enormes beneficios a la salud cuando se adicionan a la ingesta diaria de los seres humanos. Se piensa que la creciente conciencia sobre la efectividad de los polifenoles en el tratamiento de diferentes enfermedades como la diabetes, los problemas cardiovasculares, el colesterol alto y el cáncer, junto con el aumento del número de aplicaciones en los sectores de alimentos y bebidas y farmacéutico, impulsará la demanda del producto. Aunado a esto, la venta de polifenoles se ha visto beneficiada por ser un producto de origen vegetal catalogado como un producto 100% natural. Por todo ello, se supone que los polifenoles tendrán una alta aceptación dentro del mercado (Mordor Intelligence, 2022).

3.4.2. Viabilidad técnica

Se busca determinar la viabilidad de un proyecto en condiciones de seguridad con la tecnología disponible, verificando numerosos factores como la durabilidad, la operatividad, las necesidades de suministros, etc. En este apartado debemos responder a las preguntas: ¿Dónde? ¿Cuánto producirá? ¿Con qué? ¿Cómo? ¿Qué servicios son necesarios?

Se parte de la premisa que la planta piloto propuesta será instalada dentro del espacio de una industria productora de etanol, por lo que se asegura el suministro de

todos los servicios necesarios para la operación de la planta como: Electricidad, agua, calefacción, materia prima y mano de obra. A su vez, las operaciones unitarias implementadas en esta planta piloto son ampliamente conocidas y reportadas en la literatura. Partiendo de esta premisa se puede afirmar la viabilidad técnica del proyecto.

3.4.3. Viabilidad financiera

En esta sección se pretenden determinar los recursos económicos necesarios para llevar a cabo el diseño conceptual, la construcción llave en mano, el arranque y la operación exitosa de la planta piloto, considerando cuáles serán los costos de producción, lanzamiento, ajustes de ingresos, rendimiento, reembolsos, ganancias etc. En la sección 3.5 se encuentran las bases para realizar a futuro en una investigación subsecuente el estudio financiero.

3.4.4. Viabilidad ambiental y social

Se busca determinar en qué medida el proyecto es beneficioso o perjudicial en la calidad de vida de los habitantes de la zona. Este proyecto involucra el reaprovechamiento de un subproducto, las vinazas, considerado como un fuerte contaminante al ecosistema. Su objetivo es reducir el color, la DBO y la DQO de la vinaza y brinda a cambio biogás rico en metano como fuente limpia de energía (puesto que la producción de CO_2 se compensa con el CO_2 que usa la caña de azúcar para crecer) y polifenoles que son una gran promesa medicinal especialmente contra virus (Leyra-Tobilla, 2016). Este proyecto no emplea balsas de evaporación o lagunas de lodos por lo que no produce malos olores o proliferación de insectos, favoreciendo a la comunidad circundante donde se instale esta planta. Por otro lado, los residuos generados por esta planta como lodos pueden ser utilizados en fertirriego cañero y las vinazas procesadas cumplirán con las normas para poder disponer de ellas de acuerdo con la NOM-001-SEMARNAT-2021, NOM-002-SEMARNAT-1996, NOM-003-SEMARNAT-1997. Por ello, se concluye que el proyecto es viable desde el punto de vista ambiental y social.

3.5. Estudio económico

El estudio económico se debe basar en la metodología tradicional propuesta por Peters y Timmerhaus en 1991.

Con base en la experimentación realizada para la obtención del metano a nivel de laboratorio se formuló la propuesta a escala industrial para obtener las variables del proceso, el dimensionamiento del equipo y el desarrollo de una ingeniería conceptual con un estudio de factibilidad técnico-económica de ~35% calculando los costos totales con base en los equipos requeridos (Peters y Timmerhaus, 1991).

Para realizar lo anterior, como ya se mostró en el inciso 3.3.7 se emplearían los softwares de los programas Aspen HYSYS® (Aspen Technology Inc, 2017a) y Aspen Plus® (Aspen Technology Inc, 2017b). A continuación se hace un ejercicio.

3.5.1. Simulación del proceso a escala industrial empleando el programa Aspen Plus®

De acuerdo con los datos reportados sobre la producción de vinazas en el ingenio azucarero-alcoholero seleccionado se propondría que la planta estuviera instalada en el sitio de la planta productora de etanol. La planta operaría en tres periodos de 8 horas al día durante los 365 días del año. Los procesos unitarios a escala de laboratorio se dimensionarían a escala industrial, utilizando los equipos disponibles en el paquete Aspen Plus®.

El método termodinámico utilizado para las operaciones unitarias involucradas sería el modelo no aleatorio para dos líquidos con electrolitos acoplado con Redlich-Kwong, ENRTL-RK (*Electrolite Non-Random-Model of Two Liquids*, por sus siglas en inglés), dado que este modelo permite definir coeficientes de actividad para aplicarse

en sistemas con un amplio rango entre los puntos de ebullición, así como en las concentraciones de los mismos (ASPEN TECH, 2014).

El método termodinámico que se usaría sería el SRK (Soave-Redlich-Kwong, por sus siglas en inglés), debido a que calcula coeficientes de fugacidad independientes de la composición (ASPEN TECH, 2014).

En este apartado se analiza de una forma sistemática y ordenada el aspecto monetario correspondiente al estudio técnico previo. Esto será de gran ayuda para determinar la rentabilidad del proyecto. Esta fase del estudio tendría como objetivo encontrar el monto aproximado de los recursos económicos necesarios que implica la realización del proyecto y debe realizarse previo a su puesta en marcha, así como la determinación del costo total requerido en su periodo de operación. Para ello, se calcularán tantos los costos variables como los costos fijos.

3.5.2. Costos variables

Son aquellos que varían dependiendo de la producción de la planta y pueden cambiar con respecto al tiempo; por ejemplo, los servicios, insumos, mano de obra, suministros de oficina, comisiones, etc.

3.5.2.1. Costos de materia prima

Este proyecto tiene como característica principal el reaprovechamiento de subproductos no deseados hasta el momento de las plantas azucareras-alcoholeras como la vinaza de donde serán extraídos los muy valiosos polifenoles y el bagazo que será empleada como fuente de carbono para la generación de carbón activado o, incluso, las cenizas de las calderas bagaceras, que si se logran activar de manera simple tecnológicamente representarán una fuente de ingresos ya que pueden venderse también los excedentes, pudiendo esperarse que dichos materiales no tengan un costo adicional para la empresa con estos ingresos adicionales.

3.5.2.2. Costos de servicios

El consumo de servicios se puede dividir en tres secciones gas, agua y luz (Tabla 3.7). En este diseño se hace uso únicamente de dos servicios: Agua para diluir las vinazas a la entrada del reactor y energía eléctrica para alimentar a las motobombas.

En el caso del agua de servicio son necesario 33,000 L/d para diluir las vinazas crudas de 27,000 a 60,000 L/d. Para el caso de la electricidad son empleadas dos motobombas detalladas en el Anexo 1.

Tabla 3.7. Costos de servicios

Servicio	Concepto	Cantidad	Precio unitario	Costo anual
Electricidad	Moto-Bomba 1	11.25 kWh	0.826\$/kWh	\$80,287.2 ⁽¹⁾
	Moto-Bomba 2	18.75 kWh	0.826\$/kWh	\$133,812 ⁽²⁾
Agua	Agua de servicio en total	33 m ³ /d	\$4.07/m ³	\$1,160,438.4 ⁽³⁾
	Total			\$1,374,537.6

(1) 11.25 kWh (24h/d)(360d/a)(0.826\$/kWh)= \$80287.2 MXN anuales

(2) 18.75 kWh (24h/d)(360d/a)(0.826\$/kWh)= \$80287.2 MXN anuales

(3) 33 m³/d (24h/d)(360d/a)(4.07\$/m³)= \$1,160,438.4 MXN anuales

3.5.2.3. Costo de mano de obra

La planta piloto para la extracción de polifenoles requiere la incorporación de 3 empleados: Un técnico de laboratorio, que lleva a cabo la toma de muestras y su análisis, un técnico industrial, responsable de mantenimiento y encargado de gestionar los equipos, planificar el mantenimiento, supervisar y controlar el correcto funcionamiento de la maquinaria, realizar informes técnicos e implantar y controlar las mejoras aplicables al proceso productivo y, por último, un técnico de mantenimiento, cuya función es mantener y reparar la maquinaria industrial, optimizar los equipos y llevar a cabo las tareas de mantenimiento

preventivo/correctivo. Se propone que la planta opera 24 h al día por 360 días del año, con turnos de 8 h y con 3 empleados en cada turno. El costo total de la mano de obra se resume en la Tabla 3.8.

Tabla 3.8. Costo de mano de obra

Personal	Honorarios mensuales por turno (\$/mes)	Honorarios mensuales por 3 turnos (\$/mes)	Honorarios anuales por 3 turnos (\$/año)
Técnico de laboratorio ⁽¹⁾	8,669	26,007	312,084
Técnico industrial ⁽²⁾	10,985	32,955	395,460
Operario de mantenimiento ⁽³⁾	7,828	23,484	281,808
		Total	989,352

⁽¹⁾ Precio basado en un salario de técnico de laboratorio mínimo (<https://mx.indeed.com/career/analista-de-laboratorio/salaries>)

⁽²⁾ Precio basado en un salario de técnico industrial mínimo (<https://mx.indeed.com/career/tecnico-industrial/salaries>)

⁽³⁾ Precio basado en un salario de operario de mantenimiento mínimo (https://mx.indeed.com/career/auxiliar-de-mantenimiento/salaries?from=top_sb)

3.5.2.4. Costo de supervisiones operativas y asistencia administrativa

Es imprescindible considerar un costo relacionado con la supervisión y la asistencia administrativa de la planta, de acuerdo con el libro de Peters y Timmerhaus, 1991, este costo suele ser de alrededor de un 15% del costo de la mano de obra, luego el costo de dichas supervisiones y asistencia administrativa es de \$148,402.80.

3.5.2.5. Costo del mantenimiento y muestreo

De acuerdo con el libro de Peters y Timmerhaus (1991), el mantenimiento podría ser contratado con la empresa que suministraría los equipos. Este costo puede ser estimado como el 7% del costo de los equipos.

El costo por muestreo comprende los materiales, equipos y reactivos empleados para las pruebas que requiera el proyecto y pueden ser estimados como el 15% del costo total del mantenimiento.

3.5.3. Costos fijos

Estos no dependen del volumen de producción que conlleve el proyecto y no tendrán cambios o modificaciones a menos que el contexto o las circunstancias lo requieran. El negocio deberá realizar estos gastos, a pesar de que no produzca nada.

3.5.3.1. Costos de financiamiento

Se considera que la planta piloto será un proyecto destinado al uso de la Alcoholera de Zapopan, S.A. de C.V. de este modo se propone que la inversión sea propia y, por lo tanto, no se le registra un valor a dicho costo.

3.5.3.2. Costos de investigación y desarrollo

Existe un costo por investigación y desarrollo al cual se le atribuye un % en el rango de 1-5% de los ingresos. Para este caso se toma el valor más alto de 5% ya que es un campo que aún requiere de una extensa investigación, \$2,377,697.42.

3.5.3.3. Costos de equipos

Para estimar los costos de los equipos se tomó en cuenta aquellos que aporten directamente al estudio económico o aquellos que estén relacionados con la extracción de polifenoles. En la Tabla 3.9 se indican cada uno de los equipos principales.

Tabla 3.9. Costo de los equipos principales

Equipo	Descripción	Costo
Moto-Bomba 1	Anexo 1	\$43875
Moto-Bomba 2	Anexo 1	\$47385
C: Tanque de adecuación	Un tanque de mezclado de acero al carbón con un volumen de 26,000 L	
D- RALLFA	Anexo 3	\$3,900,000
E- Columna de adsorción	Una columna de acero inoxidable con 5m de diámetro ya que los polifenoles serán empleados para consumo humano	

En ella no están incluidos los posibles postratamientos de las la vinazas después de separar el material carbonoso biodegradable como metano y los polifenoles. La Tabla 3.9bis presenta estos.

Tabla 3.9bis. Costo de todos los equipos principales y de sus accesorios

Equipo	Descripción	Costo
C: Tanque de adecuación		
D- RALLFA		
E- Columna de adsorción en CA		
F-Tanque de coagulación		
G- Tanque de floculación		
H- Ultrafiltración		
I- Nanofiltración		
J- Torre de desorción		

3.5.4. Costos totales de explotación

Los costos totales de explotación es el resultado de la suma de los costos fijos y los costos totales. El resumen de estos costos se muestra en la Tabla 3.10.

Tabla 3.10. Costos totales de explotación

Clasificación	Rubro	Coste anual
Variables	Materia prima	\$0
	Servicios	\$1,374,537.6
	Mano de obra	\$989,352
	Supervisiones operativas y asistencia administrativa	\$148,402.8
	Mantenimiento y muestreo	
Fijos	Financiamiento	\$0
	Investigación y desarrollo	\$2,377,697.42
	Equipos	

Es importante señalar que este es un ejercicio. La siguiente etapa de esta investigación contemplará ya balances de materia más precisos que permitan el dimensionamiento de los equipos con mayor rigor.

3.5.5. Ingresos

Los ingresos de explotación se basan en las ventas esperadas de los productos y para ello se debe calcular la producción anual mínima de los compuestos de interés económico como el biogás y los polifenoles.

Para calcular el costo de los compuestos fenólicos, se consultó la página-e de las redes internacionales www.amazon.com. Se tomó como referencia el suplemento “*Grape seed extract*” de la marca Zazzee. Naturalmente estos costos se refieren a un tipo específico de polifenoles autorizados por la COFEPRIS y habría que saber si estos se encuentran entre los polifenoles obtenidos de las vinazas tratadas anaerobiamente. Consecuentemente, se continúa con el ejercicio. El costo es de \$790 por bote con 180 cápsulas de 400 mg de producto del cual se menciona que un 95% son polifenoles por lo que cada bote cuenta con 68.4 g de polifenoles y, por tanto, los polifenoles de la semilla de uva tienen un precio en el mercado de 11.55

\$/g. Otro producto llamado Resveratrol con un precio de \$449 por frasco, en el índice nutricional muestra un contenido por contenedor de 45 porciones con 1.1 g y cada porción contiene 40mg de polifenoles. Por tanto, cada gramo de polifenol tiene un precio de \$249. Ambos intervalos de precio, dan un indicativo del precio exacto de diferentes tipos de polifenoles en el mercado y que, definitivamente, dan un panorama de cuán valorados son estos productos. La planta piloto tiene una capacidad de producción para los polifenoles de los que se ignora su composición de 0.455 kg/h.

El costo del gas natural se calculó a través de la página gubernamental de la Comisión Reguladora de Energía con un valor de \$20.77/kg. La planta piloto tiene una capacidad de producción de 11.973 kg/h de metano equivalente a 103,446.72 kg_{metano}/año.

Los productos de mayor interés son: El biogás rico en metano que es producido en el tratamiento de la materia orgánica biodegradable contenida en la vinaza en el reactor RALLFA (Figura 2.3, capítulo anterior) y los polifenoles extraídos en la torre de adsorción considerando que pueden ser extraídos en su totalidad. Las vinazas tratadas sin polifenoles deben tener un tratamiento adicional para su disposición o ser usadas para riego en los cañaverales con la autorización de la Comisión Nacional del Agua. Como estas vinazas no generarían un ingreso adicional serían excluidas de este apartado. Los ingresos se presentan en la Tabla 3.11.

Tabla 3.11. Ingresos por subproductos

Subproducto	Producción	Precio unitario	Total por
Biogás	103,446.72kg _{met} /año ⁽¹⁾	\$20.77/ kg	\$2,148,588.37
Polifenoles	3931.2 kg AG/año ⁽²⁾	11.55 \$/g	\$45,405.360.00
		Total	\$47,553,948.37

(1) 11.973 kg_{metano}/h (24h/día)(360día/año)= 103,446.72 kg_{metano}/año

(2) 0.455 kg_{polifenoles}/h (24h/día)(360día/año)= 3931.2 kg_{polifenoles}/año

Con base en estos rubros, a continuación se incluyen en la Tabla 3.12 con objeto de sentar las bases para continuar estos cálculos en un estudio futuro.

Tabla 3.12. Costos e ingresos

Rubro	Costo anual / Ingreso anual
Costo fijo	\$2,077,128.4
Costo variable	\$3,716,350
Ingresos	-\$47,553,948.37
Total	

Finalmente, se señala que deben dimensionarse y evaluarse los equipos principales y los accesorios presentados en la Figura 3.6 para tener ya el panorama completo. Una vez obtenida toda la información se insertarían en el paquete de cómputo los datos para obtener la información pertinente que permita calcular el retorno de la inversión, *ROI (Return on Investment*, por sus siglas en inglés), que es una medida de la rentabilidad y se define como la relación entre la ganancia neta o ganancia bruta anual y la inversión de capital total; se expresa como una fracción o porcentaje por año (Peters y Timmerhaus, 1991).

Se estimaría el costo más robusto de venta anual del metano producido a partir de la biotransformación de los compuestos carbonosos de las vinazas con lo cual se podría recuperar la inversión de capital y si el tiempo evaluado está en un intervalo de tres años, por ejemplo, el proceso es económicamente viable.

Esta parte se haría una vez definido el proceso integral a escala de laboratorio e incluyendo los balances de materia completos.

CAPÍTULO IV.
Metodología

4.1. Secuencia para realizar la investigación

A principios del año 2020 comenzó la pandemia por COVID-19 provocada por el virus SARS-CoV-2, la cual obligó a la Dirección de la Facultad de Química a suspender todo tipo de actividad universitaria que se llevara a cabo de manera presencial. No obstante, se desarrollaron nuevos modelos de trabajo los cuales permitieron continuar con las investigaciones de manera remota. Debido a dicha contingencia sanitaria, una de las opciones viables fue la sustitución de las investigaciones convencionales, basadas en la experimentación, por recopilaciones bibliográficas con el objetivo de recolectar información preciada para su futura comprobación práctica y obtener una base de datos actualizada y concisa. Este documento fue elaborado sin la necesidad de la presencia del sustentante en el laboratorio para evitar el contacto físico y eliminar cualquier riesgo de contagio. En la Figura 4.1 se muestra el diagrama de bloques el cual detalla cómo fue desarrollada esta investigación y el proceso seguido para la recopilación de información. Se realizó una revisión exhaustiva de publicaciones como libros, revistas, tesis, tesinas, informes de estancias y artículos científicos con una antigüedad no mayor a 10 años a excepción de aquellas fuentes que fueron consideradas por la calidad de su información como clásicas. Como fuente principal de documentación se visitó el banco de tesis de la UNAM (TESIUNAM), la biblioteca digital de la UNAM (BiDi-UNAM, Elsevier Scopus, ScienceDirect, Springer) y bases de datos abiertos independientes de la UNAM: Nature, PubMed, Food Science, Journal of Food Science, BioMed Research International, etc. Con el objetivo de orientar al sustentante, se resolvió las dudas que surgieron durante la recopilación de información y se verificó que se cumpliera con los objetivos propuestos, se programaron revisiones de avance semanalmente en las cuales el sustentante y las tutoras se reunieron de manera remota por medio de alguna plataforma para teleconferencias, como, por ejemplo: Zoom. Finalmente, se elaboró una base sólida de información la cual ayudó al estudiante a comprender y familiarizarse con la investigación. Se estudió la producción de melazas en el

proceso de refinamiento de azúcar, la procedencia de las vinazas dentro de la elaboración de etanol, la importancia de los polifenoles en la dieta humana y en la naturaleza, la normatividad relacionada a la descarga de subproductos en cuerpos de agua nacionales, los métodos de extracción, así como sus ventajas y desventajas, los métodos de purificación de compuestos fenólicos, se realizó un análisis económico y se concluyó con un somero análisis de la información.

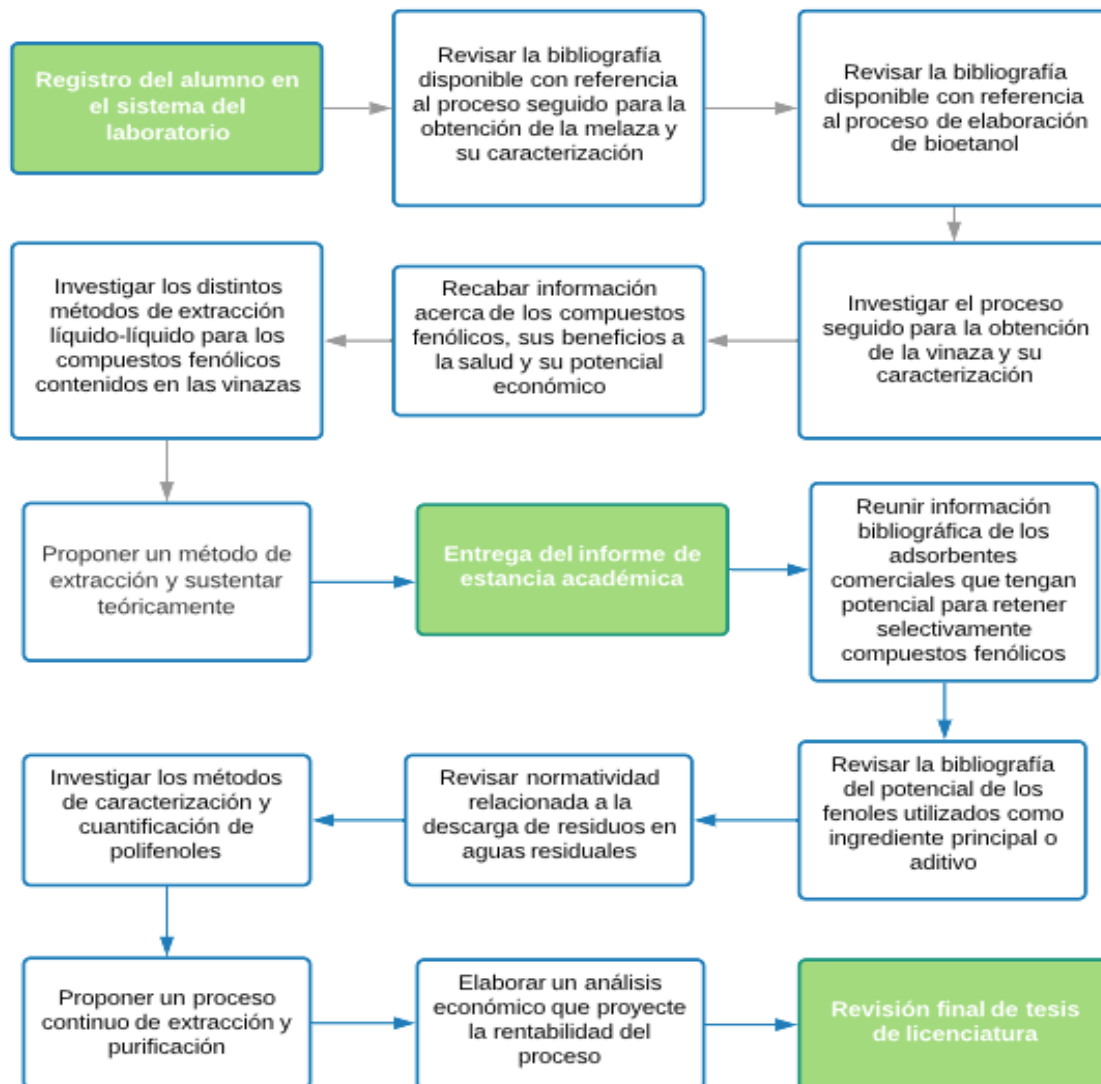


Figura 4.1. Diagrama de etapas de la investigación

CAPÍTULO V.
Resultados y discusión

La obtención de compuestos fenólicos depende del tipo de método de extracción empleada. También se debe tomar en cuenta que algunos métodos no son apropiados para su uso industrial: Unos por sus bajos rendimientos. En el caso de métodos convencionales de extracción líquido-líquido, ELL, y con calentamiento, su bajo volumen de operación. El uso de microdispositivos por sus grandes tiempos de extracción, así como en el caso de procesos por lotes. Otras tecnologías más novedosas como el uso de fluidos supercríticos, así como la extracción asistida con pulso aún no han sido llevadas a escala industrial (Tablas 2.4, 2.5, 2.6 y 2.7). Por estas razones la extracción con carbón activado se sugiere para obtener compuestos vegetales activos como los polifenoles debido a su versatilidad, simplicidad de operación, su capacidad para preservar la actividad biológica y la posibilidad de implementación a nivel industrial. Naturalmente, deben tomarse en cuenta todos aquellos parámetros que puedan hacer más eficiente la extracción como el tipo de carbón activado, el rendimiento de adsorción y desorción, el tiempo de residencia hidráulica y la temperatura ya que afectan directamente el rendimiento de la extracción y los costos involucrados.

Todos los resultados presentados en este informe son de fuentes bibliográficas cuyas investigaciones fueron realizadas a nivel de laboratorio, por lo que los rendimientos pueden verse afectados al ser escalados a nivel industrial.

Por ello, se deberán ajustar nuevamente los parámetros, tomar en cuenta las dimensiones de los equipos, la difusión de los disolventes e implementar nuevas tecnologías para la optimización del proceso. Por otro lado, la composición de las vinazas y, por tanto, de los compuestos fenólicos a extraer serán distintos en cada matriz por lo que se sugiere realizar pruebas de cuantificación como la técnica de Folin-Ciocalteu (Contreras-Contreras, 2019), la caracterización con CLAR (*HPLC*) y su actividad antioxidante empleando las pruebas *ORAC* (por sus siglas en inglés *Oxygen Radical Absorbance Capacity*), *DPPH*, método usado para medir la estabilidad del radical 1,1-difenil-2-picrilhidrazil, *ABTS* evalúa la estabilidad del

ácido 2.2-azino-bis(3-etilbenzotiazolin)-6-sulfónico o *FRAP* (por sus siglas en inglés *Free Radical Scavenging, Ferric Reducing Antioxidant Power*) (Ramón y Gil-Garzón, 2021).

Después de realizar un análisis económico de la propuesta del tren de tratamiento a las vinazas se comprobó que el proyecto puede ser rentable considerando solamente la primera etapa del proceso con la producción de biogás rico en metano por medio del reactor tipo RALFA (*UASB*). La segunda etapa puede ser considerada como una sección adicional para la generación de mayores ingresos y la producción de vinazas con menores índices de DQO y DBO para retornarla al RALLFA y diluir las vinazas “crudas”.

CAPÍTULO VI.
Conclusiones y recomendaciones

6.1. Conclusiones

De acuerdo con esta investigación bibliográfica y considerando el objetivo general señalado de realizar el análisis de las metodologías para el aprovechamiento integral de las vinazas, subproducto de la destilación de etanol obtenido utilizando melazas de caña de azúcar y levaduras cerveceras, considerando que salen a altas temperaturas de la torre de destilación se puede concluir lo siguiente:

Si bien las industrias del alcohol y del azúcar representan un importante sector económico del país también son un área de oportunidad para el reaprovechamiento de sus subproductos como el bagazo, las melazas y las vinazas, siendo estas últimas las que requieren mayor interés debido a sus características físicas y químicas que hacen necesaria su estabilización y aprovechamiento.

En la actualidad se ha demostrado que el uso de las vinazas como aditivo en el alimento para animales, principalmente ganado vacuno, no es una opción viable debido a su alto contenido de polifenoles, los cuales inhiben el funcionamiento de las enzimas ralentizando la digestión del animal y evitando la proliferación de microbiota benéfica para el rumen. Por otra parte, el uso de vinazas como fertilizante cuando es usado en otros cultivos diferentes de la caña y/o con otros tipos de suelos no siempre es una opción viable ya que los compuestos fenólicos inhiben la germinación de las semillas. En varios estudios presentados en la literatura y sistematizados por Gaspar-Mendoza (2021) se ha encontrado que dichos compuestos fenólicos tienen un alto potencial en sectores de las industrias cosmética, alimentaria y farmacéutica y que, al ser introducidos como aditivos dentro de la dieta humana, gracias a sus múltiples beneficios a la salud representan una posible opción para prevenir enfermedades cardiovasculares, diabetes, entre otras, inhibiendo el crecimiento carcinogénico y la presencia de virus. El uso selectivo de los compuestos fenólicos creará una nueva área laboral,

contribuirá al reaprovechamiento de subproductos de la industria alcohólica y disminuirá las emisiones tóxicas al ambiente.

Este proyecto analizó la posibilidad de desarrollar tecnologías más limpias por parte de la industria del etanol, aprovechando la parte carbonosa biodegradable que contienen las vinazas para producir metano, un energético necesario y adecuado ya que permite *in situ* producir vapor directamente para la destilación del etanol producido a partir de la fermentación de la melazas de caña de azúcar diluidas y enriquecidas.

También analizó la extracción de los polifenoles que permanecen en las vinazas considerando la investigación experimental de Contreras-Contreras (2019) usando carbón activado para adsorberlos de las vinazas de caña e implementando los conocimientos ingenieriles para una propuesta de una planta de tratamiento sostenible al involucrar su desorción usando potasa calentada (Kow et al., 2016) y poder reutilizar este carbón activado varias veces.

Finalmente para hacer esta propuesta sustentable, el carbón activado podría obtenerse de dos fuentes: El bagazo de la caña de azúcar, propuesta desarrollada por Solís-Fuentes et al. (2012). La segunda opción más atractiva es tomar directamente las cenizas de los hogares de las calderas para activarlas directamente siguiendo la metodología propuesta por Girgis et al. (1994) y Guo et al. (2020), aprovechando las herramientas de la ingeniería química propuestas por Thakur et al. (2013).

Se espera que este tipo de investigaciones logren concientizar a los directores ejecutivos de la industria acerca de la importancia del reaprovechamiento de los subproductos. Por otra parte también se busca que el tren de tratamiento propuesto sea un proceso económicamente viable, el cual represente un incentivo económico para las empresas productoras de México.

Con respecto de los objetivos particulares de esta investigación bibliográfica:

- Revisar la literatura para evaluar los métodos de separación de los compuestos carbonosos biodegradables y el valor agregado de los productos que se formen como el biogás rico en metano
- Revisar la literatura para evaluar los métodos de separación de los compuestos carbonosos recalcitrantes y el valor agregado de los productos que se obtengan como los compuestos fenólicos y que sea factible su recuperación
- Presentar la metodología que debería seguirse en un análisis económico preliminar para determinar si el proceso propuesto podría ser rentable para la industria.

se cumplieron a cabalidad.

Finalmente, a continuación se presentan algunas recomendaciones para que esta investigación bibliográfica fructifique y dé resultados positivos para la noble industria azucarera-alcoholera que brinda sustento y trabajo honrado a varios millones de mexicanos y mexicanas.

6.2. Recomendaciones

Es importante realizar un análisis técnico-económico a un nivel mayor que el estudio preliminar realizado en esta investigación con objeto de validar la bondad de la propuesta de reaprovechamiento de las vinazas de la producción de alcohol etílico de melazas de caña de azúcar.

Este ejercicio redundará en beneficios tangibles para este sector productivo y para las personas que dependen de él, desde los cañeros que cultivan esta planta

terrestre tan productiva hasta los técnicos que operan las fábricas que la procesan para obtener sus múltiples productos de los que el azúcar (fuente de energía para las personas) y el etanol (fuente de energía para los vehículos automotores) son solamente dos de ellos. La revista ICIDCA sobre los derivados de la caña de azúcar fue creada en 1967 con la finalidad de difundir las experiencias alcanzadas y los resultados de las investigaciones sobre los derivados de la caña de azúcar (www.revista.icidca.azcuba.cu). El Instituto Cubano de Investigaciones de los Derivados de la Caña de Azúcar, ubicado en Vía Blanca # 804 y Carretera Central, en San Miguel del Padrón, La Habana, Cuba, da múltiples opciones de aprovechamiento integral de este pasto gigante que puede dar hasta 200 toneladas por hectárea.

Anexos

Anexo 1a.

Estimación del costo de las bombas de alimentación

Para el diseño de la planta piloto (Fig. 3.6) se requieren dos bombas, una de ellas impulsará a la corriente 5 correspondiente a las vinazas crudas y la segunda bomba impulsará al agua de servicio empleada para diluir las vinazas crudas. De acuerdo con el libro de Peters y Timmerhaus, 1991, la mejor opción para ambas corrientes es el uso de bombas centrífugas debido a su simplicidad, bajos costos de adquisición y mantenimiento. Para la selección de materiales es necesario recordar que las vinazas crudas tienen un alto grado de corrosión debido a su bajo pH, se recomienda una instalación de acero al carbón (Figuras A-1, A-2).

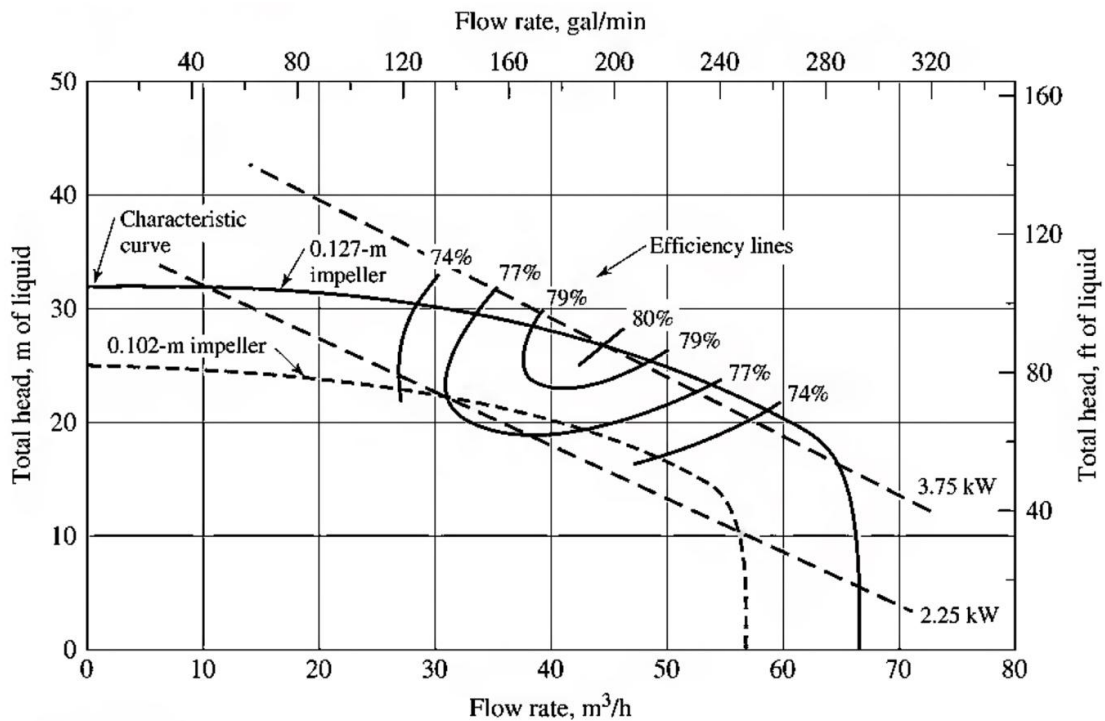


Figura A-1. Curva característica de una motobomba centrífuga a velocidad constante de 3450 rev/min

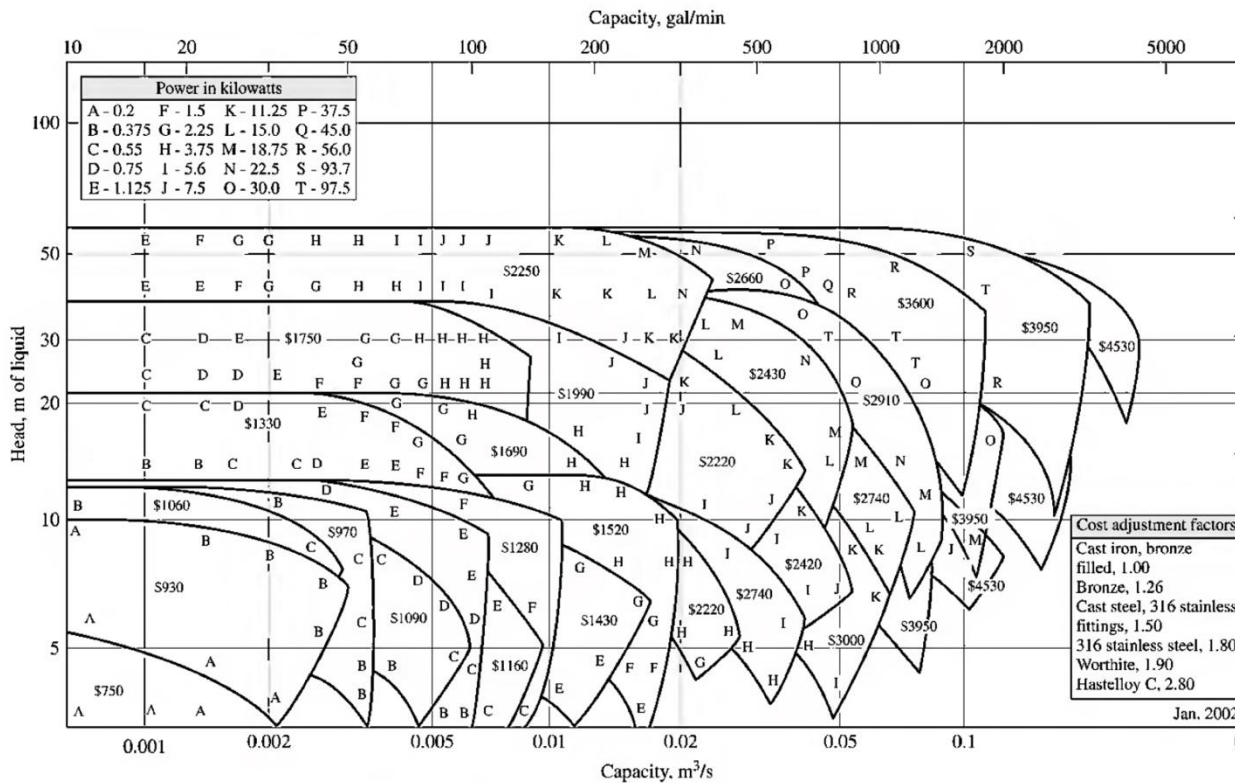


Figura A-2. Precio de una motobomba centrífuga incluida su base de acero y acoplamiento

En las Tablas A-1 y A-2 se presentan las propiedades de las motobombas de las Figuras A-1 y A-2.

Tabla A-1. Propiedades de la motobomba 1

Bomba 1 (PUMP 1)	Sustancia: Vinaza cruda	
Propiedad	Unidades	Cantidad
μ	cp	1.3
Caudal (Q)	l/d	27,000
	m^3/h	1.125
	m^3/s	0.01875

Bomba 1 (PUMP 1)	Sustancia: Vinaza cruda	
Head	m	30
Eficiencia	%	80
Potencia	kWh	11.25
Precio	Dlls	\$2250
	MXN (conversión 19.5MXN/dll)	\$43875

Tabla A-2. Propiedades de la motobomba 2

Bomba 2 (PUMP 2)	Sustancia: Agua	
Propiedad	Unidades	Cantidad
Caudal (Q)	l/d	33,000
	m ³ /h	1.375
	m ³ /s	0.0229
Head	m	30
Eficiencia	%	80
Potencia	kWh	18.75
Precio	Dlls	\$2430
	MXN (conversión 19.5MXN/dll)	\$47385

Anexo 1b.

Estimación de costo del reactor tipo RALLFA

El diseño y costo de los reactores en tanque se pueden estimar de una forma similar ya sea a presión, con mezclado o ambas. La forma más confiable de obtener una cotización es por medio de un proveedor o fabricante expertos en el diseño de reactores y estos deben cumplir con las necesidades que la planta piloto requiera. Para esta estimación se empleó la Figura A-3 para conocer un precio aproximado del reactor RALLFA de 60 m³.

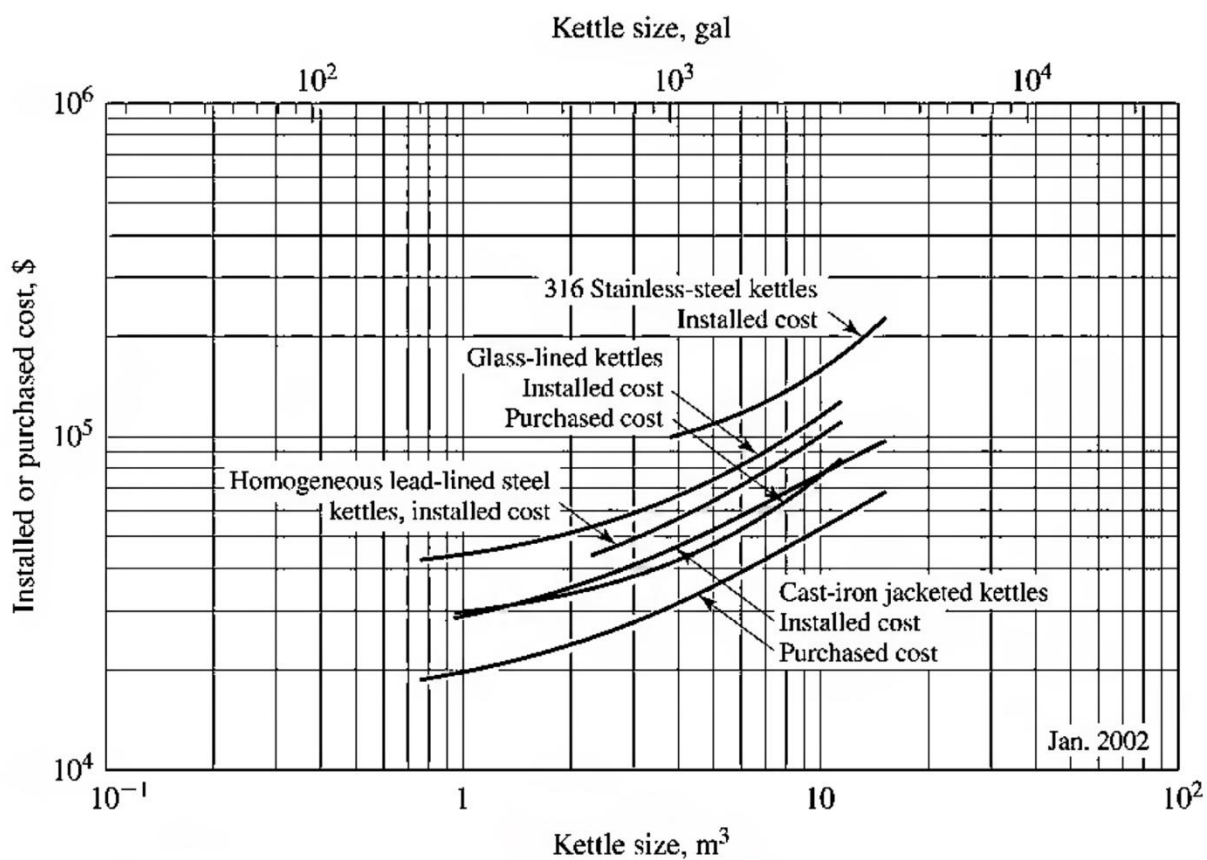


Figura A-3. Precio de un reactor incluidos sus componentes como agitador, tanque, termómetro, manejo y soporte, enchaquetado y caja de control

Tabla A-3. Propiedades del biorreactor tipo RALLFA

Reactor tipo RALLFA	Sustancia contenida: Vinazas diluidas Material: Acero inoxidable 316	
Propiedad	Unidades	Cantidad
Volumen	M ³	60
Precio	Dlls	\$200,000
	MXN (conversión 19.5MXN/dll)	\$3,900,000

Anexos

Anexo 2

Disposición de residuos en esta investigación

Esta investigación bibliográfica como cualquier actividad humana genera residuos. Estos provienen del uso de múltiples satisfactores y van desde su producción y después su disposición al terminar su vida útil. Ejemplos de ellos son papel, lápices y bolígrafos, equipos de cómputo, energía eléctrica, sillas, escritorios, etc., etc.

Y en los acervos bibliotecarios se tiene un bagaje de equipos que incluyen las redes satelitales, etc., etc.

Generalmente no se toman en cuenta y se dan por sentados. Sin embargo, en esta investigación se consideró pertinente darlos a conocer de manera explícita.

Bibliografía

- Acosta-Martínez, D.R., Mesa-Garriga, L., González-Suárez, E., Michelena-Rodríguez, G., Díaz-de-Villegas, M.E., Lorenzo-Izquierdo, M., Castillo-Portela, G. 2010. Estudio preliminar de la fermentación alcohólica de una mezcla de miel final e hidrolizado de bagazo de caña de azúcar. *Revista Centro Azúcar*. 37(4):29-38.
http://centroazucar.uclv.edu.cu/index.php/centro_azucar/article/view/435
- 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>.
- Ajila, C. M., Brar, S. K., Verma, M., Tyagi, R. D., Godbout, S., Valéro, J. R. 2012. Bio-processing of agro-byproducts to animal feed. *Critical Reviews in Biotechnology*. 32(4): 382-400.
- Álvarez-Maciél, C. 2018. Producción de etanol como biocombustible a partir de residuos vegetales no alimenticios. Tesis de maestría en Ingeniería. Univesidad Nacional Autónoma de México, Facultad de Ingeniería. Ciudad de México, México.
<http://132.248.9.195/ptd2018/mayo/0774300/Index.html>
- Anónimo. 2021. Ethanol (Ethyl Alcohol). [Chemicalsafetyfacts.org](https://www.chemicalsafetyfacts.org).
<https://www.chemicalsafetyfacts.org/ethanol/#uses-benefits>
- Anónimo. 2020. Vino y salud: ¿Qué son los polifenoles y qué funciones cumplen? Mallorca Pla i Llevant. Mallorca, España. <http://doplaillevant.com/vino-y-salud-6-que-son-los-polifenoles-y-que-funciones-cumplen/>
- Aspen Technology Inc. 2017a. Aspen HYSYS V10® User Guide. Aspen Technology, Inc.
- Aspen Technology Inc. 2017b. Aspen PLUS V10® User Guide. Aspen Technology, Inc.
- ASPEN TECH. 2014. HYSYS 3.2. Bases de la simulación. (Actualizado al 10 de marzo de 2014). Consultado en:
<https://es.slideshare.net/milordmath/54224008-hysys32manualtraslation-copy>

- Bautista-Zúñiga, F., Reyna-Trujillo, T.J., Villers-Ruiz, L., Durán-de-Bazúa, M. del C.; Rivas-Solórzano, H., Villatoro-Reséndiz, J., Krishnan-Padma, R. 2000a. Mejoramiento de suelos agrícolas usando aguas residuales agroindustriales. Caso vinazas crudas y tratadas. Pub. UNAM-UAdY. 188 págs. Apéndice 5, 9 pp.
https://www.researchgate.net/publication/236954593_Mejoramiento_de_suelos_agricolas_usando_aguas_residuales_agroindustriales_Caso_vinazas_crudas_y_tratadas/link/565c476408aeafc2aac702ca/download
- Bautista-Zúñiga, F., Durán-de-Bazúa, C., Lozano, R. 2000b. Cambios químicos en el suelo por aplicación de materia orgánica soluble tipo vinazas. Rev. Int. Contam. Ambient. 16(3): 89-101.
- Bazúa, C.D. de-, Cabrero, M.A., Poggi, H.M. 1991. Vinasses biological treatment, anaerobic-aerobic experiments. Laboratory and pilot plant tests. Part 1. Bioresource Technol. 35:87-93. [https://doi.org/10.1016/0960-8524\(91\)90086-Y](https://doi.org/10.1016/0960-8524(91)90086-Y)
- Bazúa, C.D., Wilke, C.R. 1977. Ethanol effects of the kinetics of a continuous fermentation with *Saccharomyces cerevisiae*. **Biotechnology and Bioengineering Symposium No. 7**: 105-118. ISSN 0572-6565
- Becerra, M. 2014. Bebidas fermentadas a partir de maíz y arroz: Elaboración, control y conservación. Revista Alimentos Hoy. 31(22):96-103.
https://acta.org.co/acta_sites/alimentoshoy/index.php/hoy/article/viewFile/258/242
- Beltrán, E., Pallet, D., Vera, E., Ruales, J. 2016. Uso de tecnología de membranas y resinas para la separación y purificación de polifenoles del tomate de árbol morado (*Solanum betaceum* Cav). Enfoque UTE. 7(4):71-85.
http://ingenieria.ute.edu.ec/enfoqueute/public/journals/1/html_v7n4/art006.html
- Bendini, A., Bonoli, M., Cerretani, L., Biguzzi, B., Lercker, G., Toschi, T.G. 2003. Liquid-liquid and solid-phase extractions of phenols from virgin olive oil and their separation by chromatographic and electrophoretic methods. Journal of Chromatography A. 985(1-2):425-433.
[https://doi.org/10.1016/S0021-9673\(02\)01460-7](https://doi.org/10.1016/S0021-9673(02)01460-7)
- Bermúdez, R.C. 1994. Una variante alternativa para la alimentación animal: Vinaza de destilería. Revista Cubana de Veterinaria. 4: 9.

- Bernal-González, M., Toscano-Pérez, D., Falcón, L.I., Alcántara-Hernández, R.J., Salgado-Bernal, I., Solís-Fuentes, J.A., Durán-Domínguez-de-Bazúa, M.d.C. 2016. Archaea, a useful group for unconventional energy production: Methane production from sugarcane secondary distillation effluents using thermotolerant strains. En *The Handbook of Microbial Bioresources*. V.K. Gupta, National University of Ireland Galway, Ireland, G.D. Sharma, Bilaspur University, India, M. G. Tuohy, National University of Ireland Galway, Ireland, R. Gaur, Dr. RML Avadh University, India, editores. CABI. ISBN 9781780645216. Chapter 32. Pp. 502-527. Oxfordshire, United Kingdom.
- Bernal-González, M. 1997. Tratamiento anaerobio-aerobio a nivel laboratorio de aguas residuales de la industria alcoholera a partir de melazas de caña de azúcar aciduladas con HCl. Tesis profesional de Ingeniería Química. Facultad de Ciencias, UNAM. Defensa: Abril 14. Ciudad de México, México.
- Britannica. 2021. Ethanol. *Encyclopedia Britannica*. Editors of Encyclopaedia. <https://www.britannica.com/science/ethanol>
- Cao, W., Zhang, J.J., Liu, C.Y., Bai, W.S., Cheng, N. 2020. A modified Folin-Ciocalteu method for the microdetermination of total phenolic content in honey. *International Food Research Journal*. 27(3):576–584. [http://www.ifrj.upm.edu.my/27%20\(03\)%202020/DONE%20-%2019%20-%20IFRJ19625.R1.pdf](http://www.ifrj.upm.edu.my/27%20(03)%202020/DONE%20-%2019%20-%20IFRJ19625.R1.pdf)
- Cárdenas-Salazar, S.J., Ortega-Revilla, J.C. 2015. Modelamiento y simulación de una columna de adsorción de lecho fijo para la remoción de Cr(VI) de soluciones acuosas utilizando aserrín como adsorbente. Tesis de licenciatura en Ingeniería Química. Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa, Facultad de Ingeniería de Procesos. Arequipa, Perú. <http://repositorio.unsa.edu.pe/bitstream/handle/UNSA/4003/IQorrejc085.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Cardona, C.A., Sánchez, O.J., Montoya, M.I., Quintero, J.A. 2005. Simulación de los procesos de obtención de etanol a partir de caña de azúcar y maíz. *Scientia et Technica*. Año XI(28):187-192. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=84911707033>

- Carriazo, J.G., Saavedra, M.J., Molina, M.F. 2010. Propiedades adsorptivas de un carbón activado y determinación de la ecuación de Langmuir empleando materiales de bajo costo. *Educación Química*. 21(3):222-229. http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0187-893X2010000300007
- Cartaya, O., Reynaldo, I. 2001. Flavonoides: Características químicas y aplicaciones. *Cultivos Tropicales*. 22(2):5-14. ISSN: 0258-5936. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=193215009001>
- 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.
- Castillo-Arteaga, M.G., Núñez-Calderón, J.d.I.C. 2011. Estudio de algunas propiedades de los alcoholes. En *Química Orgánica, Manual de prácticas*. Castillo, M.G., Núñez, J., Hernández, A., Rodríguez, M.C, Quintanar, S., Luna, F., Hurtado, L., editores. Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo. 2a. Edición. Pachuca, Hgo., México. <https://www.uaeh.edu.mx/scige/boletin/prepa4/n1/p1.html>
- Castro-González, A. 2004. Efecto de la temperatura en la actividad metanogénica y sulfato-reductora de consorcios microbianos en condiciones anaerobias. Tesis de Doctorado. Programa de Maestría y Doctorado en Ciencias Químicas (Ingeniería Química). Universidad Nacional Autónoma de México. Ciudad de México. <http://132.248.9.195/ppt2004/0327304/Index.html>
- Castro-González, A., Bernal-González, M., Durán-de-Bazúa, C. 2004. Tratamiento de vinazas de plantas destiladoras de alcohol usando consorcios microbianos anaerobios. *Bebidas Mexicanas*. 13(3):12-14,16-20,22-25. https://www.researchgate.net/publication/351366887_Tratamiento_de_vinazas_de_plantas_destiladoras_de_alcohol_usando_consorcios_microbianos_anaerobios
- Castro-González, A., Pliego-Bravo, Y., Durán-de-Bazúa, C. 1997. Tratamiento anaerobio de lodos de purga de una planta de lodos activados. *Tecnología, Ciencia, Educación (IMIQ)*. 12(1-2):10-25.

- Castro-Villela, J.M., Villegas-Flores, R. 1989. Obtención de proteína microbiana empleando como sustrato vinazas de ingenios azúcareros/alcoholeros. Tesis profesional de Ingeniería de Alimentos, Facultad de Ciencias Químicas, Universidad Autónoma de San Luis Potosí. Defensa: Mayo 19. San Luis Potosí, S.L.P., México. Con este trabajo de investigación se corroboraron los resultados obtenidos a nivel de laboratorio de que los efluentes carbonosos, aún los que tienen concentraciones elevadas de materia orgánica, obtenidos en la industria azucarera pueden ser tratados en un reactor de biodiscos o rotatorio. Este trabajo obtuvo el PRIMER LUGAR DE LA CATEGORÍA ESTUDIANTIL DEL PREMIO 1988 ATAM-CONTROL DE CALIDADES cuando fuera presentado en las Sesiones Técnicas del XIX Congreso Nacional de Ciencia y Tecnología de Alimentos realizado en San Luis Potosí, S.L.P., México.
- Chará J., Suárez J. 1993. Utilización de vinaza y jugo de caña como fuente energética en patos pekín alimentados con grano de soya y azolla como fuente proteica. *Livestock Research for Rural Development*. 5:1 – 6.
- Chávez-Ramos, K. 2017. Evaluación de microdispositivos para la extracción líquido-líquido de compuestos fenólicos en aceite de oliva. Tesis de Maestría en Ciencias Químicas. Facultad de Química, Universidad Nacional Autónoma de México, México. <http://132.248.9.195/ptd2017/enero/0755151/Index.html>
- Civit, E., Durán-de-Bazúa, C., Engelmann, G., González, S., Hartmann, L. 1984. Anaerobic treatment of maize processing wastewater (nejayote) in a packed bed reactor cascade. *Environm. Technol. Letters*. 5(2):89-93.
- CONADESUCA. 2016. Informe estadístico del sector agroindustrial de la caña de azúcar en México, Zafras 2016-2007/2015-2015.
- 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. Facultad de Química, UNAM. CDMX, México. <http://132.248.9.195/ptd2019/enero/0784401/Index.html>
- 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. Facultad de Química, Universidad Nacional Autónoma de México. Ciudad de México, México.
- <https://search.ebscohost.com/login.aspx?direct=true&db=cat02029a&AN=tes.TES01000767769&lang=es&site=eds-live>
- Córdova-Mosquera, A., Gómez-Salcedo, Y., Riera, M.A., Rodríguez-Díaz, J.M., Pereda-Reyes, I. 2019. Influence of advanced oxidative processes in 'anaerobic' digestion of wastewater in coffee industry. *Centro Azúcar*. 46(2): 89-100. ISSN: 2223- 4861.
- http://centroazucar.uclv.edu.cu/index.php/centro_azucar/article/view/38/31
- Cordovés-Herrera, M.d.I.A., Durán-de-Bazúa, C., Chaux, D., Miranda-da-Cruz, S., Luken, R. 1997. Towards a cleaner and more profitable sugar industry. Pub. UNIDO. An information package on waste minimization and pollution abatement in the cane sugar industry. Proyecto US/INT/91/217/15-01-2, ONUDI-GEPLACEA-UNAM. Pub. United Nations Industrial Development Organization. Vol. 1, 82 p. y Vol. 2, 40 p. Viena, Austria.
- Correa-López, R.E. 2022. Métodos de tratamiento alternos tanto biológicos como fisicoquímicas, para el reaprovechamiento de vinazas provenientes de una planta cooperante productora de bioetanol.
- <http://132.248.9.195/ptd2022/marzo/0823752/Index.html>
- Cruz-Rodríguez, D.J. 2022. Evaluación de la calidad del biogás producido por reactores anaerobios de lecho de lodos de flujo ascendente (RALLFA) a escala de laboratorio operados a 45 y 55°C dosificados con vinazas azucareras. Tesis de Licenciatura en Ingeniería Química. Facultad de Química. Universidad Nacional Autónoma de México. Ciudad de México. México (en proceso).
- Cuéllar-Briseño, R. 2019. Efecto de la proporción de DQO/SO₄²⁻ de un efluente líquido proveniente del proceso de flotación de una planta minera durante su tratamiento biológico mediante un reactor anaerobio de lecho de lodos de flujo

- ascendente (RALLFA). Tesis de licenciatura en Ingeniería Química. Facultad de Química, UNAM. Ciudad de México, México.
- Da-Porto, C., Natolino, A., Decorti, D. 2015. The combined extraction of polyphenols from grape marc: Ultrasound assisted extraction followed by supercritical CO₂ extraction of ultrasound-raffinate. *Lwt-Food Science and Technology*. 61(1):98-104. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2014.11.027>
- Da-Rocha, C.B., Zapata-Noreña, C.P. 2020. Microwave-Assisted Extraction and Ultrasound-Assisted Extraction of Bioactive Compounds from Grape Pomace. *Int. J. Food Eng.* 16(1-2): 1–10. <https://doi.org/10.1515/ijfe-2019-0191>
- Da-Silva-Neto, J.V., Gallo, W.L.R., Nour, E.A.A. 2020. Production and use of biogas from vinasse: Implications for the energy balance and GHG emissions of sugar cane ethanol in the Brazilian context. *Environmental Progress and Sustainable Energy*. 39(1):1-11. <https://doi.org/10.1002/ep.13226>
- 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.
- De-la-Trinidad-Benítez, K.L. 2021. Modelado de un reactor de fermentación para producción de etanol como biocombustible. Tesis de licenciatura en Ingeniería Química. Universidad Nacional Autónoma de México, Facultad de Química. Ciudad de México, México.
<http://132.248.9.195/ptd2021/septiembre/0814530/Index.html>
- Detor-Méndez, V.I., Hernández-Segoviano, E. 2012. Comportamiento de cuatro reactores anaerobios de lecho de lodos de flujo ascendente (RALLFA) bajo diferentes temperaturas de operación 35, 45, 55 y 65°C. Tesis profesional. UNAM, Facultad de Estudios Superiores Cuautitlán. Pp. 1-99. Cuautitlán, México.
<https://repositorio.unam.mx/contenidos/143194>
- DOF. 2022. Norma Oficial Mexicana NOM-001-SEMARNAT-2021. Diario Oficial de la Federación. Poder Ejecutivo Federal. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. 2021. Semarnat actualiza NOM 001 sobre descargas de aguas residuales, tras 25 años de parálisis. Comunicado.

<https://www.gob.mx/semarnat/prensa/semarnat-actualiza-nom-001-sobre-descargas-de-aguas-residuales-tras-25-anos-de-paralisis?idiom=es>

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. Ciudad de México, México.

DOF. 1997. Norma Oficial Mexicana NOM-003-SEMARNAT-1997. Diario Oficial de la Federación. Poder Ejecutivo Federal. Secretaría de Medio Ambiente, Recursos Naturales y Pesca. 1998. NORMA Oficial Mexicana NOM-003-ECOL-1997.

https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/311363/NOM_003_SEMARNAT.pdf,

[https://agua.org.mx/wp-](https://agua.org.mx/wp-content/uploads/2013/10/NOM_001_002_003_SEMARNAT.pdf)

[content/uploads/2013/10/NOM_001_002_003_SEMARNAT.pdf](https://agua.org.mx/wp-content/uploads/2013/10/NOM_001_002_003_SEMARNAT.pdf)

https://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5645374&fecha=11/03/2022#gs.c.tab=0

DOF. 1996. Norma Oficial Mexicana NOM-002-SEMARNAT-1996. Diario Oficial de la Federación. Poder Ejecutivo Federal. Secretaría de Medio Ambiente, Recursos Naturales y Pesca. 1998. NORMA Oficial Mexicana NOM-002-ECOL-1996.

<https://www.profepa.gob.mx/innovaportal/file/3295/1/nom-002-semarnat-1996.pdf>

Drosou, C., Kyriakopoulou, K., Bimpilas, A., Tsimogiannis, D., Krokida, M. 2015. A comparative study on different extraction techniques to recover red grape pomace polyphenols from vinification byproducts. Ind. Crops Prod. 75:141-149.

<https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2015.05.063>

- Durán-de-Bazúa, M.d.C. 2005. Sugarcane Industry Wastewaters Treatment. En Water Encyclopedia. J.H. Lehr, J. Keeley, Eds. 1:614-620. Published Online: 15 JUL 2005. DOI: 10.1002/047147844X.iw154
- 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 alcohólicos: Sistema anaerobio/aerobio. Rev. IMIQ. 35(8): 42-47.
- Durán-Domínguez-de-Bazúa, M.-d.-C. 2022a. Aprovechamiento de los subproductos del procesamiento de la caña de azúcar: Bagazo, cachaza, vinazas, metano, polifenoles, aguas residuales tratadas, etc. / *Use of by-products from sugarcane processing: Bagasse, cachasse, stillage (vinasse), methane, polyphenols, treated wastewater, etc..* Revista RD ICUAP. 8(23):115-130. <http://rd.buap.mx/ojs-dm/index.php/rdicuap/article/view/812/924>
- Durán-Domínguez-de-Bazúa, M.d.C. 2022b. Posibilidades Tecnológicas en la Agroindustria Azucarera-Alcoholera. En Curso: Actualización en Innovación Tecnológica y Contabilidad Azucarera 2022. PROCAZÚCAR. Agosto 18-19, Córdoba, Veracruz, México.
- Enríquez-Poy, M. 2022. Caña de azúcar, clave para recuperar la soberanía energética / *Sugar cane, key to recovering energy sovereignty*. En / *In Sustainability and development: 3. Sociohumanistic aspects* - Sustentabilidad y desarrollo: 3. Aspectos sociohumanísticos. María del Carmen Durán-Domínguez-de-Bazúa, Carolina Peña-Montes, Gerardo Reyes-Guzmán, *editors/editor(as)*. RACAM, DAAD. UNAM. ISBN: En trámite INDAUTOR. Pp. 127-143. Ciudad de México / *Mexico City, Mexico*. 27 Junio 1ª edición Capítulo 8 / *Chapter 8*
- Enríquez-Poy, M. 2021. Sembrando tierra y residuos, para cosechar caña de azúcar y otros vegetales / *Sowing soil and residues to harvest sugar cane and other vegetables*. En Memorias del Seminario Internacional de Expertos en Tratamiento de Efluentes Industriales y Residuos en Honor a la Dra. Luisa Tan

- Molina. Séptima edición / *Proceedings of the International Seminar of Experts on the Treatment of Industrial Effluents and Residues in Honor to Mrs. Dr. Luisa Tan Molina. Seventh edition.* RACAM, ed. Pp. 145-160. Ciudad de México, México.
- Escamilla-Jiménez, C.I., Cuevas-Martínez, E.Y., Guevara-Fonseca, J. 2009. Flavonoides y sus acciones antioxidantes. *Rev. Fac. Med. UNAM.* 52(2):73-75.
<https://www.medigraphic.com/pdfs/facmed/un-2009/un092g.pdf>
- Escutia-Guadarrama, L. 2011. Extracción asistida por ultrasonido de polifenoles en uva. Tesis de licenciatura en Química. Facultad de Química, Universidad Nacional Autónoma de México. Ciudad de México, México.
http://132.248.9.195/ptb2011/marzo/0667889/0667889_A1.pdf
- Fajardo-Castillo, E.E., Sarmiento-Forero, S.C. 2007. Evaluación de melaza de caña como sustrato para la producción de *Saccharomyces cerevisiae*. Tesis de licenciatura en Microbiología Industrial. Pontificia Universidad Javeriana, Facultad de Ciencias. Bogotá, D.C.
<https://repository.javeriana.edu.co/bitstream/handle/10554/8279/tesis26.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Fakhri, S., Abbaszadeh, F., Zachariah Moradi, S., Cao, H., Khan, H., Xiao, J. 2022. Effects of polyphenols on oxidative stress, inflammation, and interconnected pathways during spinal cord injury. *Oxidative Medicine and Cellular Longevity.* 2022: Art. ID 8100195, 34 pages.
<https://doi.org/10.1155/2022/8100195>
- Fernández-Salazar, M.E. 2020. Extracción, identificación y cuantificación de los polifenoles del marrubio (*Marrubium vulgare*) por electroforesis capilar. Tesis de licenciatura en Química. Facultad de Estudios Superiores Cuautitlán, Universidad Nacional Autónoma de México. Ciudad de México, México.
<http://132.248.9.195/ptd2021/marzo/0809024/Index.html>
- 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.
- Flores-Peña, O.E. 2017. Evaluación del potencial de metano utilizando residuos lignocelulósicos provenientes de una fermentación alcohólica. Tesis de licenciatura

- en Ingeniería Química. Facultad de Química, Universidad Nacional Autónoma de México. Ciudad de México, México. <https://repositorio.unam.mx/contenidos/456039>
- Ford, L., Theodoridou, K., Sheldrake, G., Walsh, P. 2019. A critical review of analytical methods used for the chemical characterisation and quantification of phlorotannin compounds in brown seaweeds. *Phytochemical Analysis*. 30(10):1-13. <https://doi.org/10.1002/pca.2851>
- Freitas, P.V., da Silva, D.R., Beluomini, M.A., da Silva, J.L., Stradiotto, N.R. 2018. Determination of phenolic acids in sugarcane vinasse by HPLC with pulse amperometry. *Journal of Analytical Methods in Chemistry*. 2018: Article ID 4869487, 10 pp. <https://doi.org/10.1155/2018/4869487>
- García-Triana, B.E., Saldaña-Bernabeu, A., Saldaña-García, L. 2013. El estrés oxidativo y los antioxidantes en la prevención del cáncer. *Revista Habanera de Ciencias Médicas*. 12(2):187-196.
http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1729-519X2013000200005#:~:text=Introducción%3A%20el%20estrés%20oxidativo%20participa,mecanismos%20celulares%20de%20defensa%20antioxidante.
- García, I.G., Venceslada, J.B., Peña, P.J., Gómez, E.R. 1997. Biodegradation of phenol compounds in vinasse *Aspergillus terreus* and *Geotrichum candidum*. *Water Research*. 31(8):2005-2011.
- Garrido-Fernández, A., Fernández-Diez, M.J., Adams, M.R. 1997. Table olives, production and processing. Chapman & Hall. Londres, Reino Unido.
- Gaspar-Mendoza, L. 2021. Evaluación teórica del desempeño de carbón activado de bagazo de caña para separar polifenoles de vinazas tratadas anaerobiamente. Trabajo de estancia estudiantil 2021-1. UNAM, Facultad de Química. Ciudad de México, México.
- Gaspar-Mendoza, L. 2022. Adsorción y desorción de polifenoles para su uso medicinal a partir de vinazas de bioetanol de caña de azúcar (*Saccharum officinarum*) usando carbón activado del propio bagazo de la caña. Tesis profesional de ingeniería química. UNAM, Facultad de Química. Ciudad de México. <http://132.248.9.195/ptd2022/septiembre/0830323/Index.html>

Gaspar-Mendoza, L., Bernal-González, M., García-Gómez, R.S., Solís-Fuentes, J.A., Navarro-Frómeta, A.E., Durán-Domínguez-de-Bazúa, M.d.C. 2022. Aprovechamiento integral de las vinazas de alcohol de caña de azúcar (*Saccharum officinarum*) mediante anaerobiosis y la posible separación de polifenoles útiles usando carbón activado de bagazo de caña / *Comprehensive use of sugarcane (Saccharum officinarum) alcohol stillage through anaerobiosis and the possible separation of useful polyphenols using activated carbon from cane bagasse*. *Mix Tec.* 2(3):12-54.

<http://mixtec.utim.edu.mx/articulosv3/articulo02.pdf>

Gaspar-Mendoza, L., Bernal-González, M., García-Gómez, R.S., Navarro-Frómeta, A.E., Solís-Fuentes, J.A., Durán-Domínguez-de-Bazúa, M.d.C. 2021. Uso medicinal de polifenoles, un estudio educativo con fines sociales / *Medicinal use of polyphenols, an educational study for social purposes* (Cartel EA/EE-01). En *Seventh International Seminar of Experts on the Treatment of Industrial Effluents and Residues in Honor of Mrs. Dr. Luisa Tan Molina*. Instituto de Ciencias de la Atmósfera y Cambio Climático y Facultad de Química, LIQAyQA, MCE2, BOKU University Vienna, UTIM, UCE, UJAT, TNAldemex-ITV, UV, UH, ATAM, AMCATH, GIZ, UFZ, BUAP, UMSNH, RedICA, RACAM, Red Conacyt GCyDA. University City, Ciudad de México, October 1-2. Evento virtual/*Virtual event*.

Gharaati-Jahromi, S. 2019. Extraction techniques of phenolic compounds from plants. En *Plant Physiological Aspects of Phenolic Compounds*. Soto-Hernández, M., García-Mateos, R., Palma-Tenango, M. Editores. IntechOpen Book Series. DOI: 10.5772/intechopen.84705

Gimeno-Creus, E., 2004. Compuestos fenólicos: Un análisis de sus beneficios para la salud. *Ámbito Farmacéutico*. 23(6):80-84. <https://www.elsevier.es/es-revista-offarm-4-articulo-compuestos-fenolicos-un-analisis-sus-13063508>

Girgis, B.S., Khalil, L.B., Tawfik, T.A.M. 1994. Activated carbon from sugar cane bagasse by carbonization in the presence of inorganic acids. *J. Chem. Technol. Biotechnol.* 61(1): 87-92.

González, M., Barrios, S., Budelli, E., Pérez, N., Lema, P., Heinzen, H. 2020. Ultrasound assisted extraction of bioactive compounds in fresh and freeze-dried

- Vitis vinifera* cv Tannat grape pomace. Food Bioprod. Process.124(2020):378–386. ISSN 0960-3085 <https://doi.org/10.1016/j.fbp.2020.09.012>
- González-Centeno, M.R., Knoerzer, K., Sabarez, H., Simal, S., Rosselló, C., Femenia, A. 2014. Effect of acoustic frequency and power density on the aqueous ultrasonic-assisted extraction of grape pomace (*Vitis vinifera* L.) - A response surface approach. Ultrasonic Sonochemistry. 21(6):2176–2184. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2014.01.021>
- Grotewold, E. 2006. The Science of Flavonoids. Springer. 275 pp. New York, NY, Estados Unidos. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-0-387-28822-2>
- 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.
- Guntero, V.A., Longo, M.B., Ciparicci, S., Martini, R.E., Andreatta, A.E. 2015. Comparación de métodos de extracción de polifenoles a partir de residuos de la industria vitivinícola. CAIQ2015-VII Congreso Argentino de Ingeniería Química. 3ras. Jornadas Argentinas de Seguridad de Procesos. http://www.aaiq.org.ar/SCongresos/docs/06_029/papers/05c/05c_1775_727.pdf
- Guo, Y., Tan, C., Sun, J., Li, W., Zhang, L, Zhao, C. 2020. Porous activated carbons derived from waste sugarcane bagasse for CO₂ adsorption. Chemical Engineering Journal. 381: 122736.
- Hernández-González, J.C. 2017. Balance de materia y energía de un reactor anaerobio de lecho de lodos de flujo ascendente (RALLFA) para el tratamiento de un efluente proveniente de una planta azucarera. Tesis profesional de Ingeniería Química. Facultad de Química, UNAM. Defensa: Junio 14. Ciudad de México, México.
- Jiménez-Ambriz, R.M., Martínez-Garza, M.A. 1995. Instalación y arranque de un reactor anaerobio en un tren anaerobio-aerobio de una planta piloto de tratamiento de vinazas. Tesis profesional de Ingeniería Química. Facultad de Química, UNAM. Defensa: Noviembre 6. Ciudad de México, México (con esta investigación a nivel prototipo se obtuvo el siguiente reconocimiento: Premio

IMIQU-CONACyT a la mejor tesis en ingeniería química a nivel nacional 1995 / Segundo lugar. Tesis "Instalación y arranque de un reactor anaerobio en un tren anaerobio-aerobio de una planta piloto de tratamiento de vinazas". Tesistas: Ing. Rosa María Jiménez-Ambriz e Ing. Miguel Ángel Martínez-Garza. Asesora de tesis: Profa. Dr.-Ing. Carmen Durán Domínguez. Enero 21, 1996. Ciudad de México, México.

Jiménez, A.M., Borja, R., Marín, A., Raposo, F. 2006. Kinetic analysis of the 'anaerobic'³ digestion of untreated vinasses and vinasses previously treated with *Penicillium decumbens*. Journal of Environmental Management. 80(4):303-310. DOI: 10.1016/j.jenvman.2005.09.011

Karatzos, S., McMillan, J.D., Saddler, J.N. 2014. The potential and challenges of drop-in biofuels. IEA Bioenergy Task 39. Pp. 141-145. <https://task39.sites.olt.ubc.ca/files/2014/01/Task-39-Drop-in-Biofuels-Report-FINAL-2-Oct-2014-ecopy.pdf>

Kaushik, A., Basu, S., Singh, K., Batra, V.S., Balakrishnan, M. 2017. Activated carbon from sugarcane bagasse ash for melanoidins recovery. Journal of Environmental Management. 200:29-34. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2017.05.060>.

Kim, J., Yoon, M., Yang, H., Jo, J., Han, D., Jeon, Y.J., Cho, S. 2014. Enrichment and purification of marine polyphenol phlorotannins using macroporous adsorption resins. Food Chemistry. 162(2014):135-142. ISSN 0308-8146. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2014.04.035>

Kow, S.-H., Fahmi, M.R., Abidin, C.Z.A., Ong, S.-A., Ibrahim, N. 2016. Regeneration of spent activated carbon from industrial application by NaOH solution and hot water. Desalination and Water Treatment. DOI: 10.1080/19443994.2016.1168133

Kumar-Gupta, V., Nayak, A., Agarwal, S., Tyagi, I. 2014. Potential of activated carbon from waste rubber tire for the adsorption of phenolics: Effect of pre-treatment conditions. Journal of Colloid and Interface Science. 417(2014):420–430.

³ 'Anaerobic' digestion es un pleonasma (nota de la asesora)

- Kumar-Reddy, K.S., Kannan, P., Al Shoaibi, A., Srinivasakannan, C. 2014. KOH-based porous carbon from date palm seed: preparation, characterization, and application to phenol adsorption. *Water Science & Technology*. 70(10):1633-1640.
- 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.
- 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 para obtener título de Químico Farmacéutico Biólogo. Facultad de Química, UNAM. Ciudad de México, México.
- Liguori, R., Amore, A., Faraco, V. 2013. Waste valorization by biotechnological conversion into added value products. *Applied Microbiology and Biotechnology*. 97(14): 6129-6147.
- López, I., Borzacconi, L., Passeggi, M. 2018. Anaerobic treatment of sugar cane vinasse: Treatability and real-scale operation. *Journal of Chemical Technology and Biotechnology*. 93(5):1320-1327. <https://doi.org/10.1002/jctb.5493>
- 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.
- Manahan, S.E. 1997. Introducción a la química ambiental. Curso de Posgrado. Programa de Maestría y Doctorado en Ciencias Químicas. Orientación Química Ambiental. Facultad de Química, Universidad Nacional Autónoma de México. Ciudad de México, México.
- Marchante, L., Gómez Alonso, S., Alañón, M.E., Pérez-Coello, M.S., Díaz-Maroto M.C. 2018. Natural extracts from fresh and oven-dried winemaking by-products as valuable source of antioxidant compounds. *Food Sci. Nutr*. 6(6):1564-1574. <https://doi.org/10.1002/fsn3.697>

- Marinelli, V., Padalino, L., Nardiello, D., Del Nobile, M. A. Conte, A. 2015. New Approach to Enrich Pasta with Polyphenols from Grape Marc. *J. Chem.* 6(2015):1-8 <https://doi.org/10.1155/2015/734578>
- Martínez-Arellano, D. 2022. Recuperación de polifenoles de vinazas sometidas a un tratamiento anaerobio en reactores de lecho de lodos de flujo ascendente (RALLFA) termofílicos. Tesis profesional de ingeniería química. UNAM, Facultad de Química. Ciudad de México, México.
- Martínez-Flórez, S., González-Gallego, J., Culebras, J.M., Tuñón, M.J. 2002. Los flavonoides: Propiedades y acciones antioxidantes. *Nutrición Hospitalaria.* 17(6):271-278.
https://www.academia.edu/8258805/2002_los_flavonoides_propiedades_y_acciones_antioxidantes_1_?from=cover_page
- Martins, G.R., Monteiro, A.F., do Amaral, F.R.L. 2021. A validated Folin-Ciocalteu method for total phenolics quantification of condensed tannin-rich açai (*Euterpe oleracea* Mart.) seeds extract. *J. Food Sci. Technol.* 58:4693-4702.
<https://doi.org/10.1007/s13197-020-04959-5>
- McMurry, J. 2004. Química orgánica. 6ª ed. International Thomson Editores. Ciudad de México, México.
- Moldovan, M.L., Bogdan, C., Iurian, S., Roman, C., Oniga, I., Benedec, D. 2020. Phenolic content and antioxidant capacity of pomace and canes extracts of some *Vitis vinifera* varieties cultivated in Romania. *Farmacia.* 68(1):15–21.
<https://doi.org/10.31925/farmacia.2020.1.3>
- Montoya-M., M.I., Quintero-S., J.A., Sánchez-T., O.J., Cardona-A., C.A. 2005. Evaluación económica del proceso de obtención de alcohol carburante a partir de caña de azúcar y maíz. *Revista Universidad EAFIT.* 41(139):76-87.
https://www.researchgate.net/publication/26496690_Evaluacion_economica_del_proceso_de_obtencion_de_alcohol_carburante_a_partir_de_cana_de_azucar_y_maiz
- Mordor Intelligence. 2022. Mercado de Polifenoles: Crecimiento, Tendencias, Impacto de Covid-19 y Pronósticos (2021 - 2026).
<https://www.mordorintelligence.com/es/industry-reports/polyphenol-market>

- Moreno-Ruiz, Y.F. 2020. Determinación de polifenoles totales y capacidad antioxidante en gualumbos (flor de maguey agave spp.). Tesis de licenciatura de Química de Alimentos. Facultad de Química, Universidad Nacional Autónoma de México. Ciudad de México, México.
<http://132.248.9.195/ptd2020/marzo/0801225/Index.html>
- Moreno-Simón, M. 2020. Dinámica de los polifenoles procedentes de aguas residuales de la industria vinícola durante el proceso de digestión 'anaerobia'⁴. Tesis Bachillerato, Universitat Politècnica de Catalunya, Cataluña, España.
<https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2117/334571/memoria.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Mota-Celis, M.G. 2010. Flavonoides: Características y algunas propiedades biológicas. Una revisión. Tesina de licenciatura en Biología. Universidad Nacional Autónoma de México, Facultad de Estudios Superiores Iztacala. Ciudad de México, México. <https://repositorio.unam.mx/contenidos/174069>
- Naranjo-Martínez, J.I. 2016. Evaluación de dos métodos para la obtención de extractos con actividad antioxidante a partir de gulupa (*Passiflora edulis* Sims.) con aplicación en productos mínimamente procesados. Tesis de licenciatura de Química de Alimentos. Facultad de Ingeniería, Universidad de La Salle. Bogotá, Colombia. https://ciencia.lasalle.edu.co/ing_alimentos/58
- Natolino, A., Da-Porto, C. 2020. Kinetic models for conventional and ultrasound assistant extraction of polyphenols from defatted fresh and distilled grape marc and it's main components skins and seeds. Chem. Eng. Res. Des.156:1-12.
<https://doi.org/10.1016/j.cherd.2020.01.009>
- Nieto-Sanz, L. 2019. Obtención de compuestos antioxidantes a partir de bagazo de cerveza. Tesis de licenciatura en Ingeniería Química. Universidad de Valladolid. Escuela de Ingenierías Industriales. Valladolid, España. P.8.
<https://core.ac.uk/download/pdf/232122987.pdf>

⁴ La digestión es un proceso eminentemente anaerobio por lo que es innecesario adicionar ese adjetivo. Es un resabio que ya dura dos generaciones desde la aparición del primer libro de dos ingenieros civiles que no sabían mucha microbiología y que sigue perpetuándose (nota de la asesora)

- Ojeda-Armaignac, E., Hing-Cortón, R. 2009. Tratamiento por electrocoagulación y coagulación-floculación de la vinaza de destilerías. *Tecnología Química*. 29:153-161.
- Ojeda-Berra, L. 2008. Modelo matemático de un reactor anaerobio con bacterias sulfatorreductoras para el tratamiento del efluente del proceso de flotación de una planta minera. Tesis de Maestría en Ingeniería (Química, Procesos). Facultad de Química, UNAM. Ciudad de México, México.
<https://repositorio.unam.mx/contenidos/97029>
- Ortega-Becerril, A.K. 2020. Determinación de polifenoles totales en aceites vegetales a partir de extracciones líquido-líquido con microfluídica. Tesis de licenciatura en Química de Alimentos. Facultad de Química, Universidad Nacional Autónoma de México. Ciudad de México, México.
<http://132.248.9.195/ptd2020/agosto/0802767/Index.html>
- Ossa, J.A., Vanegas, M.C., Badillo, A.M. 2010. Evaluación de la melaza de caña como sustrato para el crecimiento de *Lactobacillus plantarum*. *U.D.C.A Actualidad & Divulgación Científica*. 13(1):97-104. ISSN 0123-4226.
<https://search.ebscohost.com/login.aspx?direct=true&db=cat02032a&AN=per.PER01000366441&lang=es&site=eds-live>
- Pacheco-Suárez, G. 2016. Estudio técnico económico de las alternativas para el tratamiento y/o aprovechamiento de los efluentes en la industria alcoholera (vinazas), por fermentación de melazas. Tesis de licenciatura en ingeniería química. Facultad de Estudios Superiores Zaragoza, UNAM. Ciudad de México, México. <http://132.248.9.195/ptd2017/abril/0757895/Index.html>
- 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.
- Pazuch, F.A., Camargo-Nogueira, C.E., Melegari-Souza, S.N., Cavaler-Micuanski, V., Friedrich, L., Lenz, A.M. 2017. Economic evaluation of the replacement of sugar cane bagasse by vinasse, as a source of energy in a power plant in the state of

- Paraná, Brazil. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 76(2017):34-42. ISSN 1364-0321. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.03.047>
- Pérez-Trueba, G., Martínez-Sánchez, G. 2001. Los flavonoides como antioxidantes naturales. *Acta Farmacéutica Bonaerense*. 20(4):297-306. http://www.latamjpharm.org/trabajos/20/4/LAJOP_20_4_3_1_P9HXUFPEV7.pdf
- Pérez, J., Gardey, A. 2019. Definición de melaza. *Definición.de*. <https://definicion.de/melaza/>
- Perez, M., Rodriguez-Cano, R., Romero, L.I., Sales, D. 2006. Anaerobic thermophilic digestion of cutting oil wastewater: Effect of co-substrate. *Biochemical Engineering Journal*. 29(3):250-257.
- Peters, M.S., Timmerhaus, K.D. 1991. *Plant design and economics for chemical engineers*. McGraw-Hill International Editions. 4a ed. Chemical and Petroleum Engineering Series. Capítulo 6. Pp. 150-215. New York, EE.UU. <http://repository.um-palembang.ac.id/id/eprint/9024/1/Plant%20Design%20and%20Economics%20for%20Chemical%20Engineers%20%28%20PDFDrive.com%20%29.pdf>
- Pineda-Loperena, J. 2015. Transesterificación enzimática de flavonoides. Tesis de maestría en Ciencias Químicas. Facultad de Química, Universidad Nacional Autónoma de México. Ciudad de México, México. <https://repositorio.unam.mx/contenidos/319328>
- Poblano-Flores, A. 2015. Contenido de metano en biogás producido a nivel laboratorio en tres reactores de lecho de lodos de flujo ascendente (RALLFA) operando a 45, 55 y 65°C. Tesis profesional de Ingeniería Química. Facultad de Química, UNAM. Defensa: Mayo 22. Ciudad de México, México.
- 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.
- Quintero, R. 2004. Perspectivas acerca del uso y manejo de vinazas aplicadas al suelo. En: *Memorias del encuentro sobre vinaza, potasio y elementos menores para una agricultura sostenible*. Sociedad Colombiana de la Ciencia del Suelo (SCCS). Mayo 13-14. Palmira, Colombia.

- Quiñones, M., Miguel, M., Aleixandre, A. 2012. Los polifenoles, compuestos de origen natural con efectos saludables sobre el sistema cardiovascular. *Nutrición Hospitalaria*. 27(1):76-89. ISSN 1699-5198.
http://scielo.isciii.es/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0212-16112012000100009&lng=es&tlng=es.
- Rabelo, R., Machado, M., Martínez, J., Hubinger, M.D. 2016. Ultrasound assisted extraction and nanofiltration of phenolic compounds from artichoke solid wastes. *Journal of Food Engineering*. 178(2016):170-180.
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0260877416300188>
- Ramírez-Méndez, K.E. 2020. Tratamiento enzimático para la reutilización de bagazo de agave en la producción de etanol. Tesis de licenciatura en Ciencias Agroquímicas. Universidad Nacional Autónoma de México, Escuela Nacional de Estudios Superiores Unidad León. León, Guanajuato.
<http://132.248.9.195/ptd2020/septiembre/0803926/Index.html>
- Ramón, C., Gil-Garzón, M.A. 2021. Efecto de los parámetros de operación de la extracción asistida por ultrasonido en la obtención de polifenoles de uva: Una revisión. *Tecnológicas*. 2(51):1-15, e1822.
<https://doi.org/10.22430/22565337.1822>
- 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.
- Rincón-Acelas, I.R. 2008. Cinética de la degradación anaerobia termofílica de vinazas de caña. Tesis de Maestría en Ingeniería (Campo del conocimiento: Ingeniería Ambiental, Campo disciplinario: Agua). Programa de Maestría y Doctorado en Ingeniería. UNAM. Defensa: Junio 30. México D.F. México.
- Robbins, R. 2003. Phenolic acids in foods: An overview of analytical methodology. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*. 51(10):2866-1887.
DOI: 10.1021/jf026182t
- Robles-González, V., Galíndez-Mayer, J., Rinderknecht-Seijas, N., Poggi-Varaldo, H.M. 2012. Treatment of mezcal vinasses: A review. *Journal of Biotechnology*.

- 157(2012):524-546. <https://www.utm.mx/postgrado/MCPNyAI/Evaluacion2014/C1-Estructura%20y%20personal%20academico/1.4%20LGAC/1.4.2%20Participacion%20de%20estudiantes%20y%20profesores/Articulos/Dr.%20Vania/jb-2012-524.pdf>
- 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.
- Rodriguez-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–flocculation process coupled with heterogeneous photocatalysis using titanium dioxide nanoparticles. *Environmental Technology*. 41(8):1023-1033.
- Rodríguez-Arreola, A. 2019. Tratamiento de vinaza de tequila por medio de coagulación-floculación y fotocatalisis heterogénea empleando nanopartículas de TiO₂. Tesis de Doctorado en Ciencias Físico Matemáticas, orientación Nanociencias. Universidad de Guadalajara, Centro Universitario de los Valles, Ameca, Jalisco, México.
- Rogers, P.L., Jeon, Y.J., Svenson, C.J. 2005. Application of biotechnology to industrial sustainability. *Process Safety and Environmental Protection*. 83(6):499-503.
- Romero-Soto, B. 2011. Identificación de bacterias metanogénicas y sulfatorreductoras en tres reactores RALLFA a diferentes temperaturas: 45, 55 y 65°C. Tesis profesional de Ingeniería Química. Facultad de Química, UNAM. Defensa: Marzo 30. Ciudad de México, México.
- Sánchez-Hernández, A.A. 2008. Degradación anaerobia termofílica de vinazas de caña a nivel de laboratorio. Tesis de Ingeniería Química. Instituto Tecnológico de Tuxtla Gutiérrez. SEP. Defensa: Noviembre 20. Tuxtla Gutiérrez, Chiapas, México.
- Santos-Buelga, C., González-Manzano, S., Dueñas, M., González-Paramas, A.M. 2012. Extraction and isolation of phenolic compounds. *Natural products isolation*.

- Methods in Molecular Biology (Methods and Protocols). 864(1):427-464.
https://doi.org/10.1007/978-1-61779-624-1_17
- Saura-Pujante, M.J. 2014. Efectos de polifenoles sobre un modelo experimental de osteoporosis. Tesis de Doctorado. Universidad de Murcia, Facultad de Medicina. Murcia, España.
<https://digitum.um.es/digitum/bitstream/10201/41869/1/Manuel%20Jos%c3%a9%20Saura%20Pujante-%20Tesis.pdf>
- Saval, S. 2012. Aprovechamiento de residuos agroindustriales: Pasado, presente y futuro. Bio.Tecnología. 16(2):14-46.
- Shi, J., Li, R., Yang, S., Phang, Y., Zheng, C., Zhang, H. 2020. The protective effects and potential mechanisms of *Ligusticum chuanxiong*: Focus on anti-inflammatory, antioxidant, and antiapoptotic activities. Evidence-Based Complementary and Alternative Medicine. 2020: Article ID 8205983, 9 pags.
<https://doi.org/10.1155/2020/8205983>
- Solís-Fuentes, J.A., Morales-Téllez, M., Ayala-Tirado, R.C., Durán-de-Bazúa, M.d.C. 2012. Obtención de carbón activado a partir de residuos agroindustriales y su evaluación en la remoción de color del jugo de caña. Tecnología, Ciencia, Educación (IMIQ, México). 27(1): 36-48. ISSN: 0186-6036.
<https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=48224413006>
- Sosa-Villalobos, C. 2014. Arranque de un reactor anaerobio, con aguas residuales de destilería de alcohol de caña. Revista Iberoamericana de Ciencias. 1(5):200-207. ISSN 2334-250. <http://www.reibci.org/publicados/2014/octubre/reactor.pdf>
- Soto, M.F., Diaz, C.A., Zapata, A.M., Higueta, J.C. 2021. BOD and COD removal in vinasses from sugarcane alcoholic distillation by *Chlorella vulgaris*: Environmental evaluation. Biochemical Engineering Journal. 176(2021):1-8. ISSN 1369-703X.
<https://doi.org/10.1016/j.bej.2021.108191>
- Soto, M.L, Moure, A., Domínguez, H., Parajó, J.C. 2017. Batch and fixed bed column studies on phenolic adsorption from wine vinasses by polymeric resins. Journal of Food Engineering. 209:52-60. ISSN 0260-8774.
<https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2017.04.008>

- Steinmetz, K.A., Potter, J.D. 1996. Vegetables, fruit, and cancer prevention: A review. *J. Am. Diet Assoc.* 96: 1027-1039.
- Tao, Z., Kyung, H.R. 2011. Preparation of amino-modified active carbon cartridges and their use in the extraction of quercetin from *Oldenlandia diffusa*. *Journal of Pharmaceutical and Biomedical Analysis.* 56(4):713-720.
<https://doi.org/10.1016/j.jpba.2011.07.014>
- Thakur, P.K., Mathur, A.K., Gautam, S.B., Balomajumder, C., Rahul. 2013. Determination of mass transfer coefficients for a mixture of compost, sugarcane bagasse, and granulated activated carbon as packing medium in biofilter. *Biorem. J.* 170: 61-70.
- Toledo-Cervantes, A., Guevara-Santos, N., Arreola-Vargas, J., Snell-Castro, R., Méndez-Acosta, O.H. 2018. Performance and microbial dynamics in packed-bed reactors during the long-term two-stage anaerobic treatment of tequila vinasses. *Biochemical Engineering Journal.* 138(2018):12-20. ISSN 1369-703X.
<https://doi.org/10.1016/j.bej.2018.06.020>.
- Tomás-Barberán, F.A. 2003. Los polifenoles de los alimentos y la salud. *Alimentación, Nutrición y Salud.* 10(2): 41-53.
- Toscano-Pérez, D. 2012. Estudio de la diversidad filogenética de bacterias metanogénicas en tres reactores tipo RALLFA operando a 45, 55 y 65°C para el tratamiento de vinazas. Tesis profesional de Química Farmacéutico-Biológica. Facultad de Ciencias, UNAM. Defensa: Diciembre 4. Ciudad de México, México.
- Trillo-Contreras, J.L. 2015. Extracción y purificación de productos naturales de interés industrial. Trabajo de Maestría en Biotecnología Industrial y Agroalimentaria. Universidad de Almería, Facultad de Ciencias Experimentales. Almería, España.
http://repositorio.ual.es/bitstream/handle/10835/6109/7307_TFM%20Extracción%20y%20Purificación%20de%20Polifenoles%20J.L.Trillo.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- UNESCO. 2017. Programa Mundial de Evaluación de los Recursos Hídricos (WWAP). Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura 2017.

<http://www.unesco.org/new/es/natural-sciences/environment/water/wwap/facts-and-figures/all-facts-wwdr3/fact-36-industrial-wastewater/>

- Urbano-Marinho, J.F., Evangelista-Correia, J., de-Castro-Marcato, A.C., Pedro-Escher, J., Fontanetti, C.S. 2014. Sugar cane vinasse in water bodies: Impact assessed by liver histopathology in tilapia. *Ecotoxicology and Environmental Safety*. 110(2014):239-245. ISSN 0147-6513.
<https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2014.09.010>.
- Valero, E. Miranda, E., Sanz, J., Martínez-Castro, I. 2000. Automatic thermal desorption in GC analysis of dairy product volatiles. *Chromatographia*. 44:59-64.
- Vega-Baudrit, M., Delgado-Montero, K., Sibaja-Ballester, M., Alvarado-Aguilar, P.; Barrientos-Ramírez, S. 2008. Empleo de melaza de caña de azúcar para la obtención y caracterización de poliuretanos potencialmente biodegradables. *Revista iberoamericana de polimeros*. 9(4):408-421.
- Velasco, A., Ramírez, M., Volke-Sepúlveda, T., González-Sánchez, A., Revah, S. 2008. Evaluation of feed COD/sulfate ratio as a control criterion for the biological hydrogen sulfide production and lead precipitation. *Journal of Hazardous Materials*. 151(2-3):407-413.
- 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-Juvenal, G.E. 2015. Implementación de un medidor volumétrico de biogás rico en metano a nivel de laboratorio en tres reactores de lecho de lodos de flujo ascendente (RALLFA) operando a 45, 55 y 65°C. Tesis profesional de Ingeniería Química. Facultad de Química, UNAM. Defensa: Mayo 8. Ciudad de México, México.
- Villatoro-Reséndiz, J. 1998. Estudio de la transformación de la materia orgánica biodegradable de la vinaza cruda y tratada en los suelos acrisol y vertisol, del Municipio Miguel Alemán en el Estado de Veracruz, México. Tesis profesional de

- Ingeniería Química. Facultad de Ciencias, UNAM. Defensa: Marzo 11. Ciudad de México, México.
- Villegas-Bolaños, O. 2015. Seguimiento de la producción de biogás rico en metano a nivel de laboratorio en tres reactores de lecho de lodos de flujo ascendente (RALLFA) operando a 45, 55 y 65°C. Tesis profesional de Ingeniería Química. Facultad de Química, UNAM. Defensa: Septiembre 25. Ciudad de México, México.
- Virique-Rosas, J.J. 2019. Elaboración y análisis estadístico de un inventario de descargas de aguas residuales de los sectores industriales del municipio de Tlalnepantla de Baz, Estado de México. Tesis de licenciatura en Química Industrial. Facultad de Estudios Superiores Cuautitlán, Universidad Nacional Autónoma de México. Cuautitlán Izcalli, Estado de México. <https://search.ebscohost.com/login.aspx?direct=true&db=cat02029a&AN=tes.TES01000788759&lang=es&site=eds-live>. Acceso em: 15 dez. 2021
- Wang, Y., Liu, H., Zhang, D., Liu, J., Wang, J., Wang, S., Sun, B. 2019. Baijiu vinasse extract scavenges glyoxal and inhibits the formation of Nε-Carboxymethyllysine. Dairy Food. Molecules (Basel, Switzerland), 24(8):1-13,1526. <https://doi.org/10.3390/molecules24081526>
- Xiong, Q., Zhang, Q., Zhang, D., Shi, Y., Jiang, C., Shi, X. 2014. Preliminary separation and purification of resveratrol from extract of peanut (*Arachis hypogaea*) sprouts by macroporous adsorption resins. Food Chemistry. 145(2014):1-7. ISSN 0308-8146. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2013.07.140>
- Yi, D., Mourning, Z., Dongxiao, S.-W., Mingzhu, Z., Huiping, C., Mengying, F., Lianzhu L. 2015. Absorption and desorption behaviour of the flavonoids from *Glycyrrhiza glabra* L. leaf on macroporous adsorption resins. Food Chemistry. 168:538-545. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2014.07.109>
- Zacharof, M.P. 2017. Grape winery waste as feedstock for bioconversions: Applying the biorefinery concept. Waste and Biomass Valorization. 8(4):1011-1025.
- Zámano-Pérez, A.H. 1991. Tratamiento biológico de aguas residuales de la industria alcoholera a partir de melazas de caña de azúcar. Tesis profesional de Química

Farmacéutico-Biológica Orientación Bioquímica. Facultad de Química, UNAM.
Defensa: Junio 6. Ciudad de México, México.

Ziyaadini, M., Zahedi, M.M., Khosravinia, S. 2016. Ultrasound-assisted extraction combined with reverse phase-dispersive liquid-liquid micro extraction as a new approach for preconcentration and spectrophotometric determination of total phenol in marine sediments of Chabahar Bay. *Marine Pollution Bulletin*. 109(1):104-109. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2016.06.013>

Zúñiga-Cerón, V., Gandini-Ayerbe, M.A. 2013. Caracterización ambiental de las vinazas de residuos de caña de azúcar resultantes de la producción de etanol. *Dyna*. 80(177):124-131. ISSN 2346-2183.

<https://search.ebscohost.com/login.aspx?direct=true&db=edsdoj&AN=edsdoj.08ad4cc535cf4930a016ddf229078263&lang=es&site=eds-live>.

Páginas electrónicas consultadas

<https://cideteq.repositorioinstitucional.mx/jspui/bitstream/1021/377/1/Tratamiento%20de%20efluentes%20I%C3%ADquidos%20a%20trav%C3%A9s%20de%20procesos%20acoplados%20de%20Electrofloculaci%C3%B3n.pdf>

<http://www.investigacion.biblioteca.uvigo.es/xmlui/bitstream/handle/11093/412/Extracci%C3%B3n%20y%20purificaci%C3%B3n%20de%20compuestos.pdf?sequence=4&isAllowed=y>

http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0123-34752016000100015&lng=es&nrm=iso&tlng=en

<https://atamexico.com.mx/noticia-de-interes/valorizacion-de-los-polifenoles-de-las-vinazas-alcoholeras-y-roneras-como-antioxidantes-potentes/>

Posted on agosto 14, 2022 in [Noticia de Interés](#)

Para un proceso más limpio:

Valorización de los Polifenoles de las Vinazas Alcoholeras y Roneras como Antioxidantes Potentes. *Reseña de la presentación virtual del 9 de junio del 2022 hecha por la Dra. María del Carmen Durán-Domínguez-de-Bazúa a los(as) agremiados(as) de la Asociación de Técnicos Azucareros de México, A.C. ATAM, así como al público en*

general. Reseña hecha por el M. en I.A. Miguel Ángel Curiel Olivera, Correo electrónico: mcurielolivera@gmail.com y revisada por la conferencista