



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**

---

**FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES CUAUTITLÁN**

**Desalcoholización de cerveza comercial por  
métodos no convencionales**

**T E S I S**

**QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE  
INGENIERO EN ALIMENTOS**

**P R E S E N T A:**

**HUGO RODRÍGUEZ AGUILAR**

**ASESOR: DR. JONATHAN CORIA HERNÁNDEZ**

**COASESOR: DR. JOSÉ LUIS ARJONA ROMÁN**

**CUAUTITLÁN IZCALLI, ESTADO DE MÉXICO, 2022**



Universidad Nacional  
Autónoma de México



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

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

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



UNIVERSIDAD NACIONAL  
AVENIDA DE  
MEXICO

FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES CUAUTITLÁN  
SECRETARÍA GENERAL  
DEPARTAMENTO DE TITULACIÓN

U.N.A.M.  
FACULTAD DE ESTUDIOS  
SUPERIORES CUAUTITLÁN  
ASUNTO: VOTO APROBATORIO

DR. DAVID QUINTANAR GUERRERO  
DIRECTOR DE LA FES CUAUTITLAN  
PRESENTE

ATN: DRA. MARÍA DEL CARMEN VALDERRAMA BRAVO  
Jefa del Departamento de Titulación  
de la FES Cuautitlán.

Con base en el Reglamento General de Exámenes, y la Dirección de la Facultad, nos permitimos comunicar a usted que revisamos el: **Trabajo de tesis y examen profesional**

**Desalcoholización de cerveza comercial por métodos no convencionales.**

Que presenta el pasante: **Hugo Rodríguez Aguilar**

Con número de cuenta: **312122827** para obtener el título de: **Ingeniero en Alimentos**

Considerando que dicho trabajo reúne los requisitos necesarios para ser discutido en el **EXAMEN PROFESIONAL** correspondiente, otorgamos nuestro **VOTO APROBATORIO**.

**ATENTAMENTE**

**"POR MI RAZA HABLARÁ EL ESPÍRITU"**

Cuautitlán Izcalli, Méx. a 14 de Febrero de 2022.

**PROFESORES QUE INTEGRAN EL JURADO**

	NOMBRE	FIRMA
<b>PRESIDENTE</b>	Dra. Rosalía Meléndez Pérez	
<b>VOCAL</b>	I.A. Miriam Álvarez Velasco	
<b>SECRETARIO</b>	Dr. Jonathan Coria Hernández	
<b>1er. SUPLENTE</b>	M. en C. y M. en I. Ana María Soto Bautista	
<b>2do. SUPLENTE</b>	M. en C. Araceli Ulloa Saavedra	

NOTA: los sinodales suplentes están obligados a presentarse el día y hora del Examen Profesional

MCVB/cga\*



UNIVERSIDAD NACIONAL  
AUTÓNOMA DE  
MÉXICO

**FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES CUAUTITLÁN  
SECRETARÍA GENERAL  
DEPARTAMENTO DE TITULACIÓN**

U.N.A.M.  
FACULTAD DE ESTUDIOS  
SUPERIORES CUAUTITLÁN  
**ASUNTO: VOTO APROBATORIO**

**DR. DAVID QUINTANAR GUERRERO  
DIRECTOR DE LA FES CUAUTITLÁN  
PRESENTE**

**ATN: DRA. MARÍA DEL CARMEN VALDERRAMA BRAVO  
Jefa del Departamento de Titulación  
de la FES Cuautitlán.**

Con base en el Reglamento General de Exámenes, y la Dirección de la Facultad, nos permitimos comunicar a usted que revisamos el: **Trabajo de tesis y examen profesional**

**Desalcoholización de cerveza comercial por métodos no convencionales.**

Que presenta el pasante: **Hugo Rodríguez Aguilar**

Con número de cuenta: **312122827** para obtener el título de: **Ingeniero en Alimentos**

Considerando que dicho trabajo reúne los requisitos necesarios para ser discutido en el **EXAMEN PROFESIONAL** correspondiente, otorgamos nuestro **VOTO APROBATORIO**.

**ATENTAMENTE**

**"POR MI RAZA HABLARÁ EL ESPÍRITU"**

Cuautitlán Izcalli, Méx. a 14 de Febrero de 2022.

**PROFESORES QUE INTEGRAN EL JURADO**

	<b>NOMBRE</b>	<b>FIRMA</b>
<b>PRESIDENTE</b>	<u>Dra. Rosalía Meléndez Pérez</u>	<u>_____</u>
<b>VOCAL</b>	<u>I.A. Miriam Álvarez Velasco</u>	<u></u>
<b>SECRETARIO</b>	<u>Dr. Jonathan Coria Hernández</u>	<u>_____</u>
<b>1er. SUPLENTE</b>	<u>M. en C. y M. en I. Ana María Soto Bautista</u>	<u>_____</u>
<b>2do. SUPLENTE</b>	<u>M. en C. Araceli Ulloa Saavedra</u>	<u>_____</u>

NOTA: los sinodales suplentes están obligados a presentarse el día y hora del Examen Profesional

MCVB/cga\*



UNIVERSIDAD NACIONAL  
AVANZADA DE  
MÉXICO

**FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES CUAUTITLÁN  
SECRETARÍA GENERAL  
DEPARTAMENTO DE TITULACIÓN**

UNIVERSIDAD NACIONAL  
FACULTAD DE ESTUDIOS  
SUPERIORES CUAUTITLÁN  
**ASUNTO: VOTO APROBATORIO**

**DR. DAVID QUINTANAR GUERRERO  
DIRECTOR DE LA FES CUAUTITLÁN  
PRESENTE**

**ATN: DRA. MARÍA DEL CARMEN VALDERRAMA BRAVO  
Jefa del Departamento de Titulación  
de la FES Cuautitlán.**

Con base en el Reglamento General de Exámenes, y la Dirección de la Facultad, nos permitimos comunicar a usted que revisamos el: **Trabajo de tesis y examen profesional**

**Desalcoholización de cerveza comercial por métodos no convencionales.**

Que presenta el pasante: **Hugo Rodríguez Aguilar**

Con número de cuenta: **312122827** para obtener el título de: **Ingeniero en Alimentos**

Considerando que dicho trabajo reúne los requisitos necesarios para ser discutido en el **EXAMEN PROFESIONAL** correspondiente, otorgamos nuestro **VOTO APROBATORIO**.

**ATENTAMENTE**

**"POR MI RAZA HABLARÁ EL ESPÍRITU"**

Cuautitlán Izcalli, Méx. a 14 de Febrero de 2022.

**PROFESORES QUE INTEGRAN EL JURADO**

	NOMBRE	FIRMA
<b>PRESIDENTE</b>	Dra. Rosalía Meléndez Pérez	_____
<b>VOCAL</b>	I.A. Miriam Álvarez Velasco	_____
<b>SECRETARIO</b>	Dr. Jonathan Coria Hernández	_____
<b>1er. SUPLENTE</b>	M. en C. y M. en I. Ana María Soto Bautista	_____
<b>2do. SUPLENTE</b>	M. en C. Araceli Ulloa Saavedra	_____

NOTA: los sinodales suplentes están obligados a presentarse el día y hora del Examen Profesional

MCVB/cga\*



UNIVERSIDAD NACIONAL  
AUTÓNOMA DE  
MÉXICO

**FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES CUAUTITLÁN  
SECRETARÍA GENERAL  
DEPARTAMENTO DE TITULACIÓN**

U.N.A.M.  
FACULTAD DE ESTUDIOS  
SUPERIORES CUAUTITLÁN  
**ASUNTO: VOTO APROBATORIO**



**DR. DAVID QUINTANAR GUERRERO  
DIRECTOR DE LA FES CUAUTITLÁN  
PRESENTE**

**ATN: DRA. MARÍA DEL CARMEN VALDERRAMA BRAVO  
Jefa del Departamento de Titulación  
de la FES Cuautitlán.**

Con base en el Reglamento General de Exámenes, y la Dirección de la Facultad, nos permitimos comunicar a usted que revisamos el: **Trabajo de tesis y examen profesional**

**Desalcoholización de cerveza comercial por métodos no convencionales.**

Que presenta el pasante: **Hugo Rodríguez Aguilar**

Con número de cuenta: **312122827** para obtener el título de: **Ingeniero en Alimentos**

Considerando que dicho trabajo reúne los requisitos necesarios para ser discutido en el **EXAMEN PROFESIONAL** correspondiente, otorgamos nuestro **VOTO APROBATORIO**.

**ATENTAMENTE**

**"POR MI RAZA HABLARÁ EL ESPÍRITU"**

Cuautitlán Izcalli, Méx. a 14 de Febrero de 2022.

**PROFESORES QUE INTEGRAN EL JURADO**

	<b>NOMBRE</b>	<b>FIRMA</b>
<b>PRESIDENTE</b>	Dra. Rosalía Meléndez Pérez	_____
<b>VOCAL</b>	I.A. Miriam Álvarez Velasco	_____
<b>SECRETARIO</b>	Dr. Jonathan Coria Hernández	_____
<b>1er. SUPLENTE</b>	M. en C. y M. en I. Ana María Soto Bautista	
<b>2do. SUPLENTE</b>	M. en C. Araceli Ulloa Saavedra	_____

NOTA: los sinodales suplentes están obligados a presentarse el día y hora del Examen Profesional

MCVB/cga\*



UNIVERSIDAD NACIONAL  
AVENIDA DE  
MEXICO

**FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES CUAUTITLÁN  
SECRETARÍA GENERAL  
DEPARTAMENTO DE TITULACIÓN**

**ASUNTO: VOTO APROBATORIO**

**DR. DAVID QUINTANAR GUERRERO  
DIRECTOR DE LA FES CUAUTITLÁN  
PRESENTE**

**ATN: DRA. MARÍA DEL CARMEN VALDERRAMA BRAVO  
Jefa del Departamento de Titulación  
de la FES Cuautitlán.**

Con base en el Reglamento General de Exámenes, y la Dirección de la Facultad, nos permitimos comunicar a usted que revisamos el: **Trabajo de tesis y examen profesional**

**Desalcoholización de cerveza comercial por métodos no convencionales.**

Que presenta el pasante: **Hugo Rodríguez Aguilar**

Con número de cuenta: **312122827** para obtener el título de: **Ingeniero en Alimentos**

Considerando que dicho trabajo reúne los requisitos necesarios para ser discutido en el **EXAMEN PROFESIONAL** correspondiente, otorgamos nuestro **VOTO APROBATORIO**.

**ATENTAMENTE**

**"POR MI RAZA HABLARÁ EL ESPÍRITU"**

Cuautitlán Izcalli, Méx. a 14 de Febrero de 2022.

**PROFESORES QUE INTEGRAN EL JURADO**

	<b>NOMBRE</b>	<b>FIRMA</b>
<b>PRESIDENTE</b>	<u>Dra. Rosalía Meléndez Pérez</u>	_____
<b>VOCAL</b>	<u>I.A. Miriam Álvarez Velasco</u>	_____
<b>SECRETARIO</b>	<u>Dr. Jonathan Coria Hernández</u>	_____
<b>1er. SUPLENTE</b>	<u>M. en C. y M. en I. Ana María Soto Bautista</u>	_____
<b>2do. SUPLENTE</b>	<u>M. en C. Araceli Ulloa Saavedra</u>	

NOTA: los sinodales suplentes están obligados a presentarse el día y hora del Examen Profesional

MCVB/cga\*

El presente trabajo de tesis fue resultado del 0912-TMIA opción Ingeniería de Procesos de Separación por Transferencia de Masa y, su desarrollo se llevó a cabo en el Laboratorio 13 “Análisis térmico y estructural de alimentos y materiales” de la Unidad de Investigación Multidisciplinaria de la FES Cuautitlán el cual recibió apoyo de los proyectos:

- UNAM-DGAPA **PAPIIT IT201220** “Aplicación de ultrasonido en la descongelación asistida de alimentos”.
- UNAM-FESC **PIAPI 2006** “Análisis térmico de materiales y alimentos y su relación con los procesos de transferencia de calor y masa”.
- UNAM-FESC **PIAPIME 2.13.01.21** “Implementación de técnicas didácticas para el mejoramiento de la enseñanza-aprendizaje en el TMIA opción Ingeniería de Procesos de Separación por Transferencia de Masa”.

## **Dedicatorias**

### **A mi madre:**

Mi primer gran logro va dedicado a la mujer que me otorgó la vida, con su amor, sacrificio y apoyo he podido lograr todo lo que me he propuesto, celebrando cada paso que daba y cada logro como si fuera suyo. Sus palabras han sido y siempre serán mi guía. Gracias por todo.

### **A mi familia:**

A mi tía Cristina una parte fundamental de mi vida como estudiante y durante mi crecimiento, muchas gracias por toda la ayuda y el apoyo durante esos años. (Se le cumplió el que fuera ingeniero).

A mi tío Luis y mi tía Lourdes, gracias por todo su apoyo y cariño incondicional durante toda mi vida.

A mis primos Armando y Jesús, que son parte de mi vida, muchas gracias por las aventuras a lo largo de estos años espero que nunca acaben.

### **A mis amigos:**

A Liz que más que una amiga se ha convertido en una hermana, no sabe lo agradecido que estoy por haberla conocido y haber podido pasar por muchas aventuras a lo largo de estos años, gracias por todo.

A mis amigos y compañeros de taller, Yevit a pesar que hasta los últimos momentos de la carrera la conocí, su amistad se convirtió en una parte importante de mi vida, y espero que eso continúe por muchos años más. Benja agradezco por su amistad y todos los buenos momentos durante toda la carrera.

A Brenda que fue una parte importante durante mis estudios, gracias por tu amistad, aprendí de ti, a ver desde otros puntos de vista las cosas.

A mis amigas Mariana, Marleny y Ana el mejor equipo de trabajo y de aventuras, gracias por su amistad.

## **Agradecimientos**

A la Universidad Nacional Autónoma de México en especial a la Escuela Nacional Preparatoria N° 9, "Pedro de Alba" y a La Facultad de Estudios Superiores Cuautitlán por brindarme la oportunidad de cumplir mis metas y objetivos.

A las profesoras: I.A. Miriam Álvarez Velasco, M. en C. y M. en I. Ana María Soto Bautista y M. en C. Araceli Ulloa Saavedra por sus excelentes sugerencias y comentarios para mejorar este trabajo.

A mi asesor de tesis Dr. Jonathan Coria Hernández, por toda su ayuda durante todo el proceso con el fin de tener un buen trabajo, pero sobre todo por su paciencia, apoyo y consejos. Muchas gracias.

A mi asesor Dr. José Luis Arjona Román, por su tiempo, ayuda y todo su conocimiento para poder mejorar este trabajo y poder completar mi carrera. Muchas gracias.

A la profesora Dra. Rosalía Meléndez Pérez, por su gran apoyo, consejos y enseñanzas durante mi última etapa universitaria, y sus grandes comentarios para poder completar y mejorar mi trabajo. Muchas gracias.

# CONTENIDO

---

RESUMEN.....	1
INTRODUCCIÓN.....	2
Capítulo I. Antecedentes .....	4
1. Cerveza.....	4
1.1. Clases de cervezas .....	5
a) Fermentación alta.....	6
b) Fermentación baja.....	7
c) Fermentación espontánea .....	8
2. Historia mundial de la cerveza.....	9
2.1. Historia de la cerveza en México .....	12
3. Proceso de elaboración.....	16
3.1. Operaciones unitarias fundamentales para la elaboración de cerveza .....	17
3.2. Ingredientes usados en la elaboración de cerveza .....	26
a) Malta.....	26
b) Lúpulo.....	27
c) Levadura .....	28
d) Agua.....	29
e) Adjuntos .....	29
4. Calidad de la cerveza.....	30
a) Color .....	31
b) pH.....	32
c) Espuma.....	33
d) Turbidez.....	34
e) Grado alcohólico .....	34
5. Cerveza sin alcohol .....	35
5.1. Procesos de desalcoholización de cerveza .....	36
5.1.1. Adaptación del proceso de elaboración .....	37
a) Mosto de baja densidad .....	37
b) Mosto de alta densidad .....	37
c) Malteado a elevada temperatura.....	38
d) Control del proceso de fermentación.....	38

5.1.2. Tratamientos físicos.....	39
5.1.2.1. Métodos que aplican calor.....	39
a) Destilación .....	40
b) Rectificación continua al vacío.....	40
c) Destilación al vacío empleando columna de conos rotarios.....	41
d) Evaporación en películas a vacío .....	41
5.1.2.2. Métodos de separación por membranas .....	42
a) Ósmosis inversa .....	42
b) Diálisis .....	43
6. Ultrasonido como método de desalcoholización de cerveza .....	43
6.1. Ultrasonido .....	44
6.2. Aplicaciones del ultrasonido .....	45
Capítulo II. Metodología de la Investigación Experimental .....	46
1. Objetivos .....	46
2. Descripción experimental .....	46
2.1. Actividades preliminares.....	48
2.1.1. Características de la materia prima .....	48
2.1.2. Control de la materia prima.....	48
2.2. Objetivo particular 1 .....	49
2.2.1. Desalcoholización de cerveza por destilación a vacío .....	49
2.2.2. Desalcoholización de cerveza por ultrasonido .....	50
2.3. Objetivo particular 2.....	51
2.3.1. Determinación de contenido alcohólico mediante espectroscopía infrarroja con transformada de Fourier (FTIR) .....	51
2.3.2. Determinación del rendimiento .....	52
Capítulo III. Resultados y Análisis .....	55
3.1. Cambios en el pH cerveza por efecto de la desalcoholización .....	55
3.2. Cambios en el color y la absorbancia en cerveza por efecto de la desalcoholización.....	57
3.3. Identificación de grupos funcionales mediante FTIR .....	64
3.4. Determinación de contenido alcohólico .....	66
3.5. Determinación del rendimiento.....	67
Conclusiones .....	72
Referencias Bibliográficas .....	74

## ÍNDICE DE TABLAS

---

Tabla 1. Unidades de medida del color en cerveza.....	32
Tabla 2. Especificaciones de la cerveza tipo Lager.....	48
Tabla 3. Resultados de la determinación de medidas de dispersión y tendencia central en la medición de pH.....	57
Tabla 4. Valores de L*, a* y b* obtenidos en la medición de color por espectrofotometría de reflectancia. ....	58
Tabla 5. Resultados de la determinación de medidas de dispersión y tendencia central en la medición de color.....	59
Tabla 6. Resultados de la determinación de medidas de dispersión y tendencia central en la medición de absorbancia. ....	63
Tabla 7. Porcentaje de alcohol final en las cervezas desalcoholizadas. ....	67
Tabla 8. Resultados obtenidos de los balances y rendimientos.....	69
Tabla 9. Comparación del etanol obtenido en los procesos de desalcoholización.....	70

## ÍNDICE DE FIGURAS

---

Figura 1. Línea del tiempo sobre la historia mundial de la cerveza .....	11
Figura 2. Línea del tiempo sobre la historia de la cerveza en México .....	15
Figura 3. Esquema de elaboración de la cerveza .....	16
Figura 4. Diagrama de proceso de cerveza tipo Lager Vienna.....	18
Figura 5. Esquema de la estructura de una espuma .....	34
Figura 6. Diagrama experimental .....	47
Figura 7. Cambios de pH en las muestras de cerveza .....	55
Figura 8. Comparación entre los resultados de $\Delta E^*$ .....	60
Figura 9. Espectro de absorbancia de las muestras de cerveza .....	61
Figura 10. Comparativa de los espectros infrarrojo de las muestras de cerveza ..	64
Figura 11. Comparativa de los espectros infrarrojo de las muestras de cerveza con respecto al alcohol y otros compuestos .....	65
Figura 12. Determinación del área bajo la curva en las muestras desalcoholizadas .....	66
Figura 13. Datos del balance de materia en el proceso de destilación a vacío .....	68
Figura 14. Datos del balance de materia en el proceso de ultrasonido .....	68

## RESUMEN

---

En el presente trabajo se realizó una comparación entre dos métodos de desalcoholización (destilación con vacío y ultrasonido), usados en una cerveza convencional tipo *Lager*, la técnica de ultrasonido no ha sido reportada como un proceso de desalcoholización, la comparación fue mediante la variación del tiempo de proceso con el objetivo de identificar la técnica que brinde las mejores características asociadas con la calidad final de la cerveza.

Las características de calidad determinadas en esta investigación fueron pH, color y grado alcohólico, en cuanto al pH, este no presentó una variación por los métodos usados, pero sí una variación en el proceso de desgasificación, el cual es previo a la desalcoholización, esto es debido a una fotooxidación por la luz ambiental; el color sí sufrió cambio por las técnicas usadas, consiguiendo un color más oscuro para las muestras destiladas a vacío y un color más claro en las muestras tratadas por ultrasonido, para confirmar este cambio de color se determinó el  $\Delta E^*$ . En cuanto al grado alcohólico se determinó que el método de ultrasonido logra retirar más alcohol en la cerveza, en comparación a la destilación a vacío, esto se observa al evaluar los perfiles espectrales de las muestras desalcoholizadas obtenidos mediante espectroscopía infrarroja con transformada de Fourier (FTIR).

Para comprobar una disminución de alcohol en la cerveza utilizando la técnica del ultrasonido se determinó el rendimiento, ya que da un panorama más amplio de la eficacia de este nuevo método usado, obtenido así como resultado que el ultrasonido es una buena alternativa a los métodos tradicionales de desalcoholización como lo es la destilación con vacío, ya que es una técnica que lograr evaporar más etanol de la cerveza, a la vez generando un menor daño a las características de calidad y también obteniendo un mejor rendimiento.

## INTRODUCCIÓN

---

La cerveza es una bebida fermentada a base de malta (cebada germinada), lúpulo, agua y levaduras, este tipo de bebida se toma para calmar la sed o por puro placer (Suárez, 2013).

El consumo de esta bebida ha formado parte de la historia de México desde los inicios de la época de la Nueva España, la mezcla de culturas que trajo consigo la colonización por parte de España en el territorio americano dio origen a la crónica de este licor, desde la inauguración de la primera cervecería por parte de españoles poseedores de permisos directos del rey hasta la potencia mundial en exportación que es hoy en día, en la actualidad esta bebida está muy arraigada dentro de las tradiciones mexicanas.

En la actualidad, México es uno de los principales países consumidores de cerveza alrededor del mundo, de acuerdo a una agencia de investigación de mercados internacional, el 69% de los hogares en nuestro país compran cerveza, de los cuales el 91% prefiere “clara”, y el otro 9% “oscura” (Cerveceros de México Cámara de la cerveza y malta, 2017).

A lo largo del desarrollo tecnológico del procesamiento industrial de cerveza se han logrado muchos estilos y variaciones dependientes de factores socioeconómicos, culturales, políticos, etc. Estas variaciones generan alteraciones en la formulación original como respuesta a necesidades específicas de los consumidores a la vez cambios en los procesos tecnológicos para lograr producir ese estilo en particular y así cubrir una demanda en el mercado. Un caso similar es la cerveza sin alcohol, la cual cuenta con un origen incierto y, no se conoce una fecha exacta de elaboración; algunos historiadores refieren que fue en el antiguo Egipto y otros durante la Ley Seca en Estados Unidos. Está elaborada con los mismos ingredientes naturales que la cerveza tradicional, pero durante el proceso de elaboración se extrae el alcohol (mediante operaciones unitarias extras como destilación o evaporación) o se realiza una fermentación controlada para limitar la producción. Los métodos de extracción

de alcohol son el producto de años de investigación y desarrollo tecnológico, aun así los procesos generan un daño en las propiedades sensoriales de la cerveza.

La existencia y demanda en el mercado de la cerveza sin alcohol dio como resultado estilos y variaciones que dependen de varios factores importantes como el proceso de elaboración, al existir varios métodos de desalcoholización, el alcohol retirado varía en cada técnica. Otro factor importante son las Normas Oficiales, ya que el porcentaje de alcohol presente en la cerveza varía de país en país, esto dio lugar a diferentes denominaciones tales como “libre de alcohol”, “sin alcohol” y “0% de alcohol”. Al ser un producto recientemente nuevo en el mercado, la información sobre ésta, es escasa y muchas veces repetitiva.

En este trabajo se estableció como objetivo un estudio comparativo entre la técnica de destilación a vacío y ultrasonido de alta potencia, con el fin de determinar la viabilidad de este último como una técnica de desalcoholización.

Resulta interesante así, el enfoque de estudio de este trabajo en una técnica que genere un daño menor en las propiedades de la cerveza, que a su vez sea más económica y sea amigable con el medio ambiente. El uso de ultrasonido de alta potencia en la desalcoholización, no ha sido estudiado ni reportado como una técnica alternativa a las clásicas. Por otro lado, la comparación del rendimiento en cuanto al alcohol obtenido como residuo del proceso con el principal método que es la destilación con vacío, brinda una perspectiva más tangible de la funcionalidad del ultrasonido como método de desalcoholización de cerveza.

## Capítulo I. Antecedentes

---

### 1. Cerveza

La cerveza es una bebida antigua con un característico sabor amargo. Existen diversos estilos para todos los gustos porque su variedad es inmensa y se consume prácticamente en todo el mundo. No solo hidrata y refresca, sino que tiene amplios beneficios; sin embargo, no hay que olvidar que es una bebida alcohólica y, por tanto, su consumo debe ser moderado (Penalva, 2017).

La fabricación de la cerveza es una sucesión de tres procesos bioquímicos: (1) la formación de enzimas en el grano de cereal germinante, (2) la degradación de almidón a azúcares más simples justamente por parte de esas enzimas antes formadas y, (3) la fermentación de los azúcares a alcohol, la cual genera a la vez la formación de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), por lo tanto se define como una bebida fermentada a base de malta (cebada germinada), lúpulo, agua y levadura.

La producción a gran escala se dio gracias al estudio e innovación de los tres procesos mencionados, logrando así que algunos países se consideren potencias en la elaboración y exportación. México se ha convertido en una potencia cervecera, al ser el primer exportador de cerveza en el mundo con el 21% de los envíos a nivel internacional, seguido por Holanda con un 14.4%, Bélgica, que alcanza el 11% y Alemania teniendo 9.9% y siendo el cuarto productor en el mundo. México exportó 33 millones de hectolitros en el 2017, mientras que en 2016 se vendieron 32 millones de hectolitros, lo que representó un crecimiento de 2.8%, con respecto al año al anterior año (Celis, 2018).

México a pesar de ser un país productor y exportador de gran escala a nivel mundial, no cuenta con una norma específica de cerveza, sino que se hace referencia en la NOM-199-SCFI-2017 de Bebidas alcohólicas, que clasifica a la cerveza dentro de las bebidas alcohólicas fermentadas y la define como:

“Bebida alcohólica fermentada elaborada con malta, lúpulo y agua potable, puede adicionarse con infusiones de cualquier semilla farinácea procedente de gramíneas o leguminosas, raíces o materia prima vegetal feculenta y/o carbohidratos de origen vegetal susceptibles de ser hidrolizados o, en su caso, azúcares que son adjuntos de la malta, con adición de lúpulos o sucedáneos de éstos. Su contenido alcohólico es de 2 a 20% Alc. Vol. La cerveza puede adicionarse de ingredientes y aditivos permitidos en el acuerdo correspondiente de Secretaría de Comercio y Fomento Industrial”.

### **1.1. Clases de cervezas**

Existen muchos tipos de cerveza alrededor del mundo, con características diferentes ya que al modificar un parámetro se consigue una amplia variedad de estilos. Pero todas se pueden clasificar en tres grandes familias:

- a) *Ale* de fermentación alta.
- b) *Lager* de fermentación baja.
- c) *Lambic* de fermentación espontánea.

A su vez dentro de cada familia se encuentran más grupos que pueden corresponder con estilos de localidades (belgas, británicas, alemanas, etc.), con una característica significativa como puede ser el color (pálido u oscuro), la intensidad del amargor o bien, a que contenga algún adjunto que no corresponde a la fórmula base (flores, frutas, entre otras).

Como se mencionó antes, las cervezas se clasifican en familias: *Ale*, *Lager* y *Lambic* esto es debido a que comparten ciertas características en común, dentro de estas familias existen muchos estilos diferentes con un nombre propio, pero a la vez siguen compartiendo características similares.

Con respecto, a lo anterior a continuación se presentan características específicas de cada familia:

## a) Fermentación alta

La cerveza que se produce con *Saccharomyces cerevisiae* se denomina “Ale” ya que produce un tipo de fermentación denominada ale o alta fermentación. Se caracteriza por ejercer su metabolismo a altas temperaturas (19 a 25°C) y por depositarse en la parte más superficial del fermentador (Galarza, 2018).

La fermentación alta es la forma original de fabricación de cerveza. La fermentación baja recién se menciona al final del siglo XV y adquiere mayor importancia en la mitad del siglo XIX. Pero aún hace cien años, el 75% de la producción se realizaba por fermentación alta.

Las cervezas de fermentación alta se desarrollaron especialmente en países como:

- Alemania, con cervezas de tipo *Weizenbier*, *Berliner WeiBe*, *Altbier* o *Kolsch*, pero también como cerveza malteada sin alcohol o doble caramelo, etc.
- Gran Bretaña, con cervezas de tipo *Ale*, *Porter* o *Stout*.
- Bélgica con cervezas de tipo *Lambic*, *Gueuze*, trapenses o tipo *Wit*.

### **Ale:**

- Este término es usado para varios tipos de cerveza, generalmente de origen inglesa y de color oscuro, aunque en los últimos años la elaboración de esta cerveza se lleva a cabo en diferentes países, donde se modifican algunos ingredientes para la fácil adaptación al paladar del consumidor.
- Lavadura utilizada: *Saccharomyces cerevisiae*.
- Son cervezas aromáticas como resultado de su fermentación rápida (25°C) y pueden consumirse a los pocos días de elaboración. (Penalva, 2017).
- Usualmente se utilizan adjuntos para la fabricación de cerveza tipo *Ale*, pero para algunas cervezas sólo se usa materia prima según la Ley de Pureza

Reinheitsgebot. El contenido alcohólico puede variar entre 3-10%; sobre esa base se las denomina “*light*”, “*heavy*”, “*export*” o “*strong*” (Wolfgang, 2006).

- Algunas de las cervezas más características de esta familia son:
  - *Stout*
  - *Pale ale*
  - *Mild ale*
  - *Abadía*
  - *Bitters*
  - *Cervezas de trigo*

## **b) Fermentación baja**

Este tipo de fermentación difiere de la cerveza de fermentación alta debido a importantes diferencias en la levadura, debido a que se producen con *Saccharomyces pastorianus* y se denomina “*Lager*” a la vez cuenta con una notable diferencia en los productos producidos por el metabolismo de ésta, los cuales otorgan un carácter muy propio.

El desarrollo de los tipos actuales de cerveza clara de fermentación baja ocurrió en el siglo XIX y estuvo ligado a una serie de desarrollos tecnológicos:

- Invención de la máquina frigorífica con la que, por ende, fue posible mantener temperaturas bajas durante la fermentación y el reposo de la cerveza, independientemente de las condiciones medioambientales.
- Desarrollo del soplado mecánico del vidrio mediante el cual fue posible producir económicamente botellas y vasos, que pasaron a ocupar el lugar de las jarras de arcilla que eran utilizadas cotidianamente; de esta manera se pudo examinar el contenido del vaso.

- Invención de la filtración de cerveza en 1878, por lo que fue posible filtrar la cerveza para que ésta fuera totalmente brillante, lo cual desde entonces pasó a ser un criterio esencial de calidad (Wolfgang, 2006).

### **Lager:**

- El tipo Lager se define por el tipo de levadura utilizada (*Saccharomyces pastorianus*) durante el proceso, es una fermentación de fondo, lo que significa que se establece en el fondo del fermentador.
- La levadura funciona mejor a temperaturas de fermentación baja en torno a las 12°C, a la fermentación le sigue un prolongado periodo de acondicionamiento, también a temperaturas bajas, conocido como “*lagering*”, este proceso es importante ya que ayuda a eliminar mucho de los sabores que aparecen durante la fermentación.
- El término deriva de la palabra alemana “*lagern*”, que significa almacenar. La *lager* es el estilo de cerveza más popular, se consume en grandes cantidades en todo el mundo (Hughes, 2019).
- Algunas de las cervezas más características de esta familia son:
  - *Bock*
  - *Lager pálida*
  - *Pilsner*
  - *Lager ámbar*
  - *Dunkel*

### **c) Fermentación espontánea**

Éste tipo de cervezas se elaboran únicamente en una zona concreta de Bélgica, en el valle de Zenne en Bruselas y son el resultado de una fermentación espontánea

que sucede en barricas de roble prolongándose durante tres meses, y con una maduración hasta de 3 años (Penalva, 2017).

### ***Lambic:***

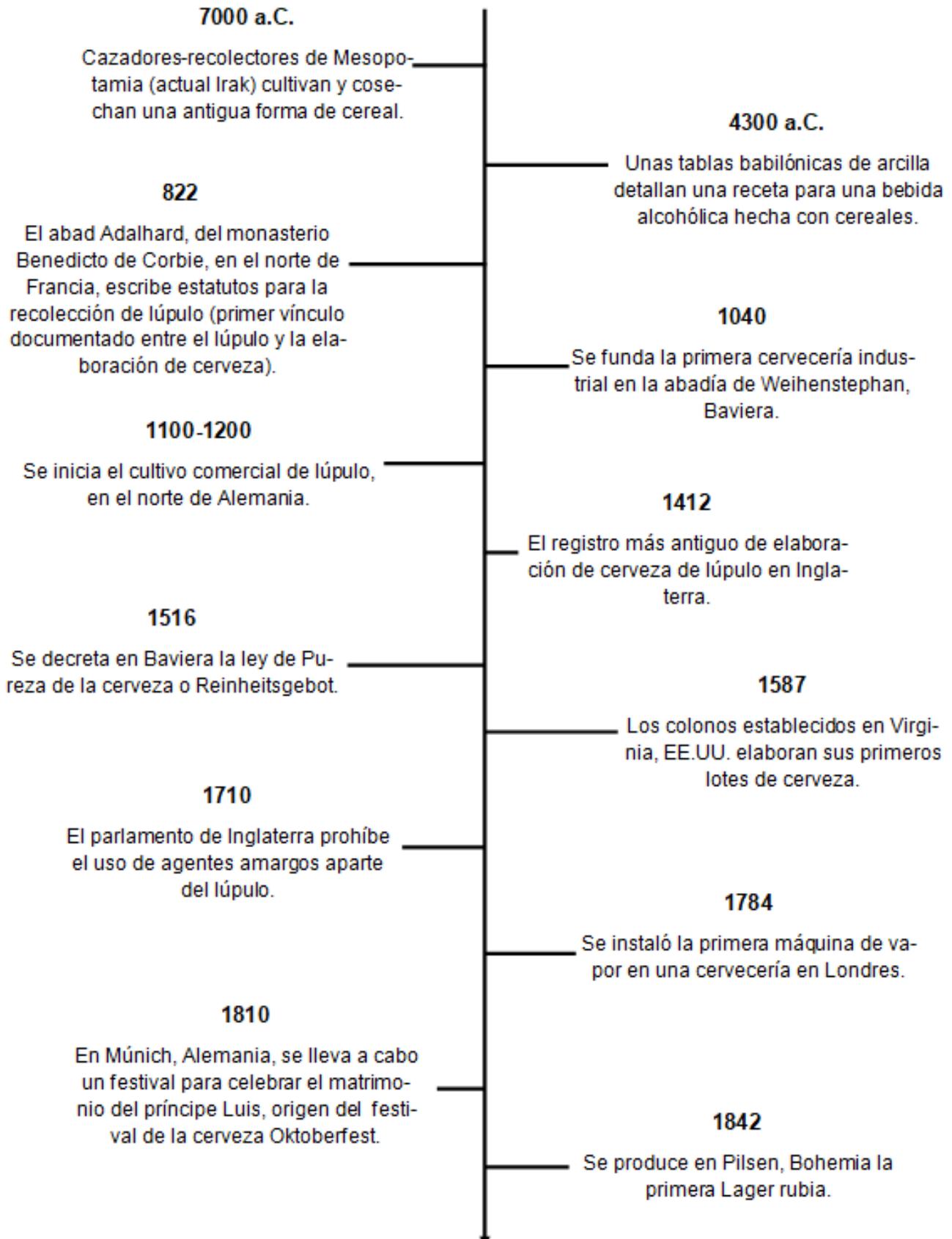
- Este método se denomina "fermentación espontánea" porque se realiza entre octubre y abril utilizando microorganismos presentes en el aire de la zona.
- Las *Lambic* tienen una parte de trigo y en ocasiones también incluyen frutas, especialmente cerezas y frambuesas su sabor ácido con toques agrios recuerda a la sidra (Penalva, 2017).
- Algunas de las cervezas más características de esta familia son:
  - *Gueuze*
  - *Kriek*

## **2. Historia mundial de la cerveza**

El consumo de alcohol en los humanos data desde sus orígenes por sus ancestros evolutivos, cuando los homínidos descendieron de los árboles y empezaron a consumir frutas del suelo fermentadas por levaduras; ésta teoría se denomina "simio borracho" dando una respuesta al gusto humano por el alcohol y la existencia de enzimas en el cuerpo humano capaces de realizar la degradación de etanol. La historia de la humanidad va unida a la de la cerveza, ya que todas las grandes civilizaciones la fabricaron a su estilo y posibilidades. La cerveza tiene una larga y fascinante historia que se remonta a unos cuantos milenios: desde la antigua Mesopotamia hasta la actual industria cervecera.

En la Figura 1 se muestra una línea del tiempo donde denotan algunos hechos de importancia en la trayectoria histórica de la cerveza e inventos que fueron de gran interés en el desarrollo tecnológico de esta bebida.

## Breve historia mundial de la cerveza



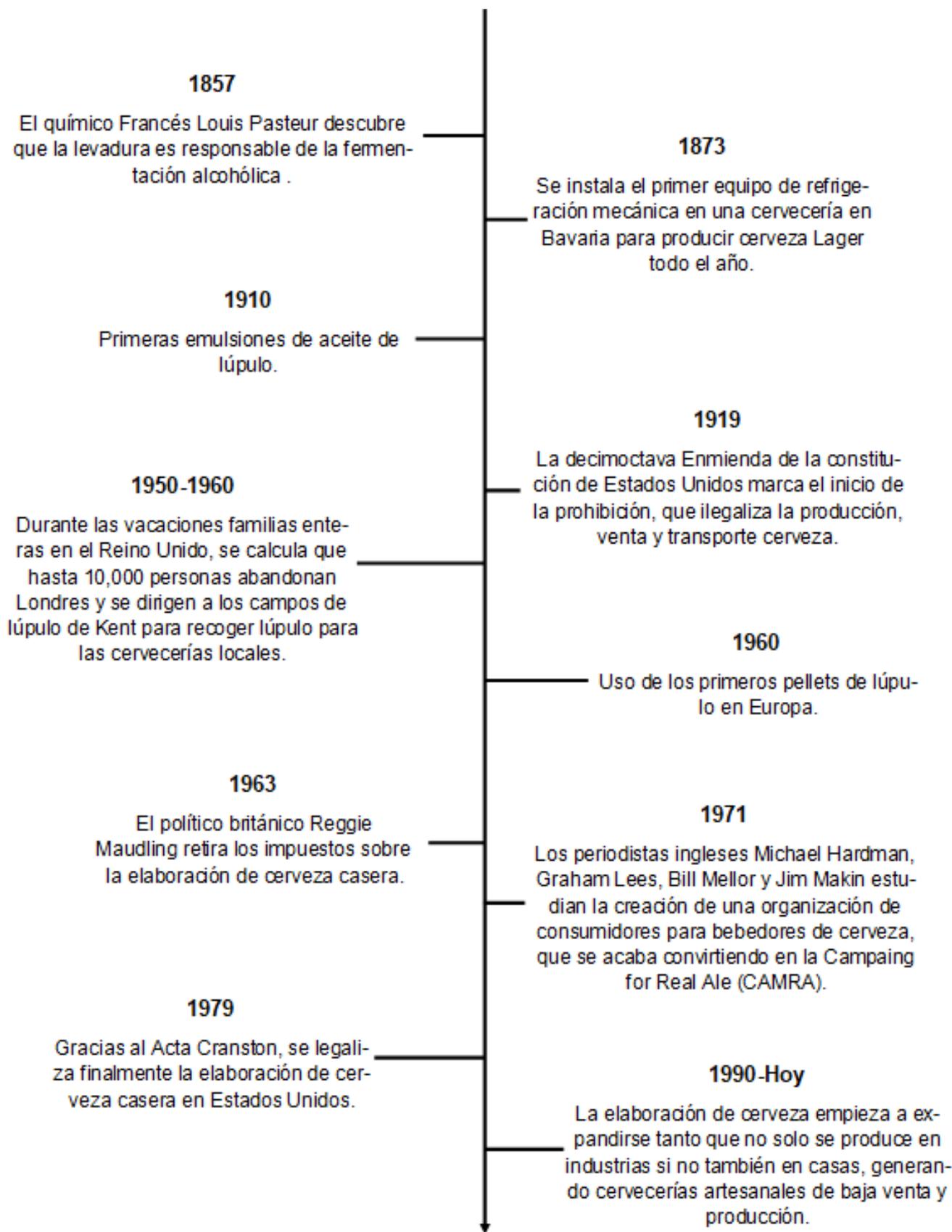


Figura 1. Línea del tiempo sobre la historia mundial de la cerveza (Hughes 2019).

Como se puede ver la cerveza ha estado presente desde el inicio de la humanidad, está estrechamente relacionada con los avances tecnológicos y movimientos sociales y políticos que generaron cambios en la producción, demanda y venta de esta bebida alcohólica.

## **2.1. Historia de la cerveza en México**

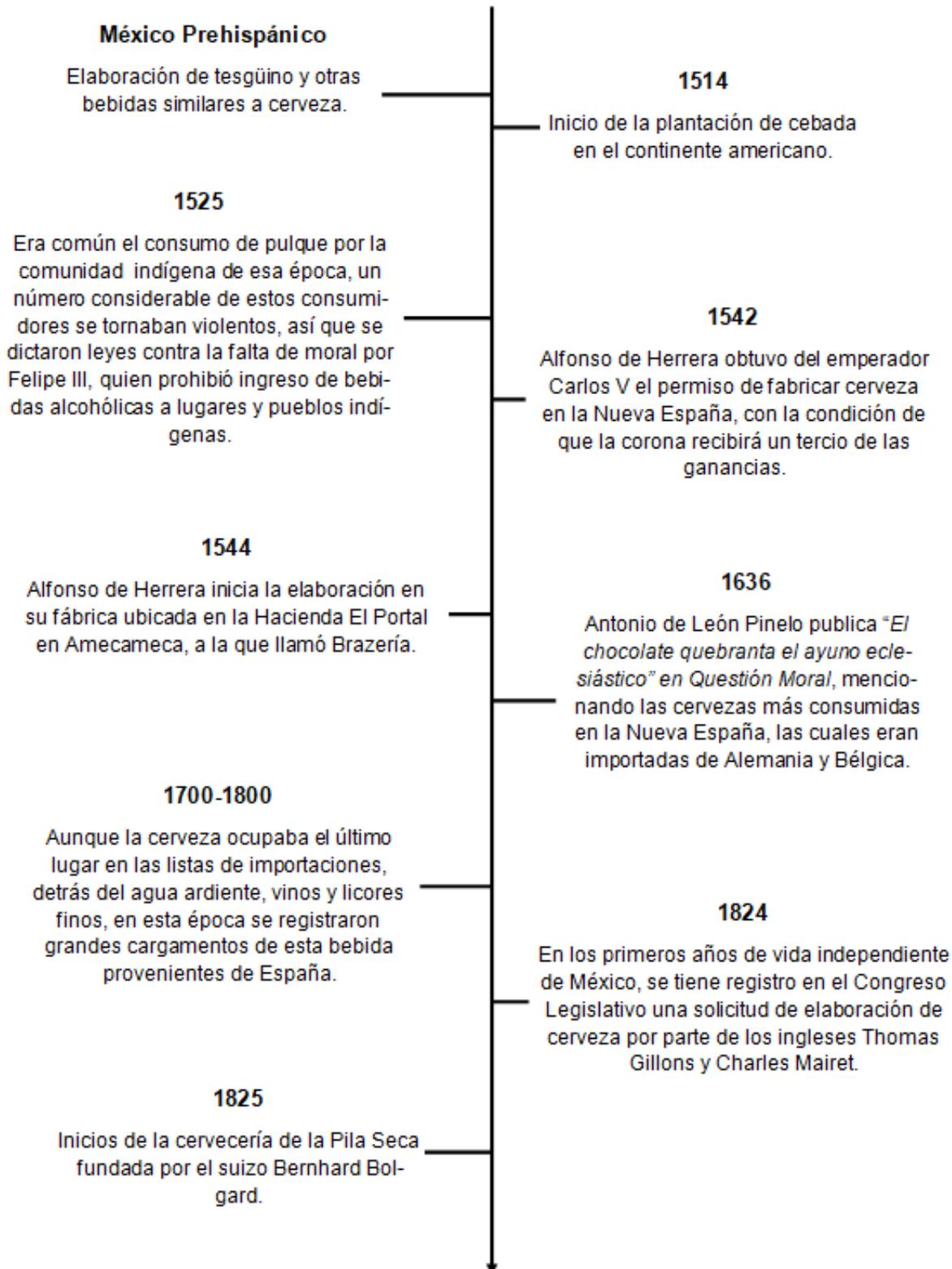
Reyna & Krammer (2012) señalan que dentro de la historia de México fue complicada la aceptación de la cerveza durante la época novohispana, gracias a la presencia de otras bebidas alcohólicas económicamente más accesibles, esto estuvo presente hasta su posterior consolidación durante el siglo XX, tanto en el gusto como en una floreciente industria mexicana.

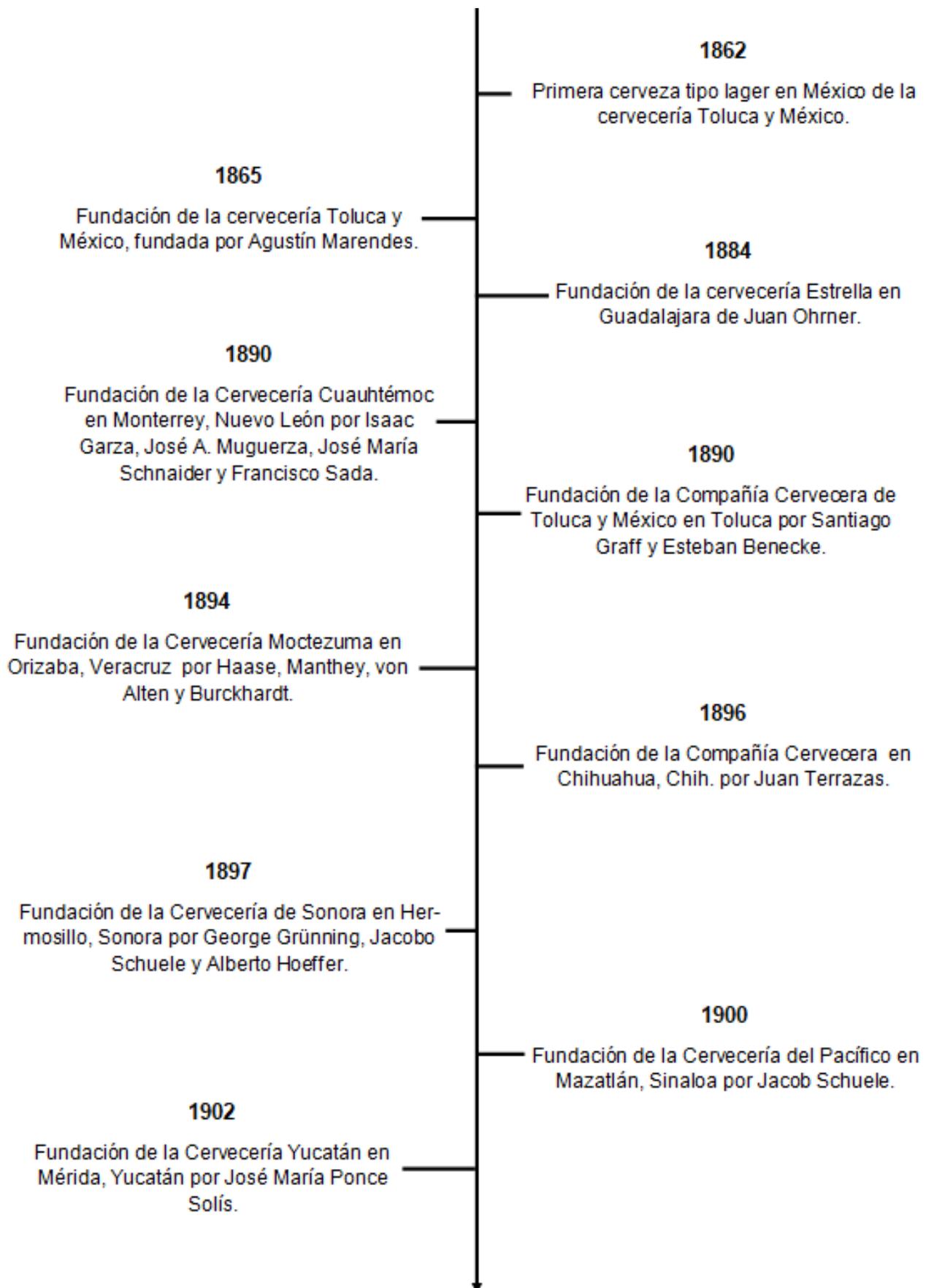
La falta de maestros cerveceros, máquinas adecuadas, materias primas, caminos que facilitaran un transporte rápido y seguro impidieron llegar a la población de manera más sencilla. Para la mayoría de la población esta bebida tenía un alto costo y, aunque el pulque tenía un sabor y olor desagradables, durante los trescientos años de dominación española continuó consumiéndose por ser barato y de fácil adquisición. Ésta es la razón por la cual el gusto por la cerveza no fructificó en estas tierras. Después de largas travesías y de meticulosos cuidados, las escasas remesas que llegaban se valoraban a precios exorbitantes y sólo llegaban a la mesa de aquellos que poseían un alto poder adquisitivo (Reyna & Krammer, 2012).

A lo largo de la historia muchas cervecerías fueron fundadas alcanzando gran éxito, otras más fracasaron y cerraron sus puertas, las más destacadas desde entonces son: Grupo Modelo, Cervecería Cuauhtémoc y Cervecería Moctezuma, estas dos últimas se unieron en 1985 para poder competir con Grupo Modelo que desde su fundación en 1925 adquirió muchas cervecerías como Cervecería Toluca y México y Cervecería Yucateca. Al día de hoy, Grupo Modelo pertenece al grupo InBev que es una empresa multinacional con sede en Lovaina, Bélgica, fabricante mundial de cerveza y Cervecería Cuauhtémoc Moctezuma pertenece a Heineken empresa cervecera neerlandesa.

En la Figura 2 se muestra una línea del tiempo donde se exponen los hechos más relevantes de esta historia.

## Breve historia de la cerveza en México





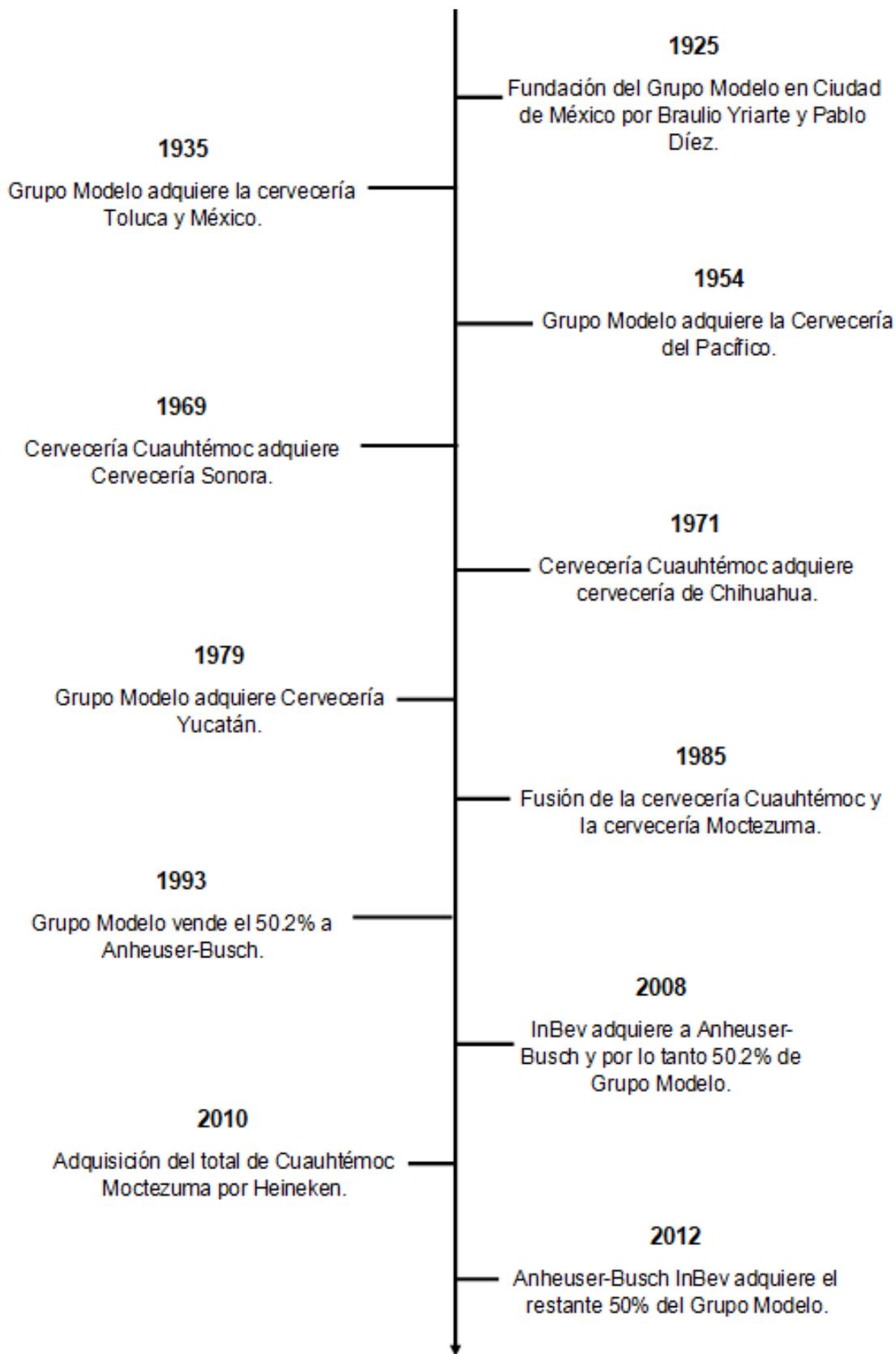


Figura 2. Línea del tiempo sobre la historia de la cerveza en México (Reyna & Krammer, 2012).

### 3. Proceso de elaboración

El proceso se basa en el uso de ingredientes fundamentales en la producción de cerveza y en algunos casos de adjuntos (ingredientes con un fin diferente a la fórmula original, como puede ser: el de reducción de costos, conseguir olores o sabores, etc.); el fin de usar estos insumos es la formación de alcohol etílico, para que esto suceda se debe llevar una sucesión de procesos bioquímicos que comienzan con la formación de enzimas en la cebada germinada, una cocción en la cual se llevará a cabo la degradación del almidón del grano en azúcares simples (por las enzimas antes formadas) seguido por una fermentación del azúcar, por parte de levaduras a alcohol y dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>).

El proceso cervecero contempla una serie de pasos, que en general no deben variar por lo tanto se ha logrado industrializar y automatizar en su totalidad, pero sus variaciones, en esencia aportarán los diferentes matices y estilos de cervezas. Las operaciones unitarias más importantes en este proceso se observan en la Figura 3.



Figura 3. Esquema de elaboración de la cerveza (Beneficios de la cerveza, 2017).

Es importante destacar que en la práctica, este esquema se puede dividir en dos procesos diferentes, el primero es la producción de maltas (remojo, germinación, secado y tostado), a esta secuencia de operaciones se le denomina malteado.

El malteado es un proceso el cual pocas cervecerías llevan a cabo, generalmente compran maltas a empresas especializadas en su producción. El propósito principal

es generar las enzimas amilolíticas para hidrolizar el almidón y los adjuntos, cualquier cereal puede ser tratado por este proceso aunque el nombre de “malta” se reserva generalmente para la cebada únicamente, si se quiere hablar de otro grado se usa el término malta y el grano de donde proviene.

El segundo proceso es el más importante debido a que, en esta etapa se prepara un medio de cultivo donde la levadura crecerá y desarrollará procesos bioquímicos propios, generando como residuo etanol y CO<sub>2</sub>.

### **3.1. Operaciones unitarias fundamentales para la elaboración de cerveza**

La producción de cerveza es muy similar a la producción de vino, la diferencia radica en el origen de los azúcares fermentables. En el vino, es el jugo azucarado de las frutas, mientras que en la cerveza solo es el almidón proveniente de la malta, al ser más complejo, en la fermentación se requieren operaciones unitarias extras.

Las etapas con más importancia son las siguientes:

- a) Remojo
- b) Germinación
- c) Secado
- d) Tostado
- e) Molienda
- f) Maceración o Sacarificación
- g) Filtrado
- h) Cocción
- i) Enfriamiento
- j) Fermentación
- k) Clarificación
- l) Carbonatación
- m) Maduración

n) Envasado o embotellado

La Figura 4 muestra un diagrama de proceso de cerveza tipo Lager Vienna donde se expresan las etapas más representativas de todo el proceso de elaboración de cerveza.

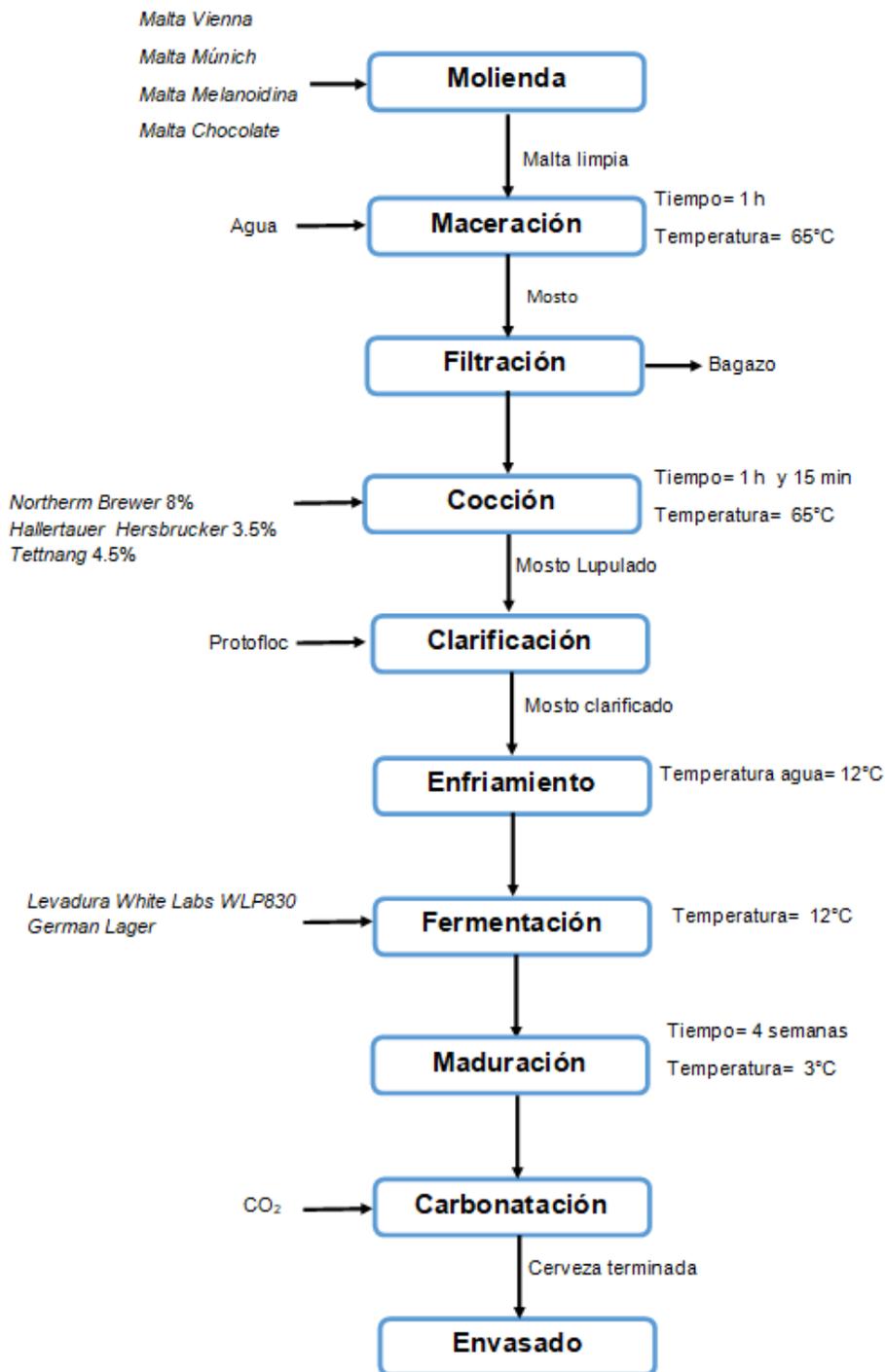


Figura 4. Diagrama de proceso de cerveza tipo Lager Vienna (Hughes 2019).

A continuación se explicaran con más detalle cada etapa presente en el proceso de elaboración

### **a) Remojo**

La cebada llega a las malteras, donde es necesario controlar su calidad, se realizan pruebas visuales, pruebas de viabilidad de germinación, humedad, contenido de nitrógeno, etc. Después pasa a la etapa de remojo en esta zona se le proporciona las condiciones de humedad, temperatura y oxigenación adecuadas con el propósito de iniciar la germinación.

La cebada se extiende en una capa lo más extensa posible para que la superficie tenga el máximo contacto con el aire y pueda captar suficiente cantidad de oxígeno, se agrega agua con una temperatura que varía de 8 a 10°C, después de unas horas el agua es retirada y es renovada constantemente durante 65-75 horas. Una ventaja de esta técnica es que las impurezas flotan a la superficie gracias al agua y son retiradas generando una malta más homogénea (Wolfgang, 2003).

### **b) Germinación**

Es la primera etapa en la elaboración de toda malta. En términos generales es la acción de proporcionar las condicione tanto de humedad como de temperatura a los granos de cebada con el fin de inducir la formación de enzimas amilolíticas.

Enzimas generadas en esta etapa:

- $\alpha$ -amilasa
- $\beta$ -amilasa
- Proteasas
- $\beta$ -glucanasas
- Pentosanasas

Para comenzar la germinación la cebada es limpiada y lavada, posteriormente ésta es colocada en agua siguiendo una proporción de 1 parte de granos por 3 partes de agua, permitiendo sobrepasarlos en unos 5 cm. Luego de 48 horas se escurre, se lava, se vuelve a escurrir y finalmente se mantiene tapada en lugar oscuro a temperatura ambiente por unos 6 días. Si es necesario, se puede rociar un poco de agua para mantener las semillas húmedas (González, 2017).

### **c) Secado**

Operación de secado con el objetivo de detener la germinación y provocar reacciones de obscurecimiento no enzimático (Maillard y caramelización) responsables del color y el sabor de la malta.

Cuando las temperaturas de secado son más altas, el tostado del grano determina la variedad de colores y sabores, estas son las llamadas maltas especiales. La variedad de maltas especiales es muy extensa pasando por distintos colores y sabores. Estas maltas aportan azúcares no fermentables que le dan más cuerpo a la cerveza (Sebess, 2017).

### **d) Tostado**

Es el procedimiento usado con la finalidad de obtener las denominadas maltas especiales. Consiste en hornear la malta verde a temperaturas ascendentes y progresivas para producir maltas con diferentes grados de caramelización.

Entre 60 y 80°C (este valor depende del grado de tostado que se quiere lograr) se obtiene una gama de maltas que va desde las muy activas (en términos enzimáticos) y pálidas, hasta las que carecen totalmente de actividad enzimática, pero aportan mucho color y sabor por estar a fondo caramelizadas. Por arriba de

los 80°C prácticamente no existe actividad enzimática y sólo se obtienen maltas útiles para dar ciertas características sensoriales a la cerveza (González, 2017).

### **e) Molienda**

Como describe McCabe *et al.* (2007), el objetivo de la molienda es producir pequeñas partículas a partir de otras más grandes. Las partículas más pequeñas son deseadas por su gran superficie o bien por su forma, tamaño y número.

En esta etapa se mezclan los diferentes tipos de maltas (tanto la malta base como las maltas especiales) con el fin obtener el porcentaje adecuado para cada estilo de cerveza a elaborarse.

La función de la molienda es exponer el endospermo del grano, sin generar mucha harina, conservando la cáscara de los granos de la malta lo más intacta posible. La cáscara servirá posteriormente como elemento filtrante (Sebess, 2017).

### **f) Maceración o Sacarificación**

Esta etapa del proceso de elaboración consiste en sumergir la malta en agua caliente durante un tiempo y temperatura establecidos (es decir, que el macerado se realiza un tiempo determinado a una temperatura dada por el estilo de cerveza a elaborar), con el fin de activar las enzimas generadas anteriormente, hidrolizando el almidón de los granos en azúcares simples.

En general, todas las enzimas tienen “temperaturas ideales de acción”, en las que desarrollan mejor su actividad; por otra parte, resultan gravemente dañadas por temperaturas elevadas. Estos márgenes térmicos pueden expresarse así (Wolfgang, 2003):

- $\alpha$ -amilasa: ideal, 40-60°C, perjudicial, a partir de 70°C.
- $\beta$ -amilasa: ideal, 62-65°C, perjudicial, a partir de 70°C.

- Proteasas: ideal, 72-75°C, perjudicial, a partir de 80°C.

En esta etapa en algunas formulaciones se agregan adjuntos sólidos a la mezcla malta-agua.

### **g) Filtrado**

El mosto se filtra para separarlo del bagazo (una masa sólida formada tras la maceración por la cascarilla y elementos indisolubles), que se destinarán generalmente para la alimentación animal. El bagazo se rocía con agua caliente a 75°C para terminar de extraer los azúcares liberados durante el macerado (Penalva, 2017).

### **h) Cocción**

Una vez filtrado el mosto, se añade lúpulo y esta mezcla es sometida a una cocción con el fin de (Hought, 1990):

- Detención de la actividad enzimática.
- Esterilización del mosto.
- Coagulación de proteínas.
- Precipitación más intensa del fosfato cálcico y, por consiguiente la disminución del pH.
- Evaporación de agua y compuestos volátiles y, por tanto, concentración del mosto.
- Producción de color por caramelización de azúcares, formación de melanioidina y oxidación de taninos.

La adición del lúpulo resulta de la mayor importancia para el buen éxito de la cocción del mosto y por ello para el resultado final. La dosis de lúpulo viene determinada por la clase de cerveza; las variedades de cerveza resultan influidas asimismo por la cantidad y tipo de lúpulo añadido. Sin embargo, resulta imposible determinar

exactamente la cantidad de lúpulo que debe agregarse para alcanzar un resultado concreto (Wolfgang, 2003).

### **i) Enfriamiento**

Al finalizar la cocción el mosto tiene una temperatura de 80-90°C. A partir de este momento, el mosto debe enfriarse con la mayor rapidez posible a la temperatura de fermentación, que en el método de fermentación baja es de 4-7°C y 15-20°C en el método de fermentación alta. Se necesita enfriar lo más rápidamente posible por varias razones: La cerveza contiene siempre componentes que más tarde pueden manifestarse produciendo turbidez. Un enfriamiento rápido precipita tales componentes, que después son eliminados definitivamente de la cerveza.

En la zona térmica de los 20-40°C proliferan con particular intensidad los microorganismos indeseables presentes en la cerveza, por lo que este intervalo debe atravesarse con rapidez (Wolfgang, 2003).

### **j) Fermentación**

En esta parte se agrega la levadura con el objetivo de iniciar la fermentación, el cual es el proceso por el cual el líquido dulce (mosto) y no alcohólico se transforma en cerveza. En esta etapa se pueden resaltar tres fases clave las cuales son:

- La primera fase de la fermentación se conoce como “lag” o “adaptativa”, momento en el que las células de levadura empiezan a multiplicarse. En este punto, el mosto se puede contaminar con facilidad, por lo tanto cuanto más corta sea la fase, mejor. Transcurrido este tiempo se forma una espuma llamada “krausen” de color crema en la superficie del mosto.
- En la segunda fase se denomina “fase primaria” o “atenuativa”, cuando la levadura fermenta azúcares del mosto y produce, entre otras cosas, alcohol

y dióxido de carbono. El *krausen* decrecerá y es normal observar partículas flotantes en el líquido.

- La última fase es nombrada “fase secundaria” o “de acondicionamiento”, es aquella donde la levadura elimina cualquier subproducto no deseado (sustancias químicas naturales como ésteres y diacetileno). Esto permite obtener una cerveza con sabor más limpio (Hughes, 2019).

### **k) Clarificación**

Comúnmente durante la maduración de la cerveza se produce una clarificación, mediante la cual las células de las levaduras y proteínas se precipitan en el fondo del contenedor, al finalizar la maduración, se realiza un proceso de filtrado para eliminar la turbiedad y conseguir una cerveza transparente (Penalva, 2017).

En algunos estilos de cerveza este método de clarificación no es suficiente por si solo para alcanzar la transparencia deseada, por lo tanto se opta por usar agentes clarificantes que inducen la aglutinación y floculación de las partículas suspendidas.

### **l) Carbonatación**

Las cervezas *Lagers* se sirven muy carbonatadas y con mucha espuma y, las cervezas *Ale* aunque su sabor es más plano, también requieren la cantidad correcta de CO<sub>2</sub> para producir un poco de espuma y un ligero hormigueo en la lengua. A este proceso de carbonatación se le conoce como cebado, la base de este es agregar azúcar antes del envasado o maduración y así alcanzar el nivel de carbonatación deseado (Hughes, 2019).

### **m) Maduración**

En esta etapa la cerveza se deja reposar en el tanque fermentador, ésta puede madurar de tres semanas hasta años, según el estilo, para obtener un grado alcohólico más alto se necesita más tiempo para su maduración.

Durante el tiempo que la cerveza está en el tanque de almacenaje la levadura restante sigue fermentando los restos de azúcares que contiene la cerveza, estos azúcares son aquellos más difíciles de fermentar y sólo atraen la atención de la levadura una vez que se han consumido los azúcares más sencillos de metabolizar. Debido a que la cerveza continúa fermentando, aunque muy lentamente, en el tanque de almacenaje, es común que se llame a esta etapa “segunda fermentación” (Sebess, 2017).

### **n) Envasado o embotellado**

Al finalizar el tiempo de maduración la cerveza está lista para ser envasada, existen varias técnicas de envasado, pero las más usadas son las que utilizan botellas de vidrio, barriles (madera o aluminio) y latas, cada una de estas técnicas tiene un fin y un mercado específico de consumidores. En algunos estilos de cervezas antes o después del envasado se realiza una pasteurización con el fin de alargar la vida útil de la bebida.

Hought (1990), expone este proceso con dos alternativas:

- La primera es donde la cerveza se puede pasteurizar en flujo continuo, utilizando un intercambiador de placas, elevando la temperatura a 75°C, la desventaja de este método es que no se puede asegurar que toda la cerveza alcance realmente la temperatura por el obstáculo que representa a la tendencia del CO<sub>2</sub> a insolubilizarse. Para evitar esto muchas instalaciones cuentan con dispositivos de recirculación.

- La segunda alternativa consiste en un tratamiento térmico una vez que la cerveza esté envasada, en este proceso las botellas o las latas van progresando por el interior del pasteurizador, en donde reciben una aspersion de agua a temperaturas progresivamente crecientes, hasta que el contenido alcance 60-85°C, para finalizar reciben otra aspersion de enfriamiento hasta temperatura ambiente.

### **3.2. Ingredientes usados en la elaboraci3n de cerveza**

Los siguientes ingredientes son la base de la elaboraci3n de la cerveza:

- a) Malta
- b) Lúpulo
- c) Levadura
- d) Agua
- e) Adjuntos

Estos insumos son de suma importancia en este proceso puesto que son los factores que determinan la calidad e inocuidad final de la cerveza. El uso y mezcla de los adjuntos con la fórmula original dio origen a todas las variaciones de cervezas que conocemos hoy en día.

A continuaci3n, se explican con más detalle cada ingrediente usado en el proceso de elaboraci3n

#### **a) Malta**

La cebada es el cereal más utilizado para producir malta para cerveza. Tiene un alto contenido en enzimas y por eso tiene el potencial para producir muchos azúcares fermentables. Hay tres variaciones: de dos carreras, de cuatro carreras y de seis carreras, en referencia al número de hileras de granos por espiga (Hughes, 2019).

La cebada de dos carreras es la variedad más utilizada y esto es debido a que contiene menos proteínas en comparación a las demás variaciones.

En la elaboración de cerveza se denomina “maltas base” a las maltas ligeramente tostadas, proporcionando la mayor parte de azúcares fermentables y suponen el mayor porcentaje de cereal en una formulación. Las “maltas especiales” son maltas más tostadas que las anteriores y utilizadas en pequeñas cantidades para añadir, sabor, color y aroma. A diferencia a las maltas base aportan pocos azúcares fermentables.

## **b) Lúpulo**

El lúpulo, en latín *Humulus lupulus* L., forma parte de la Familia de las Cannabáceas. Es una planta trepadora silvestre, que a través de un cuidadoso cultivo a lo largo de varios siglos ha desarrollado ciertas características que permiten insertar en la cerveza el aroma y amargor que la caracterizan (Quiroga, 2016).

La función del lúpulo en la cerveza es dar aroma y sabor amargo, en contraposición al dulce de los azúcares de los cereales, además los  $\alpha$ -ácidos que contiene, tienen un efecto antibacterial, además de que es un precursor de la actividad de la levadura (Gisbert, 2016).

Los lúpulos también contienen aceites esenciales que son responsables del aroma y sabor de la cerveza. Se han detectado 250 tipos de aceites esenciales diferentes. Los que se encuentran en mayor concentración son: mirceno, humuleno y cariofileno.

- El humuleno es responsable del aroma de lúpulo característico de la cerveza.
- El mirceno agrega aromas cítricos.
- El cariofileno contribuye a dar sabor especiado (Palomas, 2017).

### c) Levadura

La levadura es un hongo microscópico unicelular encargada de la fermentación alcohólica de los azúcares disponibles en el mosto, existen dos tipos de levaduras principalmente para la elaboración de cerveza:

- *Saccharomyces cerevisiae*, su uso por los humanos coincide prácticamente con el inicio de la civilización. Originalmente conocida como la levadura de pan, ha sido utilizada ampliamente para fermentar vino y cerveza desde tiempos de los sumerios. Este tipo de levadura tiene características que le permiten fermentar a mayores temperaturas, y de ahí se derivaron las cervezas tipo *Ale*. Por lo general, son cervezas más complejas en cuanto a sabor y aroma (Quiroga, 2018).
- *Saccharomyces pastorianus*, es una especie de levadura que se originó como un híbrido de la levadura *Saccharomyces cerevisiae* y de la *Saccharomyces eubayanus*. Este tipo de levadura fue descubierta en 1883 por Emil Christian Hansen en la cervecera danesa Carlsberg, es por ello que también se la conoce como *Saccharomyces carlsbergensis*. Los derechos de la nueva levadura descubierta no se reservaron y, por el contrario, el propietario de Carlsberg, permitió su uso público. Las cervezas tipo *lager* tienen las características de ser más refinadas y fáciles de tomar (Quiroga, 2018).

Las levaduras también producen diversos subproductos que afectan al sabor y el aroma de la cerveza terminada. Los productos más frecuentes son ésteres, aceites de fusel y diacetilo.

#### **d) Agua**

Los granos empleados en la elaboración de la cerveza apenas contienen agua, por lo que es necesario aportarla externamente, el agua es el ingrediente principal en la cerveza y que supone entre un 90 y 96% del volumen de esta bebida.

Wolfgang (2003), explica que la calidad del agua está dada por la dureza de ésta, se produce “agua dura” cuando el agua de la lluvia, originalmente “agua blanda”, se carga de sales, principalmente de calcio y magnesio al contactar con la tierra del suelo. Si estos metales forman sales con ácido carbónico (carbonatos), se origina la dureza carbonatada y al unir estos metales con otros ácidos (ácido sulfúrico, ácido clorhídrico) causa dureza no carbonatada.

Estas interacciones del agua con las sales de un lugar en específico, dieron como resultado que por muchos años algunos estilos de cervezas solo eran posibles de elaborar en regiones muy específicas de algún país, un ejemplo de esto, son cervezas alemanas como *Pilsen* o *Viena*, gracias al avance de la tecnología y el estudio a profundidad del efecto de la calidad del agua en la elaboración, estos estilos se pueden recrear en cualquier parte del mundo.

#### **e) Adjuntos**

Se denomina adjuntos a cualquier ingrediente utilizado en la elaboración de cerveza que no sea agua, levadura, lúpulo o malta, cada adjunto tiene un fin específico para ser agregado a la formulación, por ejemplo, dar color, aroma, o dar sabores muy específicos en ciertos estilos de cerveza. Algunos ejemplos de los adjuntos más utilizados y sus funciones son:

- Miel: Incrementa el contenido alcohólico, agente bactericida.
- Maíz en copos: Contribuye a la producción de cervezas más pálidas con sabor a maíz.

- Piel de naranja: Añade toques de sabor a naranja.
- Chile: Utilizado en cervecerías mexicanas para dar un retrogusto seco y una ligera quemazón.
- Canela en rama: La canela otorga un aroma y sabor fuerte, comúnmente usada en cervezas oscuras.
- Arándanos: Aportación de color y sabor.
- Cereza: Ayuda a equilibrar el alcohol y amargor.
- Té: Da sabor y aroma (depende del tipo de té usado) (Hughes, 2019).

#### **4. Calidad de la cerveza**

La calidad de la cerveza depende de varios factores que tienen relación con las materias primas utilizadas, con el proceso de elaboración y almacenaje (Monroy, 2019).

Es por eso que se trabaja con tres aspectos críticos de calidad:

- Físicas y químicas
- Microbiológica
- Sensorial

La cerveza terminada debe tener parámetros de calidad, los más importantes son: contenido de alcohol, color, densidad, pH, grados Brix (°Bx) y turbidez, estos parámetros deben cumplir con ciertos valores establecidos por la normatividad de cada país para así poder ser considerada apta para consumo humano.

La cerveza es una mezcla compleja de más de 800 componentes en su mayoría agua y por lo tanto las propiedades sensoriales son fundamentales en su consumo (Palomas, 2017).

Las características físicas y químicas de la cerveza son de importancia debido a que son los términos que se usan para definir los requerimientos de calidad e higiene de los cuerpos regulatorios de cada país (Rodríguez, 2003).

A continuación, se explican algunos parámetros usados comúnmente para describir la calidad de una cerveza.

### **a) Color**

Uno de los pasos más importantes para producir la cerveza es el calentamiento del mosto junto con el lúpulo. Es en este momento cuando se produce la reacción de Maillard y las reacciones asociadas, que son las que van a dar lugar al color de la cerveza.

El pardeamiento que se produce comúnmente en los alimentos por calentamiento o almacenamiento es debido a una reacción química entre azúcares reductores, principalmente D-glucosa, y un aminoácido libre o un aminoácido que forma parte de una cadena proteica. Esta reacción es conocida como reacción de Maillard (Fennema, 2000).

Las melanioidinas coloreadas, son producto de todas las reacciones que se llevan a cabo durante la cocción del mosto son las responsables de las diferentes tonalidades de amarillo o marrón que observamos en los diferentes tipos de cerveza (Morales, 2018).

El color en la cerveza además de ser un método para determinar la calidad del producto, se usa como un estándar de clasificación y así tener un modelo de referencia común alrededor del mundo, en la Tabla 1 se explican brevemente las tres unidades utilizadas para medir el color de la cerveza.

Tabla 1. Unidades de medida del color en cerveza.

<b>Unidad</b>	<b>Descripción</b>
<b>EBC</b>	Es el sistema creado por la European Brewers Convention. En un principio empleaba la comparación visual pero posteriormente asumió la tecnología del espectrofotómetro que utilizaba la SRM. Numéricamente una unidad EBC equivale a aproximadamente 2 unidades SRM.
<b>Lovibond</b>	Este sistema fue creado por el inglés J.W. Lovibond a finales del siglo IX. Se basaba en la comparación del color de la cerveza con una cuadrícula de diferentes tonalidades graduadas de 0 a 20. Éstas reciben el nombre de grados Lovibond, abreviado °L. Por ser un método puramente cualitativo y del todo subjetivo, en la actualidad ha caído en desuso y solo es empleado para expresar el color de la malta.
<b>SRM</b>	En 1950 la Sociedad Americana de Químicos Cerveceros o ASBC (del inglés <i>American Society of Brewing Chemists</i> ) crea la escala SRM, acrónimo de <i>Standard Reference Method</i> . Es un método técnicamente más sofisticado que el Lovibond ya que el color es medido directamente por un análisis fisicoquímico denominado espectrofotómetro. Este sistema, al no depender de la percepción que el operario pueda tener del color, ofrece una total objetividad y una alta precisión.

González (2017)

## b) pH

El pH es un factor de gran importancia para las reacciones bioquímicas que se desarrollan durante la elaboración de la cerveza, en todos los pasos de la fabricación hay disminución del pH y los amortiguadores minerales del agua contrarrestan en parte este cambio.

La influencia del contenido mineral del agua sobre el pH es de importancia durante la fabricación ya que algunos de estos ejercen una influencia estabilizadora, un ejemplo son los iones de calcio sobre las amilasas. Los iones de calcio reaccionan con los fosfatos orgánicos e inorgánicos de la malta precipitando fosfatos de calcio, el resultado es la acidificación del mosto si el calcio está en forma de sulfato (Rodríguez, 2003).

El pH es un factor determinante para una buena fermentación debido a la acción de las levaduras sobre el mosto, éste tiende a modificar el pH de la cerveza final, principalmente es debido a que existe una transformación de aminoácidos a ácidos (láctico y pirúvico). Sin embargo, el pH necesario para la acción de la levadura se encuentra en el intervalo de 4.4 a 5.0 siendo el más favorable 4.5 para su crecimiento y acción (Monroy, 2019).

La NOM-199-SCFI-2017 de Bebidas alcohólicas estipula que el pH final de una cerveza debe encontrarse entre el intervalo de 2.5 a 5.0.

### **c) Espuma**

Son dispersiones coloidales de un gas o mezcla de gases suspendidos en una fase dispersante formada por un líquido viscoso o un semisólido como se muestra en la Figura 5, el líquido rodea a las burbujas de aire y las separa una de otra. En la mayoría de las espumas alimenticias el gas es aire (Badui, 2006).

La formación de espuma es uno de los factores más importantes en la evaluación de la calidad de una cerveza y brinda al consumidor la primera impresión de la misma, se forma por gases que se encuentran finamente repartidos en el líquido y materias sólidas, principalmente el CO<sub>2</sub> (Rodríguez, 2003).

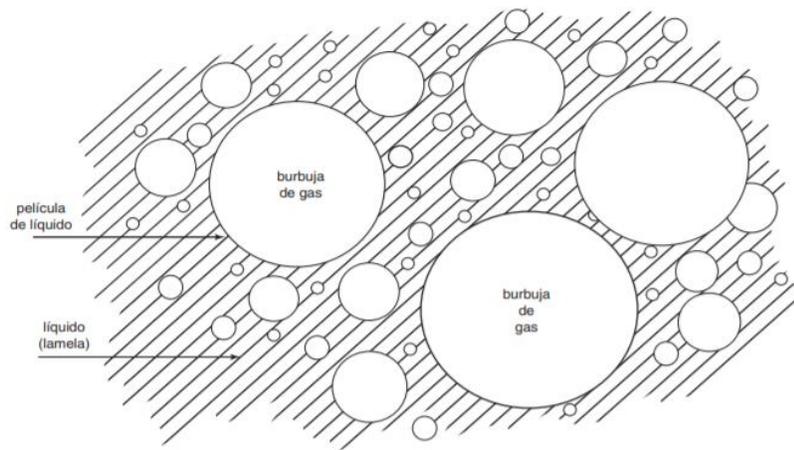


Figura 5. Esquema de la estructura de una espuma (Badui, 2006).

Los elementos de la formación de ésta son las proteínas de alto peso molecular derivadas de la malta y las iso-humulonas provenientes del lúpulo. Las maltas demasiado tostadas o con poco porcentaje en la mezcla de maltas usadas en una formulación tienden a producir poca espuma, por lo que cuanto menor sea la relación de malta y lúpulo, más pobre será la espuma (Ferreira, 2014).

#### **d) Turbidez**

La estabilidad de la cerveza se define como unidades de tiempo transcurridas hasta alcanzar un determinado nivel de turbidez. La pérdida de brillo, el descenso de la transparencia, el grado de enturbiamiento, incluso la floculación, precipitación y sedimentación, son las manifestaciones visuales de la falta de estabilidad o inestabilidad de la cerveza. Así, la turbidez u opacidad de la cerveza se puede deber a las siguientes causas: biológica, coloidal y una química, ésta última debido a diversos agentes como el oxalato de calcio (Rodríguez, 2003).

#### **e) Grado alcohólico**

El alcohol se forma durante la etapa de fermentación del mosto en un proceso anaeróbico. Los principales productos de la fermentación son etanol y CO<sub>2</sub> aunque

también se forman numerosos subproductos, debido al proceso biológico de las levaduras usadas, que contribuyen de forma importante en el aroma de la cerveza.

El porcentaje de azúcares fermentables en el mosto total determina el límite de atenuación (grado alcohólico), que establece el alcohol que contendrá la cerveza al final. Y en el mosto, el 60% de las sustancias son fermentables (maltosa, maltotriosa, sacarosa, glucosa y fructosa) que serán utilizadas por la levadura para producir el alcohol (Rodríguez, 2003).

## **5. Cerveza sin alcohol**

En los últimos años, debido al interés de los consumidores por una buena alimentación y a la creación de leyes que restringen el consumo de alcohol, se ha visto la necesidad de producir cervezas libres de alcohol que permitan a los consumidores seguir disfrutando de esta bebida (Brányik *et al.*, 2012).

Existen varias razones para retirar parcial o completamente el alcohol de una cerveza, entre ellas se puede mencionar: la tendencia de los consumidores, cada vez mayor, de mantener un estilo de vida saludable, un mayor disfrute sin el temor de sufrir consecuencias adversas, razones de tipo religioso que restringen el consumo de bebidas alcohólicas, etc. (Mascarell, 2017).

La legislación de cada país establece unos límites que definen los tipos de cerveza en función de su concentración de alcohol. En España se pueden encontrar los siguientes tipos (Muñoz, 2017):

- Cerveza: es la que contiene normalmente entre un 4-5% de alcohol, aunque existen algunas con un porcentaje mucho mayor.
- Cerveza baja en alcohol: reciben este nombre las que poseen entre un 1-3% de alcohol en su composición.
- Cerveza sin alcohol: es aquella que presenta una graduación de alcohol inferior al 1%, y es en este grupo donde se encuentra la cerveza 0.0%. Se le

puede denotar con este nombre porque la cantidad de alcohol que posee es mínima en comparación con la cerveza tradicional.

En el Reino Unido la legislación estipula que la cerveza puede etiquetarse como:

- *No-alcohol* o *alcohol-free* (sin alcohol) cuando su contenido no excede el 0.05% por volumen.
- *Dealcoholised* (desalcoholizada) hasta el 0.5% por volumen.
- *Low-alcohol* (baja en alcohol) hasta el 1.2% por volumen.

En los Estados Unidos las bebidas que contienen menos del 0.5% de alcohol por volumen se consideran sin alcohol, regularmente debido a su bajo contenido alcohólico la cerveza sin alcohol suele ser permitida su venta a menores de edad (Mascarell, 2017).

En México no existe algún apartado legal que permita determinar los tipos de cerveza sin alcohol aun así, empresas como Modelo y Cuauhtémoc Moctezuma han producido y comercializado cervezas sin alcohol.

### **5.1. Procesos de desalcoholización de cerveza**

La producción de cerveza sin alcohol en el mundo ha sido motivada por diversas razones a través del siglo pasado, durante las guerras mundiales la escasez de recursos hacía que la cerveza producida tuviera bajo contenido alcohólico. Además, entre los años 1919 y 1933 la prohibición para producir, vender y consumir alcohol en los Estados Unidos fue la que impulsó la producción de cerveza libre de alcohol. Sin embargo, el verdadero crecimiento de este mercado se ha dado en los últimos años debido a la creación de leyes que restringen el consumo de alcohol y al deseo de los consumidores por llevar estilos de vida más saludables (Herrera & Jaramillo, 2015).

Las técnicas para eliminar el alcohol de la cerveza son varias y se suelen clasificar en dos grupos:

1. Adaptación del proceso de elaboración de la cerveza para tratar de limitar la cantidad de alcohol que se obtiene durante la fermentación.
2. Tratamientos físicos para separar el etanol una vez que la cerveza ha sido elaborada. Estos últimos eliminan una mayor cantidad de alcohol, pero es necesario el uso de maquinaria especializada lo cual aumenta el costo del proceso (Lurueña, 2012).

A continuación, se explican con más profundidad cada técnica:

#### **5.1.1. Adaptación del proceso de elaboración**

Este proceso de eliminación de alcohol se basa en actuar sobre el malteo y/o fermentación se contemplan en esta categoría los métodos:

##### **a) Mosto de baja densidad**

La forma más sencilla de obtener cerveza sin alcohol es comenzar con un mosto de baja densidad, que normalmente se consigue diluyendo agua al mosto original y llevar a cabo una fermentación controlada. Sin embargo, este procedimiento presenta un problema y es que además de tener poco alcohol también presenta poco sabor (Muñoz, 2017).

##### **b) Mosto de alta densidad**

Para solventar el problema de sabor de la técnica anterior, existe la alternativa de emplear un mosto de alta densidad, obteniéndose así, tras la fermentación una

cerveza con una alta concentración de compuestos volátiles que aportan sabor y aromas. Pero el porcentaje de alcohol se ve muy poco afectado con respecto al de la cerveza común, por lo que hay que llevar a cabo una dilución del producto obtenido para reducir dicho porcentaje, la restricción que presenta esta técnica es que no se puede obtener cerveza por debajo de un 2% de alcohol (Muñoz, 2017).

### **c) Malteado a elevada temperatura**

La función de este método es desactivar una de las enzimas que participan en la hidrólisis del almidón, concretamente la  $\beta$ -amilasa, que es inactiva a una temperatura igual o superior a 80°C. Debido a esta desactivación se van a obtener una menor cantidad de azúcares fermentables (glucosa, maltosa y dextrinas), por tanto, la levadura va a tener una menor actividad y la cantidad de etanol obtenida también va a ser menor. A pesar de ello, este procedimiento sigue presentando problemas y es que se obtiene un alto contenido en dextrinas las cuales son producidas por la enzima  $\alpha$ -amilasa, que es la que actúa con mayor importancia en este proceso. Esto da lugar a que su sabor sea diferente al de la cerveza normal. (Lurueña, 2012).

### **d) Control del proceso de fermentación**

Si se varían algunos aspectos relacionados con la fermentación se pueden conseguir cervezas con bajo contenido alcohólico, algunos métodos son:

- Al utilizar ciertas especies de levadura, como *Saccharomyces ludwigii*, que fermenta solamente un 15% de los azúcares fermentables, dando como resultado una menor cantidad de etanol (Mascarell, 2017).
- Llevando a cabo un proceso de fermentación controlada, aplicando bajas temperaturas sobre el tanque donde se realiza la fermentación, así

deteniéndola abruptamente, a la vez es necesario retirar las levaduras presentes en el mosto.

El problema con estos métodos radica en que el sabor no se modifica suficientemente para llegar a ser el sabor de la cerveza y se produce una mezcla mosto/cerveza de sabor dulce/acartonado, por lo tanto, no es una manera viable de realizar una cerveza sin alcohol (Wolfgang, 2006).

### **5.1.2. Tratamientos físicos**

Los tratamientos físicos presentan una serie de ventajas frente a los métodos de adaptación del proceso de elaboración, entre las que destacan la posibilidad de obtener cerveza con una concentración de alcohol mucho menor (en la mayoría de los casos), no obstante, requieren el uso de maquinaria especializada, lo que supone costos mucho más elevados que en el caso de los métodos del primer grupo (Mascarell, 2017).

Estos métodos se pueden clasificar en dos tipos:

#### **5.1.2.1. Métodos que aplican calor**

Este tipo de separación se apoya de los diferentes puntos de ebullición que presentan el agua y el alcohol etílico contenidos en la cerveza, existen varios métodos los cuales se clasifican en:

- a) Destilación.
- b) Rectificación continua al vacío.
- c) Destilación al vacío empleando una columna de conos rotatorios.
- d) Evaporación en película a vacío.

### **a) Destilación**

Este proceso consiste en calentar la cerveza con alcohol para que se evapore la máxima cantidad de etanol posible cuando éste alcance su temperatura de ebullición, este vapor se enfría en un condensador para obtener alcohol puro y seguidamente se extrae en forma líquida. Por otra parte, el concentrado de la mezcla inicial que queda en el proceso una vez retirado el alcohol se diluye con agua antes de que dicha mezcla alcance una temperatura de 100°C, temperatura a la cual el agua también empieza a evaporarse (Muñoz, 2017).

Sin embargo, la cerveza que se obtiene de esta forma no tiene un sabor muy agradable, ya que la elevada temperatura provoca la aparición de un sabor "a quemado" y la pérdida de otros compuestos volátiles que aportan sabor y aroma, por lo que en la actualidad su uso es poco frecuente (Mascarell, 2017).

### **b) Rectificación continua al vacío**

Es una técnica novedosa para llevar a cabo la desalcoholización de la cerveza. En este método se han aplicado los avances tecnológicos conseguidos en el ámbito del proceso de destilación.

La capacidad de producción de estos sistemas generalmente está en el rango de 4 a 200 hl de cerveza sin alcohol por hora. Este arreglo de proceso consta de los principales pasos de la siguiente manera (Brányik *et al.*, 2012):

- Precalentamiento de la cerveza filtrada en un intercambiador de calor de placas.
- Desgasificación de la cerveza (pérdida de vitalidad) y simultáneamente la liberación de compuesto volátiles en un desgasificador.
- Desalcoholización en una columna de vacío (generalmente una columna rectificadora de lecho empacado).

- Recuperación de los componentes del aroma provenientes del CO<sub>2</sub> por aspersión con cerveza desalcoholizada o agua directamente en el producto desalcoholizado.

### **c) Destilación al vacío empleando columna de conos rotarios**

Este es uno de los procesos más eficaces de los que se conocen para eliminar el alcohol de las bebidas, pero también se requiere un equipo muy específico. Fue el primer proceso implantado a escala industrial proporcionando una cerveza sin alcohol con un sabor muy parecido al de la cerveza alcohólica.

Este procedimiento de desalcoholización se basa en una evaporación en condiciones de vacío de los componentes más volátiles (compuestos aromáticos, alcohol), que son recuperados por condensación. Al trabajar en vacío, la temperatura en el interior de la columna es baja, permitiendo un proceso menos agresivo. La muestra es introducida por la parte superior de la columna, y por gravedad recorre en sentido descendente el interior de la columna, pasando por un sistema de conos rotatorios y estacionarios que se alternan, lo que permite crear una serie de películas muy finas y muy turbulentas (Mazarrasa, 2015).

### **d) Evaporación en películas a vacío**

Al igual que los procedimientos anteriores este proceso consiste en someter a la mezcla a temperatura para que se evapore el alcohol, en este caso también se aplica vacío en el equipo para que la temperatura de ebullición disminuya y el tiempo de residencia del líquido en la zona de calentamiento sea menor; además, al igual que ocurría en los procesos anteriores, en este proceso los componentes del aroma y del sabor de la cerveza son arrastrados antes que el etanol. En este caso dichos compuestos son recuperados aplicando una destilación fraccionada para volverlos a incorporar al producto final. Existen muchos tipos de evaporadores, pero el más

empleado en el proceso de desalcoholización consta de un cilindro que cuenta con una serie de tubos de gran longitud y reducido diámetro, es por aquí por donde se introduce el producto a tratar, el cual se encuentra almacenado en un tanque a presión (Muñoz, 2017).

#### **5.1.2.2. Métodos de separación por membranas**

Estos métodos se basan en la utilización de membranas semipermeables, que actúan como filtros muy específicos: dejan pasar el agua, mientras que retienen los sólidos suspendidos y otras sustancias. En estos casos no es necesario aplicar altas temperaturas, por lo que la cerveza no sufre alteraciones debido este factor. La desventaja es que no es económicamente rentable utilizar estos métodos para obtener cervezas con una concentración de alcohol inferior al 0.5% (normalmente se utiliza para obtener cervezas con una concentración del 2%) (Lurueña, 2012).

Se pueden emplear dos métodos para llevar a cabo este sistema, los cuáles son:

##### **a) Ósmosis inversa**

Este método consiste en aplicar altas presiones para hacer pasar la cerveza a través de una membrana semipermeable. El agua y los compuestos de bajo peso molecular, como el etanol, son capaces de atravesar la membrana, mientras que el resto de los compuestos son retenidos (es necesario diluir la cerveza inicial con agua para compensar la pérdida que tiene lugar durante el proceso). Eso significa que la pérdida de aromas se limita a compuestos de bajo peso molecular (Mascarell, 2017).

La ventaja que posee esta técnica es que se separa de forma natural la cerveza del alcohol conservándose así todas sus propiedades naturales. De esta forma, el sabor

será ligeramente diferente al producto inicial porque la pérdida de aromas sólo está relacionada con compuestos de bajo peso molecular.

## **b) Diálisis**

La diálisis se basa en un principio similar al de la ósmosis inversa, sólo que en lugar de utilizar altas presiones para hacer pasar los compuestos a través de la membrana, se emplea el gradiente de concentración, por lo que se trata de una técnica, en principio, más sencilla y económica (Mascarell, 2017).

La membrana semipermeable actúa como un tamiz molecular permeable únicamente a ciertas moléculas, dependiendo del tamaño de poro y las propiedades superficiales de la membrana. Cuando la desalcoholización por diálisis se realiza en agua, todos los ingredientes de la cerveza tienden a moverse desde el área de alta concentración (cerveza) al área de baja concentración (agua) así logrando la disminución de alcohol (Brányik *et al.*, 2012).

Como se revisó en este apartado existen varios métodos para logra extraer el alcohol de una cerveza, cada uno con sus ventajas y desventajas, como pueden ser el costo de la operación o las propiedades sensoriales de la cerveza al terminar el proceso de desalcoholización, esto ha sido posible gracias a los avances tecnológicos a lo largo de la historia y de la gran popularidad que se ha generado alrededor de las cervezas sin alcohol, en este trabajo se plantea el uso de ultrasonido como alternativa innovadora a estos métodos tradicionales.

## **6. Ultrasonido como método de desalcoholización de cerveza**

El ultrasonido es una técnica novedosa usada en la industria alimentaria, ya que representa ventaja sobre los procesos tradicionales, al reducir tiempos de proceso, mejorar atributos de calidad, no alterar las principales características de los

productos, reduce riesgos químicos, físicos y se considera tecnología verde al ser sustentable, debido a que emplea menos tiempo, agua y energía (Campo *et al.*, 2018).

### **6.1. Ultrasonido**

El ultrasonido puede definirse como las ondas acústicas inaudibles de una frecuencia generalmente superior a los 20 kHz. Cuando el ultrasonido pasa a través de un medio líquido, la interacción entre las ondas del ultrasonido, el líquido y el gas disuelto conduce a un fenómeno de excitación conocido como cavitación acústica, caracterizado por la generación y evolución de microburbujas en el medio líquido. La cavitación se produce en aquellas regiones de un líquido que se encuentran sometidas a presiones de alta amplitud que alternan rápidamente. Las microburbujas que alcanzan un tamaño crítico implosionan o colapsan violentamente para volver al tamaño original. La implosión supone liberación de toda la energía acumulada, ocasionando incrementos de temperatura instantáneos y focales, que se disipan sin que supongan una elevación de temperatura sustancial en la temperatura del líquido tratado. La energía liberada, así como el choque mecánico asociadas al fenómeno de implosión afectan la estructura de los materiales situados en el microentorno (Ulloa *et al.*, 2013).

Los mecanismos de acción del ultrasonido se han investigado al largo de la historia y se han clasificado en los siguientes términos (Delgado, 2012):

- Cavitación.
- Formación de radicales libres.
- Choques micro mecánicos intracelulares (en el caso de inactivación microbiana).
- Generación de energía calorífica y mecánica.
- Fuerza de radiación.
- Compresión y rarefracción.

El ultrasonido cuenta con un gran interés al ser una tecnología considerada amigable con el medio ambiente, al conocer las ventajas y los mecanismos de acción se ha descubierto muchos usos de esta técnica en la industria alimentaria.

## **6.2. Aplicaciones del ultrasonido**

Las innovaciones tecnológicas en alimentos buscan satisfacer las necesidades del consumidor por obtener productos frescos, con características nutrimentales, con calidad e inocuidad, a continuación, se describen los usos más frecuentes del ultrasonido reportados en la industria de alimentos y de importancia en la industria cervecera:

- Degaseo y despumante: Despumado de bebidas carbonatadas, cerveza u otros líquidos durante enlatado; desespumado de fermentos microbiológicos: remoción de gases disueltos en líquidos.
- Fermentación y maduración: Incremento de la velocidad de fermentación y añejamiento (Gómez & López, 2009).

Los métodos antes vistos tienen ventajas y desventajas de gran importancia en el ámbito sensorial de la propia cerveza, por lo tanto, se buscan alternativas más eficaces, económicas y en estos tiempos modernos, que sea más amigables con el medio ambiente.

Al conocer el mecanismo de cavitación propio del ultrasonido, este principio se puede aplicar a un proceso de desalcoholización al lograr una evaporación del alcohol etílico debido a la liberación de energía que es provocada por la implosión de microburbujas, esto aumenta la temperatura del medio generando diferentes cambios físicos y químicos.

## Capítulo II. Metodología de la Investigación Experimental

---

### 1. Objetivos

#### Objetivo general:

Comparación de dos métodos de desalcoholización en cerveza comercial tipo *Lager*, mediante la variación del tiempo de proceso para la selección del que brinde las mejores características asociadas con la calidad final de la cerveza.

#### Objetivos particulares

1. Evaluar la desalcoholización de cerveza por destilación a vacío y con ultrasonido a través de la variación del tiempo de proceso para la obtención del método con menor pérdida en algunas características (pH, color y grado alcohólico).
2. Comparación entre el uso de ultrasonido y destilación a vacío en el proceso de desalcoholización de cerveza a través del rendimiento de la cantidad retirada de alcohol para evaluar la viabilidad entre los dos métodos.

### 2. Descripción experimental

A continuación, se presenta el diagrama experimental en el que se explica de manera general, las actividades desarrolladas experimentalmente dentro de este proyecto.

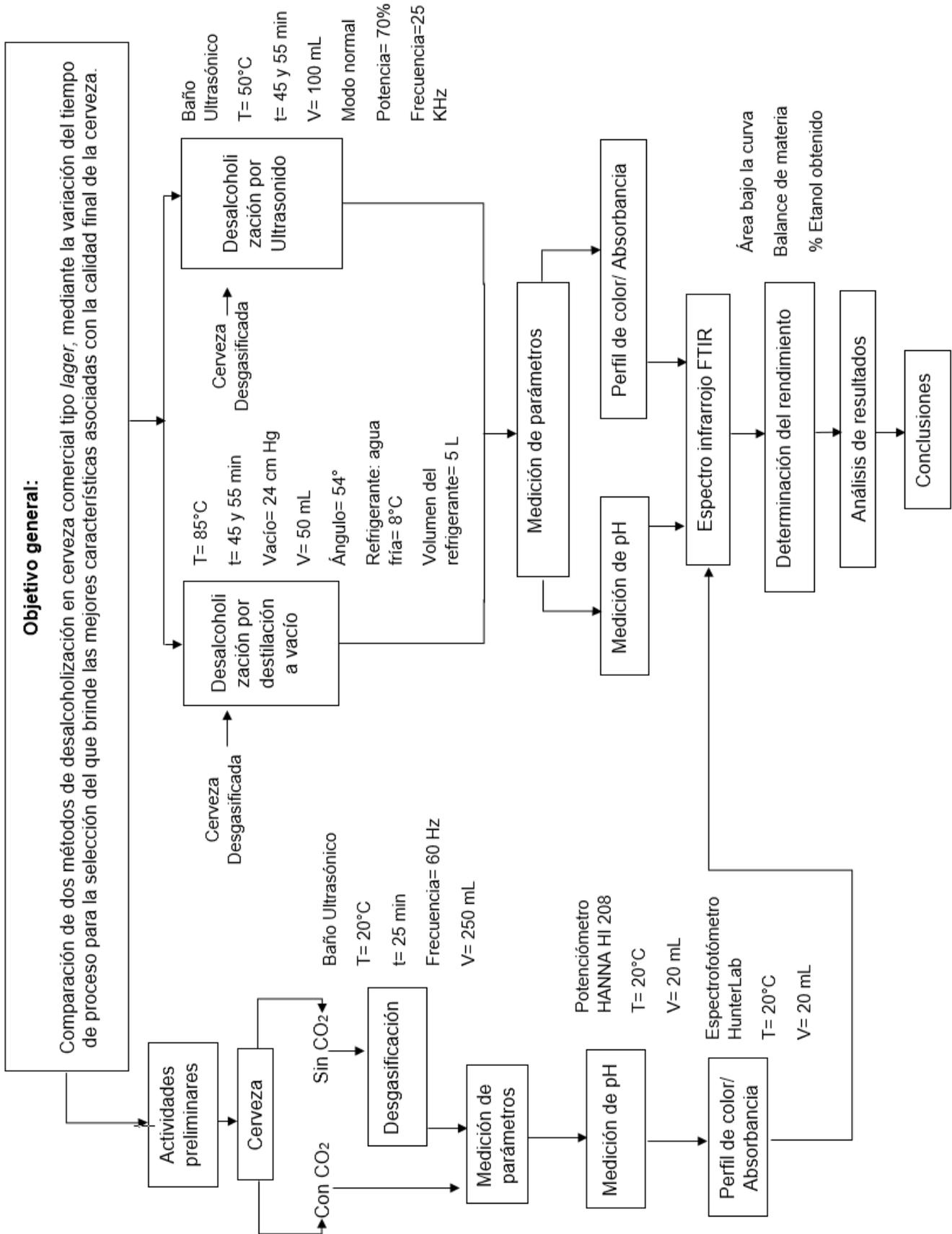


Figura 6. Diagrama experimental.

## 2.1. Actividades preliminares

### 2.1.1. Características de la materia prima

Para fines de este proyecto de investigación se usó un tipo de cerveza comercial, de fácil acceso y clasificada dentro de cerveza tipo *Lager*.

*Lager Vienna*: Es una cerveza oscura, creada de la fusión de dos ingredientes, la malta dorada y caramelo tostado, dándole leves tonos de dulzor reduciendo los niveles de amargor, ya que su sabor único ofrece una combinación muy especial. Cuenta con un 4.1% Alc. Vol.

Esta cerveza cumple con los parámetros (Tabla 2) que indica la normatividad mexicana.

Tabla 2. Especificaciones de la cerveza tipo Lager.

Especificaciones	Límites	
	Mínimo	Máximo
Contenido de alcohol a 20°C (% Alc. Vol.)	2	20
Metanol (mg/100 mL de alcohol anhidro)	-	300
Acidez Total (como ácido láctico en g/L)	-	10
pH	2.5	5.0
Plomo (mg/L)	0	0.5
Arsénico (mg/L)	0	0.5

NOM-199-SCFI-2017.

### 2.1.2. Control de la materia prima

La materia prima fue obtenida de un supermercado local, a esta se le realizaron pruebas de pH y perfiles de color. La NOM-199-SCFI-2027 especifica que estas pruebas se deben realizar sin la presencia de CO<sub>2</sub> para evitar errores de medición,

a la vez la norma recomienda el método de baño ultrasónico para desgasificar la cerveza con las condiciones de: tiempo 25 min, temperatura 20°C y frecuencia de 60 Hz, se usó este método recomendado en un equipo Elmasonic P60H (Elma Ultrasonics Inc.).

Se realizó la medición de pH a la cerveza sin desgasificar (recién abierta) y a la cerveza ya desgasificada a 20°C.

Se utilizó un potenciómetro HANNA HI 208 previamente calibrado con soluciones buffer de pH 4.01, 7.00 y 10.01 se sumergió el electrodo en la muestra, se realizó la medición del pH, se retiró el electrodo y se lavó con agua destilada. Se llevaron a cabo 3 réplicas con 3 repeticiones, se realizó el análisis estadístico con la determinación de medidas de dispersión y tendencia central, con el fin de encontrar errores de medición.

En cuanto a la medición de perfil de color, el equipo utilizado fue el espectrofotómetro Miniscan EZ (HunterLab), en el que se obtuvieron los datos de escala de color CIELab ( $L^*$ ,  $a^*$  y  $b^*$ ) al ser el color una combinación de 3 coordenadas en el espacio, se determinó la diferencia total ( $\Delta E^*$ ), a la vez se obtuvieron los datos de absorbancia de los 400 a los 700 nm. La muestra usada fue estandarizada a  $20 \pm 1^\circ\text{C}$ .

Se llevaron a cabo 3 réplicas con 3, se realizó el análisis estadístico mediante la determinación de medidas de dispersión y tendencia central, con el fin de encontrar errores de medición.

## **2.2. Objetivo particular 1**

### **2.2.1. Desalcoholización de cerveza por destilación a vacío**

Se realizaron 2 corridas experimentales de destilación a vacío con la cerveza previamente desgasificada a una temperatura de  $20 \pm 1^\circ\text{C}$ , con dos tiempos de

destilación de 45 y 55 min, a un nivel de vacío de 24 cm Hg. El sistema de refrigeración se mantuvo constante en un ángulo de 54° con el objetivo de no tener variaciones experimentales.

Se empleó un sistema de recirculación de líquido refrigerante, el cual fue agua fría a una temperatura de  $8\pm 1^{\circ}\text{C}$  con un volumen constante de 5 L.

El volumen inicial de cerveza suministrada al sistema de destilación fueron 50 mL, que se mantuvo constante durante todos los experimentos.

Al finalizar la destilación se realizaron pruebas físicas al residuo (la cerveza destilada), tales como pH, perfil de color, temperatura y volumen. Se llevaron a cabo 3 réplicas con 3 repeticiones, se realizó el análisis estadístico mediante la determinación de medidas de dispersión y tendencia central, con el fin de encontrar errores de medición.

### **2.2.2. Desalcoholización de cerveza por ultrasonido**

Para esta metodología se utilizó un baño ultrasónico modelo P60H (Elma Ultrasonics Inc.), donde se realizaron 2 corridas experimentales con cerveza previamente desgasificada. Las condiciones utilizadas dentro del baño fueron:

- Modo normal
- 70% de potencia
- 25 kHz de frecuencia
- 50°C
- Con tiempos de 45 y 55 min

Estas condiciones se mantuvieron constantes durante todos los experimentos. El volumen inicial fue de 100 mL a una temperatura de 20°C.

Al finalizar se realizaron pruebas tales como pH, perfil de color, temperatura y volumen. Se llevaron a cabo 3 réplicas con 3 repeticiones, se realizó el análisis

estadístico mediante la determinación de medidas de dispersión y tendencia central, con el fin de encontrar errores de medición.

### **2.3. Objetivo particular 2**

#### **2.3.1. Determinación de contenido alcohólico mediante espectroscopía infrarroja con transformada de Fourier (FTIR)**

Con el propósito de determinar la disminución del alcohol etílico en las cervezas desalcoholizadas por destilación a vacío y por ultrasonido, se obtuvieron sus espectros en modo de transmitancia relativa por el espectrofotómetro de Infrarrojo con Transformada de Fourier FTIR Frontier SP8000, Perkin Elmer (Waltham, MA, EUA) acoplado a un dispositivo de reflectancia total atenuada (*ATR* por sus siglas en inglés) en un intervalo de número de onda desde 4000 hasta 400  $\text{cm}^{-1}$  mediante el uso del software del equipo. Se obtuvieron espectros infrarrojos tanto de la cerveza con gas, la cerveza destilada a 45 y 55 min y de la cerveza tratada por ultrasonido a 45 y 55 min.

El espectro de transmisión IR es la prueba más concluyente de identidad de compuestos que puede ser obtenida a través de la energía de vibración de los átomos que conforman una molécula y la intensidad que está presente depende del enlace, tipo de enlace y la molécula en sí (Paulino, 2005).

Se determinó el área bajo la curva con el software OriginLab 8, en el intervalo donde los grupos funcionales del etanol tienen mayor presencia dentro del espectro, con el objetivo de determinar el contenido alcohólico de las muestras.

### 2.3.2. Determinación del rendimiento

Con los datos obtenidos anteriormente se realizó una secuencia de cálculo con el objetivo de obtener un panorama más amplio sobre los dos procesos estudiados, así mismo se llevó a cabo un balance de materia como se expone en la Ecuación 1 con el fin de determinar el volumen de destilado obtenido:

$$F = D + R \dots\dots\dots (Ec. 1)$$

Donde:

F= Alimentación (mL)

D= Destilado (mL)

R= Residuo (mL)

Se realizó un balance parcial de etanol como se muestra en la ecuación 2 para conocer la cantidad de alcohol en el destilado.

$$F(x_F) = D(x_D) + R(x_R)$$

$$x_D = \frac{F(x_F) - R(x_R)}{D} \dots\dots\dots (Ec. 2)$$

Donde:

F= Alimentación (mL)

(x<sub>F</sub>)= Fracción etanol alimentación

D= Destilado (mL)

(xD)= Fracción etanol destilado

R= Residuo (mL)

(xR)= Fracción etanol residuo

También se determinó el % de etanol obtenido como se observa en la ecuación 3 y así poder tener una comparación entre la cantidad de alcohol alimentado y el destilado.

$$\%Etanol\ obtenido = \frac{Ed}{Ea} * 100 \dots (Ec. 3)$$

Donde:

Ed= Etanol destilado (mL)

Ea= Etanol alimentado (mL)

Con respecto al rendimiento se realizó la determinación como se muestra en la ecuación 4 con el fin de obtener el rendimiento de la cerveza destilada, es decir, la cantidad de cerveza desalcoholizada en el residuo con respecto a la cantidad alimentada.

$$Rendimiento = \frac{VcR}{VcA} * 100 \dots (Ec. 4)$$

Donde:

VcA= Volumen de cerveza de alimentación (mL)

VcR= Volumen de cerveza del residuo (mL)

Para la determinación del rendimiento del etanol presente en el residuo de la cerveza se usó la ecuación 5.

$$\text{Rendimiento} = \frac{VeR}{VeA} * 100 \dots (\text{Ec. 5})$$

Donde:

VeA= Volumen de etanol de alimentación (mL)

VeR= Volumen de etanol del residuo (mL)

## Capítulo III. Resultados y Análisis

A continuación, se presentan los resultados de la experimentación que tienen como propósito dar respuestas a los objetivos planteados.

### 3.1. Cambios en el pH cerveza por efecto de la desalcoholización

Los valores obtenidos en este parámetro se ven reflejados en la Figura 7, donde se puede señalar que el pH de la cerveza con gas está en el intervalo reportado bibliográficamente por Rodríguez (2003), quien registró que en el caso de cervezas tipo *Lager* el pH fluctúa entre  $4.1 \pm 0.2$ .

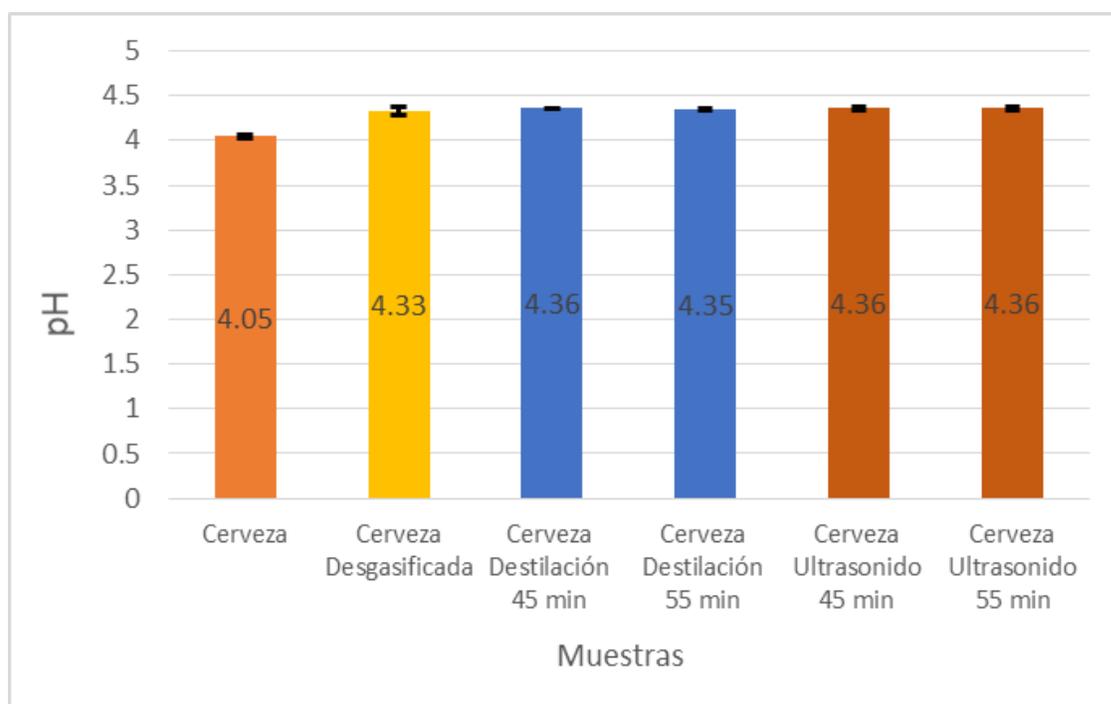


Figura 7. Cambios de pH en las muestras de cerveza

A la vez se observa un claro aumento en el valor del pH a partir de la muestra de cerveza sin gas y manteniendo valores similares en las demás muestras ya desalcoholizadas por los dos métodos usados, este aumento, se debe a que, al tener que llevar a cabo un proceso de desgasificación con el fin de eliminar el dióxido

de carbono de la muestras, como especifica la NOM-199-SCFI-2017, la cerveza está en contacto directo con la luz ambiental, provocando un proceso químico denominado fotoxidación, cambiado así el pH y sabor de la cerveza.

El sabor típicamente amargo de la cerveza se debe a la presencia de iso- $\alpha$ -ácidos en cantidades que varían entre 15 y 100 ppm. Además, estos ácidos contribuyen a las propiedades bacterianas de la cerveza y funcionan como elemento fundamental de la formación de espuma. El problema con los iso- $\alpha$ -ácidos es su pronunciada sensibilidad a la luz (Burns *et al.*, 2001).

La fotoxidación genera cambios internos en la cerveza, esto es explicado en el estudio reportado por Huvaere *et al.* (2006), donde indica que la calidad del sabor de la cerveza se ve comprometida por la exposición a la luz, un fenómeno que generalmente se conoce como “*lightstruck flavor*” o “*LSF*”. La formación de sabores extraños ya fue reconocido desde 1875, el mecanismo no ha sido completamente aclarado hasta la fecha. Como explica en su trabajo Weedon y Morrison (2008), la cerveza desarrolla un sabor desagradable cuando se expone a la luz ultravioleta, esto es debido a la formación de 3-metil-2-butanotiol mediante una fotólisis y, se ha demostrado que los iso- $\alpha$ -ácidos deben estar presentes para que esto ocurra.

Por esta reacción química el uso de botellas teñidas de verde o marrón son comúnmente ocupadas con el fin de bloquear el paso de la luz.

Se realizó un análisis estadístico mediante la determinación de medidas de dispersión y tendencia central, con el fin de encontrar errores de medición, los resultados se pueden observar en la Tabla 3.

Analizando los resultados se puede observar que la media (que es el promedio de todas las mediciones de cada muestra) un aumento en el pH a partir de la cerveza desgasificadas y aumentando ligeramente en las muestras ya desalcoholizadas con respecto a las cerveza sin ningún tratamiento, este mismo patrón está presente en la mediana y la moda, en esta última se puede observar valores frecuentes en la toma de pH, con esto, los resultados de la desviación estándar y el coeficiente de

variación (donde muestra de 0-1 % de variación con respecto a la media) se puede decir que las pruebas de pH se realizaron de manera correcta.

Tabla 3. Resultados de la determinación de medidas de dispersión y tendencia central en la medición de pH.

	<b>Media</b>	<b>Mediana</b>	<b>Moda</b>	<b>Varianza</b>	<b>Desviación Estándar</b>	<b>Coefficiente de Variación</b>
<b>Cerveza</b>	4.053	4.060	4.060	0.000	0.016	0%
<b>Cerveza Desgasificada</b>	4.337	4.340	4.340	0.002	0.044	1%
<b>Cerveza Destilación 45 min</b>	4.366	4.370	4.370	0.000	0.005	0%
<b>Cerveza Destilación 55 min</b>	4.357	4.360	4.370	0.000	0.013	0%
<b>Cerveza Ultrasonido 45 min</b>	4.367	4.365	4.380	0.001	0.025	1%
<b>Cerveza Ultrasonido 55 min</b>	4.366	4.360	4.360	0.000	0.021	0%

### **3.2. Cambios en el color y la absorbancia en cerveza por efecto de la desalcoholización**

El color final de una cerveza está definido principalmente por el tipo de malta usada en la formulación, a la vez esto depende de las condiciones usadas en el proceso de malteado de los granos. Esto es mejor explicado en el estudio reportado por Shellhammer (2009), donde indica que la cebada contiene concentraciones muy bajas de sustancias pigmentadas, es el proceso de malteado el que da como resultado la formación de color en la cerveza. Las fases de germinación y horneado del proceso preparan el escenario y, determinan el grado de formación de color a

partir de las reacciones de pardeamiento de Maillard y, en algunos casos, las reacciones de caramelización y pirólisis.

Los valores obtenidos en la determinación de color se ven reflejados en la Tabla 4.

Tabla 4. Valores de L\*, a\* y b\* obtenidos en la medición de color por espectrofotometría de reflectancia.

<b>CIE LAB</b>	<b>Cerveza</b>	<b>Cerveza Desgas.</b>	<b>Cerveza Destilación 45 min</b>	<b>Cerveza Destilación 55 min</b>	<b>Cerveza Ultrasonido 45 min</b>	<b>Cerveza Ultrasonido 55 min</b>
<b>L*</b>	44.77	44.24	42.62	41.36	45.74	45.67
<b>a*</b>	11.66	11.12	14.19	15.13	10.04	10.10
<b>b*</b>	45.94	44.58	49.73	47.30	42.03	42.15

De acuerdo al trabajo realizado por Koren *et al.*, (2020), en el caso de L\*, a\* y b\*, el valor L\* puede estar entre 0 y 100, cuanto mayor sea L\* más claro será el color de las muestras. Los valores a\* y b\* pueden estar entre -100 y 100, cuanto menor sea a\* significa verde y entre mayor sea, significa rojo. Con respecto a la coordenada b\* cuanto más pequeña sea significa azul y, entre mayor sea significa amarillo.

En las muestras tratadas por destilación con vacío el color tiende a ser más oscuro comparado con la cerveza original, pero al contrario con esto, en las muestras desalcoholizadas por ultrasonido el color tiende a ser más claro, esto no es consistente con la investigación de Brányik *et al.*, (2012), ya que los procesos térmicos tienden a aumentar el color mientras que los procesos de desalcoholización por membrana lo disminuyen. Cabe resaltar que la información sobre el efecto de desalcoholización sobre el color en cerveza es muy escasa, aunque podría suponerse que a los tiempos muy cortos de los microbombardeos de las ondas ultrasónicas no propician los cambios de color en la cerveza.

Se realizó un análisis estadístico mediante la determinación de medidas de dispersión y tendencia central, con el fin de encontrar errores de medición, los resultados se pueden observar en la Tabla 5.

Tabla 5. Resultados de la determinación de medidas de dispersión y tendencia central en la medición de color.

Muestras	CIE LAB	Media	Mediana	Moda	Varianza	Desviación Estándar	Coefficiente de Variación
Cerveza	L*	44.776	44.840	44.840	0.030	0.173	0%
	a*	11.669	11.640	11.730	0.046	0.215	2%
	b*	45.948	45.960	-	0.237	0.487	1%
Cerveza Desgasificada	L*	44.248	44.300	44.340	0.015	0.122	0%
	a*	11.120	11.090	11.050	0.007	0.082	1%
	b*	44.584	44.600	44.710	0.064	0.253	1%
Cerveza Destilación 45 min	L*	42.628	42.900	42.940	0.308	0.555	1%
	a*	14.191	14.565	14.560	0.576	0.759	5%
	b*	49.734	49.750	49.780	0.012	0.111	0%
Cerveza Destilación 55 min	L*	41.363	41.360	42.440	1.890	1.375	3%
	a*	15.132	15.025	14.780	0.402	0.634	4%
	b*	47.309	49.600	40.710	18.228	4.269	9%
Cerveza Ultrasonido 45 min	L*	45.748	45.475	45.310	0.296	0.544	1%
	a*	10.045	9.895	-	0.249	0.499	5%
	b*	42.080	42.235	-	1.716	1.310	3%
Cerveza Ultrasonido 55 min	L*	45.674	45.930	46.150	0.418	0.646	1%
	a*	10.105	10.135	-	0.106	0.325	3%
	b*	42.152	42.265	-	0.467	0.684	2%

Lo significativo en estos resultados son la varianza, la desviación estándar y el coeficiente de variación, este último presenta una variación con respecto a la media del 0-9% y con esto se puede afirmar que el color se midió correctamente.

Con el fin de tener un panorama más amplio entre las diferencias visuales entre dos muestras, se calculó el  $\Delta E^*$ . Los resultados se presentan en la Figura 8, donde, las muestras desalcoholizadas se compararon con la cerveza sin ningún tratamiento previo. Si el  $\Delta E^* \leq 1.5$  significa que casi no hay diferencias perceptibles al ojo humano en una inspección visual, si  $\Delta E^* \geq 1.5$  las muestras son ligeramente diferentes, si  $\Delta E^* \geq 3.0$  hay alguna diferencia y, si el  $\Delta E^* \geq 6.0$  significa que hay una diferencia significativa en el color de las muestras que son percibidas por el consumidor (Koren *et al.*, 2020).

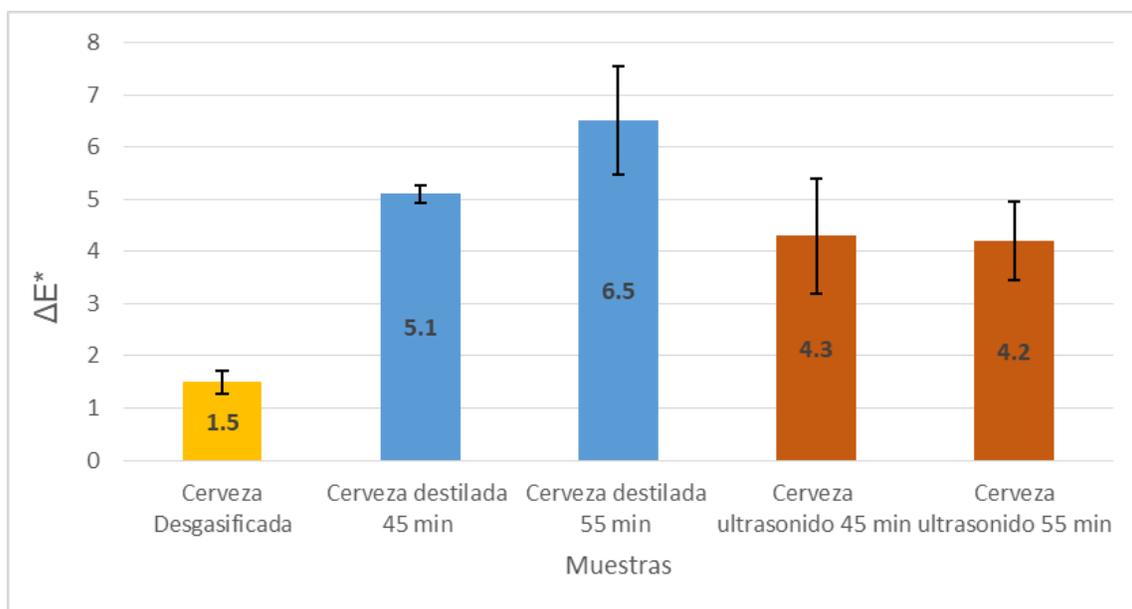


Figura 8. Comparación entre los resultados de  $\Delta E^*$ .

Teniendo en cuenta lo anterior, la desgasificación de la cerveza no genera ningún cambio de color notable, en los demás resultados se puede observar que existen diferencias visuales entre la muestra de cerveza con alcohol y las muestras tratadas por los métodos de desalcoholización. El proceso de destilación a vacío tiene un mayor cambio de color comparado con la técnica de ultrasonido, por lo que se puede decir que el uso del ultrasonido como técnica de desalcoholización provoca un menor daño en la cerveza por lo que es más viable si se quiere conservar un color más cercano al original.

Con respecto a los datos obtenidos en absorbancia, estos se ven reflejados en la Figura 9.

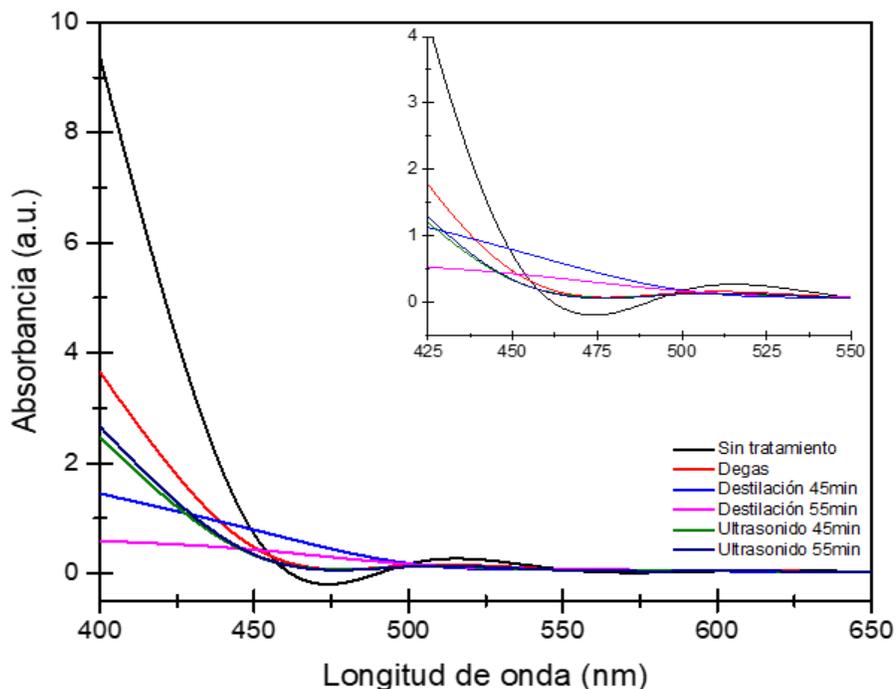


Figura 9. Espectro de absorción de las muestras de cerveza.

Las reacciones de pardeamiento de Maillard son clave para el color de la cerveza y se originan en el endospermo de la cebada durante el malteado, pero pueden reanudarse durante la ebullición del mosto. Los dos componentes clave de esta reacción son los azúcares reductores (principalmente maltosa) y los aminoácidos libres o grupos amino de aminoácidos que comprenden las proteínas (Shellhammer, 2009).

El determinación de las absorbancias a 420 nm es un método usado como indicador de las reacciones de pardeamiento no enzimático, esto es debido a que los compuestos formados absorben en esta longitud de onda como lo explica en su trabajo Echavarría *et al.*, (2012), la reacción de Maillard tanto en sus etapas iniciales como final es muy importante para encontrar indicadores adecuados, entre los indicadores comúnmente utilizados de la reacción son, mediciones espectrofotométricas a 280 nm para compuestos de pirazina y 420 nm para la detección de pigmentos color marrón.

En los resultados obtenidos en este trabajo, se puede resaltar la disminución de la capacidad de absorción a 400 nm, la disminución dio inicio desde el proceso de desgasificación y se mantuvo constante durante los dos métodos usados con el fin

de retirar el alcohol de la cerveza, aun así se puede observar que la capacidad de absorbancia se ve menos afectada por la técnica de ultrasonido que por la técnica de destilación con vacío. La absorbancia es menor cerca de los 475 nm, esto es antes de que se inicie cualquier proceso de desalcoholización ya que después de eso los valores se incrementan.

En el caso de las muestras destiladas con la temperatura modifica el comportamiento de la zona de 400-500 nm, a la vez se ve afectado por el tiempo, siendo que entre más tiempo de proceso la absorbancia es menor.

Mientras que en las muestras de ultrasonido y desgasificación estas comparten un comportamiento similar, al ser ambas técnicas que usan ondas ultrasónicas genero cavitación acústica y así ocasionado incrementos de temperatura, este cambio de temperatura genera cambios físicos y químicos en las muestras, esto se ve directamente reflejado en la absorbancia.

El color de la cerveza puede ser modificado durante el almacenamiento como es reportado en el estudio de Callemien y Collin (2007), donde se observa un aumento casi lineal en muestras almacenadas a 40°C en ausencia de oxígeno, la formación de productos de Maillard coloreados bajo esas condiciones de almacenamiento fue la causa predominante. En presencia de oxígeno, el aumento de esta propiedad en los primeros días fue a una velocidad más alta, debido a la oxidación y posterior degradación de polifenoles.

Teniendo en cuenta lo anterior, al llevar a cabo un proceso de desgasificación con presencia de oxígeno la cerveza posiblemente presentó reacciones de degradación de polifenoles ya que la cerveza al ser tratada por destilación, el cual es un proceso térmico, aceleró esa degradación, teniendo como consecuencia un cambio de color, esto sería concordante con lo obtenido en las mediciones de  $L^*$ ,  $a^*$  y  $b^*$ , donde las muestras destiladas con vacío tuvieron tendencia a ser más oscuras que la cerveza original, teniendo así valores menores de absorbancia.

En el caso de las muestras desalcoholizadas por ultrasonido, es muy probable que se llevara a cabo la misma degradación de polifenoles, pero en las mediciones de

L\*, a\* y b\*, se obtuvieron como resultado que, en las muestras el color tiende a ser más claro, teniendo a la vez valores mayores de absorbancia comparadas con las muestras destiladas con vacío. Esto es debido a que, al suministrar menos energía en forma de calor a la muestra, las reacciones de degradación tuvieron menos efecto negativo sobre la cerveza.

Se realizó un análisis estadístico mediante la determinación de medidas de dispersión y tendencia central, con el fin de encontrar errores de medición, los resultados se pueden observar en la Tabla 6.

Tabla 6. Resultados de la determinación de medidas de dispersión y tendencia central en la medición de absorbancia.

	<b>Espectro</b>	<b>Media</b>	<b>Mediana</b>	<b>Moda</b>	<b>Varianza</b>	<b>Desviación Estándar</b>	<b>Coefficiente de Variación</b>
<b>Cerveza</b>	400	0.107	0.070	-	0.005	0.072	68%
	450	1.403	1.410	-	0.005	0.070	5%
	500	5.770	5.740	-	0.028	0.167	3%
	550	13.373	13.420	-	0.021	0.146	1%
	600	20.897	20.910	-	0.004	0.061	0%
	650	26.713	26.720	-	0.001	0.031	0%
<b>Cerveza Desgasificada</b>	400	0.273	0.250	-	0.008	0.087	32%
	450	2.120	2.140	-	0.003	0.053	2%
	500	6.793	6.790	-	0.013	0.115	2%
	550	13.950	14.000	-	0.018	0.132	1%
	600	20.257	20.260	-	0.006	0.075	0%
	650	26.333	26.270	-	0.068	0.261	1%
<b>Cerveza Destilación 45 min</b>	400	0.685	0.440	-	0.541	0.736	107%
	450	1.257	1.260	-	0.001	0.038	3%
	500	5.460	5.460	-	0.003	0.054	1%
	550	12.703	12.670	-	0.019	0.137	1%
	600	20.362	20.315	-	0.053	0.231	1%
	650	27.340	27.380	-	0.317	0.563	2%
<b>Cerveza Destilación 55 min</b>	400	1.677	1.665	1.650	0.004	0.061	4%
	450	2.307	2.285	-	0.003	0.059	3%
	500	5.630	5.645	-	0.003	0.050	1%
	550	12.277	12.320	-	0.039	0.197	2%
	600	19.507	19.435	-	0.192	0.438	2%
	650	27.500	27.285	-	0.450	0.671	2%
<b>Cerveza Ultrasonido 45 min</b>	400	0.405	0.310	-	0.081	0.285	70%
	450	2.948	2.980	2.980	0.090	0.299	10%
	500	8.073	8.195	-	0.152	0.390	5%
	550	15.130	15.425	-	0.357	0.598	4%
	600	21.393	21.500	-	0.168	0.409	2%
	650	26.723	27.905	-	10.412	3.227	12%
<b>Cerveza Ultrasonido 55 min</b>	400	0.375	0.335	-	0.020	0.141	38%
	450	2.872	2.900	2.980	0.064	0.254	9%
	500	7.937	8.025	-	0.175	0.419	5%
	550	15.025	15.180	-	0.278	0.528	4%
	600	21.252	21.510	21.640	0.304	0.552	3%
	650	27.908	28.160	-	0.287	0.536	2%

Lo significativo en estos resultados son la varianza, la desviación estándar y el coeficiente de variación, este último presenta una variación con respecto a la media bastante irregular, esto puede ser debido a una sobreexposición a la luz en el momento de medir la absorbancia, pero al ser la mayoría porcentajes bajos se puede afirmar que la absorbancia se midió correctamente.

### 3.3. Identificación de grupos funcionales mediante FTIR

En la Figura 10 pueden observarse los espectros infrarrojos de las muestras de cerveza desalcoholizadas por destilación con vacío y ultrasonido, comparadas con la cerveza sin tratamiento. En las muestras, se presentan dos bandas características a  $3450\text{ cm}^{-1}$  y  $1645\text{ cm}^{-1}$  que se atribuyen a las vibraciones de estiramiento de los enlaces O-H y H-O-H, respectivamente de acuerdo al trabajo presentado por Mondragón (2017).

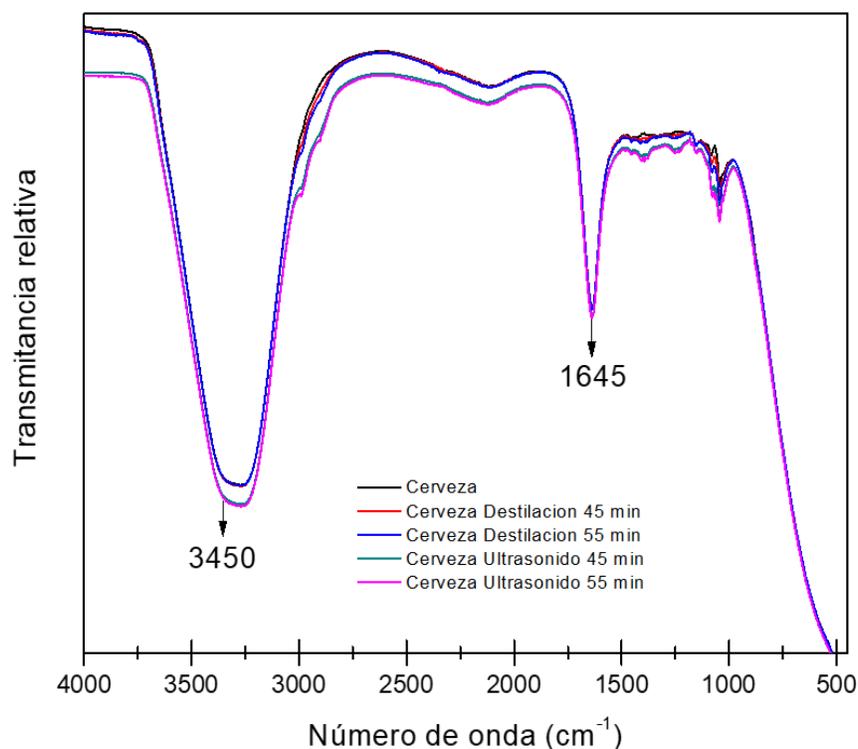


Figura 10. Comparativa de los espectros infrarrojo de las muestras de cerveza.

En la Figura 11, se observan con mayor claridad varias bandas que representan principalmente la presencia de carbohidratos y etanol en la cerveza, como describe en su investigación Duarte *et al.*, (2004), donde, el etanol absorbe fuertemente a 879, 1045 y 1085  $\text{cm}^{-1}$ , mientras que la maltosa y los malto-oligosacáridos muestran varias bandas superpuestas que van desde 998 a 1155  $\text{cm}^{-1}$ .

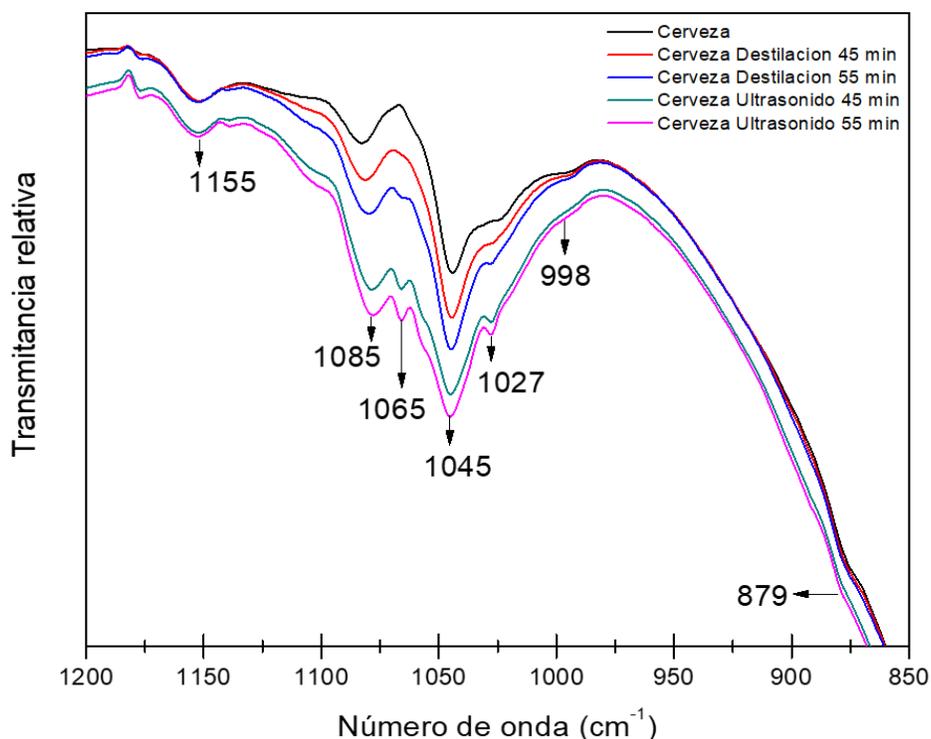


Figura 11. Comparativa de los espectros infrarrojo de las muestras de cerveza con respecto al alcohol y otros compuestos.

Al identificar las bandas presentes en los espectros infrarrojos que representan la presencia de etanol en las muestras de cerveza, se puede analizar los procesos usados y comprobando así el uso de ultrasonido como método desalcoholizante ya que aparte de lograr retirar alcohol de la cerveza, es capaz de evaporar más etanol en comparación a las muestras tratadas por destilación con vacío.

Para el caso de las muestras con ultrasonido, a los 1065  $\text{cm}^{-1}$  se presenta una banda característica que no se presenta en los otros tratamientos, indicando que existe una ramificación importante en el carbono  $\alpha$  de los alcoholes primarios, como es el caso del etanol, indicando que el proceso genera cambios importantes en los enlaces C-O de estas estructuras químicas durante la desalcoholización.

Así mismo, a los  $1027\text{ cm}^{-1}$  se presentan vibraciones de estiramiento en los enlaces C-N de los compuestos alifáticos que pudiesen formarse debido a las reacciones de Maillard durante la aplicación del ultrasonido en las muestras, lo que ocurre muy poco en las muestras tratadas por destilación con vacío.

### 3.4. Determinación de contenido alcohólico

El contenido alcohólico presente en las muestras de cerveza tratadas por ultrasonido y destilación fue determinado mediante la identificación del área bajo la curva de las bandas representativas obtenidas mediante espectroscopía FTIR como se muestra en la Figura 12.

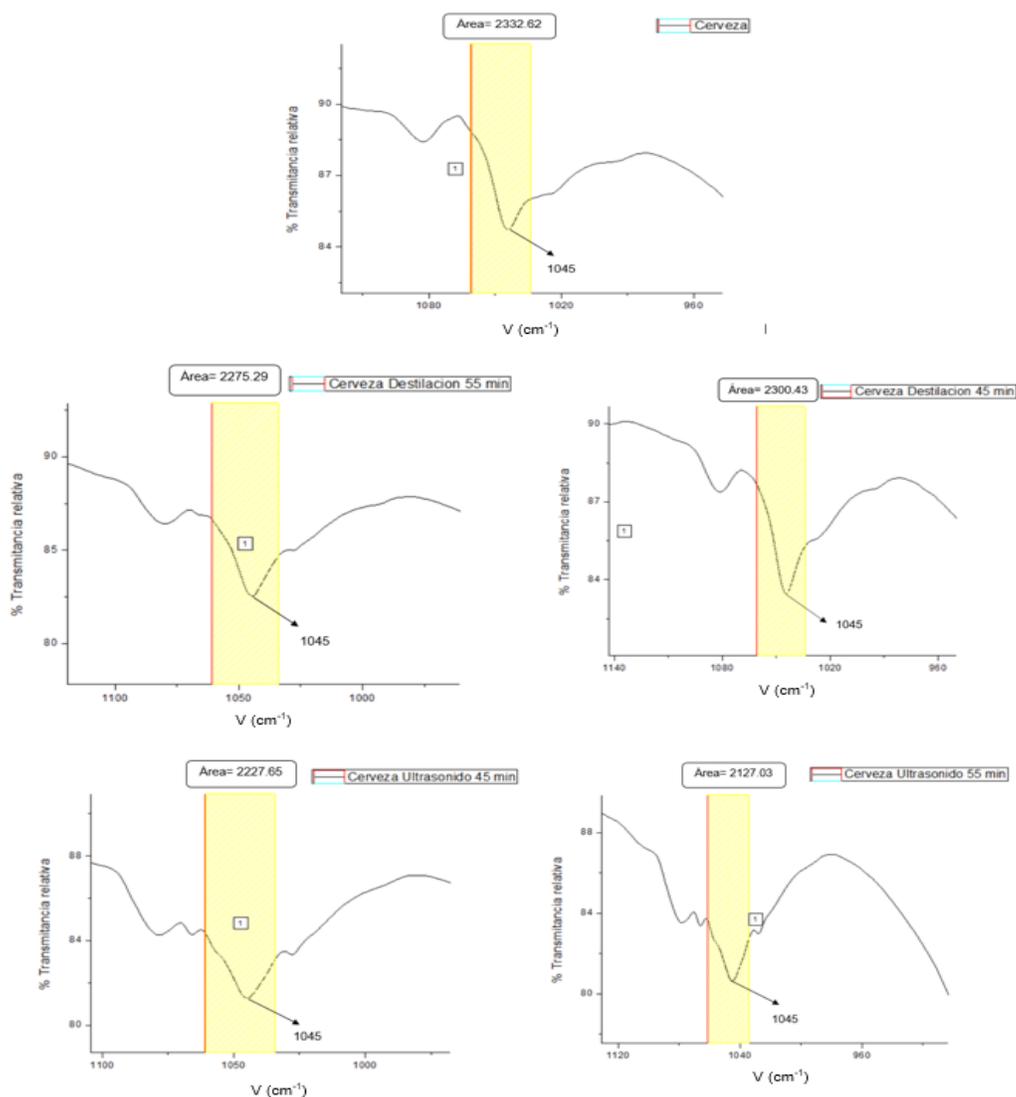


Figura 12. Determinación del área bajo la curva en las muestras desalcoholizadas.

El área bajo la curva fue determinada mediante el software OriginLab 8, para esto se seleccionó la banda donde predomina fuertemente la presencia de etanol, la banda seleccionada es la que está presente en  $1045\text{ cm}^{-1}$ .

Al obtener el valor del área bajo la curva de las muestras e identificar el porcentaje de etanol en la cerveza sin tratamiento, se puede determinar un valor de la cantidad de alcohol presente, estos datos se ven reflejados en la Tabla 7.

Tabla 7. Porcentaje de alcohol final en las cervezas desalcoholizadas.

<b>Muestra</b>	<b>Área bajo la curva</b>	<b>% de Alcohol</b>
<b>Cerveza</b>	2332.62	4.10
<b>Cerveza destilación 45 min</b>	2300.43	4.04
<b>Cerveza destilación 55 min</b>	2275.29	3.99
<b>Cerveza Ultrasonido 45 min</b>	2227.65	3.91
<b>Cerveza Ultrasonido 55 min</b>	2127.03	3.73

Conociendo el % de alcohol final en las muestras procesadas para desalcoholización, se puede analizar que el ultrasonido logra retirar mayor cantidad de alcohol en comparación con la destilación a vacío, comprobando así que el uso ultrasonido como medio desalcoholizante es efectivo.

### **3.5. Determinación del rendimiento**

Los datos obtenidos en la experimentación se muestran en las Figuras 13 y 14, esta información se usó en el balance de materia y balance parcial de etanol.

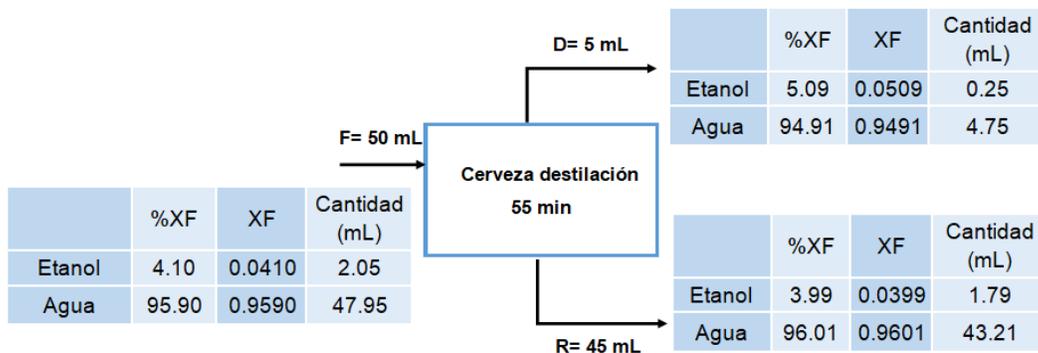
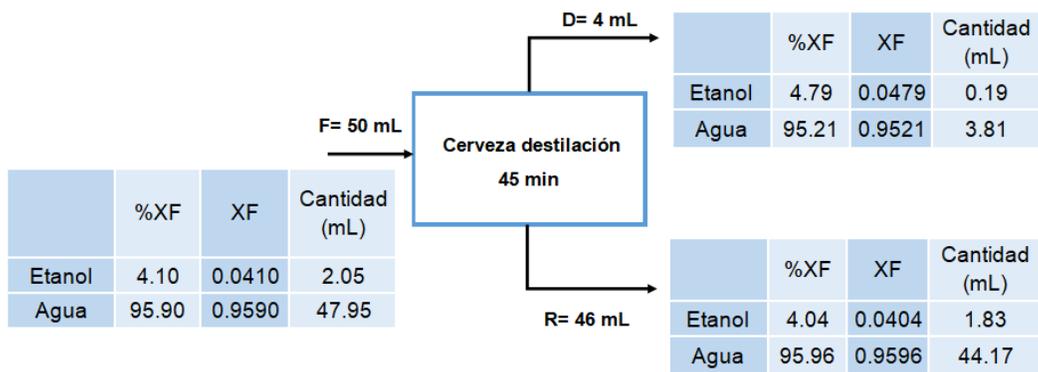


Figura 13. Datos del balance de materia en el proceso de destilación a vacío.

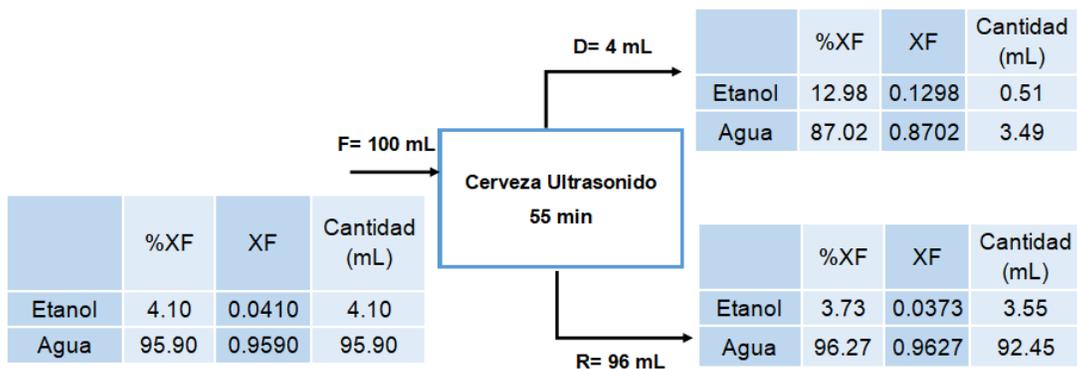
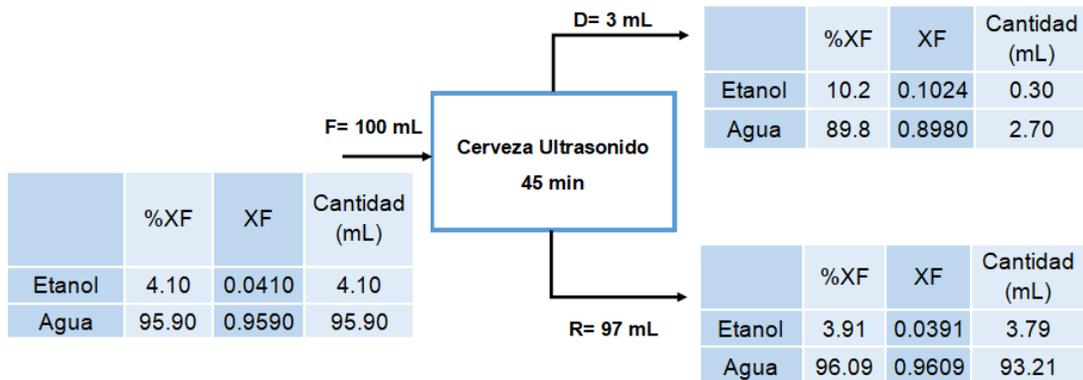


Figura 14. Datos del balance de materia en el proceso de ultrasonido.

Así mismo, se determinó el porcentaje de etanol obtenido, rendimiento de cerveza y etanol de los dos procesos de desalcoholización, estos resultados se exponen en la Tabla 8.

Tabla 8. Resultados obtenidos de los balances y rendimientos.

<b>Cálculo</b>	<b>Cerveza destilación 45 min</b>	<b>Cerveza destilación 55 min</b>	<b>Cerveza Ultrasonido 45 min</b>	<b>Cerveza Ultrasonido 55 min</b>
<b>Balance de materia (Etanol obtenido)</b>	4 mL	5 mL	3 mL	4 mL
<b>Balance parcial de etanol</b>	0.0479	0.0509	0.1024	0.1298
<b>%Etanol obtenido</b>	9.26%	12.41%	7.46%	12.65%
<b>Rendimiento cerveza</b>	92%	90%	97%	96%
<b>Rendimiento etanol</b>	89.26%	87.31%	92.43%	86.58%

Al analizar los resultados se observa que el volumen evaporado como destilado por los procesos de desalcoholización son proporcionales al tiempo ya que van en aumento, cuanto más sea el tiempo de proceso mayor será el volumen obtenido como destilado.

En cuanto al balance parcial de etanol y el % de etanol obtenido se obtuvo como resultado que el ultrasonido evaporó más alcohol en las muestras de cerveza en comparación a la destilación con vacío, esto es reflejado de forma más clara en la Tabla 9. Al mismo tiempo se puede analizar un aumento proporcional del alcohol

retirado, al tener un tiempo de proceso más largo, la cantidad de alcohol retirado será mayor.

Tabla 9. Comparación del etanol obtenido en los procesos de desalcoholización.

<b>Muestra</b>	<b>Volumen de alcohol retirado (mL)</b>	<b>% Etanol obtenido</b>
<b>Cerveza destilación 45 min</b>	0.19	9.26
<b>Cerveza destilación 55 min</b>	0.25	12.41
<b>Cerveza Ultrasonido 45 min</b>	0.30	7.46
<b>Cerveza Ultrasonido 55 min</b>	0.51	12.65

En la cerveza destilada a vacío con un tiempo de 45 min se lograron evaporar 4 mL de los cuales 0.19 mL son de alcohol que representa el 9.26% de la muestra total, en comparación con la cerveza tratada por ultrasonido a 45 min donde se evaporó un total de 3 mL de los cuales 0.25 mL son de etanol que representa el 7.46% de la muestra total.

En cuanto a la cerveza destilada a vacío con un tiempo de 55 min se extrajeron 5 mL donde 0.25 mL es alcohol representando el 12.41% de la muestra total. Por otra parte en la cerveza desalcoholizada por ultrasonido a 55 min se logró retirar 0.51 mL los cuales representan el 12.65% de la muestra total.

Esto es confirmado por la determinación del rendimiento de cerveza ya que se obtuvo un mayor rendimiento en el ultrasonido en comparación a la destilación con vacío, esto es debido a que el resultado es un 92 y 90% en las destilaciones con vacío a 45 y 55 min respectivamente mientras que en el ultrasonido es un 97 y 96% a 45 y 55 min respectivamente. Esto se puede interpretar como que, entre mayor sea el rendimiento, menor pérdida de volumen de cerveza se obtiene al final de los procesos de desalcoholización, lo que significa menor pérdida de materia prima y, a niveles industriales de procesamiento, estas cantidades toman importancia significativa.

Al tener en cuenta lo anterior se puede determinar la eficacia del ultrasonido como medio desalcoholizante, aparte de lograr retirar más alcohol en comparación a la destilación con vacío, se obtuvieron más residuos (cerveza ya desalcoholizada), por lo tanto existe mayor rendimiento atribuido a este proceso, al generar un daño menor al volumen total de la muestra.

## Conclusiones

---

A partir de los resultados de la experimentación, se logró determinar que la técnica de ultrasonido es eficaz como un proceso de desalcoholización ya que se demostró la capacidad de evaporar etanol presente a la cerveza, esto es, debido a la liberación de energía que es provocada por la implosión de microburbujas, aumentando la temperatura del medio generando diferentes cambios físicos y químicos.

En cuanto a los parámetros de calidad determinados en el presente trabajo, en el pH se observó un aumento a partir de la proceso de desgasificación y, esto es debido a una fotoxidación, al exponer la cerveza a la luz ambiental, por lo que, las técnicas de desalcoholización no presentan efecto en este parámetro. Por otra parte, a la determinación de color en las muestras tratadas por destilación con vacío, el color tiende a ser más oscuro comparado con la cerveza original, pero contrariamente con esto, en las muestras desalcoholizadas por ultrasonido, el color tiende a ser más claro, siendo así el ultrasonido una técnica de desalcoholización a tener en cuenta si se quiere conservar un color más cercano a la cerveza original.

Con respecto a la medición de la absorbancia, hubo un cambio en comparación a la cerveza con alcohol, ya que se llevó a cabo un proceso de desgasificación previo a la desalcoholización, la muestra fue expuesta a oxígeno presentando reacciones de degradación de polifenoles, la destilación con vacío presenta un mayor cambio en comparación al ultrasonido, ya que, el primero suministra más energía en forma de calor, acelerando las reacciones químicas de degradación.

Mediante el análisis de los espectros de FTIR se pudo comprobar la disminución del contenido alcohólico de las muestras, ambos procesos evaluados, donde el ultrasonido retiró una mayor cantidad de alcohol etílico.

Los resultados obtenidos en este trabajo aportan una visión más amplia sobre el rendimiento general y el rendimiento de alcohol obtenido del ultrasonido como método de desalcoholización, obteniendo así que el ultrasonido tiene un mayor

porcentaje de etanol obtenido y a la vez un mejor porcentaje de rendimiento general en comparación a la destilación a vacío.

En este trabajo se logró comprobar que al ultrasonido es eficaz como una técnica de desalcoholización, generando menor daño en la cerveza y a la vez un mejor rendimiento de alcohol evaporado, esto es una nueva alternativa a las técnicas tradicionales, y al ser el ultrasonido un proceso amigable con el medio ambiente es una opción más ecológica en comparación a los demás procesos de desalcoholización.

## Referencias Bibliográficas

---

- Badui, S.D. (2006). *Química de los alimentos* (4° ed.). Pearson Educación.
- Beneficios de la cerveza. (2017). *Actitud Saludable*. Recuperado 2 de mayo de 2020, de <https://actitudsaludable.net/beneficios-de-la-cerveza/>.
- Brányik, T., Silva, D. P., Baszczyński, M., Lehnert, R., & Almida, J. B. A. (2012). A review of methods of low alcohol and alcohol-free beer production. *Journal of Food Engineering*, 108(4), 493–506.
- Burns, C. S., Heyerick, A., Keukeleire, D. D., & Forbes, M. D. E. (2001). Mechanism for formation of the lightstruck flavor in beer revealed by Time-Resolved electron paramagnetic resonance. *Chemistry an European Journal*, 7(21), 4553–4561.
- Callemien, D., & Collin, S. (2007). Involvement of flavonoids in beer color instability during storage. *Journal of Agriculture and Food Chemistry*, 55(22), 9066–9073.
- Cerveceros de México Cámara de la cerveza y la malta. ¿Cuánta cerveza se consume en México? (2017). <https://cervecerosdemexico.com/2017/04/20/cuanta-cerveza-se-consume-en-mexico/>.
- Campo, V. Y., Gélvez, O. V., & Ayala, A. A. (2018). Ultrasonido en el procesamiento (homogenización, extracción y secado) de alimentos. *Biotecnología en el Sector Agropecuario y Agroindustrial BSAA*, 1(16), 102–113.
- Celis, F. (2018, 7 agosto). La producción de cerveza seguirá creciendo en México. *Forbes México*. <https://www.forbes.com.mx/produccion-de-cerveza-seguira-creciendo-en-mexico>.
- Delgado, J. O. (2012). Aplicación del ultrasonido en la industria de los alimentos. *Revista Especializada en Ingeniería de Procesos en Alimentos y Biomateriales*, 6, 141–152.

- Duarte, L. F., Barros, A., Almeida, C., Spraul, M., & Gil, A. M. (2004). Multivariate analysis of NMR and FTIR data as a potential tool for the quality control of beer. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 52(5), 1031–1038.
- Echavarría, A. P., Pagán, J., & Ibarz, A. (2012). Melanoidins formed by maillard reaction in food and their biological activity. *Food Eng Rev*, 4, 203–223.
- Fennema, O. R. (2000). *Química de los alimentos* (2° ed.). Acribia.
- Ferreira, L. (2014). *Elaboración de cerveza: Historia y evolución, desarrollo de actividades de capacitación e implementación de mejoras tecnológicas para productores artesanales*. Tesis de Licenciatura. Universidad Nacional de la Plata.
- Galarza, V. A. E. (2018). *Elaboración de cerveza Amber Ale de alta fermentación saborizada y aromatizada con frutas y plantas aromáticas ecuatorianas*. Tesis de Licenciatura. Facultad de Ingeniería Química, Universidad Central del Ecuador.
- Gisbert, V. M. (2016). *Diseño del proceso industrial para la elaboración de cerveza*. Tesis de Licenciatura. Universidad Politécnica de Valencia.
- Gómez, D. J., & López, A. M. (2009). Aplicaciones del ultrasonido en el tratamiento de alimentos. *Temas Selectos de Ingeniería de Alimentos*, 3(1), 59–73.
- González, G. M. R. (2017). *Principios de elaboración de las cervezas artesanales* (1° ed.). Lulu Enterprises.
- Herrera, A. A., & Jaramillo R. A. (2015). *Diseño conceptual para la elaboración y desalcoholización de cerveza artesanal*. Tesis de Licenciatura. Escuela de Ingeniería, Universidad EAFIT.
- Hough, S. J. (1990). *Bioteología de la cerveza y de la malta* (1° ed.). Acribia.
- Hughes, G. (2019). *Como elaborar cerveza casera con más de 100 recetas* (1° ed.). Omega.

- Huvaere, K., Andersen, M. L., Storme, M., Bocxlaer, J. V., Skibsted, L. H., & Keukeleire, D. D. (2006). Flavin-induced photodecomposition of sulfur-containing amino acids is decisive in the formation of beer lightstruck flavor. *The Royal Society of Chemistry and Owner Societies*, 5, 961–969.
- Koren, D., Vecseri, B. H., Kun-Farkas, G., Urbin, A., Nyitrai, A., & Sipos, L. (2020). How to objectively determine the color of beer? *Journal of Food Science and Technology*, 57(3), 1183–1189.
- Lureña, M. A. (2012). Fabricación de la cerveza sin alcohol. Gominolas de petróleo. <http://www.gominolasdepetroleo.com/2012/10/como-se-hace-la-cerveza-sinalcohol.htm>.
- Mascarell, M. J. J. (2017). Diseño de una columna de rectificación a vacío para la obtención de cerveza de bajo contenido alcohólico a partir de cervezas artesanales. Tesis de Licenciatura. Universidad de Cádiz.
- Mazarrasa, F. (2015). Ajuste de grado alcohólico: Situación tecnológica actual y nuevas tendencias de mercado. La semana Vitivinícola. <http://www.sevi.net/es/3441/91/7121/Ajuste-de-grado-alcoh%25C3%25B3lico-Situaci%25C3%25B3n-tecnol%25C3%25B3gica-actual-y-nuevas-tendencias-de-mercado-vino-bodega-desalcoholizacion-monografico-maquinaria-tecnologia-conetech.htm>.
- McCabe, W. L., Smith, J. C., & Harriot, P. (2007). Operaciones unitarias de ingeniería química (7° ed.). McGraw-Hill Interamericana.
- Mondragón, C. P. M. (2017). Espectroscopía de infrarrojo para todos. . .y 51 espectros de alimentos consumidos en México (1° ed.). Centro de Investigación y Asistencia en Tecnología y Diseño del Estado de Jalisco. [https://ciatej.mx/files/divulgacion/divulgacion\\_5a43b7c09fdc1.pdf](https://ciatej.mx/files/divulgacion/divulgacion_5a43b7c09fdc1.pdf).
- Monroy, C. M. (2019). Evaluación de parámetros fisicoquímicos en una cerveza utilizando triticale como adjunto (X. Triticosecale Wittmack). Tesis de Licenciatura. Facultad de Ciencias Agrícolas, Universidad Autónoma del Estado de México.

- Morales, T. M. (2018). Reacciones químicas en la cerveza. *Revista de Química PUCP*, 32(1), 4–11.
- Muñoz, E. C. (2017). Diseño de una planta de desalcoholización de cervezas en microcervecerías con una producción de 18,5 l/h. Tesis de Licenciatura. Escuela Técnica Superior de Ingeniería, Universidad de Sevilla.
- Norma Oficial Mexicana NOM-199-SCFI-2017, Bebidas alcohólicas-Denominación, especificaciones fisicoquímicas, información comercial y métodos de prueba.
- Palomas, D. (2017, 17 enero). La química detrás de la amargura y el sabor de la cerveza. *DCiencia, ciencia para todos*. <https://www.dciencia.es/quimica-cerveza/>.
- Paulino, S. E. (2005). Manual de Espectroscopía, Fundamentos y resolución de Espectros de Ultravioleta-Visible e Infrarrojo. México: Tesis de Licenciatura. Facultad de Estudios Superiores Cuautitlán, Universidad Nacional Autónoma de México.
- Penalva, N. (2017). *Cerveza guía práctica y elaboración* (1° ed.). Libsa, España.
- Quiroga, F. M. (2016). Lúpulo: un ingrediente fascinante. *Forbes México*. <https://www.forbes.com.mx/lupulo-ingrediente-fascinante/>.
- Quiroga, F. M. (2018). Levadura: El componente “Mágico” de la cerveza. *Forbes México*. <https://www.forbes.com.mx/levadura-el-componente-magico-de-la-cerveza/>.
- Reyna, M. C., & Krammer, J. P. (2012). *Apuntes para la historia de la cerveza en México* (1° ed.). Instituto Nacional de Antropología e Historia.
- Rodríguez, C. H. A. (2003). Determinación de parámetros físico-químicos para la caracterización de cerveza tipo lager elaborada por Compañía Cervecería Kunstmann S. A. Tesis de Licenciatura. Facultad de Ciencias Agrarias, Universidad Austral de Chile.

- Sebess, P. (2017). *Técnicas de Cervecería Artesanal: ¿Cómo hacer tu propia cerveza?* (1.a ed.). Maudi Sebess.
- Shellhammer, T. H. (2009). Beer color. En C. W. Bamforth (Ed.), *Beer: A Quality Perspective* (1° ed., pp. 213–226). Academic Press. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-669201-3.X0001-2>.
- Suárez, D. M. (2013). *Cerveza: Componentes y Propiedades*. Tesis de Posgrado. Universidad de Oviedo.
- Ulloa, J. A., Ulloa, P. R., & Ramírez, R. J. C. (2013). Ultrasonido: Aplicaciones en el campo de los alimentos. *Nueva Época*, 4(14), 1–13.
- Weedon, A. C., & Morrison, J. S. (2008). The photochemistry of trans-isohumulone, a bitter flavouring component of beer. *Canadian Journal of Chemistry*, 86, 791–798.
- Wolfgang, K. (2006). *Tecnología para cerveceros y malteros* (1° ed.). Vlb Berlín.
- Wolfgang, V. (2003). *Elaboración casera de cerveza* (1° ed.). Acribia.