



**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE MÉXICO**

---

---

**FACULTAD DE QUÍMICA**

**APROVECHAMIENTO DE LOS  
SUBPRODUCTOS DE LA INDUSTRIA  
CERVECERA**

**TESINA**

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE

**QUÍMICA DE ALIMENTOS**

P R E S E N T A

**IXCHEL ANTONIO CAÑONGO**



**MÉXICO, CDMX**

**2023**



Universidad Nacional  
Autónoma de México



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

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

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

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

**JURADO ASIGNADO:**

PRESIDENTE            Profesor **AGUSTIN REYO HERRERA**

VOCAL                    Profesor **JOSE LUIS GODINEZ RODRIGUEZ**

SECRETARIO            Profesor **ARTURO ENRIQUEZ PEÑA**

1° SUPLENTE            Profesora **VERONICA HERNANDEZ BRIONES**

2° SUPLENTE            Profesor **FELIPE DE JESUS RODRIGUEZ PALACIOS**

**ASESOR DEL TEMA:**



---

Q.F.B Agustín Reyó Herrera

**SUSTENTANTE:**



---

Ixchel Antonio Cañongo

## AGRADECIMIENTOS

A mi asesor de tesis Agustín Reyo Herrera, mi más sincero agradecimiento por su confianza, paciencia y enseñanzas brindadas durante y después de la elaboración de este trabajo.

A mis padres Eleuteria y Jaime, por todo el amor, apoyo y confianza que me han brindado en mi camino por perseguir mis sueños y alcanzar mis metas. Ustedes son el motivo que me impulsa a nunca conformarme, a siempre intentar superarme a mí misma y plantearme metas cada vez más grandes. Los amo infinitamente.

A mi hermana Anayanzin, por su amor, compañía y apoyo incondicional. Te adoro por ser la persona más noble y bondadosa que conozco, por escuchar mis confidencias e historias interminables y por motivarme desde niña a perseguir mis sueños y a persistir con esta meta que se ha convertido en un logro.

A mi tía Raquel y mis primos Citlalli y Emiliano, por todo su cariño y comprensión. Valoro inmensamente su compañía y el tiempo que me han regalado.

A mis amigos de la Universidad, por compartir esta experiencia de vida conmigo, por estar para mí en mis buenos y malos momentos, por escucharme y alentarme a siempre seguir adelante. Lorena, Judit, Saraí, Nayelli y Karen, les agradezco por hacer que mi tiempo en la Facultad fuera más ameno, por todas esas charlas ruidosas llenas de risas y carcajadas y por la calidez de sus palabras y acciones que me motivan a ser cada día una mejor persona.

A mis amigos María, Constanza, Wendy, Zaira, Rebeca, Guillermo y Pilar, por todos los valiosos consejos que me han brindado y los momentos felices que hemos compartido.

A Claire, Grace y Melanie, por su amistad y palabras de ánimo. Valoro mucho que siempre me dediquen un poco de su tiempo, a pesar de la diferencia de horarios.

## ÍNDICE

|  |           |
|--|-----------|
| <b>AGRADECIMIENTOS</b>   | <b>3</b>  |
| <b>ÍNDICE DE FIGURAS</b>   | <b>6</b>  |
| <b>ÍNDICE DE TABLAS</b>  | <b>9</b>  |
| <b>RESUMEN</b>   | <b>9</b>  |
| <b>1. INTRODUCCIÓN</b>   | <b>11</b> |
| 1.1. Industria Cervecera Internacional y Nacional  | 17        |
| 1.2. Impacto de las cervecerías artesanales en el mercado mundial                        | 21        |
| 1.3. Impacto de las cervecerías artesanales en el mercado latinoamericano y nacional     | 26        |
| <b>2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA</b>   | <b>31</b> |
| <b>3. OBJETIVO</b>   | <b>32</b> |
| <b>4. CERVEZA</b>  | <b>33</b> |
| 4.1. Agua  | 35        |
| a) Concentraciones de iones metálicos  | 36        |
| b) pH  | 38        |
| 4.2. Cebada  | 41        |
| 4.3. Malteo  | 45        |
| a) Malta base y maltas especiales  | 47        |
| 4.4. Molienda y maceración   | 51        |
| 4.5. Adjuntos  | 55        |
| 4.6. Mosto dulce   | 55        |
| 4.7. Lúpulo  | 57        |
| 4.8. Levadura  | 70        |
| 4.9. Clasificación primaria de las cervezas con respecto a su tipo de levadura           | 73        |
| 4.10. Inoculación de la levadura y fermentación  | 80        |
| 4.11. Maduración   | 82        |
| 4.12. Cervezas <i>Sour</i>   | 84        |
| 4.13. Aromas en la cerveza impartidos por la levadura (congenéricos) y otros componentes | 87        |
| 4.14 Tratamientos posteriores a la maduración  | 98        |

|  |            |
|--|------------|
| <b>5. SUBPRODUCTOS DE LA ELABORACIÓN DE CERVEZA</b>  | <b>100</b> |
| <b>5.1. Grano agotado, bagazo o <i>Brewer's spent grains (BSGs)</i></b>  | <b>102</b> |
| 5.1.1. Caracterización de los componentes bioactivos y con propiedades funcionales presentes en el grano agotado     | 105        |
| 5.1.2. Métodos de conservación del grano agotado   | 114        |
| 5.1.3. Aplicaciones en la Industria Alimentaria  | 118        |
| 5.1.4. Otras aplicaciones  | 128        |
| <b>5.2. <i>Trüb</i></b>  | <b>130</b> |
| 5.2.1. Caracterización de los componentes bioactivos y con propiedades funcionales presentes en el <i>trüb</i>       | 132        |
| 5.2.2. Tratamiento del <i>trüb</i>   | 137        |
| 5.2.3. Aplicaciones en la Industria Alimentaria  | 137        |
| 5.2.4. Otras aplicaciones  | 140        |
| <b>5.3. Levadura residual, <i>surplus o residual brewing yeast (BSY)</i></b>   | <b>140</b> |
| 5.3.1. Caracterización de los componentes bioactivos y con propiedades funcionales presentes en la levadura residual | 143        |
| 5.3.2. Tratamiento de la levadura residual   | 147        |
| 5.3.3. Aplicaciones en la Industria Alimentaria  | 150        |
| 5.3.4. Otras aplicaciones  | 156        |
| <b>6. CONCLUSIONES</b>   | <b>157</b> |
| <b>7. GLOSARIO DE TÉRMINOS</b>   | <b>159</b> |
| <b>8. REFERENCIAS</b>  | <b>166</b> |

## Índice de figuras

|              |   |    |
|--------------|---|----|
| Figura 1.1.  | Elaboración de cerveza en el antiguo Egipto   | 11 |
| Figura 1.2.  | Ley de la Pureza o <i>Reinheitsgebot</i>  | 13 |
| Figura 1.3.  | Lass O' Gowrie, Manchester  | 13 |
| Figura 1.4.  | Cerveza <i>Miller Lite</i> de 1975  | 14 |
| Figura 1.5.  | Multinacionales y marcas de cerveza   | 15 |
| Figura 1.6.  | Producción de cerveza artesanal en Estados Unidos   | 16 |
| Figura 1.7.  | Consumo global de cerveza por país durante el año 2021  | 17 |
| Figura 1.8.  | Producción de cerveza por entidad   | 18 |
| Figura 1.9.  | Compuestos químicos presentes en la cerveza y sus ingredientes  | 21 |
| Figura 1.10. | Distribución de las cervecerías artesanales en el mundo   | 22 |
| Figura 1.11. | Ejemplos de cervezas afrutadas y su contenido de compuestos fenólicos   | 23 |
| Figura 1.12. | Ejemplo de diseños de envases de cervezas artesanales   | 24 |
| Figura 1.13. | Pilares de la sustentabilidad   | 26 |
| Figura 1.14. | Incremento del sector artesanal por región (periodo 2008-2019)  | 27 |
| Figura 1.15. | Cervezas representativas de las primeras cervecerías artesanales mexicanas  | 28 |
| Figura 1.16. | Sello independiente de ACERMEX  | 29 |
| Figura 4.1.  | Proceso de elaboración de cerveza   | 33 |
| Figura 4.2.  | Métodos analíticos empleados en la determinación de los componentes de las materias primas y la cerveza                           | 34 |
| Figura 4.3.  | Medidor de pH   | 38 |
| Figura 4.4.  | Ilustración de la planta de cebada (A) y dos de sus variedades: cebada de 2 hileras (2H) y cebada de 6 hileras (6H)               | 41 |
| Figura 4.5.  | Estructura del grano de cebada  | 42 |
| Figura 4.6.  | Representación esquemática de una célula del endospermo de la cebada  | 43 |
| Figura 4.7.  | Limpieza y selección del grano de cebada  | 44 |
| Figura 4.8.  | Características de algunas maltas especiales y su modo de obtención   | 48 |
| Figura 4.9.  | Esquema de la producción de diferentes tipos de malta a partir de un tipo de grano  | 50 |
| Figura 4.10. | Esquema de la sacarificación del almidón durante el macerado y la estructura típica de un $\alpha$ -glucano ramificado (dextrano) | 52 |
| Figura 4.11. | Diagrama del proceso estandarizado y gradual de maceración  | 53 |
| Figura 4.12. | Esquema general de la separación del grano agotado y el mosto dulce   | 54 |
| Figura 4.13. | Principales compuestos aromáticos del lúpulo y su aroma   | 58 |
| Figura 4.14. | Estructura de la flor de lúpulo   | 59 |
| Figura 4.15. | Extractos obtenidos a partir de la flor de lúpulo   | 60 |
| Figura 4.16. | Isomerización de los $\alpha$ -ácidos   | 61 |
| Figura 4.17. | Oxidación de los $\beta$ -ácidos  | 62 |
| Figura 4.18. | Ejemplos de algunos compuestos presentes en los aceites esenciales  | 64 |
| Figura 4.19. | Ejemplos de algunas variedades comerciales de lúpulo  | 65 |
| Figura 4.20. | Patrón de flujo en un intercambiador de calor de placas   | 69 |
| Figura 4.21. | Ejemplo de instalación de una vela de saturación con piedras de oxigenación (ilustrada para su visualización)                     | 70 |

|               |  |     |
|---------------|--|-----|
| Figura 4.22.  | Estructura de la levadura  | 71  |
| Figura 4.23.  | Esquema de la propagación de la levadura   | 78  |
| Figura 4.24.  | Levadura <i>Saccharomyces cerevisiae</i>   | 79  |
| Figura 4.25.  | Progreso típico de la fermentación   | 81  |
| Figura 4.26.  | Fases del proceso de elaboración de las cervezas <i>Sour</i> y los metabolitos y microorganismos involucrados en cada fase                                 | 85  |
| Figura 4.27.  | Relación entre las rutas metabólicas que contribuyen a la formación de los principales compuestos químicos responsables del perfil sensorial de la cerveza | 87  |
| Figura 4.28.  | Esquema de las principales rutas metabólicas que contribuyen a la síntesis de alcoholes  | 88  |
| Figura 4.29.  | Vía anabólica para la síntesis de alcoholes superiores   | 90  |
| Figura 4.30.  | Esquema de la ruta de síntesis de ésteres de la levadura   | 92  |
| Figura 4.31.  | Formación del 4-etil fenol y el 4-etil guayacol a partir de los ácidos <i>p</i> -cumárico y ácido ferúlico   | 94  |
| Figura 4.32.  | Producción y eliminación de diacetilo por parte de la levadura   | 95  |
| Figura 4.33.  | Mecanismo de reacción para la obtención de 3-metil-2-buteno-1-tiol   | 97  |
| Figura 4.34.  | Esquema de la pasteurización rápida  | 99  |
| Figura 4.35.  | Esquema de la pasteurización en túnel  | 99  |
| Figura 5.1.   | Proceso de elaboración de cerveza y subproductos asociados   | 101 |
| Figura 5.2.   | Esquema de la obtención del bagazo durante la elaboración de cerveza   | 102 |
| Figura 5.3. A | Etapa unitaria, separación del grano agotado del mosto dulce   | 103 |
| Figura 5.3. B | Flujo del mosto dulce a través del filtro-prensa   | 103 |
| Figura 5.4.   | Estructura química de la celulosa  | 107 |
| Figura 5.5.   | Estructura macromolecular de la lignina  | 107 |
| Figura 5.6.   | Estructura química de los arabinoxilanos ferulados   | 108 |
| Figura 5.7.   | Estructura química de los $\beta$ -glucanos  | 110 |
| Figura 5.8.   | Estructuras químicas de los compuestos fenólicos presentes en el bagazo  | 113 |
| Figura 5.9.   | Grano agotado húmedo y seco  | 115 |
| Figura 5.10.  | Deshidratación del grano agotado por medio de un deshidratador solar   | 116 |
| Figura 5.11.  | Esquema de la cámara de secado con vapor sobrecalentado  | 117 |
| Figura 5.12.  | Esquema de la obtención del <i>trüb</i> durante la elaboración de cerveza  | 131 |
| Figura 5.13.  | Mecanismo de acción antibacteriana de los $\alpha$ -iso-ácidos del lúpulo  | 134 |
| Figura 5.14.  | Estructura química general de los flavonoides y algunos ejemplos   | 135 |
| Figura 5.15.  | Esquema de la obtención de la levadura residual durante la elaboración de cerveza  | 141 |
| Figura 5.16.  | Estructura química de las N-manoproteínas y las O-manoproteínas presentes en <i>Saccharomyces cerevisiae</i>   | 144 |
| Figura 5.17.  | Estructura química de los $\beta$ -glucanos de la levadura   | 145 |
| Figura 5.18.  | Formas comerciales de la levadura residual   | 148 |

## Índice de tablas

|             |  |     |
|-------------|--|-----|
| Tabla 1.1.  | Estilos de cerveza de acuerdo con la lista de <i>Brewers Association</i> , 2021                                | 19  |
| Tabla 4.1.  | Concentraciones de aniones y cationes en algunos estilos de cerveza  | 36  |
| Tabla 4.2.  | Función de los iones presentes en el agua empleada en la elaboración de cerveza                                | 37  |
| Tabla 4.3.  | pH de la mezcla de agua y granos en la tina de macerado de algunos estilos de cerveza clásicos y europeos      | 40  |
| Tabla 4.4.  | Enzimas generadas durante el crecimiento del grano de cebada   | 45  |
| Tabla 4.5.  | Características del proceso de malteo de la cebada   | 47  |
| Tabla 4.6.  | Aromas de los aceites esenciales encontrados en el lúpulo  | 63  |
| Tabla 4.7.  | Ventajas y desventajas de las presentaciones de lúpulo   | 66  |
| Tabla 4.8.  | Ejemplos de levaduras no- <i>Saccharomyces</i>   | 74  |
| Tabla 4.9.  | Clasificación de la cerveza de acuerdo con la levadura empleada y las condiciones de fermentación y maduración | 86  |
| Tabla 4.10. | Principales alcoholes presentes en la cerveza  | 88  |
| Tabla 4.11. | Algunos ésteres presentes en la cerveza  | 91  |
| Tabla 4.12. | Compuestos azufrados presentes en la cerveza   | 96  |
| Tabla 5.1.  | Principales componentes presentes en los subproductos del proceso de elaboración de cerveza                    | 101 |
| Tabla 5.2.  | Composición química general del grano agotado  | 103 |
| Tabla 5.3.  | Compuestos químicos presentes en el grano agotado  | 104 |
| Tabla 5.4.  | Aminoácidos esenciales y no esenciales presentes en el grano agotado   | 105 |
| Tabla 5.5.  | Ácidos grasos presentes en el grano agotado  | 112 |
| Tabla 5.6.  | Funcionalidad de algunos de los lípidos provenientes del grano agotado   | 112 |
| Tabla 5.7.  | Propiedades de la harina del bagazo empleada en la elaboración de productos de panificación                    | 120 |
| Tabla 5.8.  | Usos del grano agotado en la elaboración de productos de panificación  | 121 |
| Tabla 5.9.  | Usos del grano agotado en la elaboración de productos cárnicos   | 125 |
| Tabla 5.10. | Composición química general del <i>trüb</i>  | 132 |
| Tabla 5.11. | Aminoácidos esenciales y no esenciales presentes en el <i>trüb</i>   | 133 |
| Tabla 5.12. | Algunas de las aplicaciones del <i>trüb</i> en la Industria Alimentaria  | 139 |
| Tabla 5.13. | Composición química general de la levadura residual  | 142 |
| Tabla 5.14. | Compuestos químicos presentes en la levadura residual  | 142 |
| Tabla 5.15. | Aminoácidos presentes en un extracto de <i>Saccharomyces cerevisiae</i> residual                               | 143 |
| Tabla 5.16. | Lípidos presentes en la levadura residual  | 146 |
| Tabla 5.17. | Productos de panificación elaborados mediante la adición de levadura residual                                  | 152 |
| Tabla 5.18. | Productos cárnicos elaborados mediante la adición de levadura residual   | 153 |
| Tabla 5.19. | Productos alimenticios elaborados mediante la adición de levadura residual                                     | 154 |

## RESUMEN

La cerveza, es una bebida alcohólica fermentada conocida desde la antigüedad, que se posiciona como la bebida alcohólica más consumida en el mundo. Su consumo a nivel global en el 2020 fue de 1,775 millones de hectolitros (6.7% menor al año anterior debido a los efectos de la pandemia de COVID-19) y en 2021, de 1,856 millones de hectolitros (4.0% mayor al 2020), (Kirin Holdings, 2022).

La Industria Cervecera, goza de un valor agregado superior al de las Industrias Manufactureras y es evidente el creciente interés y popularidad que ha ganado este sector alrededor del mundo (Rachwał K., *et al.*,2020).

La elaboración de cerveza se divide en varias operaciones sucesivas: molienda, malteo, maceración, ebullición del mosto, enfriamiento del mosto, aireación (aire estéril), inoculación de la levadura, fermentación, maduración, clarificación, filtración y envasado.

Durante estos procesos se generan subproductos, dentro de los que destacan tres grupos:

- a) Grano agotado o *Brewer's spent grains (BSGs)*,
- b) *Trüb* y
- c) Levadura residual o *Brewer's spent yeast (BSY)*,

cuyo manejo adecuado puede aportar beneficios económicos y evitar la contaminación causada por su acumulación excesiva.

México es el primer lugar en exportación de cerveza a nivel mundial, por encima de Países Bajos, Bélgica y Alemania, caracterizados por ser países exportadores de cerveza (INEGI, 2020). Por lo que resulta relevante que el material orgánico producido por la Industria Cervecera en el país, tenga un manejo ambientalmente sustentable y dada la rica composición química que poseen sus residuos, estos puedan ser aprovechados como fuentes de nutrientes de bajo costo en la elaboración de pienso animal y aditivos alimentarios, como medios de cultivo empleados en procesos biotecnológicos enfocados en la producción de compuestos y enzimas de interés en la Industria o bien, como material barato para la extracción de compuestos valiosos para la Industria Alimentaria.

El proyecto de titulación pretende recopilar información actualizada, que sea útil para investigadores y cerveceros, y permita elaborar propuestas para el aprovechamiento de los residuos generados durante la elaboración de cerveza.

## 1. INTRODUCCIÓN

La cerveza posee un rol preponderante en la historia de la civilización humana, de ahí que haya favorecido el desarrollo socio-económico de los primeros asentamientos humanos y el establecimiento de sociedades complejas y estructuradas como son las civilizaciones del Medio Oriente Antiguo y las civilizaciones Griega, Romana, Celta y Germánica (Buiatti, 2008).

Evidencias escritas aluden a la elaboración de cerveza en la antigua Mesopotamia desde el año 6000 a.C. y desde el año 5000 a.C. en el antiguo Egipto, **Figura 1.1.** Así mismo, dan a conocer el rol de la cerveza como ofrenda en banquetes y ceremonias rituales, además de su uso en remedios medicinales o como forma de pago a los trabajadores involucrados en proyectos eclesiásticos o de la realeza (Meusdoerffer, 2009).



**Figura 1.1. Elaboración de cerveza en el antiguo Egipto.**

Modelo encontrado en Deir el-Bahri que data del 2050-2000 a.C. Comprende 1 supervisor, 13 figuras que realizan la molienda del grano, 3 el corte de la “masa” y 4 ubicadas frente al horno. *British Museum.*

Las técnicas de elaboración de cerveza fueron introducidas a Europa desde el medio Oriente Antiguo en el 3600 a.C. (Cabras y Higgins, 2016). Las civilizaciones Griega y Romana fueron conocidas por su preferencia por el vino. No obstante, existe evidencia de que la civilización Griega convirtió a la producción y comercialización de cerveza en un monopolio cuyo principal cliente eran las clases

bajas. Mientras que, la civilización Romana poseía gremios cerveceros que fabricaban cerveza para cubrir las necesidades de las Legiones que se establecían en regiones sin vinicultura.

La expansión del Imperio Romano durante el siglo IX d. C. favoreció la construcción de monasterios a lo largo de Europa. Los monasterios del sur elaboraban vino, mientras que los monasterios del norte optaron por producir cerveza, debido a que las constantes heladas afectaban el cultivo de vid (Cabras y Higgins, 2016).

En un inicio, los monjes elaboraban cerveza para sí mismos y sus invitados; pero eventualmente cambiaron sus costumbres, instaurando tabernas conocidas como *monastery pubs* y llevando a cabo celebraciones y festivales (*church ales*), donde los campesinos podían beber cerveza de manera gratuita (Poelmans y Swinnen, 2011).

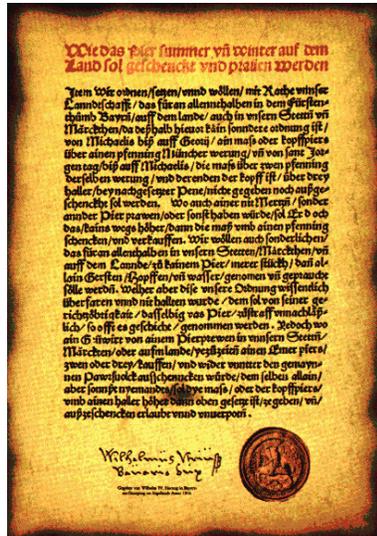
La primera evidencia de la incorporación del lúpulo (*Humulus lupulus*) en la cerveza data del 822 d.C. y refiere a una serie de estatutos emitidos por el Abad Adelardo de la Abadía de Corvey en Alemania (Hornsey, 2003). Esta innovación es una de las contribuciones más importantes hasta el día de hoy, pues fue capaz de conferirle a la cerveza estabilidad microbiológica frente a las bacterias Gram positivas, así como sabor amargo y aromas característicos (Vieira, *et al.*, 2019).

Al principio, los cerveceros añadían lúpulo como parte del *Grut*, el cual era una mezcla de malta, levadura e ingredientes herbales. No obstante, debido al aumento de impuestos asociados a este y al descubrimiento de la capacidad del lúpulo para prolongar la vida de anaquel de la cerveza, los cerveceros terminaron optando por solo añadir lúpulo (Cabras y Higgins, 2016).

Durante los siglos XIII y XVII, las ciudades de Brujas, Gante, Lovaina y Amberes en Bélgica; Haarlem y Gouda en Holanda; Hamburgo, Lübeck y Múnich en Alemania y Londres en Inglaterra, se convierten en importantes centros de elaboración de cerveza (Poelmans y Swinnen, 2011).

Las primeras fábricas de cerveza surgieron entre los siglos XIV y XVI. Este suceso impulsó la creación de regulaciones, las cuales especificaban los impuestos aplicados al producto, las materias primas a emplear en su elaboración, los tiempos de procesamiento, los precios de la cerveza y su composición. Una de las

regulaciones más conocidas es La ley de la pureza o *Reinheitsgebot* (en alemán), promulgada en Baviera en 1516. Establecía que la cerveza debía contener únicamente agua, malta y lúpulo (Lederman, 2017), **Figura 1.2.**



**Figura 1.2. Ley de la Pureza o Reinheitsgebot.**

Promulgada por el Duque Guillermo IV en Múnich, Baviera. *Brunnenbräu*, <https://bit.ly/3mbDqsu>

Durante los siglos XVIII y XIX, nacen las primeras grandes cervecerías en Europa y se crean las primeras *public houses* o *pubs* modernos en Inglaterra. Además, se llevan a cabo importantes descubrimientos que tuvieron impacto en la producción y el consumo de la cerveza (Cervecistas, 2018).



**Figura 1.3. Lass O' Gowrie, Manchester.** Taberna construida en 1883 y comprada en 1900 por “Threlfalls Brewery”, quien colocó la fachada de cerámica y ladrillo vidriado. *Pub Gallery*, <https://bit.ly/3ZQTL3j>

Para comienzos del siglo XIX, Alemania, Reino Unido y Estados Unidos se convierten en los principales productores de cerveza en el mundo, produciendo entre 5 a 7 mil millones de litros de cerveza cada uno (Poelmans y Swinnen, 2011). Para el periodo 1950-1980, la Industria Cervecera se vuelve más competitiva y se enfoca en desarrollar productos con más calidad y menores costos de manufactura que satisfagan las demandas de los consumidores. Muchas compañías de cerveza descontinúan la fabricación de cervezas oscuras y optan por producir cervezas ligeras o *light beers* (Poelmans y Swinnen, 2011). Este tipo de cervezas poseen un menor contenido de alcohol y calorías que las cervezas regulares, lo cual atrae a los consumidores que perciben al producto como saludable y con menores consecuencias asociadas al consumo de alcohol (Chrysochou, 2014). Las cervezas ligeras son ampliamente aceptadas por el mercado estadounidense y para el año 2005, se vuelven las más populares en Estados Unidos. No obstante, en Europa este tipo de cerveza no gana la misma popularidad, debido a que posee un sabor más sutil y menos amargo que las cervezas convencionales (Blanco, *et al.*, 2014),

**Figura 1.4.**



**Figura 1.4. Cerveza Miller Lite de 1975.**  
*Beer & Beyond, 2018,*  
<https://bit.ly/4162kZ9>

Durante los años 1980-2000, varias compañías europeas y estadounidenses comienzan a exportar una mayor cantidad de cerveza a países extranjeros y a establecer acuerdos con cervecerías ya establecidas para fabricar sus productos. Compañías como Heineken (Holanda), SABMiller (Sudáfrica) e Interbrew (Bélgica)

hacen adquisiciones alrededor del mundo, principalmente en el este de Europa, Norteamérica, Sudamérica y China, **Figura 1.5.**



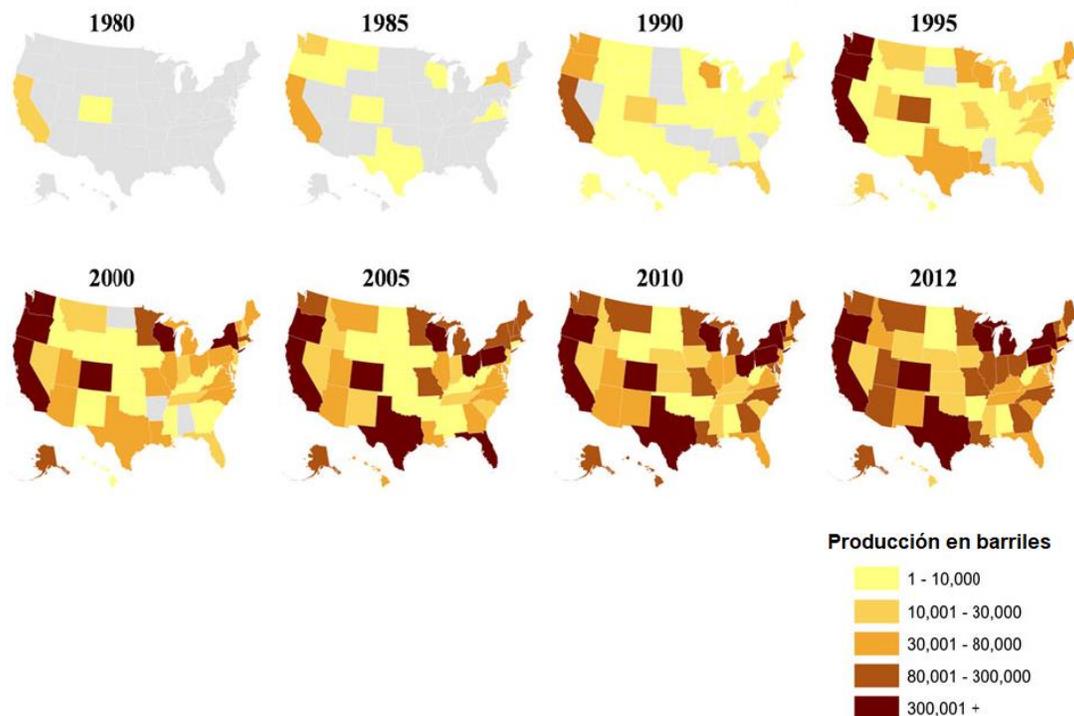
**Figura 1.5. Multinacionales y marcas de cerveza.** Ilustración de las marcas pertenecientes a los diferentes grupos cerveceros durante el año 2016. *Visual capitalist, 2016, <https://bit.ly/3KCEuio>*

El crecimiento de las grandes compañías cerveceras propició que el mercado mundial de cerveza se orientará a la producción de cervezas estandarizadas y homogéneas y produjo una disminución en la variabilidad de estilos de cerveza (Poelmans y Swinnen, 2011).

La falta de diversidad en estilos, el incremento de los salarios del consumidor y la diseminación de información sobre los diferentes estilos de cerveza existentes, dieron lugar a la llamada “Revolución de la Cerveza Artesanal” o *Craft Beer Movement* que comenzó en Estados Unidos cuando Fritz Maytag compró la “Anchor Brewing Company” de San Francisco en 1965. Este movimiento eventualmente se expandió a otros países como Australia, China, República Checa, Alemania, Países Bajos, Irlanda, Italia y Reino Unido (Garavaglia y Swinnen., 2017).

El inicio del movimiento de la cerveza artesanal en Australia (1980), Holanda (1981), Italia (1988) y China (2000) es marcado por la apertura de las primeras microcerverías y *brewpubs*. Mientras que, en países con largas tradiciones cerveceras, el inicio del movimiento es confuso y se asocia a: el surgimiento de la *Campaign for Real Ale Association* (CAMRA) en Inglaterra (1970s) y al periodo en el que las microcervecías comienzan a producir un mayor número de estilos de cerveza (Bélgica, Alemania y República Checa).

Con el pasar de los años, el número de cerveceras artesanales aumenta alrededor del mundo, principalmente en Estados Unidos, donde se observa un incremento significativo en la producción de cerveza artesanal desde 1985. La cerveza artesanal adquiere importancia en el mercado estadounidense y el número de cerveceras artesanales se incrementa continuamente, pasando de 1 en 1,965 a más de 9,500 en el 2022 (Brewers Association, 2022), **Figura 1.6.**



**Figura 1.6. Producción de cerveza artesanal en Estados Unidos.** Elzinga, Horton y Tremblay, 2015. *Craft Beer in the United States: History, Numbers and Geography*

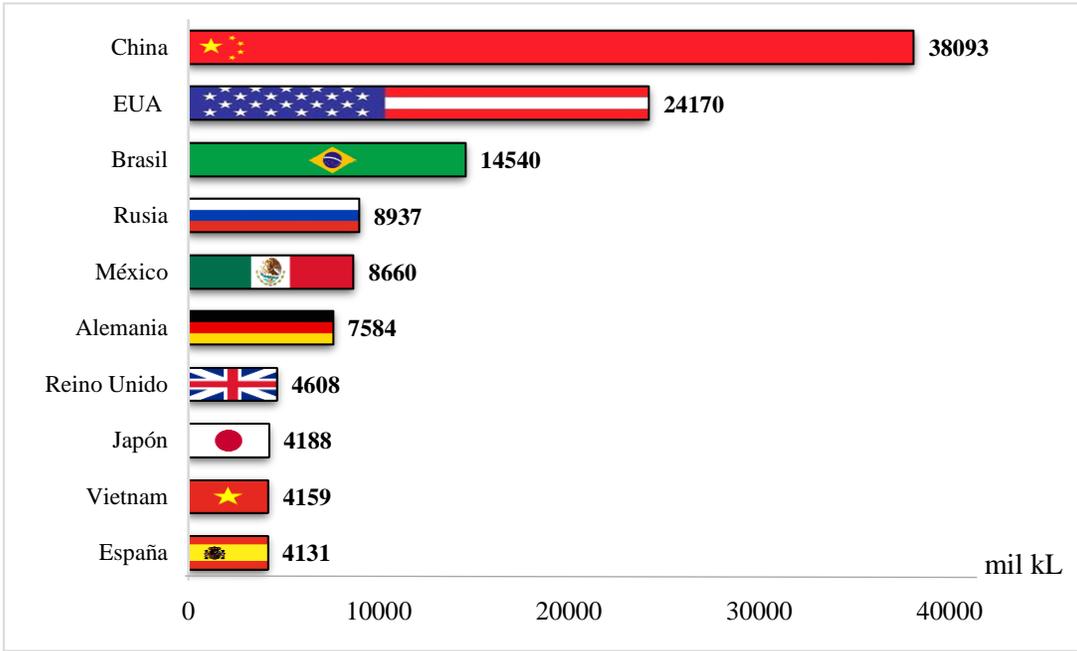
Como respuesta al crecimiento del sector artesanal en el mercado cervecero global, los grandes grupos cerveceros adquieren microcervecías y/o emplean su

influencia en bares y tiendas minoristas para promocionar y vender sus propias cervezas artesanales.

En 2017, la Asociación de Cerveceros (*Brewers Association* en inglés) en Estados Unidos crea el “*Independent Craft Brewer seal*”, cuya función es ayudar al consumidor a identificar las cervezas que son producidas por los microcerveceros y que cumplen con la definición de cerveza artesanal proporcionada por dicha asociación (Brewers Association, 2022).

### 1.1. Industria Cervecera Internacional y Nacional

La cerveza es la bebida alcohólica más consumida en el mundo y la quinta bebida más popular, después del té, las bebidas carbonatadas, la leche y el café (Olajire, 2020). Durante el año 2021, se consumieron aproximadamente 1,856 millones de hectolitros de cerveza a nivel mundial; 4.0% más que el año anterior. China es el principal consumidor de cerveza en el mundo, seguido por Estados Unidos de América, Brasil, Rusia, México y Alemania (Kirin Holdings, 2022), **Figura 1.7.**



**Figura 1.7. Consumo global de cerveza por país durante el año 2021.**

Elaborada a partir de *Kirin Holdings, 2022.*

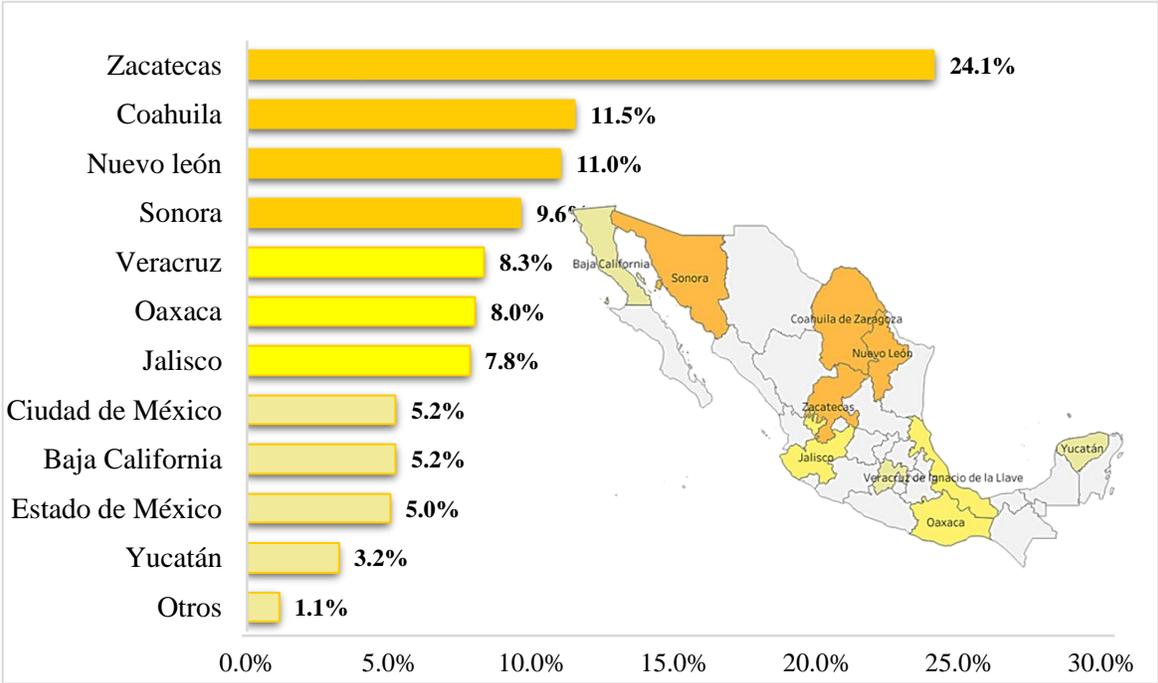
La Industria Cervecera contribuye significativamente en el Producto Interno Bruto (PIB) mundial y en la generación de empleos e ingresos públicos. Se estima que,

en 2019 la Industria Cervecera representó el 0.8% del PIB mundial con un valor agregado de 555 mil millones de dólares americanos, generó 23 millones de empleos que representaron el 0.9% del número de empleos generados a nivel mundial y aportó alrededor de 88 mil millones de dólares en impuestos (Oxford Economics, 2022).

La Industria Cervecera Mexicana es una de las más influyentes a nivel mundial. Tan solo en el 2019, contribuyó con 2.4 mil millones de dólares al PIB mundial y con 13 mil millones de dólares al PIB nacional. Así como a la creación de 420,000 empleos en el país y 51,000 alrededor del mundo (Oxford Economics, 2022).

Desde el año 2010, México es el principal exportador de cerveza a nivel mundial. La mayor parte de estas exportaciones se destinan a Estados Unidos (94.3%) y en menor medida a China (2.3%) y Australia (1.8%), (INEGI,2020).

La producción de cerveza en México se concentra principalmente en cuatro estados: Zacatecas, Coahuila de Zaragoza, Nuevo León y Sonora, los cuales acumularon el 56.2% de la producción durante el año 2019 (INEGI, 2020), **Figura 1.8.**



**Figura 1.8. Producción de cerveza por entidad. INEGI, 2020**

La Norma Oficial Mexicana NOM-199-SCFI-2017. “Bebidas alcohólicas-Denominación, especificaciones fisicoquímicas, información comercial y métodos

de prueba”, define a la cerveza como la bebida alcohólica fermentada elaborada con malta, lúpulo, levadura y agua potable y cuyo contenido alcohólico ronda entre 2% a 20% v/v. Puede adicionarse con infusiones de cualquier semilla farinácea procedente de gramíneas o leguminosas, raíces, materia prima vegetal feculenta, carbohidratos de origen vegetal susceptibles de ser hidrolizados y/o azúcares que son adjuntos de la malta, con adición de lúpulos o sucedáneos de estos.

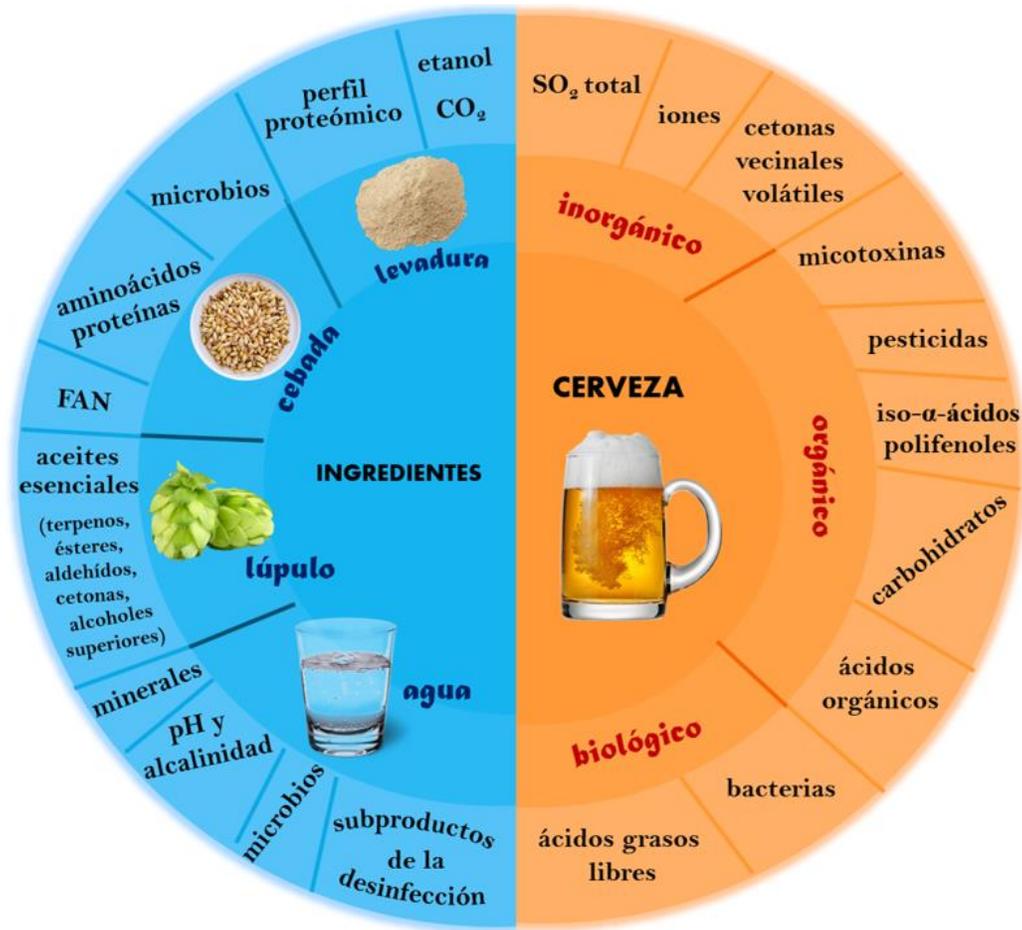
Cada uno de los ingredientes mencionados en la definición, posee una función en el proceso de elaboración y requiere de condiciones adecuadas de proceso y manipulación para dar lugar a los diferentes estilos de cerveza existentes en la actualidad, **Tabla 1.1.**

**Tabla 1.1. Estilos de cerveza de acuerdo con la lista de *Brewers Association*, 2021.**  
Villacreces C., et al., 2022. *Developments and characteristics of craft beer production process*

| Híbridos y mezclas de cervezas          | Lager                                      | Ale                                     |
|---|--|---|
| 1. Cerveza de trigo estadounidense      | 35. <i>Internacional Lager Light</i>       | 54. Cerveza australiana <i>Pale Ale</i> |
| 2. Cerveza afrutada                     | 36. Internacional estilo <i>Pilsener</i> o | 55. <i>Internacional Pale Ale</i>       |
| 3. Cerveza de trigo afrutada            | Internacional estilo                       | 56. <i>Extra Special Bitter</i>         |
| 4. <i>Field Beer</i>                    | <i>Lager</i>                               | 57. <i>International India Pale Ale</i> |
| 5. Cerveza con calabaza                 | 37. <i>Lager</i> lupulada                  | 58. Cerveza de cebada                   |
| 6. Cerveza con chile                    | 38. <i>International Dark Lager</i>        | estilo <i>Wine Ale</i>                  |
| 7. Cerveza con hierbas y especias       | 39. Cerveza alemana                        | 59. Cerveza alemana estilo              |
| 8. Cerveza con chocolate                | estilo <i>Pilsner</i>                      | <i>Koelsch</i>                          |
| 9. Cerveza con café                     | 40. <i>Pilsner</i> estilo                  | 60. Cerveza alemana estilo              |
| 10. <i>Coffee Stout</i> o <i>Porter</i> | Bohemia                                    | <i>Sour Ale</i>                         |
| 11. <i>Speciality Beer</i>              | 41. Helles estilo Múnich                   | 61. <i>Speciality Weisse</i> estilo     |
| 12. Cerveza de centeno                  | 42. <i>Dortmunder/</i>                     | Berlín                                  |
| 13. Cerveza con miel                    | Exportación                                | 62. <i>Contemporary Gose</i>            |
| 14. Cerveza sin alcohol                 | alemana estilo                             | 63. <i>South Hefeweizen</i> estilo      |
| 15. <i>Session Beer</i>                 | <i>Oktoberfest</i>                         | alemán                                  |
| 16. <i>Session India Pale Ale</i>       | 43. Lager estilo Viena                     | 64. Cerveza de trigo <i>Ale</i>         |
| 17. Otras cervezas fuertes              | 44. Cerveza alemana                        | estilo alemán                           |
| 18. Cerveza experimental                | <i>Maerzen</i> o <i>Rotbier</i>            | 65. <i>Altbier</i> estilo alemán        |
| 19. <i>Experimental India Pale Ale</i>  | estilo Franconia                           | 66. <i>Table Beer</i> estilo belga o    |
| 20. Cerveza experimental                |  | <i>Session Ale</i> estilo belga         |
| madurada en madera                      |  | 67. <i>Ale</i> estilo belga o estilo    |
| 21. Cerveza histórica                   |  | francés                                 |
|   |  | 68. <i>Witbier</i> estilo belga         |
|   |  | 69. <i>Classic Saison</i>               |

| Híbridos y mezclas de cervezas                                  | Lager   | Ale  |
|---|---|--|
|   |   | 70. <i>Speciality Saison</i>   |
|   |   | 71. <i>Sour Ale</i> estilo belga   |
|   |   | 72. <i>Abbey Ale</i> estilo belga  |
|   |   | 73. <i>Tripel</i> estilo belga   |
|   |   | 74. <i>Strong Speciality Ale</i> belga   |
|   |   | 75. <i>Fruit Beer</i> belga  |
|   |   | 76. <i>English Mild</i> o <i>Bitter</i>  |
|   |   | 77. <i>English Ale</i>   |
|   |   | 78. <i>Brown Ale</i> estilo <i>English</i>                                       |
|   |   | 79. <i>Brown Porter</i>  |
|   |   | 80. <i>Robust Porter</i>   |
|   |   | 81. <i>Sweet Stout</i> o <i>Cream Stout</i>                                      |
|   |   | 82. <i>Stout</i> de trigo  |
|   |   | 83. <i>Imperial Stout</i> estilo británico                                       |
|   |   | 84. <i>Old Ale</i> o <i>Strong Ale</i>   |
|   |   | 85. <i>Red Ale</i> estilo irlandés   |
|   |   | 86. <i>Dry Stout</i> clásica estilo irlandés                                     |
|   |   | 87. <i>Export Stout</i>  |
|   |   | 88. <i>Ale</i> estilo escoces  |
|   |   | 89. <i>Scotch Ale</i>  |
|   |   | 90. <i>Golden</i> o <i>Blonde Ale</i>  |
|   |   | 91. <i>Pale Ale</i> estilo estadounidense  |
|   |   | 92. <i>Juicy</i> o <i>Hazy Pale Ale</i>  |
|   |   | 93. <i>Strong Pale Ale</i> estilo estadounidense                                 |
|   |   | 94. <i>Juicy</i> o <i>Hazy Strong Pale Ale</i>                                   |
|   |   | 95. <i>Imperial India Pale Ale</i>   |
|   |   | 96. <i>Juicy</i> o <i>Hazy Imperial India Pale Ale</i>                           |
|   |   | 97. <i>Amber/Red Ale</i> estilo estadounidense                                   |
|   |   | 98. <i>Strong Red Ale</i>  |
|   |   | 99. <i>Brown Ale</i> estilo estadounidense                                       |
|   |   | 100. <i>Black Ale</i> estilo estadounidense o <i>Stout</i> estilo estadounidense |
|   |   | 101. <i>Imperial Stout</i> estilo estadounidense                                 |
|   |   | 102. <i>India Pale Ale</i> estilo estadounidense                                 |
| 22. Cerveza libre de gluten                                     | 45. <i>Dark Lager</i> europea                                 |  |
| 23. <i>Ale</i> estilo belga/estadounidense                      | 46. Cerveza alemana estilo <i>Schwarzbier</i>                 |  |
| 24. <i>Sour Ale</i> estilo estadounidense                       | 47. Cerveza alemana estilo <i>Bock</i> o <i>Maibock</i>       |  |
| 25. <i>Sour Ale</i> estilo estadounidense afrutada              | 48. Cerveza alemana estilo <i>Doppelbock</i> o <i>Eisbock</i> |  |
| 26. <i>Brett Beer</i>   | 49. Cerveza estadounidense estilo <i>Lager</i>                |  |
| 27. <i>Mixed-Culture Brett Beer</i>                             | 50. Cerveza estadounidense estilo <i>Lager</i> contemporánea  |  |
| 28. Cerveza madurada en barril de madera                        | 51. Cerveza estadounidense estilo <i>Pilsener</i>             |  |
| 29. Cerveza fuerte madurada en barril de madera                 | 52. Cerveza estadounidense estilo <i>Cream Ale</i>            |  |
| 30. Cerveza <i>Strong Stout</i> madurada en barril de madera    | 53. Cerveza estadounidense estilo <i>Amber Lager</i>          |  |
| 31. Cerveza <i>Sour</i> madurada en barril de madera            |   |  |
| 32. Cerveza <i>Sour</i> madurada en barril de madera y afrutada |   |  |
| 33. <i>Kellerbier</i> o <i>Zwickelbier</i>                      |   |  |
| 34. Cerveza ahumada   |   |  |

La cerveza es una mezcla compleja de más de 3,000 compuestos químicos que reaccionan e interactúan en todas sus etapas de fabricación, influyendo significativamente en sus propiedades sensoriales y con ello, en las preferencias de quien la consume (Anderson, *et al.*, 2019). No obstante, solo varias decenas de los compuestos presentes en la cerveza desempeñan un papel activo, es decir, se involucran directamente en el aroma/sabor/olor que adquiere cuando se consume, **Figura 1.9.**



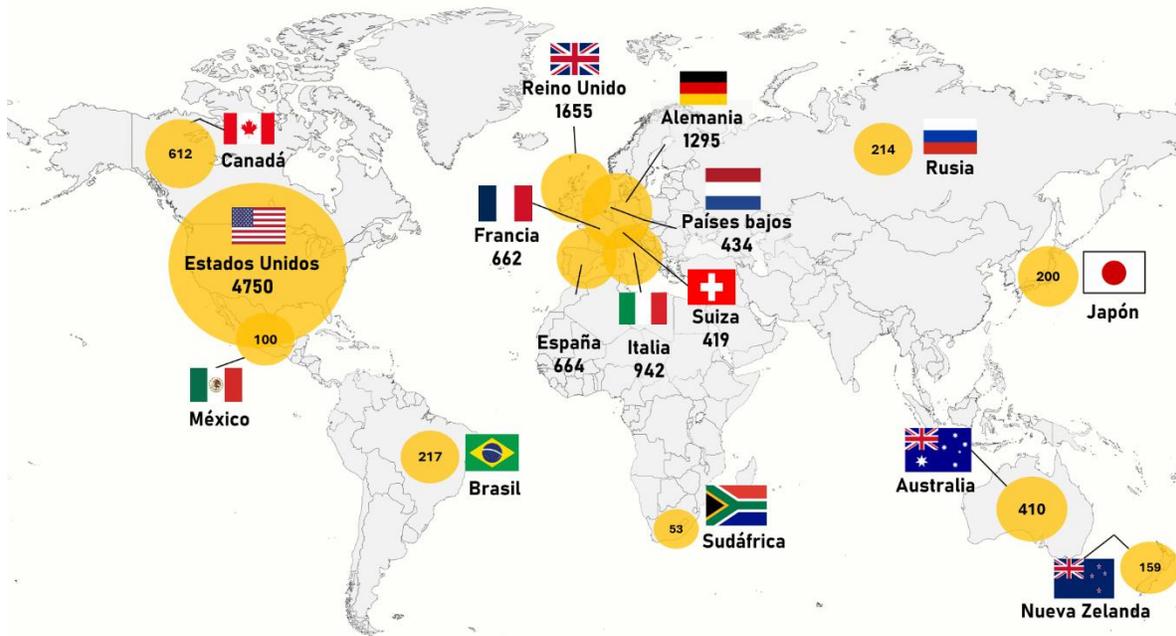
**Figura 1.9. Compuestos químicos presentes en la cerveza y sus ingredientes.**  
 Adaptada de Anderson H., *et al.*, 2019. *A review of the analytical methods used for beer ingredient and finished product analysis and quality control*

## 1.2. Impacto de las cervecías artesanales en el mercado mundial

De acuerdo con la Encuesta Global de Cervecías Artesanales (*Global Craft Beer Survey*), realizada por *Alltech* y *The Brewers Journal* en 2017, el número de

cervecerías en el mundo es mayor a 19,000 y 17,732 (94% de estas) pueden ser consideradas como cervecerías artesanales (Zenith Advisory, 2017).

Estado Unidos es el país con más cervecerías artesanales en el mundo (26.8%), seguido por Reino Unido (9.3%), Alemania (7.3%), Italia (5.3%), España y Francia (3.5%), Canadá (3.5%), Suiza y Holanda (2.4%) y Australia (2.3%), **Figura 1.10**.



**Figura 1.10. Distribución de las cervecerías artesanales en el mundo.**

Elaborada a partir de Zenith Advisory, 2017. *Craft Beer in Europe. The Emergence of Craft Beer*.

Actualmente no existe un consenso global sobre la definición de cervecería artesanal, sin embargo, en las definiciones existentes suele hacerse alusión a las siguientes características:

- a) Dimensiones de la planta cervecera y su producción de cerveza. La Asociación de Cerveceros en Estados Unidos menciona que las cervecerías artesanales son compañías pequeñas que producen  $\leq 6$  millones de barriles de cerveza. Mientras que, la Sociedad de Cerveceros Independientes en Inglaterra (*SIBA* por sus siglas en inglés) considera que las cervecerías artesanales son aquellas que generan menos de 200,000 hL de cerveza por año.
- b) Autonomía de la cervecería. Las cervecerías deben ser económicamente y legalmente independientes de otras cervecerías. En Estados Unidos, las cervecerías se consideran independientes si menos del 25% de la compañía

pertenece a una cervecería industrial, (Benner, 2017; Brewers Association, 2022).

Las cervezas artesanales se caracterizan por emplear materias primas tradicionales y si es el caso, materias primas innovadoras como diferentes mezclas de granos y especias, cultivos de lúpulo y levadura inusuales, hierbas, frutas, vegetales u otros componentes de la región que enaltecen o modifican las características sensoriales del producto. La adición de ingredientes no convencionales a la cerveza puede ayudar a mejorar su perfil sensorial y nutricional. Tal es el caso de la adición de frutas que además de aportar sabor, incrementa la cantidad de compuestos bioactivos en el producto (Villacreces, *et al.*, 2022), **Figura 1.11**.



**Figura 1.11. Ejemplos de cervezas afrutadas y su contenido de compuestos fenólicos.** Elaborada a partir de Nardini y Garaguso, 2020. *Characterization of bioactive compounds and antioxidant activity of fruit beers*; Dos Santos, Azebedo, Muratori y Castilho, 2022. *Physicochemical Characterization of Craft Beers Produced with Passion Fruit (*Passiflora edulis Sims*)*.

Las microcervecerías son conocidas por aplicar una combinación de técnicas tradicionales e innovadoras. Así como, por omitir etapas del proceso como es el caso de la pasteurización y la ultrafiltración; la omisión de estas dos etapas es incluso parte de las especificaciones de la Normativa Italiana referente a la producción de cerveza artesanal (Baiano, 2020).

La producción de cerveza a pequeña o mediana escala y el uso de tecnologías innovadoras, hace posible que las cervecerías artesanales se adapten con mayor

rapidez a los cambios en las tendencias y ofrezcan soluciones más rápidas a las demandas del consumidor en comparación con las cervecerías multinacionales, cuyos proyectos de experimentación, producción y lanzamiento de nuevos productos suelen requerir de un mayor tiempo, dada la complejidad logística, de manufactura, estandarización y estructuración que se asocia al sistema de producción masiva.

Las cervezas artesanales son atractivas para el consumidor debido a su creatividad, variedad, calidad, autenticidad y llamativos empaques que incluyen botellas de vidrio serigrafadas, etiquetas decorativas y con relieves táctiles, *stickers*, entre otros, **Figura 1.12.**



**Figura 1.12. Ejemplo de diseños de envases de cervezas artesanales.**

Comúnmente, se venden dentro de las plantas productoras de cerveza, bares, restaurantes, tiendas minoristas y de autoservicio. Sus principales consumidores son hombres jóvenes (21-35 años), con educación superior, mediano ingreso y especial interés en los productos locales y de alta calidad (Baiano, 2020).

A pesar de que las cervecerías artesanales suelen poseer menores dimensiones y generar una menor cantidad de cerveza por año con respecto a las cervecerías industriales, el impacto medio ambiental de ambos sectores se considera similar. Las microcervecerías consumen una mayor cantidad de energía (0.65 kWh por litro de cerveza) en comparación con las grandes cervecerías (0.43 kWh por litro de cerveza) y su consumo de agua (3-10 L por litro de cerveza) difiere ligeramente con

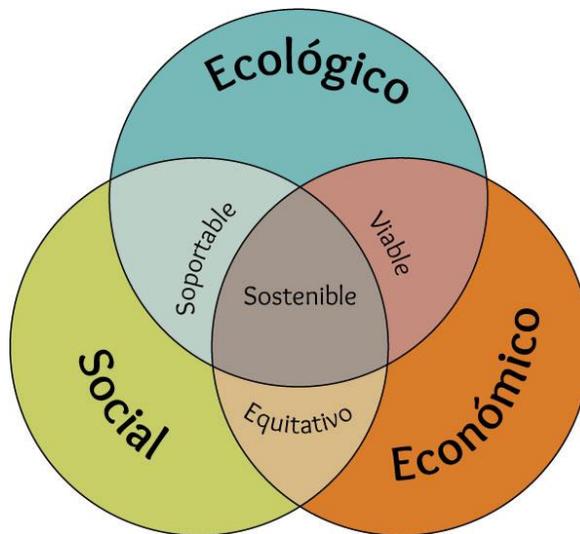
el intervalo asociado a un proceso de elaboración de cerveza eficiente (máx. 7 L/ 1 L de cerveza), (Hoalst-Pullen, *et al.*, 2014; Baiano, 2020).

La Industria Cervecera Artesanal también juega un papel importante en la generación de residuos. Se estima que, por cada 1,000 litros de cerveza se obtienen alrededor de 7,000 litros de agua residuales y de 143 a 207 kg de sólidos (Karlović, *et al.*, 2020). La gestión de residuos por parte de los cerveceros artesanales comprende su esparcimiento en vertederos y su incineración, así como su venta o donación a granjas locales como pienso animal. La incineración del material orgánico favorece la producción de gases de efecto invernadero (vapor de agua, CO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>), así como la liberación de metales pesados, dioxinas y furanos con efectos tóxicos, carcinogénicos y mutagénicos. Lo anterior, contribuye a la contaminación del aire y tiene efectos negativos en la salud y calidad de vida de la población (Blahuskova y Jancar, 2019; Gómez, *et al.*, 2021). Por otro lado, el manejo inadecuado de los subproductos puede dar lugar a la proliferación de fauna nociva (hongos filamentosos y bacterias), generación de gases de efecto invernadero (metano y CO<sub>2</sub>) y la eutrofización de los sistemas acuáticos (Rhys, *et al.*, 2021; Rivadeneira, 2020; García, 2022).

Para mitigar el impacto ambiental del proceso de elaboración cerveza artesanal y promover una mejor gestión de los residuos, es necesario buscar un mayor rango de alternativas que permitan la instauración de un sistema de economía circular que beneficie a las cervecerías.

El desarrollo sustentable aplicado a la fabricación de cerveza comprende tres aspectos:

- a) Económico. Mantener la viabilidad económica y estimular el desarrollo financiero al aplicar prácticas de sostenibilidad ambiental.
- b) Medio ambiental. Promover la responsabilidad ambiental a fin de tener un negocio funcional con tasas estables de agotamiento de recursos.
- c) Social-cultural. Respaldar a las comunidades y constructos sociales caracterizados por su diversidad, equidad y relaciones sociales. Así como, promover la salud y la calidad de vida de los individuos, (Hoalst-Pullen, *et al.*, 2014; Larrouyet, 2015), **Figura 1.13.**



**Figura 1.13. Pilares de la sustentabilidad,** <https://bit.ly/3GXMZ5m>

Las empresas deben ser conscientes de las consecuencias que tienen sus actividades en todos los niveles sociales: trabajadores, proveedores, clientes, comunidades (locales y regionales) y sociedad en general.

La sustentabilidad y el especial interés por los productos locales son las principales razones por las que los consumidores prefieren las cervezas artesanales a las de fabricación industrial, por lo que convertirse en una empresa sustentable representa un área de oportunidad para aquellas cervecerías artesanales que desean implementar actividades sustentables que permitan reducir el impacto ambiental y mejorar sus ventas. Los consumidores se sienten más atraídos a aquellas marcas que son percibidas como sustentables e incluso están dispuestos a pagar más por una cerveza que ha sido elaborada bajo esas características (Carley y Yahng, 2018).

### **1.3. Impacto de las cervecerías artesanales en el mercado latinoamericano y nacional**

De acuerdo con la Organización Mundial de la Salud (OMS), los países latinoamericanos son los más heterogéneos en términos de preferencias en el consumo de bebidas alcohólicas. No obstante, la cerveza es la bebida preferida en 11 de los 23 países que conforman la región (Toro, 2017).

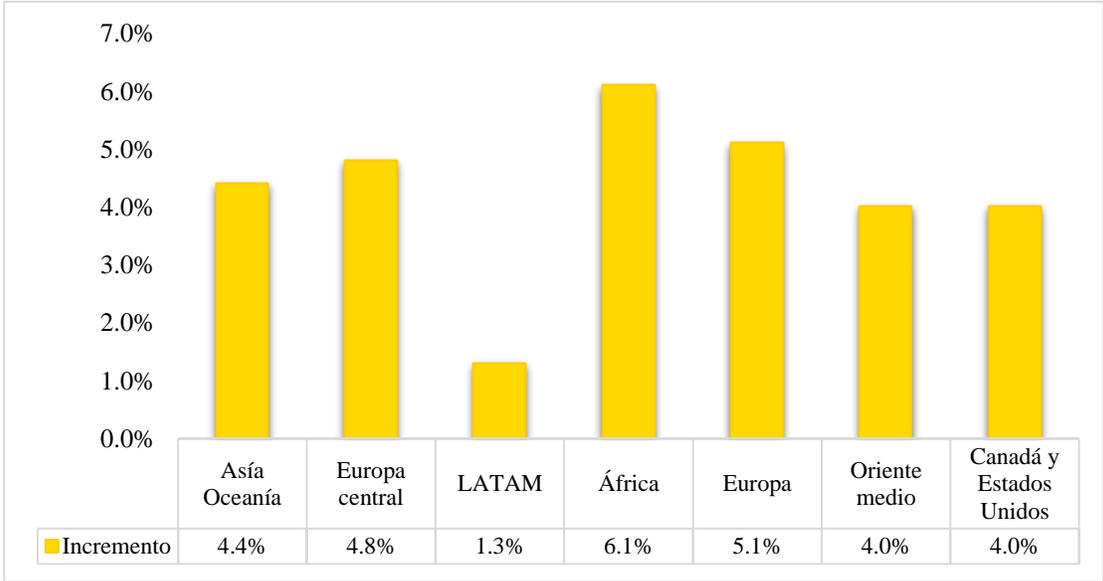
En México, la cerveza representa alrededor del 93.3% del total de las bebidas alcohólicas consumidas en el país (Gómez, 2015).

México es el tercer lugar con mayor consumo de cerveza en la región latinoamericana. En 2021, se estimó un consumo per cápita de 66.4 L/ año, el cual se encuentra únicamente por debajo de Panamá (71.1 L/año) y Brasil (67.9 L/año), (Kirin Holding, 2022).

La cerveza latinoamericana, suele asociarse a tres criterios:

1. cerveza *Ale* o *Lager*,
2. servida fría y
3. fabricada por grandes cervecerías, generalmente multinacionales.

No obstante, la continua expansión del movimiento de la cerveza artesanal alrededor del mundo, ha promovido la integración de nuevos estilos de cerveza en la región y con ello, la incorporación del sector artesanal en el mercado cervecero latinoamericano. Durante el periodo que comprende 2008-2013, se observó un incremento del 1.3% del sector artesanal en el mercado cervecero latinoamericano (Toro, 2017), **Figura 1.14.**



**Figura 1.14. Incremento del sector artesanal por región (periodo 2008-2013).**

El sector artesanal comenzó su incursión en el mercado mexicano con Gustavo González, quien empezó a producir y vender cerveza artesanal en 1995 y es

fundador de la “Cervecería Cosaco” (2000), ubicada en la Ciudad de México. A este suceso, le sigue la creación del restaurante-bar “Beer Factory” (1997), la “Cervecería Minerva” ubicada en Guadalajara, Jalisco y fundada por Jesús Briseño (2004) y la “Cervecería Primus”, ubicada en San Juan del Río, Querétaro y fundada por Jaime y Rodolfo Andreu (2006). En 2008 se crea la “Cervecería Calavera”, fundada por Björn Gilbert Nielsen y Elizabeth Rosas en Naucalpan, Estado de México. Esta última, se caracteriza por incorporar a sus cervezas ingredientes representativos de México como el chocolate, el café y diferentes tipos de chiles (morita, guajillo, ancho y chipotle), así como componentes frutales que evocan las fiestas decembrinas (Bernáldez, 2013; Guillén, *et al.*, 2016), **Figura 1.15.**



**Figura 1.15. Cervezas representativas de las primeras cervecerías artesanales mexicanas.**

En 2007, la “Cervecería Minerva” funda la Asociación de Cerveceros Artesanales e Independientes de México (ACERMEX), la cual es la encargada de velar por los derechos de los cerveceros artesanales en el país y es la responsable de la creación del sello de cerveza artesanal mexicana. Esta asociación pretende favorecer la identificación de aquellas cervezas elaboradas por cervecerías artesanales mexicanas y que cumplen con los siguientes criterios:

- a) Independientes: no pertenece a ningún grupo cervecero mayoritario de la categoría.
- b) Artesanales: se apegan a la Ley de la Pureza de Baviera.
- c) Pequeñas: producen menos del 1% de la producción total del país. Aproximadamente 189,250 hL cerveza al año.
- d) Mexicanas: producidas dentro del territorio nacional, (The Beer Times, 2022; Cerveza Minerva, 2022).



**Figura 1.16. Sello Independiente de ACERMEX,**  
<https://bit.ly/3Li4ksp>

A partir del año 2011, la Industria Cervecería Artesanal Mexicana comienza a mostrar un crecimiento sostenido. La participación del sector artesanal pasa del 0.01% en 2011 al 0.16% en 2018, con un crecimiento anual del 53.29% durante el periodo 2011-2018 (Expansión, 2019).

En 2013, la Comisión Federal de Competencia Económica (COFECE) limita hasta en un 75% los contratos de exclusividad en la distribución de cerveza establecidos entre tiendas y restaurantes del país con Grupo Modelo y Grupo Cuauhtémoc-Moctezuma, a fin de facilitar la distribución de las cervezas artesanales a lo largo del país e impulsar el crecimiento de las microcervecerías.

La tendencia de las grandes cervecerías industriales por adquirir cervecerías artesanales, se hace presente en México cuando en 2015 AB InBev adquiere “Cervecería Tijuana”, “Cervecería Cucapá”, “Cervecería Bocanegra” y “Cervecería Mexicana”.

En 2017 Heineken se asocia con la “Cervecería Primus”. Dicho acuerdo, permite a la “Cervecería Primus” conservar su independencia y autonomía y compromete a

Heineken a colaborar en la distribución y comercialización de sus cervezas artesanales, (Deloitte, 2017; Expansión, 2019).

En 2018 se produjeron 119,970,320 hectolitros de cerveza en México, de los cuales 189,250 hectolitros fueron generados por cervecerías artesanales. Los estilos de cerveza más vendidos por las cervecerías artesanales en el país, fueron: *Pale Ale* (19.30%), *IPA* (18.23%), *American Stout* (10.19%), *Amber o Red Style* (8.58%) y *Golden o Blonde Ale* (7.24%), (ACERMEX, 2018).

Actualmente, se estima que existen al menos 940 cervecerías artesanales en el país, entre las que se encuentran las cervecerías: Baja Brewing Company y Wendlandt (Baja California); Hidalgo (Zempoala, Hidalgo); Minerva (Guadalajara, Jalisco); La Brū (Morelia, Michoacán); Calavera y Octavia (Estado de México); Monstruo de Agua y Jack (Ciudad de México); Cerveza Tepozteca (Tepoztlán, Morelos); Primus y Cuatro Palos (Querétaro); Bayernbräu (San Jorónimo Caleras, Puebla); Cervecería de Colima (El Trapiche, Colima); La Legendaria y Siete Barrios (San Luis Potosí) y Sierra Madre Brewing (Monterrey, Nuevo León), (Bernáldez, 2013; Expansión, 2021; ELFENEMEX, 2022).

## 2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

La competitividad y el crecimiento de las microcervecerías mexicanas, se ven afectados principalmente por los siguientes factores:

- Desproporciones en la carga fiscal. En México, las cervecerías deben pagar el Impuesto Especial sobre Productos y Servicios (IEPS) que establece una tasa del 26.5% al precio de venta final de la cerveza. Se estima que los cerveceros artesanales pagan un IEPS de \$1,000/hL de cerveza, mientras que los cerveceros industriales un IEPS de \$300/ hL de cerveza.  
Dado que las microcervecerías no gozan del mismo margen financiero que las cervecerías industriales, el impuesto aplicado a la cerveza reduce la capacidad de los pequeños productores para producir y distribuir sus productos e incentiva la producción de grandes volúmenes de cerveza a bajo costo, incluso si ello implica la disminución de la calidad del producto.
- Empleo de un modelo de producción lineal. Este modelo se basa en “producir, consumir y desechar” y su aplicación tiene como consecuencia la acumulación de materia orgánica, cuya disposición representa un gasto adicional a los gastos de producción. Además, el manejo inadecuado del material orgánico favorece la contaminación ambiental.
- Falta de un sistema de gestión de residuos. Las cervecerías artesanales no suelen llevar un control de la cantidad de residuos que generan y/o almacenan. Cuando las fábricas se encuentran en áreas rurales, los residuos generalmente se transportan a granjas locales donde suelen ser usados como pienso o fertilizante. Mientras que, en zonas urbanas los residuos se queman o almacenan (a veces a la intemperie) para posteriormente, ser dispuestos en vertederos.
- No contar con un plan de valoración de residuos y aprovechar los subproductos. Los subproductos del proceso de elaboración de cerveza, pueden generar un ingreso monetario a la compañía cuando existe un plan de acción que permite convertirlos en un producto con valor agregado. En 2022 Colpo, *et al.*, determinaron la factibilidad y rentabilidad de crear una refinería

que recolectara el grano gastado de 14 cervecerías artesanales ubicadas en Porto Alegre, Brasil y lo convirtiera en harina para panificación. El retorno de inversión en el 64% de los casos, fue de 4 años y considerando un 10% de comisión, las ganancias para cada cervecería artesanal estuvieron en un rango de 399 a 761 dólares estadounidenses por cada 26,501 kg de harina producida. Cabe destacar que los beneficios para la compañía no se limitan a las ganancias monetarias, pues también se reduce el impacto ambiental asociado a las actividades de la empresa y se mejora la imagen de la marca ante el consumidor (EL ECONOMISTA, 2017; Saldaña, 2018; Cruz, 2020; EXPANSIÓN, 2021; Tamashiro, 2021; Colpo, *et al.*, 2022).

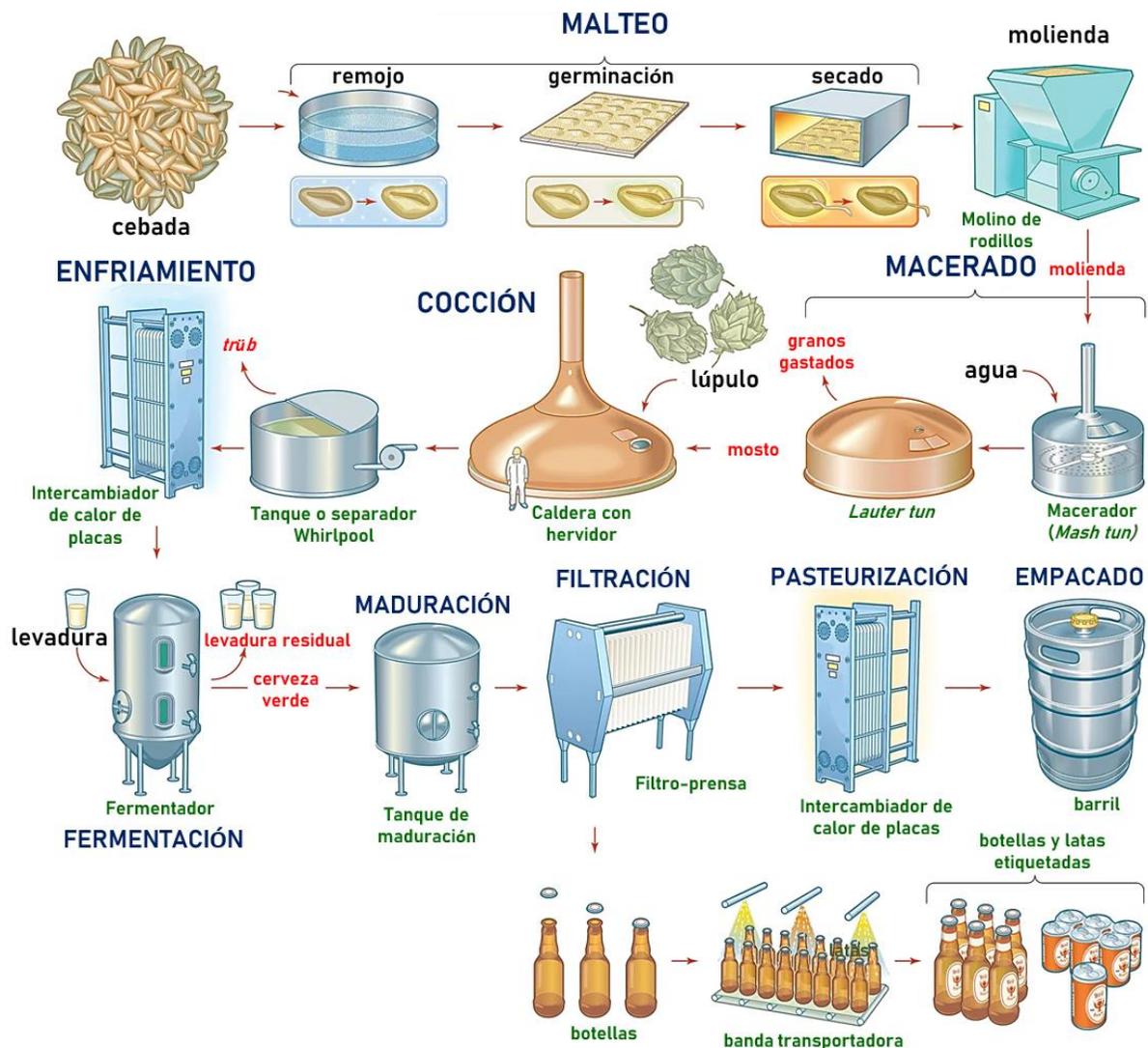
Si bien adoptar un modelo de producción más sustentable en el que se prioriza el aprovechamiento de los subproductos, no soluciona todas las problemáticas a las que debe enfrentarse el sector artesanal al competir con el sector industrial, es una medida que puede llegar a mejorar la competitividad e impulsar el crecimiento de las microcervecerías, sin que ello implique que renuncien a su independencia y autonomía, o bien asuman riesgos incosteables o insostenibles.

### **3. OBJETIVO GENERAL**

Realizar una recopilación documental actualizada de las características y propiedades de los principales subproductos generados en la elaboración de la cerveza como grano agotado, *trüb* y levadura residual. Con base en dicha información, se pretende identificar los procedimientos que pueden colaborar en la creación de una Industria Cervecera más sustentable, mejorar las prácticas de las cervecerías artesanales y generar áreas de oportunidades.

## 4. CERVEZA

El proceso de elaboración de cerveza consta de varias operaciones sucesivas: malteo, molienda, maceración, ebullición del mosto, enfriamiento del mosto, aireación estéril, inoculación de la levadura, fermentación, maduración, clarificación, filtración y envasado. **Figura 4.1.**



**Figura 4.1. Proceso de elaboración de cerveza.**

Adaptada de Enciclopedia Britannica, 2023. *Beer production process.*

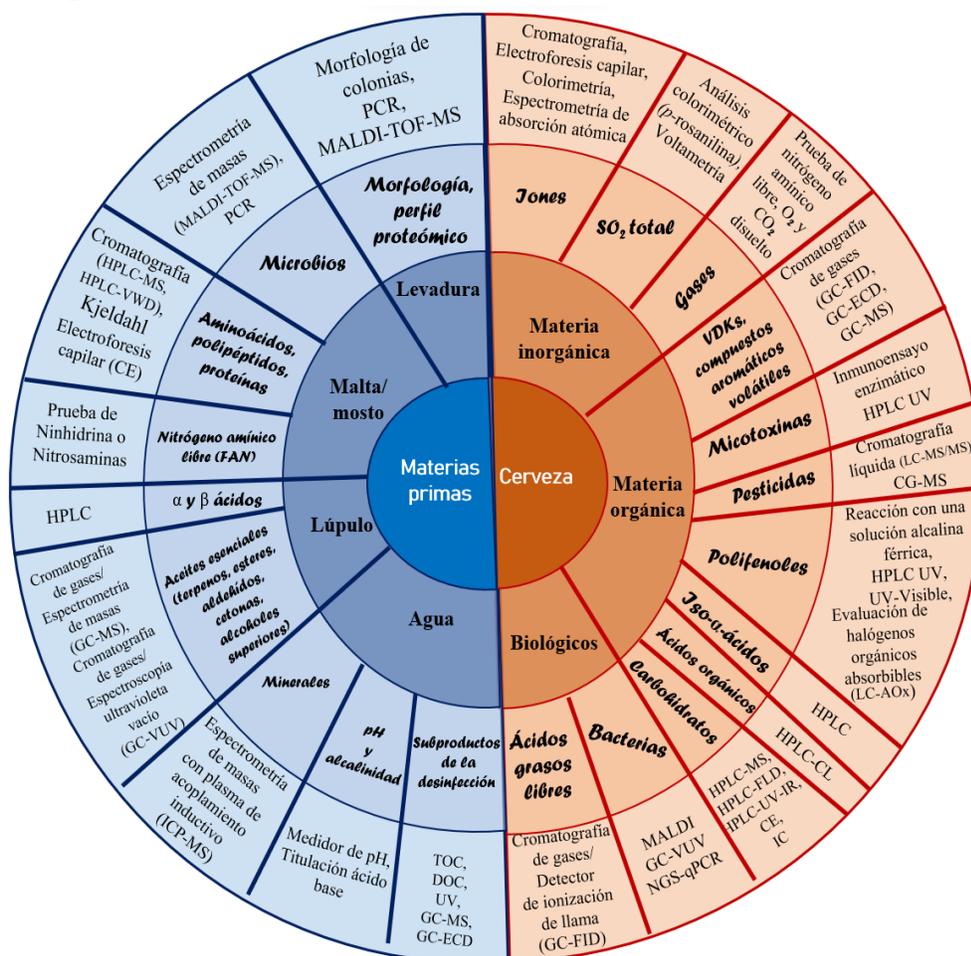
La gran mayoría de los procesos empleados para la elaboración de cerveza, se fundamentan en conocimientos transmitidos de generación en generación que han

servido como base para la investigación científica y el desarrollo de avances tecnológicos en el área (Buiatti, 2008).

Aunque no existe un mecanismo completo y preciso sobre la formación del aroma y sabor de la cerveza, se sabe que este perfil se encuentra influenciado por:

- a) Agua
- b) Malta empleada y lúpulo
- c) Subproductos del metabolismo de la levadura
- e) Estabilidad del sabor/aroma durante la maduración del producto.

La selección de ingredientes de alta calidad y el empleo de métodos analíticos que permitan conocer a mayor detalle los componentes de la cerveza durante el proceso de elaboración, permiten a los fabricantes determinar las especificaciones de las materias primas y garantizar la calidad de los lotes del producto, (Anderson, *et al.*, 2019). Algunos de los métodos empleados en el laboratorio, se resumen en la **Figura 4.2.**



**Figura 4.2.** Métodos analíticos empleados en la determinación de los componentes de las materias primas y la cerveza. Adaptada de Anderson H., *et al.*, 2019. A review of the analytical methods used for beer ingredient and finished product analysis and quality control.

A continuación, se presenta una descripción de las materias primas empleadas en la elaboración de cerveza y su procesamiento para la obtención del producto final:

#### **4.1. Agua**

El agua potable es el ingrediente principal en términos cuantitativos, pues constituye del 90 al 95% de la cerveza. De acuerdo con la “Modificación a la Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-1994 (22-11-2000). Salud Ambiental, Agua Para Uso y Consumo Humano- Límites Permisibles de Calidad y Tratamientos a los que debe someterse el Agua para su Potabilización”, el agua para uso y consumo humano es aquella que no contiene contaminantes objetables (sean químicos o agentes infecciosos) y no cause efectos nocivos al ser humano.

De manera natural, el agua empleada en la elaboración de cerveza contiene sales disueltas provenientes de los estratos por los que circula, las cuales pueden tener efectos negativos o positivos en la calidad de la cerveza dependiendo de su concentración y naturaleza.

El agua superficial proveniente de lagos, ríos y arroyos en donde se precipita el agua, suele tener un alto contenido de materia orgánica y bajas concentraciones de minerales (<50 ppm), por lo que usualmente requiere de un proceso de filtración y desinfección con cloro que permita la remoción de la materia orgánica y la eliminación de parásitos y bacterias. Mientras que, el agua proveniente de acuíferos subterráneos, usualmente presenta un bajo contenido de materia orgánica, pero altas concentraciones de minerales disueltos (>50 ppm y en ocasiones >100 ppm). Generalmente, las aguas subterráneas no requieren de un proceso de filtración y el grado de desinfección con cloro suele ser menor que el de las aguas superficiales. No obstante, pueden requerir de tratamientos de desmineralización que prevengan la generación de depósitos minerales en los contenedores.

Uno de los problemas más comunes que se da como resultado de la desinfección con cloro es la presencia de un fuerte sabor/olor característico de esta sustancia, lo cual puede derivar en sabores/olores desagradables y medicinales en la cerveza, por lo que es necesario asegurarse de remover los residuos de cloro antes de usar el agua. Así mismo, resulta necesario conocer cuáles minerales se encuentran

presentes en el agua y su concentración, pues esto puede afectar el sabor del producto final (Anderson, *et al.*, 2019).

Conviene destacar que la calidad del agua empleada en la elaboración de cerveza es dependiente del tipo de cerveza que se desee elaborar, así como de los parámetros que el fabricante haya tomado en consideración. Algunos de los parámetros del agua que tienen un efecto en la calidad del producto final son:

- a) concentraciones de iones metálicos,
- b) pH y
- c) presencia de microorganismos y/o subproductos de la desinfección.

#### a) Concentraciones de iones metálicos

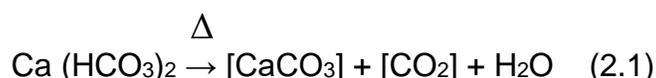
Los principales iones presentes en el agua son calcio ( $\text{Ca}^{2+}$ ), magnesio ( $\text{Mg}^{2+}$ ), sodio ( $\text{Na}^+$ ), potasio ( $\text{K}^+$ ), sulfato ( $\text{SO}_4^{2-}$ ), cloruro ( $\text{Cl}^-$ ), bicarbonato ( $\text{HCO}_3^{1-}$ ), carbonato ( $\text{CO}_3^{2-}$ ), nitrato ( $\text{NO}_3^{1-}$ ) y nitrito ( $\text{NO}_2^{1-}$ ), aunque es posible que existan trazas de otros elementos como hierro ( $\text{Fe}^{2+}$ ), cobre ( $\text{Cu}^{2+}$ ), zinc ( $\text{Zn}^{2+}$ ) y manganeso ( $\text{Mn}^{2+}$ ). La presencia de estos últimos generalmente se evita, debido a que pueden tener efectos negativos como ser prooxidantes o modificadores del sabor, olor y/o apariencia deseados en la cerveza (Buiatti S., 2008), **Tabla 4.1.**

**Tabla 4.1. Concentraciones de aniones y cationes en algunos estilos de cerveza.** La concentración de los iones se encuentra en partes por millón o ppm. Palmer J., 2017. *How to Brew.*

| Ciudad    | Estilo de cerveza     | Calcio ( $\text{Ca}^{2+}$ ) | Magnesio ( $\text{Mg}^{2+}$ ) | Bicarbonato ( $\text{HCO}_3^{1-}$ ) | Sodio ( $\text{Na}^+$ ) | Cloruro ( $\text{Cl}^{1-}$ ) | Sulfato ( $\text{SO}_4^{2-}$ ) |
|-----------|-----------------------|-----------------------------|-------------------------------|-------------------------------------|-------------------------|------------------------------|--------------------------------|
| Pilsen    | <i>Pilsener</i>       | 7                           | 2                             | 16                                  | 2                       | 6                            | 8                              |
| Dublín    | <i>Dry stout</i>      | 120                         | 4                             | 315                                 | 12                      | 19                           | 55                             |
| Dortmund  | <i>Export Lager</i>   | 230                         | 15                            | 235                                 | 40                      | 130                          | 330                            |
| Viena     | <i>Vienna Lager</i>   | 75                          | 15                            | 225                                 | 10                      | 15                           | 60                             |
| Múnich    | <i>Dunkel</i>         | 77                          | 17                            | 295                                 | 4                       | 8                            | 18                             |
| Londres   | <i>British Bitter</i> | 70                          | 6                             | 166                                 | 15                      | 38                           | 40                             |
| Edimburgo | <i>Scottisch Ale</i>  | 100                         | 20                            | 285                                 | 55                      | 50                           | 140                            |
| Burton    | <i>India Pale Ale</i> | 275                         | 40                            | 270                                 | 25                      | 35                           | 610                            |

*Dureza del agua.* Los iones calcio y magnesio son los iones responsables de la dureza del agua. La dureza del agua se puede clasificar en:

- (i) Temporal. Los iones calcio y magnesio provienen de sales de ácidos débiles como carbonatos o bicarbonatos. Cuando el agua se evapora, se forma un precipitado blanco que puede separarse por precipitación de acuerdo a la siguiente reacción:



- (ii) Permanente. Los iones calcio y magnesio provienen de sales de ácidos minerales solubles en agua como es el caso del cloruro de magnesio ( $\text{MgCl}_2$ ) y el sulfato de calcio ( $\text{CaSO}_4$ ), por lo que no es posible separar las sales del agua.

Cabe mencionar que concentraciones bajas de calcio y magnesio son necesarios en el proceso de elaboración de cerveza, pues permiten mantener activa a la levadura, así como favorecen la fermentación y la clarificación de la cerveza. Un resumen de la presencia de iones en el agua utilizada para la elaboración de cerveza se resume en la **Tabla 4.2.**

**Tabla 4.2. Función de los iones presentes en el agua empleada en la elaboración de cerveza.** Palmer J., 2017. *How to Brew.*

| Ion                           | Mínimo Sugerido | Máximo Sugerido | Función  |
|-------------------------------|-----------------|-----------------|--|
| Calcio ( $\text{Ca}^{2+}$ )   | 50 ppm          | 50-100 ppm      | Determina la dureza del agua junto con el $\text{Mg}^{2+}$ .<br>Es una sustancia insípida que protege, estabiliza y promueve la actividad enzimática durante el macerado.                                    |
| Magnesio ( $\text{Mg}^{2+}$ ) | 5 ppm           | 0-30 ppm        | Determina la dureza del agua junto con el $\text{Ca}^{2+}$ y es un nutriente vital para la levadura. Elevadas concentraciones de $\text{Mg}^{2+}$ generan un sabor amargo y ácido, indeseable en la cerveza. |

| Ion   | Mínimo Sugerido | Máximo Sugerido       | Función  |
|---|-----------------|-----------------------|--|
| Alcalinidad total como $\text{CaCO}_3$ (bicarbonato, $\text{HCO}_3^-$ ) | N/A             | 0-100 ppm (0-120 ppm) | La alcalinidad incrementa el pH del mosto y la cerveza, causando astringencia. Hay un mayor nivel de tolerancia al valor de alcalinidad en cervezas oscuras, donde esta equilibra la acidez de las maltas oscuras. |
| Sodio ( $\text{Na}^+$ )   | N/A             | 0-100 ppm             | A bajas concentraciones, puede resaltar el sabor dulce de la malta. A altas concentraciones puede interactuar con el cloruro y aportar un sabor salado a la cerveza, o bien proporcionar un sabor metálico.        |
| Cloruro ( $\text{Cl}^-$ )   | N/A             | 50-150 ppm            | Acentúa el sabor a malta, así como la dulzura y el cuerpo de la cerveza. Altas concentraciones de iones $\text{Cl}^-$ pueden llegar a crear una cerveza demasiado empalagosa, así como corroer el equipo.          |
| Sulfato ( $\text{SO}_4^{2-}$ )  | N/A             | 50-400 ppm            | Aumenta el "tiempo de permanencia" del amargor y acentúa el sabor a lúpulo. Además, añade sequedad a algunas cervezas. A concentraciones $>400$ ppm, el sabor de la cerveza se vuelve desagradable.                |

## b) pH

El pH (potencial de hidrógeno) es usado como indicador general del balance entre la dureza y la alcalinidad del agua. Se considera el parámetro mínimo a controlar en el análisis del agua. En la Industria Cervecera suele medirse empleando un medidor digital, **Figura 4.3**.



**Figura 4.3. Medidor de pH.** HANNA® Instruments, <https://bit.ly/3GsGMhx>

El agua potable tiene un pH de 7.5-8.5 y generalmente, presenta un mayor grado de alcalinidad que de dureza. Por si solo, el valor del pH no aporta suficiente información que permita conocer si el agua empleada es adecuada para la elaboración de cerveza, pues para ello también se requiere conocer la alcalinidad total del agua.

*Alcalinidad total de agua.* Suma de carbonatos ( $\text{CO}_3^{2-}$ ) y bicarbonatos ( $\text{HCO}_3^-$ ) disueltos en el agua. Se mide por titulación ácido-base y equivale a la cantidad total de ácido de concentración conocida necesario para titular la muestra de agua desde su pH original (típicamente de 7-9) a un pH de 4.3. Se representa en miliequivalentes por litro (mEq/L).

La alcalinidad total usualmente es convertida a “alcalinidad total como  $\text{CaCO}_3$ ”, pues el bicarbonato de calcio es responsable de alrededor del 97% de la alcalinidad del agua. Para estimar la alcalinidad total del agua se emplea la siguiente ecuación:

$$\text{Alcalinidad total CaCO}_3 \text{ (ppm)} = (50/61) \times [\text{HCO}_3^-] \quad (2.2)$$

La alcalinidad del agua puede aumentar el pH del mosto y dar lugar a la extracción de compuestos fenólicos caracterizados por tener un prolongado y áspero sabor amargo, así como favorecer el incremento del pH en el producto final.

*Alcalinidad residual.* La alcalinidad residual (RA) es una medida de la cantidad de iones básicos que pueden impactar el pH del agua. Debido a la presencia de carbonatos y bicarbonatos complejados con el calcio y el magnesio disponible, la alcalinidad residual de una muestra de agua se obtiene de la siguiente manera:

$$\text{Alcalinidad residual (ppm)} = \text{Alcalinidad total (ppm)} - \left( \frac{\text{ppm Ca}}{1.4} + \frac{\text{ppm Mg}}{1.7} \right) \quad (2.3)$$

La alcalinidad residual es el resultado del efecto combinado de la alcalinidad y la dureza del agua. El pH del mosto se reduce a medida que se incrementa la dureza

del agua. Mientras que, el pH del mosto se incrementa a medida que se aumenta la alcalinidad del agua. El pH del mosto puede tener un efecto en la conversión del almidón en azúcares fermentables, la concentración de nitrógeno, la clarificación, la fermentación y el rendimiento de la cerveza.

Las cervezas *Lager* poseen un pH de 4.0-5.0, las cervezas *Ale* un pH de 3.0 a 6.0 y las cervezas *Sour* pueden tener un pH tan bajo como 3.3, **Tabla 4.3.**

**Tabla 4.3. pH de la mezcla de agua y granos en la tina de macerado de algunos estilos de cerveza clásicos y europeos.**

Weyermann T., 2015. *pH in the Brewery.*

| Tipo de cerveza              | Valor de pH |
|------------------------------|-------------|
| <i>Pilsener checa y Bock</i> | 4.50-4.80   |
| <i>Kölsch y Altbier</i>      | 4.15-4.40   |
| <i>Bavarian Hefeweizen</i>   | 4.10-4.40   |
| <i>Ales inglesas</i>         | 4.00-4.20   |
| Lámbica                      | 3.40-3.90   |
| <i>Gueuze y Framboise</i>    | 3.30-4.50   |
| <i>Berliner Weisse</i>       | 3.20-3.40   |

En los últimos 60 años, se han elaborado procedimientos donde se plasman las siguientes recomendaciones para el agua:

- Después de los pretratamientos necesarios para potabilizarla, el agua pasa a través de filtros de carbono que retiran el cloro y otras sustancias que puedan aportar olor, aroma o color.
- El agua empleada en la elaboración de cerveza, debe tener concentraciones de 50 a 100 ppm de iones calcio, 5-40 ppm de iones magnesio y una alcalinidad total <100 ppm CaCO<sub>3</sub>.
- En caso de tener un agua *temporalmente dura*, es necesario llevarla a ebullición y remover el precipitado tras el proceso.

Una lista completa de métodos analíticos aprobados para el análisis del agua bajo la “Ley de Agua Limpia”, puede ser consultada en el sitio web de la EPA (*Environmental Protection Agency*) y en la NOM-SSA1-127-1994 (Modificación 2000).

## 4.2. Cebada

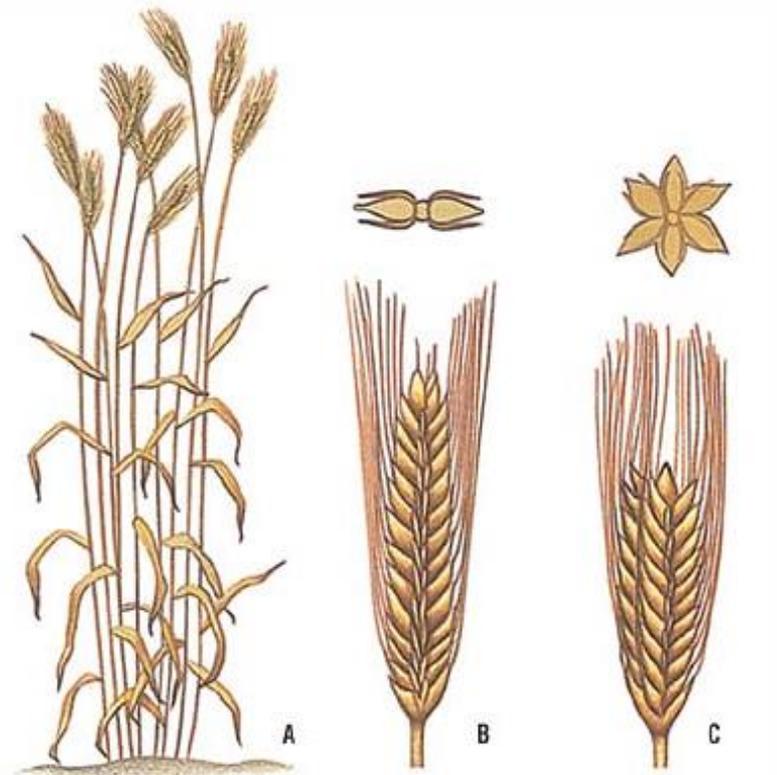
La cebada es una planta perteneciente a la familia de las gramíneas y se cree fue domesticada en Mesopotamia por el año 8500 a. C. a partir de la cebada silvestre (*Hordeum spontaneum*).

En la Industria Cervecera, suelen emplearse dos variedades de cebada que se clasifican según la manera en que los granos se alinean a lo largo de las espiguillas: dos hileras (*Hordeum distichum*) y seis hileras (*Hordeum vulgare*). En ambas variedades existen estructuras barbadas conocidas como aristas que protegen a los granos que crecen alternados en hileras largas y rectas, **Figura 4.4.**

**Figura 4.4. Ilustración de la planta de cebada (A) y dos de sus variedades: cebada de 2 hileras (2H) y cebada de 6 hileras (6H).**

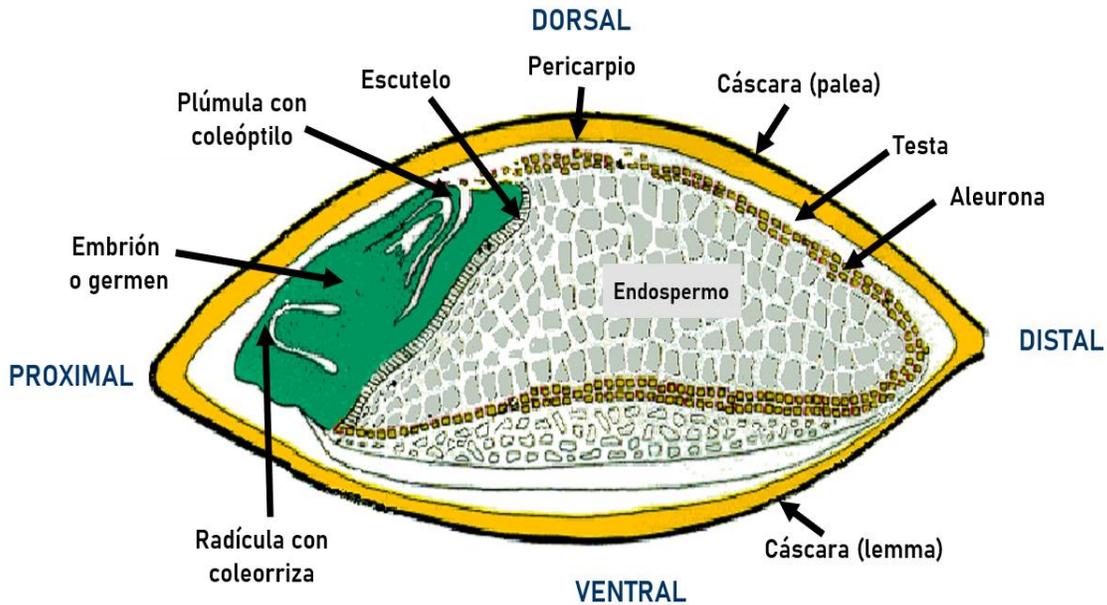
En las cebadas de 2H la espiga solo produce dos hileras de semillas (B), mientras que, en las cebadas de 6H (C) la espiga produce 3 semillas de cada lado o 6 en total.

Pérez J., 2010. *Morfología y taxonomía de la cebada*, <https://bit.ly/3RchC11>



Composición y estructura de la cebada. El grano de cebada contiene alrededor 78-83% carbohidratos totales (63-65% almidón, 3-8%  $\beta$ -glucanos, 4-7% pentosanos y

4-5% celulosa), 10-12% proteínas y aminoácidos, 2-3% lípidos y 2% minerales (Buglass, 2010). Puede dividirse en varias estructuras: embrión, endospermo, pericarpio-testa y cáscara, **Figura 4.5**.



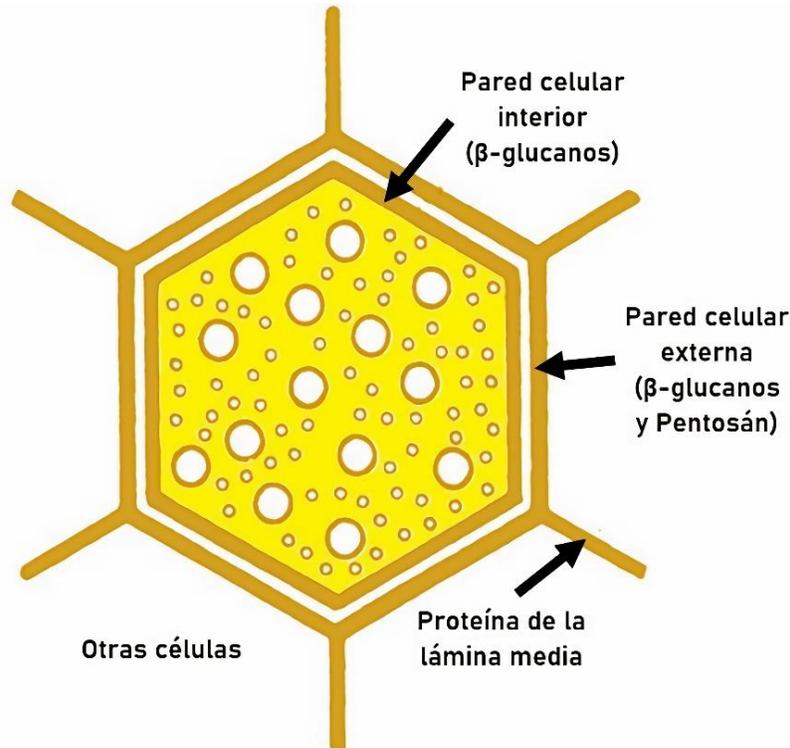
**Figura 4.5. Estructura del grano de cebada.** Elaborada a partir de la información de Mosher M. y Trantham K., 2017. *Brewing Science: A Multidisciplinary Approach*.

El embrión es la estructura viva a partir de la cual se desarrolla la planta de cebada. Comprende poco menos de un tercio del volumen total del grano y ocupa su base proximal. En esta estructura se encuentra la plúmula y el coleóptilo que dan lugar a la parte de la planta que sobresale del suelo, así como la radícula y la coleorriza que se convierten en las raíces de la planta.

Separando al embrión del endospermo se encuentra el escutelo, el cual posee células encargadas de absorber los nutrientes del endospermo a medida que el grano se desarrolla y de producir enzimas que puedan ser usadas para su crecimiento.

El endospermo ocupa la parte distal del grano y contiene principalmente almidón en forma de gránulos cristalinos grandes (25  $\mu\text{m}$ ) o pequeños (5  $\mu\text{m}$ ). Estos gránulos se encuentran contenidos en una matriz proteica que incluye: hordeína (~35%), glutelina (~30%), globulina (~30%) y albúmina (~5%). Tanto el almidón como la matriz proteica se encuentran dentro de células con delgadas paredes celulares

constituidas por proteínas y  $\beta$ -glucanos. Estos componentes aumentan la viscosidad del mosto y la cerveza, aportan turbidez y favorecen la formación de geles (Mosher y Trantham, 2017), **Figura 4.6.**



**Figura 4.6. Representación esquemática de una célula del endospermo de la cebada.** Se observan pequeños y grandes gránulos del almidón embebidos en una matriz proteica y rodeados por la pared celular. La lámina media une las células entre sí.

Adaptada de Lewis M. y Young T., 2001. *Brewing*.

La capa de aleurona también es parte endospermo, pero se encuentra integrada por dos a cuatro células con paredes celulares delgadas. Estas células son una reserva rica en lípidos y gránulos que contienen complejos polisacáridos-minerales-fitina, pero que carecen de almidón. Cuando la capa de aleurona se hidrata, esta reacciona con la hormona ácido giberélico para formar y liberar enzimas al endospermo. Las paredes celulares de las células del endospermo se desintegran, ocasionando la liberación de proteínas y el almidón.

El pericarpio y la testa son dos capas fusionadas que rodean y protegen la parte exterior del grano. El pericarpio es una membrana cerosa y semipermeable, mientras que la testa es una membrana delgada que contiene muchos de los compuestos responsables de la turbidez de la cerveza.

Por último, la cáscara se ubica por encima de la capa pericarpio-testa. Se encuentra conformada por una importante cantidad de sílice, lo cual le da una apariencia áspera y dura al grano. Protege al endospermo durante el proceso mecánico del malteo y forma una cama de filtrado durante el proceso de filtración.

Limpieza del grano de cebada. Los granos de cebada pasan por cribas vibratorias o tamices rotatorios y por corrientes de aire e imanes que remueven la materia extraña (piedras, ramas, hojas, piezas de metal, tierra, etc.). Posteriormente, los granos se someten a una etapa de clasificación. Los granos muy pequeños, dañados o diferentes a los de cebada, se separan haciéndolos pasar por cilindros rotatorios con ranuras pequeñas y esféricas que retienen la materia indeseable en su centro. Los granos restantes, se colocan en cribas vibratorias que separan los granos por tamaño **Figura 4.7.**



**Figura 4.7. Limpieza y selección del grano de cebada.**

La clasificación de los granos se considera relevante, pues permite estandarizar el tamaño y origen de los granos y con ello, tener un mayor control sobre la calidad de la malta y las variaciones entre granos (*“mismas características del grano, mismo tiempo de germinación”*).

### 4.3. Malteo

La malta es la principal fuente de enzimas requeridas para el proceso cervecero y se obtiene mediante el proceso de malteo que refiere a la germinación controlada de la cebada y consta de 3 etapas: remojo, germinación y secado de la malta (Buiatti S., 2008).

#### a) Remojo

Es una etapa crucial en la calidad de la malta, debido a que permite la activación del grano mediante la captación de oxígeno y agua, preparándolo para su germinación. Esta etapa consiste en remojar el grano de cebada en tanques con agua potable y fría (10-15 °C) por alrededor 4-48 h, aumentando de esta manera, la humedad del grano de 10-12% a 42-46% (Lewis y Young, 2001). Se considera adecuado terminar con el remojo, cuando alcanza una humedad entre 40 y 42%.

Terminado el remojo, el agua se drena y el grano se manda a los germinadores, dónde se controla la temperatura y la humedad con aire húmedo.

#### b) Germinación

Etapas donde el grano de cebada es transformado en malta. Tiene una duración de 3 a 5 días a una temperatura inicial de entre 13-16°C. Sin embargo, hacia el término de la germinación, la temperatura puede incrementarse hasta 20 a 22 °C.

Durante la germinación de la cebada, el escutelo del grano produce hormonas denominadas giberelinas que se liberan al endospermo y estimulan a las células de la aleurona para que produzcan una variedad de enzimas diastásicas, **Tabla 4.4.**

**Tabla 4.4. Enzimas generadas durante el crecimiento del grano de cebada.**

Elaborada a partir de información obtenida de Mosher M. y Trantham K., 2017. *Brewing Science: A Multidisciplinary Approach.*

| Enzima            | Función   |
|-------------------|---|
| $\alpha$ -amilasa | Endoenzima que hidroliza enlaces $\alpha$ -(1→4) y $\alpha$ -(1→6) del almidón, produciendo dextrinas y oligosacáridos. |
| $\beta$ -amilasa  | Exoenzima que hidroliza enlaces $\alpha$ -(1→4), produciendo maltosa y dextrinas límite.                                |

| Enzima               | Función  |
|----------------------|--|
| Dextrinasa limitante | Hidroliza enlaces $\alpha$ -(1→6) del almidón.   |
| Glucanasa            | Hidroliza los $\beta$ -glucanos de la pared celular de las células del endospermo del grano. |
| Pentosanasa          | Hidroliza los pentosanos de la pared celular de las células del endospermo del grano.        |
| Proteasa             | Hidroliza las proteínas que forman la pared celular y envuelven el almidón del endospermo.   |
| Fitasa               | Hidroliza el ácido fítico mediante la liberación de grupos fosfato, lo cual reduce el pH.    |

#### c) Secado de la malta

El secado con aire caliente consume aprox. 75%-80% del total de energía empleada en el proceso de malteo y tiene como objetivo reducir la humedad del grano de 45-50% a 3-5%, inactivar parcialmente algunas de las enzimas que promueven la modificación del grano durante la germinación, secar las raicillas del grano y favorecer la generación de un perfil de sabor/olor/color deseable en la malta, dando lugar a maltas “pálidas” a completamente doradas conocidas como maltas base.

El secado de la malta base, se lleva a cabo mediante varios pasos sucesivos. En el primer paso de secado, se hace pasar una gran corriente de aire (50-65°C) sobre la superficie del grano, con la intención de remover el agua superficial y evaporar aromas volátiles indeseables, reduciendo así la humedad de la malta hasta aprox. 23-25%.

En el segundo paso, la malta disminuye su humedad a 10-12%, lo cual genera que el grano disminuya de tamaño. Para optimizar la difusión de la humedad, se disminuye el volumen de aire que circula por el horno y aumentar la temperatura (70-75°C). Cuando la humedad del grano es inferior al 10 a 12%, se considera que el agua que permanece en la malta es agua ligada a las macromoléculas de esta, por lo que, para mantener la eficiencia del secado, se suele disminuir el flujo de aire y aumentar la temperatura hasta alcanzar una humedad del grano del 5%. Una vez alcanzada dicha humedad, se aumenta la temperatura hasta 80-85 °C en el caso

de la malta *Pale Ale* estadounidense y a más de 110°C, para el caso de la malta *Ale* británica (Lewis y Young, 2001). Estas temperaturas se mantienen por 4-5 horas hasta obtener una humedad del grano de 3-4%. Cabe resaltar que la humedad y las temperaturas de secado varían dependiendo del tipo de malta que se desee obtener, tal y como se describirá más adelante. Finalmente, la malta se somete a un proceso de enfriamiento rápido con aire seco y las raicillas que crecieron durante el proceso de germinación, se separan mecánicamente del grano. La malta seca se almacena en silos por alrededor de un mes antes de su uso. El proceso de malteo, puede resumirse en la siguiente tabla:

**Tabla 4.5. Características del proceso de malteo de la cebada.** Elaborada a partir de información obtenida de Lewis M. y Young T., 2001. *Brewing* y Mosher M. y Trantham K., 2017. *Brewing Science: A Multidisciplinary Approach*

| PROCESO            | CONDICIONES   | OBJETIVOS  | FACTORES A CONSIDERAR  |
|--------------------|---|--|--|
| <b>REMOJO</b>      | Temperatura:<br>10-15°C<br><br>Tiempo:<br>4-48 h      | Establecer las condiciones para la activación del grano. Remover el material flotante. Aumentar la humedad del grano de 10-12% a 42-46%, para iniciar el proceso de germinación. | Aireación de los granos. Temperatura del agua.                     |
| <b>GERMINACIÓN</b> | Temperatura:<br>Hasta 22°C<br><br>Tiempo:<br>3-5 días | Transformar la cebada en malta. Favorecer la rotura de la matriz proteica, a fin de que el almidón sea accesible para las enzimas.   | Minimizar las pérdidas por crecimiento y respiración del grano.    |
| <b>SECADO</b>      | Depende del tipo de malta                             | Facilitar la molienda del grano. Disminuir la humedad para garantizar una buena conservación de la malta. Desarrollar el color y aroma requerido por el cervecero.               | Respetar la curva de temperatura/tiempo para no inactivar enzimas. |

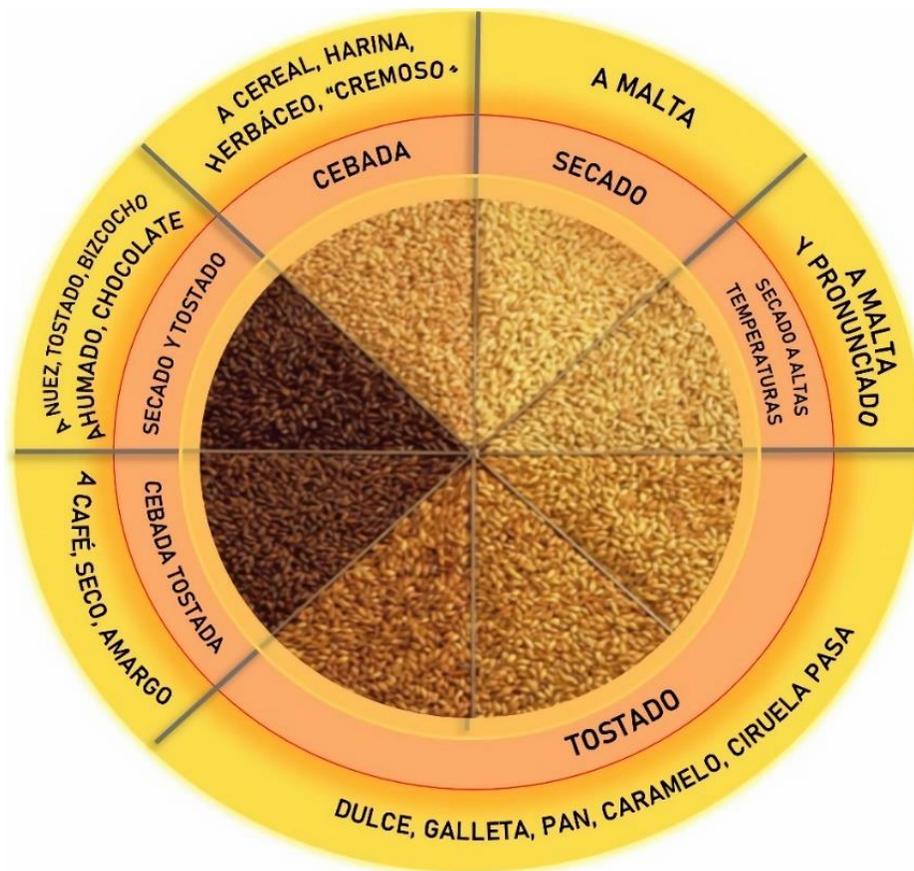
#### a) Malta base y maltas especiales

Las maltas bases comprenden del 70-95% de la malta empleada en la elaboración de cerveza, poseen un alto poder diastásico y por lo general son de colores claros

(1-4 en la escala de Lovibond® o 2-8 en la escala EBC), (Palmer, 2017). Algunos ejemplos de malta base existentes son: malta *Lager* o *Pilsner*, malta *Pale* y malta *Pale Ale*.

Las maltas base cuentan con enzimas diastásicas que son activadas durante el proceso de maceración y modifican el almidón para dar lugar a azúcares fermentables que serán de utilidad en la elaboración de cerveza. No obstante, se requiere de maltas especiales para generar los diferentes perfiles sensoriales característicos de cada estilo de cerveza. Las maltas especiales son el resultado de secar y tostar la malta a determinadas condiciones de tiempo y temperatura. Se emplean en pequeñas cantidades (1-6.0% del total de la malta empleada) y tienen la finalidad de proporcionar sabores, olores y color a ciertos estilos de cerveza,

**Figura 4.8.**



**Figura 4.8. Características de algunas maltas especiales y su modo de obtención.**

Elaborada a partir de Bob ArdaghGlassPacking. *Malt: Identifying its Flavor and What it Means for your Beer*, <https://bit.ly/3Y2sD0Y>

Las características de las maltas especiales pueden provenir de dos tipos de reacciones de oscurecimiento no enzimático:

- a) Reacciones de Maillard. Son asociadas a los procesos de cocción y se llevan a cabo favorablemente a condiciones de pH alcalinos ( $\text{pH} > 7$ ), humedad intermedia ( $0.4-0.9 A_w$ ) y rangos de temperatura de  $60\text{ }^\circ\text{C}-140\text{ }^\circ\text{C}$ . Aunque se ha observado que pueden ocurrir desde los  $49\text{ }^\circ\text{C}$  y a condiciones de pH moderados ( $\text{pH } 5-7$ ).

Las reacciones de Maillard involucran la unión del grupo carbonilo ( $\text{C}=\text{O}$ ) de un azúcar reductor con el grupo amino ( $-\text{NH}_2$ ) de un aminoácido o de una proteína, creando en el proceso melanoidinas (compuestos de color amarillo claro-café oscuro, dependiendo del avance de la reacción) y varios compuestos heterocíclicos volátiles y de bajo peso molecular que aportan aromas y sabor.

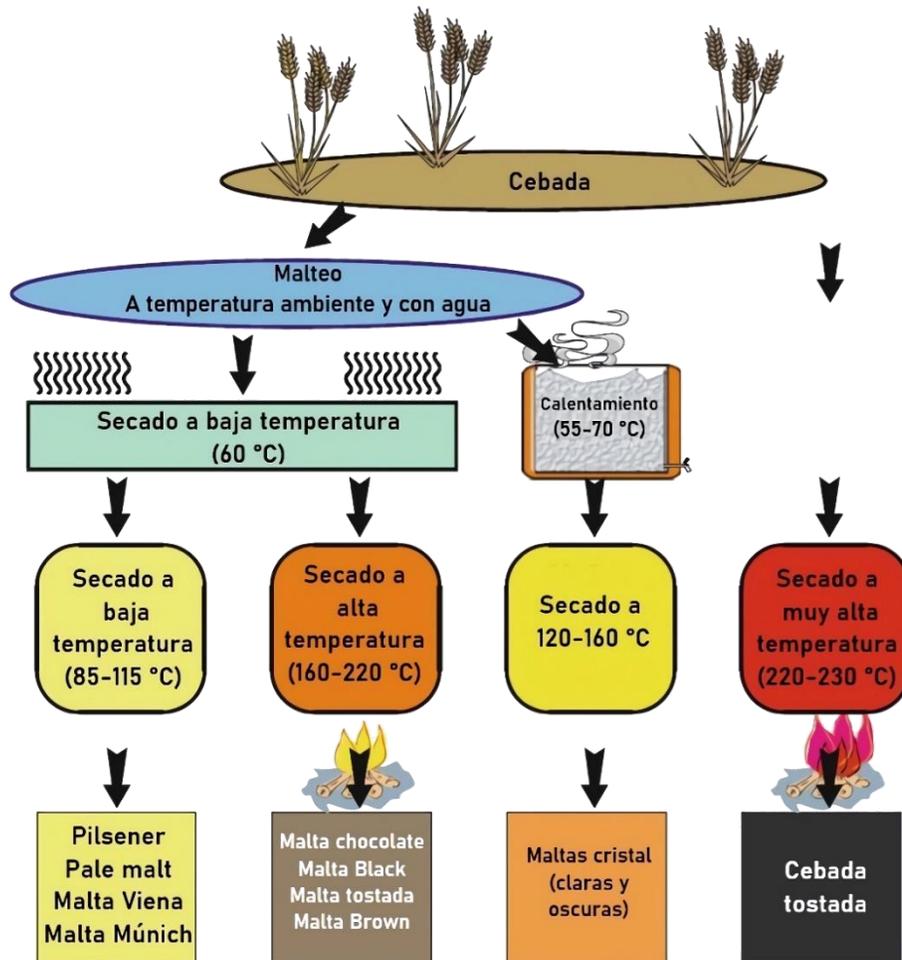
- b) Reacciones de caramelización. Ocurren a altas temperaturas ( $110-160\text{ }^\circ\text{C}$ ) y condiciones de baja humedad y alta concentración de azúcares. El avance de la reacción suele asociarse al pH, siendo lenta a condiciones de pH ácidos ( $\text{pH} < 3$ ) y rápida a condiciones de pH alcalinos ( $\text{pH} > 9$ ). Las reacciones de caramelización involucran la descomposición de azúcares reductores y dan como resultado coloraciones rojizas a cafés, así como sabores a caramelo y a *Toffee* (dulce de caramelo y mantequilla).

Calentamientos a temperaturas  $>200\text{ }^\circ\text{C}$ , se asocian a la formación de especies reactivas que pueden polimerizarse y dar lugar a aromas a quemado y pigmentaciones negras en las llamadas “maltas chocolate”.

Las maltas especiales pueden clasificarse en:

- (i) Maltas tostadas a bajas temperaturas. Por lo general, son tostadas a temperaturas  $85-115\text{ }^\circ\text{C}$ . Usualmente se combinan con las maltas base en el proceso de maceración.  
Suelen representar del 10-60% del total de la malta empleada en la elaboración de la cerveza. Tienen coloraciones que van del amarillo claro al dorado (2 a 8

°Lovibond® o 4 a 16 °EBC) y aportan sabores a malta y a costra de pan tostado. Algunos ejemplos son: malta Viena, malta *Aromatic* y malta Múnich.



**Figura 4.9. Esquema de la producción de diferentes tipos de malta a partir de un tipo de grano.** Adaptada de Mosher M. y Trantham K., 2017. *Brewing Science: A Multidisciplinary Approach*.

- (ii) Maltas tostadas a altas temperaturas. Los granos son tostados a altas temperaturas (160-220°C). Las altas temperaturas desnaturalizan las enzimas presentes en el grano y oscurecen o pirolizan su almidón. Este tipo de maltas poseen coloraciones que van desde dorado hasta café oscuro (20-190 °Lovibond® o de 40 a 380 °EBC), proporcionan sabores a costra de pan tostado y frecuentemente, son utilizadas en la elaboración de cervezas *Stouts* y *Portiers*. Algunos ejemplos son: malta Ámbar y malta *Brown*.

(iii) Maltas oscuras. Las maltas oscuras se obtienen a partir del tostado a altas temperaturas de la malta base seca y fresca en tostadores de tambor. De esta manera, se desnaturalizan las enzimas necesarias para el proceso de maceración.

Tienen coloraciones que van desde el café al negro (200-700 °Lovibond® o 400 a 1400 °EBC) y contribuyen con sabores a café tostado y chocolate. Algunos ejemplos son: malta chocolate tipo *Pale*, malta chocolate, malta *Pale black*, malta *Black* y malta tostada.

(iv) Maltas cristal o maltas caramelo. Las maltas cristal son llamadas así porque los granos presentan una apariencia vítrea. Se obtienen tras someter los granos germinados (45% humedad) a un calentamiento lento a 65°C/30 min. en tostadores de tambor o por cocimiento en pisos con vapor caliente.

Durante la etapa inicial del calentamiento, se esparce agua sobre el grano, lo cual favorece que las enzimas presentes en el grano se activen y el almidón del grano se convierta en azúcares fermentables (maltosa, maltotriosa y en menor medida glucosa) y no fermentables como las dextrinas. Una vez que el proceso se ha completado, se incrementa la temperatura a 150°C/ 1 hora o más; esta temperatura, carameliza algunos de los azúcares presentes e incrementa su sabor, así como el color de la malta.

Las maltas caramelo representan del 1-15% del total de la malta empleada en la elaboración de cerveza. Tienen una amplia variedad de coloraciones, desde ámbar hasta café oscuro (1-188 °Lovibond® o 2-376 °EBC) y aportan sabores a miel, *Toffee*, caramelo, pastel y pasas. Algunos ejemplos existentes son: malta dextrina, malta caramelo 10, malta caramelo 120, malta cristal *extra dark*, entre otros.

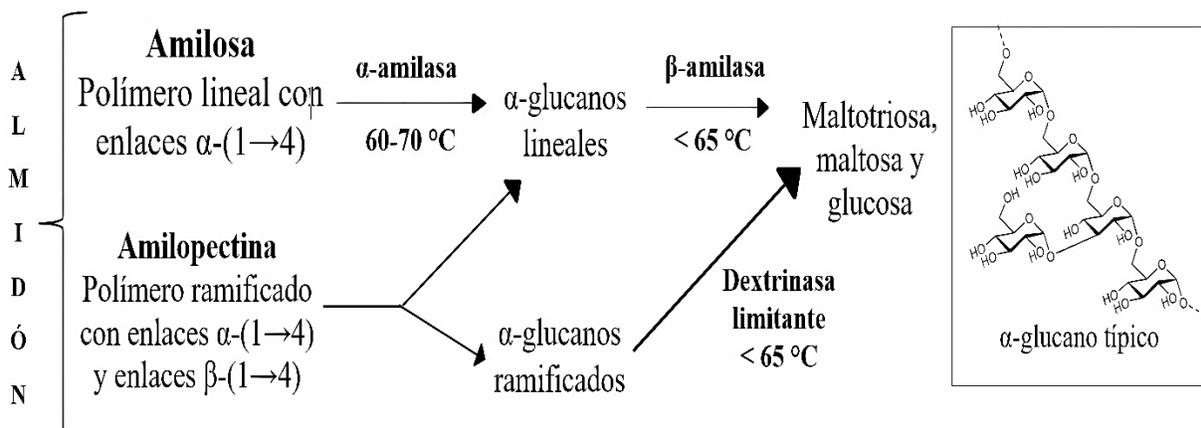
#### **4.4. Molienda y maceración**

Molienda. Una vez seleccionadas las cantidades y proporciones de malta base y maltas especiales, se procede a un proceso de molienda mediante molinos de rodillos. Este proceso, tiene como objetivo controlar y reducir el tamaño de partícula del grano sin afectar gravemente el estado de la cáscara. Los granos de cebada

son comprimidos y cortados a medida que pasan a través de los rodillos del molino, permitiendo que el almidón del endospermo se esponga.

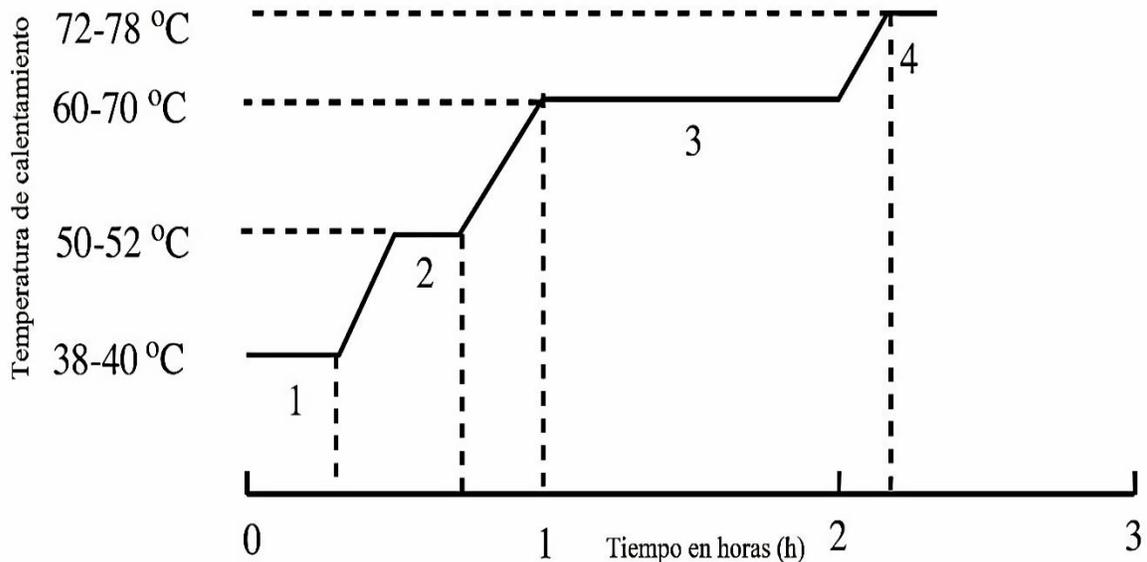
Maceración. La maceración consiste en mezclar la molienda con agua en maceradores (*Mash mixer*), con la finalidad de activar las enzimas de la malta a su temperatura óptima. Estas enzimas hidrolizan el almidón presente en azúcares fermentables y no fermentables, así como otros componentes que impiden la liberación del almidón del endospermo. Los azúcares fermentables que incluyen glucosa, maltosa y maltotriosa, son utilizados por la levadura durante el proceso de fermentación, mientras que las dextrinas permanecen esencialmente intactas hasta el final del proceso de elaboración de cerveza.

Durante el proceso de maceración también se hidrolizan proteínas, dando lugar a aminoácidos que servirán como nutrientes para la levadura durante el proceso de fermentación; la mayoría de estos aminoácidos son utilizados por la levadura, a excepción de la prolina que permanece intacta hasta llegar al producto final. Algunas de las enzimas que actúan durante el proceso de maduración se muestran en la **Figura 4.10**.



**Figura 4.10. Esquema de la sacarificación del almidón durante el macerado y la estructura típica de un  $\alpha$ -glucano ramificado (dextrano).** Rediseñada y adaptada de Buglass A., 2010. *Chapter 2.6 Beer. Handbook of Alcoholic Beverages: Technical, Analytical and Nutritional Aspects I and II.*

La temperatura y el pH del sistema se consideran parámetros relevantes durante la maceración, dado a que determinan la actividad de las enzimas presentes en la malta. La maceración de la malta involucra varias temperaturas de reposo dependiendo del tipo de cerveza que se desee obtener, **Figura 4.11**.



**Figura 4.11. Diagrama del proceso estandarizado y gradual de maceración.**

Adaptada de Buglass A., 2010. *Chapter 2.6 Beer. Handbook of Alcoholic Beverages: Technical, Analytical and Nutritional Aspects I and II.*

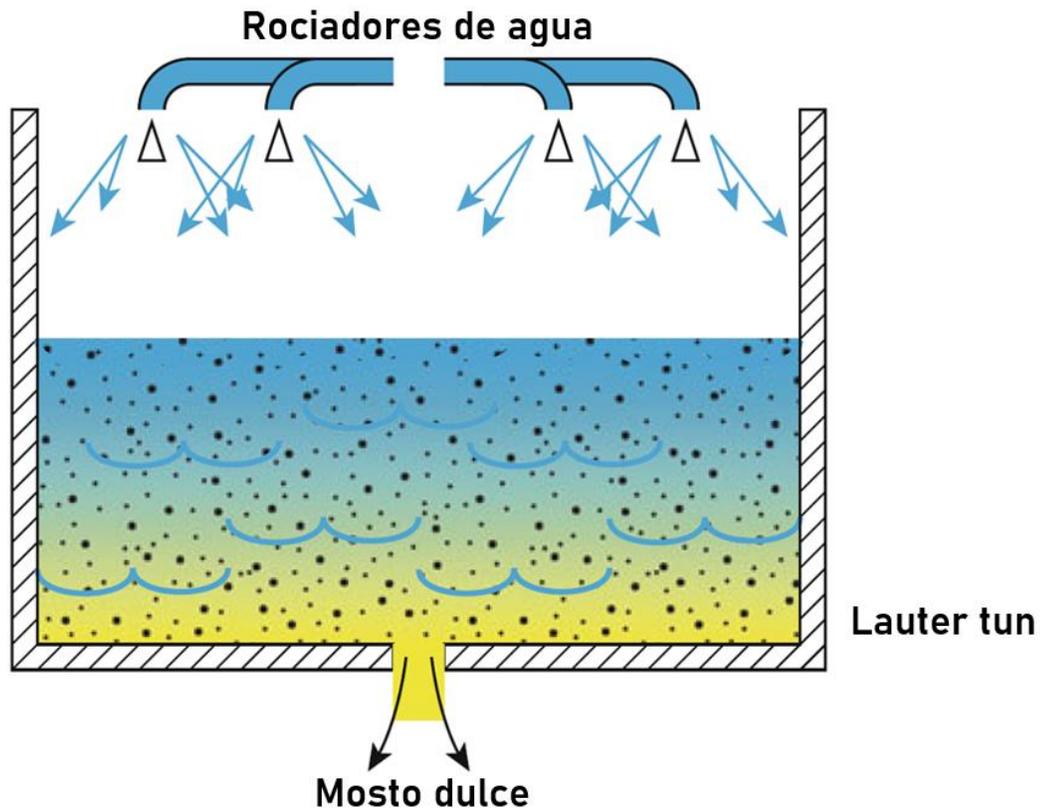
En la primera etapa (1 h), ocurre la ruptura de la pared celular catalizada por xilanasas y  $\beta$ -glucanasas, así como la hidrólisis de proteínas catalizada por carboxipeptidasas y endopeptidasas.

En la segunda etapa (2 h), la actividad proteolítica alcanza su máximo. Los aminoácidos se convertirán en nutrientes para la levadura y los péptidos formarán enlaces con carbohidratos, dando lugar a glucoproteínas que aportan estabilidad al cuerpo y la espuma de la cerveza.

El incremento de la temperatura como se muestra en la tercera etapa (3 h), inactiva las enzimas proteolíticas y provee de las condiciones favorables para que el almidón se desdoble (59-61°C) y actúen las enzimas que favorecen la sacarificación del almidón:  $\alpha$ -amilasa,  $\beta$ -amilasa y dextrinasa limitante. En la práctica, se ha observado que una temperatura de 62°C a un tiempo de reposo 20 min., favorece la máxima producción de azúcares fermentables y nitrógeno amónico libre.

En la cuarta etapa (4 h), los  $\alpha$ -glucanos reaccionan con los residuos de proteínas para dar lugar a glicoproteínas, responsables de la estabilidad de la espuma de la cerveza (Mosher y Trantham, 2017).

El producto de la maceración (*mash* en inglés) conformado por grano agotado y mosto dulce, se bombea a filtros *Lauter tun*, con la intención de separar ambos componentes. El filtro *Lauter tun* posee cuchillas que se mueven de arriba a abajo, favoreciendo la remoción de la cama de grano agotado o *spent grains* (primer subproducto de la Industria Cervecera) sobre la que se rocía agua caliente (74 a 78°C) a medida que se drena el mosto dulce, **Figura 4.12**.



**Figura 4.12. Esquema general de la separación del grano agotado y el mosto dulce.**  
Adaptada de Mosher M. y Trantham K., 2017. *Brewing Science: A Multidisciplinary Approach*.

#### 4.5. Adjuntos

Los adjuntos refieren a las sustancias diferentes a la malta que proveen carbohidratos fermentables y que son usados para remplazar una porción de la malta, con el fin de reducir costos.

#### 4.6. Mosto dulce

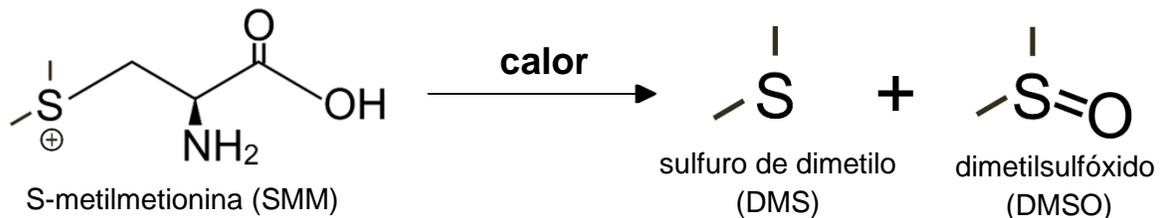
El mosto dulce es un líquido azucarado que contiene proteínas, aminoácidos, cationes metálicos (calcio y magnesio), vitaminas, ácidos nucleicos y una mezcla de azúcares fermentables (fructosa, glucosa, maltosa y maltotriosa) y no fermentables. Después de su obtención, el mosto se traslada a una caldera metálica para su ebullición, la cual puede durar entre 45-60 min.

El objetivo principal de la ebullición del mosto, es reducir el número de microorganismos presentes en el mismo (bacterias hongos y levaduras), los cuales son indeseables para la fermentación. No obstante, el proceso de ebullición también tiene otras implicaciones:

1. Reacciones de Maillard. El aumento de la temperatura favorece la ocurrencia de las reacciones de Maillard, lo cual involucra la formación de perfiles de sabor/color/olor en la cerveza.
2. Desnaturalizar proteínas. La ebullición del mosto permite la desnaturalización de proteínas y enzimas que permanecieron después del proceso de maceración. De esta manera, se generan grandes cantidades de aminoácidos que son empleados como nutrientes por la levadura, así como se obtienen proteínas de bajo peso molecular que son descartadas junto con el *trüb*.
3. Favorecer la formación del *trüb*. La ebullición del mosto favorece la formación de complejos entre proteínas y polifenoles, dando lugar a una masa pegajosa y café conocida como *trüb*. Esto permite obtener una cerveza clarificada y reducir el sabor a té generado por los polifenoles.

Algunos fabricantes, suelen añadir agentes clarificantes como la carragenina para favorecer aún más la formación de complejos proteína-polifenol.

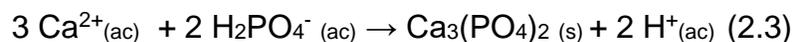
4. Eliminar el DMS. La S-metilmencionina (SMM por sus siglas en inglés) es un aminoácido proveniente de la malta que, en condiciones acuosas y ácidas, puede dar lugar a la formación de sulfuro de dimetilo (DMS por sus siglas en inglés), el cual tiene un olor similar al del maíz enlatado y se considera indeseable en la mayoría de los estilos de cerveza.



Durante la ebullición del mosto la SMM se convierte en DMS. El DMS termina evaporándose u oxidándose a dimetilsulfóxido (DMSO en inglés). Este último, también se evapora durante la ebullición del mosto.

Se estima que aprox. 50% del DMS se elimina durante la ebullición, aunque también puede observarse la disminución de la concentración de este compuesto durante la fermentación.

5. Reducir el pH del mosto. Las reacciones entre los iones calcio ( $\text{Ca}^{2+}$ ) del agua y los iones de difosfato de dihidrógeno ( $\text{H}_2\text{PO}_4^-$ ) presentes en la malta, se incrementan a medida que la temperatura aumenta. Esto ocasiona la formación de fosfato de calcio y iones hidrógeno:



El fosfato de calcio se precipita y es recolectado junto con el *trüb*, mientras que los iones hidrógeno reducen el pH del mosto en 0.1-0.4. En algunos casos, se añade

cloruro de calcio o sulfato de calcio durante el proceso de ebullición con la finalidad de reducir aún más el pH y llegar a los niveles óptimos de pH 5.2-5.3.

6. Favorecer la conversión de los  $\alpha$ -ácidos presentes en el lúpulo. Durante la ebullición del mosto, se extraen los componentes del lúpulo, entre ellos los  $\alpha$ -ácidos que como se verá más adelante, son los principales precursores del sabor amargo de la cerveza. Las temperaturas de ebullición favorecen la isomerización de los  $\alpha$ -ácidos y la formación de iso- $\alpha$ -ácidos, responsables del sabor amargo de la cerveza (Mosher y Trantham, 2017).

#### 4.7. Lúpulo

El lúpulo es la flor femenina en forma de cono de la planta herbácea y trepadora conocida como *Humulus lupulus*. Esta especie es miembro de la familia *Cannabaceae*.

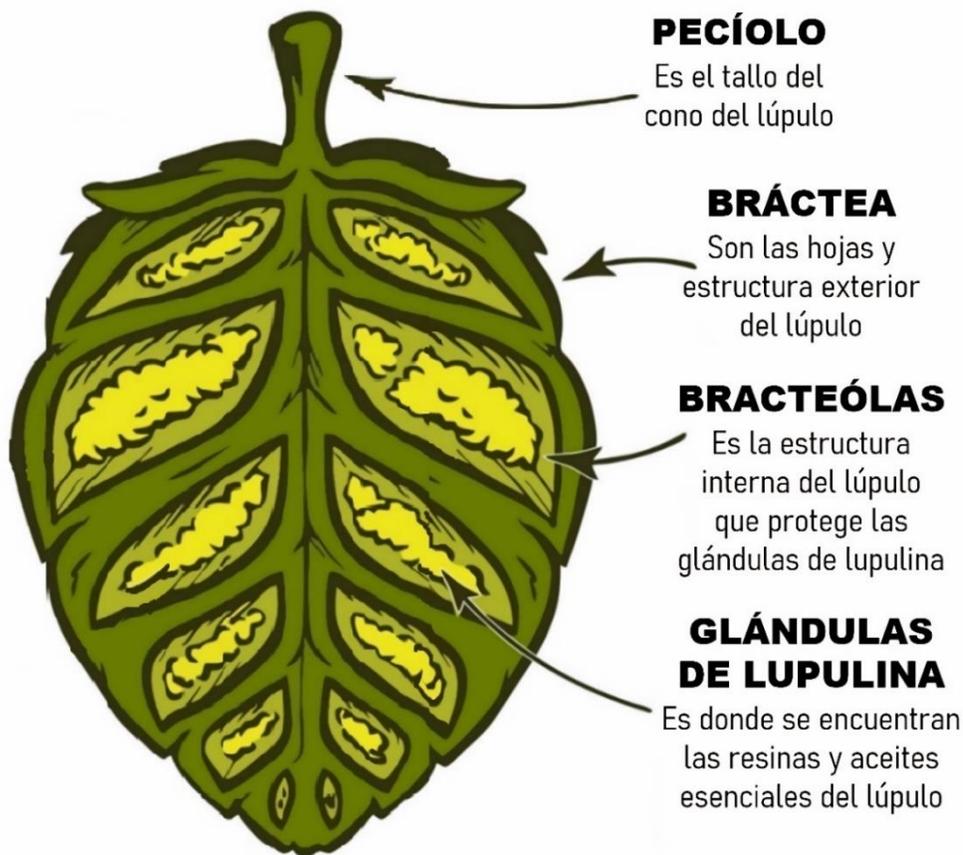
La principal razón por la que se emplea el lúpulo en la Industria Cervecera, es para proporcionar amargor, sabores y aromas característicos de este a la cerveza, **Figura 4.13**. También posee actividad antibacteriana contra bacterias Gram positivas como *Acetobacter* sp., *Lactobacillus* sp. y *Pediococcus* sp. (incluso a concentraciones de 10 mg/L); polifenoles que juegan un papel importante en la estabilidad de la cerveza dada su habilidad para unirse a proteínas, formando un coagulo que se retira durante la ebullición, fermentación o almacenamiento en frío y efectos positivos en la formación y estabilidad de la espuma, basados en la hidrofobicidad de los  $\alpha$ -ácidos del lúpulo y su habilidad para unir polipéptidos e incrementar la viscosidad de la superficie, así como reducir la tensión superficial de los líquidos (Buiatti S., 2008; Bamforth, 2016; Vieira, *et al.*, 2019).



Figura 4.13. Principales compuestos aromáticos del lúpulo y su aroma.

Machado J., et al., 2019. Chapter 10: Hops new perspectives for an old beer ingredient. Natural Beverages.

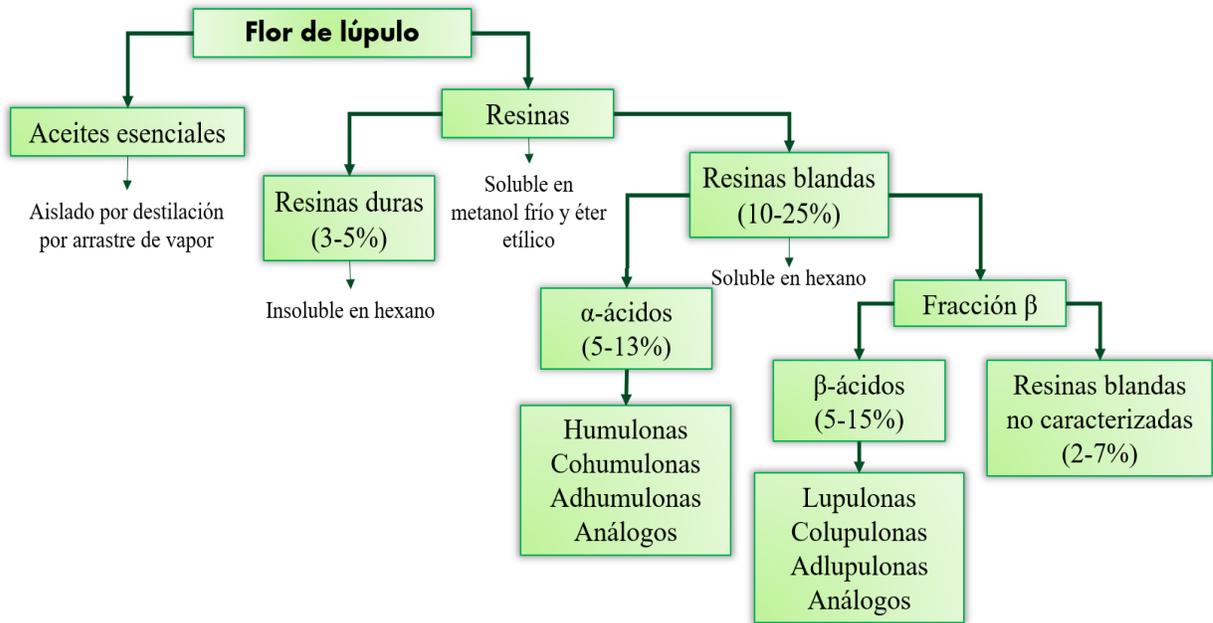
Las flores de lúpulo están formadas por espigas alternadas sobre un raquis y cuyas brácteas y bractéolas (hojas delgadas que forman la parte exterior e inferior de la flor de lúpulo) se alargan en forma de escamas, dándole el aspecto de una piña o cono. Las brácteas y las bractéolas protegen a las glándulas de lupulina, las cuales son pequeñas estructuras de color amarillo, aromáticas y resinosas que contienen  $\alpha$ -ácidos y aceites esenciales altamente apreciados en la Industria Cervecera, **Figura 4.14.**



**Figura 4.14. Estructura de la flor de lúpulo.**

Adaptada de Lallemand Brewing Sudamérica, 2021. *Inside a hop*, <https://bit.ly/40ldIR9>

Para la elaboración de cerveza se requiere de 200-600 g de lúpulo por hectolitro de cerveza y a pesar de que el lúpulo cuenta con una amplia variedad de constituyentes, solo dos se consideran fundamentales para la Industria Cervecera: las resinas (blandas y duras) y los aceites esenciales (Buglass, 2010; Bamforth, 2016; Mosher y Trantham, 2017), **Figura 4.15.**



**Figura 4.15. Extractos obtenidos a partir de la flor de lúpulo.**

Elaborada a partir de Machado, *et al.*, 2019. *Chapter 10: Hops new perspectives for an old beer ingredient*; Erzinger, *et al.*, 2021. *Chapter 3: Bioactive compounds of hops resulting from the discarding of the beer industry in the control of the pathogenic bacteria.*

Resinas. Las resinas son secretadas por las glándulas de lupulona y pueden clasificarse en resinas blandas (solubles en hexano) y resinas duras (insolubles en hexano).

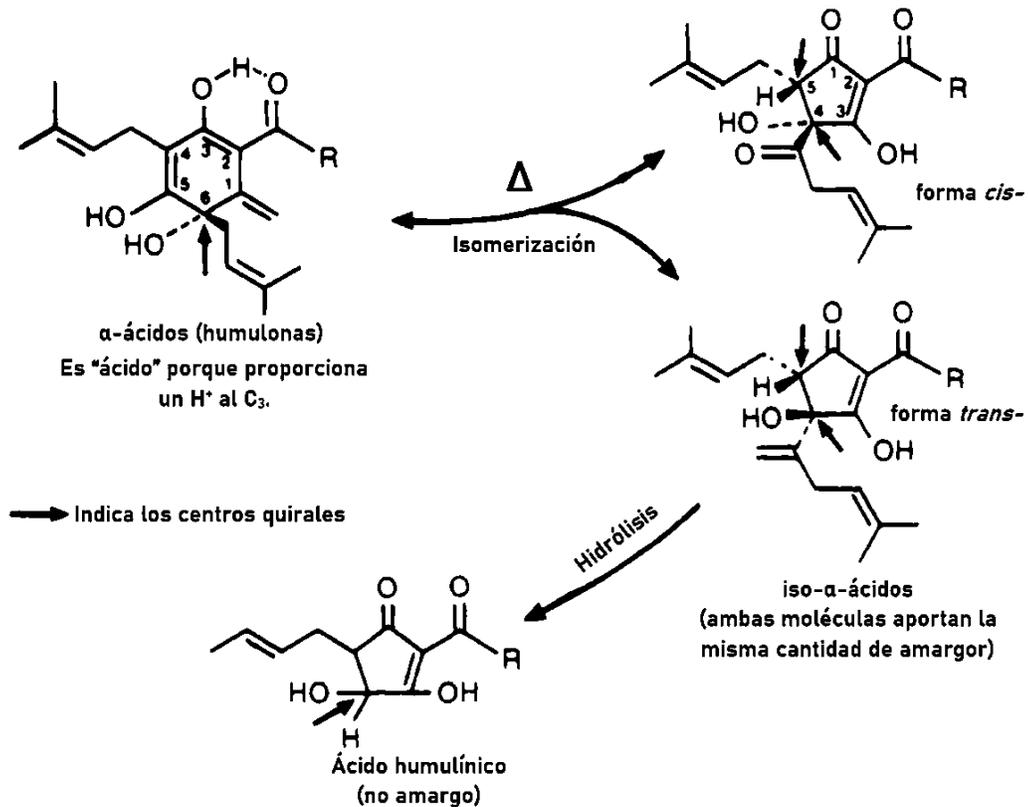
(i) Resinas blandas. Las resinas blandas se caracterizan por contener humulonas ( $\alpha$ -ácidos) y lupulonas ( $\beta$ -ácidos).

I. Humulonas. Las humulonas son responsables de la actividad antiséptica del lúpulo y en su forma isomerizada, dan lugar al sabor amargo de la cerveza. Asimismo, aportan estabilidad a su espuma.

Este tipo de compuestos, se encuentran en el lúpulo principalmente como: humulona (35-70%), co-humulona (20-65%) y ad-humulona (10-15%). Estas requieren de un pH alcalino y iones metálicos magnesio ( $Mg^{2+}$ ) para que se lleve a cabo su isomerización (Lewis y Young, 2001; Knez, *et al.*, 2019).

El proceso de ebullición del mosto lupulado, isomeriza los  $\alpha$ -ácidos presentes en el lúpulo (ahora denominados iso- $\alpha$ -ácidos), volviéndolos solubles al agua e intensificando su amargor. Entre mayor sea el tiempo de ebullición del mosto

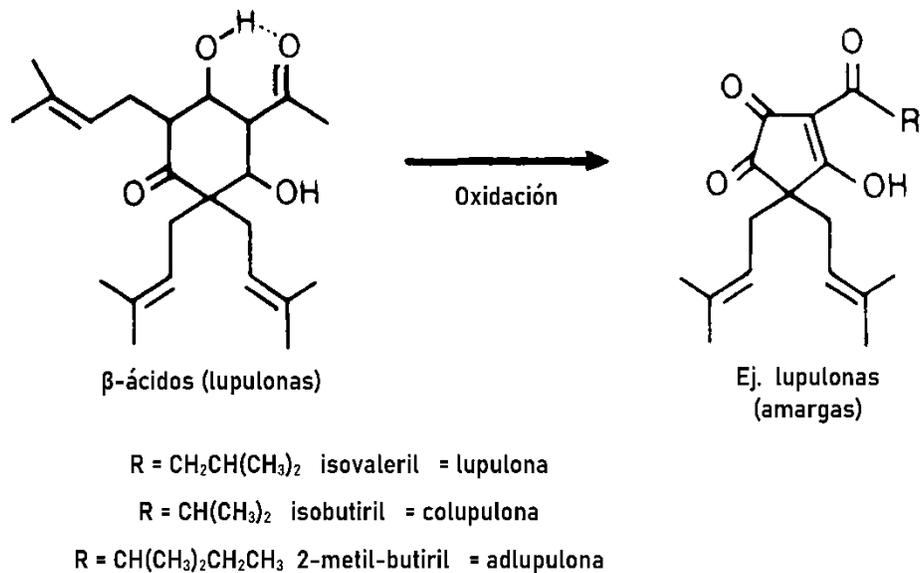
lupulado, mayor será la isomerización de las humulonas y, por ende, habrá una mayor cantidad de iso- $\alpha$ -ácidos disueltos en el mosto que darán lugar a una cerveza cada vez más amarga. Sin embargo, incluso a tiempos prolongados de ebullición (>1h), es difícil convertir >30-40% de la humulona en iso-humulona, **Figura 4.16.**



**Figura 4.16. Isomerización de los  $\alpha$ -ácidos.** Adaptada de Lewis M. y Young T., 2001. *Brewing.*

Alrededor del 70% del amargor de la cerveza se obtiene como consecuencia de isomerización de las humulonas, cuyo contenido en la cerveza suele ser de 20 a 60 mg/L. El nivel de amargor de la cerveza se asocia al contenido de iso- $\alpha$ -ácidos presentes y se reporta en unidades IBU.

II. Lupulonas. La cantidad de lupulonas presentes en el lúpulo suele ser menor en comparación con la cantidad de humulonas. Además, las lupulonas no contribuyen al amargor de la cerveza a menos que sufran de un proceso de oxidación previa, **Figura 4.17.**



**Figura 4.17. Oxidación de los  $\beta$ -ácidos.** Adaptada de Lewis M. y Young T., 2001. *Brewing*.

Se encuentran en el lúpulo principalmente como: lupulona (30-50%), colupulona y adlupulona. El proceso de oxidación de los  $\beta$ -ácidos se produce durante el almacenamiento del lúpulo y da como resultado  $\beta$ -ácidos oxidados, solubles en agua y de sabor menos amargo que las humulonas. Este tipo de compuestos se encuentran presentes en los lúpulos añejados (*aged hops* en inglés), usados principalmente para la elaboración de cervezas lámbicas.

- (ii) Resinas duras. Las resinas duras refieren a los componentes de las resinas blandas que se han oxidado y/o polimerizado y con ello, perdido su amargor y capacidad antiséptica. Contienen principalmente prenilflavonoides (xanthohumol) y flavanoles (catequinas), pero también ácidos fenólicos y estilbenos.
- I. Polifenoles. Se encuentran en las resinas duras, así como distribuidos en los pétalos y el pecíolo de la flor de lúpulo. Alrededor del 80% de ellos corresponden a moléculas de alto peso molecular (taninos) y el porcentaje restante, a moléculas de bajo peso molecular como flavonoides y ácidos fenólicos.

Los polifenoles tienen la habilidad de formar complejos con proteínas. Durante los procesos de ebullición, fermentación y/o enfriamiento de la cerveza, los polifenoles se enlazan con proteínas y dan como resultado complejos polifenol-proteína. Estos complejos son responsables de la formación de turbidez temporal o flóculos que se separa por filtración, de esta manera se obtiene una cerveza “brillosa” (caracterizada por su transparencia) y se eliminan los polifenoles que pueden aportar astringencia al producto final.

Algunos polifenoles de bajo peso molecular proveen de actividad antioxidante a la cerveza y favorecen la estabilidad de su perfil sensorial.

**Aceites esenciales.** Los aceites son secretados por las glándulas de lupulona y son responsables de gran parte del aroma, olor y sabor de la cerveza. Representan alrededor del 0.5% al 3.0% del peso total del lúpulo y sus componentes pueden clasificarse en tres categorías:

- (i) **Terpenos.** Representan el 47-89% de los aceites esenciales. Se caracterizan por su alta volatilidad y por tanto, tienden a perderse durante la ebullición o la fermentación de la cerveza. Los terpenos presentes en la cerveza son principalmente monoterpenos como el mirceno (con aroma a pino) y los sesquiterpenos:  $\alpha$ -humulona  $\beta$ -farneseno y  $\beta$ -cariofileno, **Tabla 4.6.**

**Tabla 4.6. Aromas de los aceites esenciales encontrados en el lúpulo.**

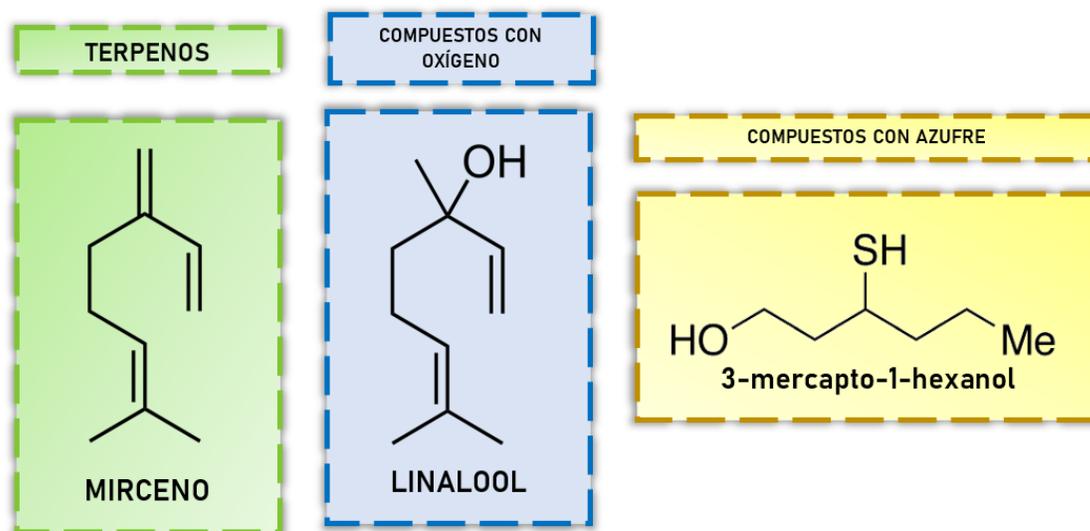
Adaptada de Palmer J., 2017. *How to Brew.*

| Aceite esencial      | Descripción del aroma  |
|----------------------|--|
| Mirceno              | A pino, zanahoria dulce y apio                                 |
| Cariofileno          | Floral, picante, a cedro y a lima                              |
| Farneseno            | Amaderado, cítrico, dulce y afrutado                           |
| $\beta$ -damascenona | A rosas, miel, frutas del bosque, grosella negra y uva Concord |
| $\beta$ -ionona      | A violetas y a frambuesa                                       |
| Linalool             | Floral y a lavanda   |

| Aceite esencial | Descripción del aroma                     |
|-----------------|---|
| Geraniol        | Floral, a rosa, a cempasúchil y a geranio |
| Nerol           | Floral, cítrico, dulce y a glicinia       |
| Citronelol      | Cítrico, a limón y a aceite de citronela  |
| Terpineol       | Cítrico, floral, afrutado y a pino        |
| Humuleno        | Picante, terroso, a piña y a cedro        |
| Humulol         | Picante, herbáceo, a heno                 |
| 4MMP*           | A uvas Moscatel, grosella negra y cebolla |

\*4MMP = 4-mercapto-4-metil-2-pentanona

- (ii) Compuestos que contienen oxígeno. La fracción oxigenada de los aceites esenciales es generalmente más aromática y menos volátil que los terpenos. Se conforma por alcoholes, ácidos, aldehídos, cetonas y ésteres provenientes de la oxidación de los terpenos, **Figura 4.18**.



**Figura 4.18. Ejemplos de algunos compuestos presentes en los aceites esenciales.** Elaborada a partir de la información obtenida de Knez M., *et al.*, 2019. *Hops Compounds: Extraction Techniques, Chemical Analyses, Antioxidative, Antimicrobial, and Anticarcinogenic Effects*.

- (iii) Compuestos que contienen azufre. Representan menos del 1% de los aceites esenciales presentes en el lúpulo y comprenden tioles, sulfuros, polisulfuros,

tioésteres, tiofenos y derivados de terpenos. Son acarreadores de aromas y sabores y favorecen la estabilidad de la cerveza. No obstante, concentraciones superiores al umbral de percepción humano pueden dar lugar a sabores desagradables.

Actualmente existe una extensa cantidad de variedades de lúpulo provenientes de Europa (p. ej. Alemania e Inglaterra), Países de la región del Pacífico (p. ej. Nueva Zelanda, y Australia), Estados Unidos, China, y Sudáfrica. Cada una de estas variedades presenta un perfil sensorial particular y pueden colaborar en la obtención de características distintivas de ciertos estilos de cerveza, **Figura 4.19**.



**Figura 4.19. Ejemplos de algunas variedades comerciales de lúpulo.**

Elaborada a partir de Kreitz T., 2013. *Hops varieties and their characters*, <https://imgur.com/CxZsQL9>

Para la elaboración de cerveza, se recomienda el empleo de lúpulos frescos con un perfil de olor fresco, herbáceo y picante y un color verde claro. Los lúpulos viejos que han sido almacenados inadecuadamente, es decir en bolsas permeables al oxígeno y a temperaturas cálidas, pueden aportar olores pungentes debido a la oxidación de sus componentes, o bien tener un menor potencial de amargor.

El lúpulo puede encontrarse comercialmente en forma de flor seca, *pellets*, aceite de lúpulo, extracto de lúpulo, entre otros. Algunas de las ventajas y desventajas de las presentaciones comerciales más comunes del lúpulo, se encuentran a continuación:

**Tabla 4.7. Ventajas y desventajas de las presentaciones de lúpulo.**

Elaborada a partir de Hughes P. y Simpson W., 1993. *Production and composition of hop products*; Lewis M. y Young T., 2001. *Brewing*; Palmer J., 2017. *How to Brew*

| Presentación de lúpulo   | Descripción  | Ventajas  | Desventajas  |
|--|--|---|--|
| <br>Enteros | Flor de lúpulo completa, fresca y sin comprimir.                         | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Fácil separación del mosto.</li> <li>• Aportan un mayor aroma en su estado fresco.</li> <li>• Buenos para el método de adición al final de la fermentación de la cerveza.</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Se oxidan más fácilmente que los pellets o plugs.</li> <li>• Absorben el mosto, dando como resultado pérdidas de mosto después de la ebullición.               <ul style="list-style-type: none"> <li>• Es costoso transportarlos y almacenarlos</li> </ul> </li> </ul> |
| <br>Plugs   | Flor de lúpulo secada y comprimida en forma de cilindros de aprox. 15 g. | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Retienen aromas frescos por más tiempo que el lúpulo entero.</li> <li>• Se comportan como el lúpulo entero en el mosto.</li> </ul>   | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Puede ser difícil romperlos en pequeñas cantidades.</li> <li>• Absorben el mosto, dando como resultado pérdidas de mosto después de la ebullición.</li> </ul>   |

| Presentación de lúpulo   | Descripción   | Ventajas   | Desventajas   |
|--|---|--|---|
|  <p data-bbox="293 716 391 747">Pellets</p>                 | <p data-bbox="472 411 675 842">La flor de lúpulo es secada, molida y convertida en encapsulados. Existen dos tipos de Pellets: tipo 90 y tipo 45 (enriquecidos con lupulina).</p> | <ul data-bbox="716 275 1065 968" style="list-style-type: none"> <li>• Fácil de pesar y mezclar.</li> <li>• Pequeño incremento en la utilidad del lúpulo, debido a que es más fácil extraer los alfa-ácidos de las glándulas de lupulina.</li> <li>• Favorece un mayor control de la cantidad de <math>\alpha</math>-ácidos añadidos en comparación con el lúpulo entero.</li> <li>• Más fácil de almacenar (almacenamiento a 0-5°C) comparado con la flor de lúpulo.</li> <li>• Precio relativamente bajo.</li> </ul>  | <ul data-bbox="1114 348 1422 894" style="list-style-type: none"> <li>• Difícil de remover del fondo de la caldera, debido a que forma un sedimento en su fondo. <ul data-bbox="1162 537 1422 747" style="list-style-type: none"> <li>• Aporta menor cantidad de sabores y aromas comparado con la flor de lúpulo, debido a su procesamiento.</li> </ul> </li> <li>• Genera defectos en la cerveza cuando se añade al final de la fermentación.</li> </ul> |
|  <p data-bbox="253 1472 431 1535">Extractos de lúpulo</p> | <p data-bbox="472 1283 675 1535">Los pellets del lúpulo se muelen y extraen con etanol o CO<sub>2</sub> (líquido o supercrítico)</p>  | <ul data-bbox="716 989 1065 1829" style="list-style-type: none"> <li>• Reduce costos de almacenaje y transporte, debido a la disminución del volumen.</li> <li>• Los extractos de lúpulo obtenidos mediante el uso de CO<sub>2</sub>, están conformados principalmente por resinas y compuestos aromáticos.</li> <li>• Los extractos de lúpulo mediante el uso de etanol, tienen componentes similares a la flor de lúpulo, pero menor contenido de polifenoles.</li> <li>• Alta vida de anaquel (3 años a temperatura ambiente). <ul data-bbox="764 1734 1065 1829" style="list-style-type: none"> <li>• No hay partículas suspendidas después de la ebullición.</li> </ul> </li> </ul> | <ul data-bbox="1114 1199 1422 1619" style="list-style-type: none"> <li>• Si emplean solventes orgánicos, existe la posibilidad de que algunos residuos de estos pasen a la cerveza.</li> <li>• Si no son extractos isomerizados, siguen necesitando de calentamiento para la isomerización de los <math>\alpha</math>-ácidos.</li> </ul>  |

El método empleado para la adición del lúpulo suele depender de las características sensoriales que se desean obtener en el producto final. Algunos métodos empleados para la adición de lúpulo se describen a continuación:

1. Adición del lúpulo al final de la maceración. Consiste en añadir el lúpulo al producto de la maceración ("*mash*" en inglés), esto permite que los  $\alpha$ -ácidos del lúpulo disminuyan levemente el pH del *mash* y con ello, se favorezca la separación del mosto dulce del grano agotado. No obstante, el perfil de amargor, sabor y aroma aportado por el lúpulo es significativamente inferior a si el lúpulo se añadiera durante la ebullición del mosto.

2. Adición temprana del lúpulo. Consiste en la adición del lúpulo a la caldera con hervidor al mismo tiempo que se recibe el mosto proveniente del filtro *Lauter tun*. Este proceso puede tomar alrededor de media hora y tiene la finalidad de que los aceites esenciales tengan más tiempo para oxidarse a compuestos más solubles y no se evaporen con la temperatura, lo cual da como resultado una mayor retención de sabores y aromas durante la ebullición.

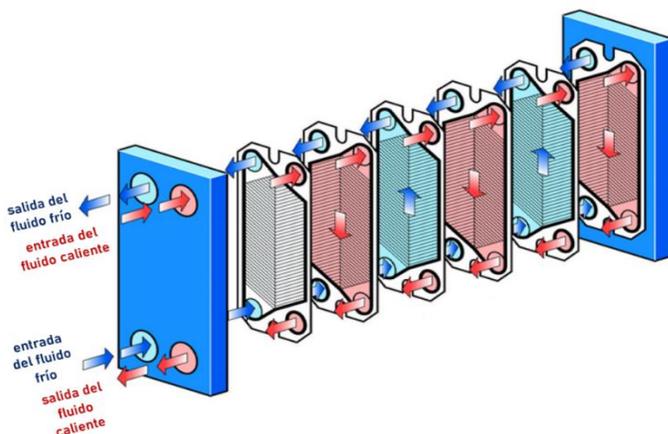
3. Adición de lúpulo al final de la ebullición del mosto. El lúpulo se añade 15 minutos o menos antes de finalizar el proceso de ebullición del mosto, o bien se agrega cuando se retira la fuente de calor de la caldera. El lúpulo debe dejarse remojar en el mosto dulce por aprox. 10-30 min. Este método tiene la finalidad de reducir la pérdida de aceites esenciales y aromas, disminuyendo así el tiempo de exposición de los componentes del lúpulo a las altas temperaturas.

4. Remojo del lúpulo en el tanque *Whirlpool*. El lúpulo se añade durante la separación del mosto dulce y el grano agotado. Generalmente, el tanque separador se encuentra a  $>85^{\circ}\text{C}$  (no debe llegar a ebullición) y el lúpulo se remoja por 30-60 min. Este método permite que ocurra la isomerización de los  $\alpha$ -ácidos, pero mantiene una mayor cantidad de aceites esenciales en comparación con la adición del lúpulo al final de la ebullición.

5. Adición del lúpulo al final de la fermentación (conocida como *Dry Hopping* en inglés). El lúpulo seco se añade al final de la fermentación y cuando aún se encuentra activa la levadura, pues el método introduce oxígeno que puede reducir la vida de anaquel de la cerveza. El lúpulo se deja en la cerveza por alrededor de 3 a 5 días a temperaturas 10-20°C; se recomienda no superar esos tiempos de contacto con la cerveza, pues de esta manera se reducen los sabores y aromas herbáceos. Este método proporciona aromas frescos y niveles de amargor de entre 1-5 IBU's. En este caso, el amargor que aporta lúpulo proviene de  $\alpha$ - y  $\beta$ - ácidos oxidados y de los polifenoles del lúpulo y no de la isomerización de los  $\alpha$ -ácidos. Una vez terminado el proceso de ebullición, el mosto lupulado, es clarificado, enfriado, aireado (con aire estéril), transportado al tanque de fermentación e inoculado con la levadura.

Para su clarificación, el mosto lupulado es trasladado a un filtro conocido como *Whirlpool*, donde se remueve el *trüb* y el grano agotado que pasó a la caldera. El *trüb* está constituido por los residuos del lúpulo y el *hot break*, conformado por proteínas coaguladas y complejos proteína-polifenol que flocularon durante la ebullición. Los filtros *Whirlpool* son recipientes cilíndricos en los cuales se bombea el mosto lupulado tangencialmente. El movimiento del tanque permite que los sólidos descendan por gravedad y forme un sedimento en forma de cono en su centro. Esta etapa tiene una duración de entre 10 a 20 min.

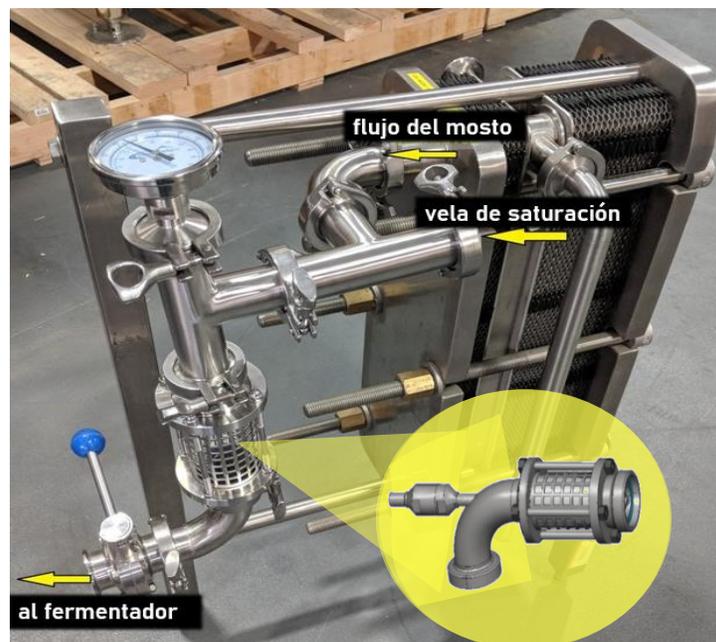
El mosto clarificado se transporta a intercambiadores de calor de placas (PHE por sus siglas en inglés), los cuales son aparatos capaces de transferir calor de un fluido caliente a un fluido frío mediante conducción (Varona, *et al.*,2007), **Figura 4.20**.



**Figura 4.20. Patrón de flujo en un intercambiador de calor de placas.** Las flechas azules representan fluido frío y las flechas rojas al fluido caliente. Adaptada de Tecnigrado, 2021. *Intercambiador de calor y su función en un sistema de calefacción*, <https://bit.ly/3E0NLwZ>

Generalmente, los intercambiadores de calor poseen dos placas: una para enfriar el mosto y otra para ajustar su temperatura a la temperatura de fermentación. El mosto caliente (87 °C), pasa por la primera placa del intercambiador de calor a medida que se bombea agua fría en dirección contraria, lo cual permite que el mosto se enfríe a una temperatura aprox. 21 °C. Posteriormente, el mosto enfriado pasa por la segunda placa, donde se reduce su temperatura; a 8-12°C en el caso de las cervezas *Lager* y 14-17°C en el caso de las cervezas *Ale*.

Posteriormente, el mosto enfriado se somete a una etapa de aireación con aire estéril. El método más empleado, consiste en hacer pasar el mosto a los tanques de fermentación y bombear aire estéril a su interior por medio de una vela de saturación con piedras porosas de oxigenación. Estos aparatos, introducen el aire estéril a presión, **Figura 4.21**.



**Figura 4.21. Ejemplo de instalación de una vela de saturación con piedras de oxigenación (ilustrada para su visualización).**

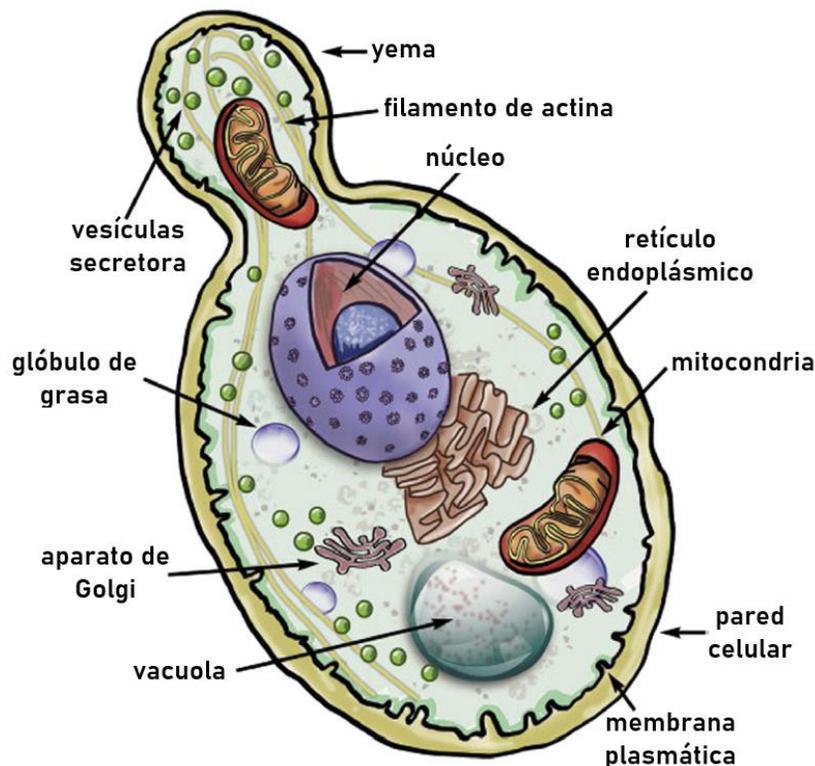
Adaptada de Glacier Tanks, 2023. *Wort aeration. A comprehensive yeast oxygenation guide*, <https://bit.ly/3YEjfk0>

#### 4.8. Levadura

La levadura es un organismo eucarionte y unicelular perteneciente al reino Fungi. Es facultativa anaerobia, es decir, es capaz de crecer tanto en presencia como ausencia de oxígeno y es relevante para la Industria Cervecera, debido a que es la

encargada de llevar a cabo el proceso de fermentación de la cerveza. Además, tiene un rol en el desarrollo del sabor, el aroma y la calidad final del producto.

Las levaduras tienen forma esférica o helicoidal, miden 5-10  $\mu\text{m}$  de diámetro, 3-10  $\mu\text{m}$  de ancho y 4-14  $\mu\text{m}$  de largo. Generalmente, se presenta aislada, aunque también se les puede encontrar en pares o en racimos (Tenge, 2009; Speers y Forbes, 2015), **Figura 4.22.**



**Figura 4.22. Estructura de la levadura.**

Adaptada de Speer A. y Forbes J., 2015. *Yeast: an overview.*

La levadura posee las siguientes estructuras:

- (i) Pared celular. Es una estructura rígida de 250 nm y constituye aprox. el 25% del peso en seco de la levadura. Posee tres capas:
  - Capa interior. Es una capa de quitina (polímero de N-acetil glucosamina) unida covalentemente a  $\beta$ -glucanos.
  - Capa intermedia. Esta región posee algunos mananos (polisacáridos de manosa) intercalados en la matriz de  $\beta$ -glucanos. Aunque también se pueden encontrar algunas proteínas.

- Capa exterior. Posee principalmente enzimas y proteínas, estas últimas en su mayoría se encuentran unidas a cadenas pequeñas de mananos. Algunas de las enzimas presentes en esta región son: invertasa, la cual hidroliza la sacarosa y da como resultado la formación de glucosa;  $\beta$ -glucanasa y manosidasa que hidrolizan respectivamente, al  $\beta$ -glucano y al manano y colaboran en la ruptura de la pared celular durante el crecimiento de la célula y, por último, la lipasa que se encarga de hidrolizar los ácidos grasos y los lípidos.
- (ii) Membrana plasmática. Se encuentra entre la pared celular y el interior de la célula. Es una bicapa lipídica semipermeable bastante fluida y flexible, debido a la presencia de fosfolípidos, esfingolípidos, esteroides y proteínas. Las levaduras, son capaces de mantener la fluidez de su membrana a diferentes temperaturas mediante el control de la saturación de sus lípidos. No obstante, si la levadura no es aireada apropiadamente, esta será incapaz de controlar la fluidez de su membrana hasta el final del proceso de fermentación, lo cual da como resultado la interrupción de la fermentación y la formación de aromas y sabores indeseables.
- (iii) Citosol. Es una porción del citoplasma de la célula que posee enzimas involucradas en la fermentación anaeróbica de los azúcares fermentables presentes en la cerveza.
- (iv) Mitocondria. Es el organelo donde ocurre la respiración anaeróbica y se encuentra involucrada en:  
La síntesis de ácidos grasos insaturados y lípidos de membrana, la adaptación fisiológica asociada a condiciones de estrés (ej. etanol), en la movilización de glucógeno y la modificación de la superficie celular (necesaria para la floculación y división celular).
- (v) Retículo endoplásmico. Se encuentra anclado al núcleo de la célula y es el organelo donde:  
Se producen proteínas, lípidos y carbohidratos secretados por la levadura.
- (vi) Vacuola. Es un orgánulo unido a la membrana de la célula que almacena nutrientes y corresponde al lugar donde:

Se lleva a cabo la hidrólisis de proteínas.

Floculación de la levadura. Es un proceso en el que las células de levadura se agrupan. Solo puede llevarse a cabo por aquellas levaduras que poseen genes "FLO", los cuales sintetizan proteínas tipo lectinas conocidas como zimolectinas, localizadas en la pared celular de la levadura y responsables de la floculación de la levadura. No obstante, las zimolectinas necesitan de la presencia de iones  $\text{Ca}^{2+}$  para llevar a cabo dicho proceso.

Al final de la fermentación de la cerveza, los nutrientes empleados por la levadura para su metabolismo son escasos, por lo que esta entra en un estado de dormancia. Las levaduras usan receptores de manosa para unirse a las zimolectinas, presentes en la superficie de las células adyacentes y de esta forma, se van agrupando hasta formar una masa alargada que puede ser separada de la cerveza.

#### **4.9. Clasificación primaria de las cervezas con respecto al tipo de levadura**

Desde el punto de vista taxonómico, las cepas de levadura tradicionalmente empleadas en la elaboración de cerveza pertenecen al género *Saccharomyces* y a la especie *cerevisiae*. No obstante, la Industria Cervecera suele dividir las cervezas con base a las condiciones de fermentación y el tipo de microorganismos.

- *Saccharomyces cerevisiae*. Conocidas tradicionalmente como levaduras de alta fermentación, porque floculan al final de la fermentación y forman una capa en la superficie del fermentador. Se caracterizan por tener un intervalo de temperatura óptimo de fermentación de 15-18°C y son empleadas en la elaboración de cervezas *Ale*. A diferencia de las cepas empleadas en la elaboración de cervezas *Lager*, *Saccharomyces cerevisiae* fermenta azúcares simples, como la glucosa y la maltosa, pero no complejos como la melibiosa y solo una tercera parte de la rafinosa.
- *Saccharomyces pastorianus*, *S. carlbergensis* o *S. uvarum*. Conocidas tradicionalmente como levaduras de baja fermentación, porque tienden a sedimentarse en el fondo del tanque de fermentación a medida que transcurre el proceso y forman una capa de sedimento en la parte baja del tanque. Se

caracterizan por tener un intervalo de temperatura óptimo de fermentación de 8 a 12°C y son utilizadas en la elaboración de cervezas *Lager*. En comparación con las cepas empleadas en la elaboración de cervezas *Ale*, *Saccharomyces carlbergensis* asimila la maltotriosa con mayor rapidez, puede emplear mezclas de maltosa y galactosa de manera simultánea y produce una mayor cantidad de sulfitos durante la fermentación. Fermenta azúcares simples y complejos como la melibiosa y la rafinosa.

Ambos tipos de levaduras mencionados, metabolizan eficientemente los azúcares fermentables mediante la ruta de fermentación anaeróbica y tienen una buena capacidad para tolerar condiciones de estrés.

En vías de obtener productos con características sensoriales cada vez más complejas, los cerveceros también utilizan levaduras no-*Saccharomyces* (*non Saccharomyces yeast* en inglés) que se caracterizan por proveen de aromas y sabores distintivos, a pesar de que a veces aportan rendimientos de fermentación bajos y suelen ser más sensibles a condiciones de estrés en relación con las pertenecientes al género *Saccharomyces*, **Tabla 4.8**.

**Tabla 4.8. Ejemplos de levaduras no-*Saccharomyces*.**

Adaptada de Baso R., *et al.*, 2016.

| Especie   | Compuestos con aroma | Descripción de aromas            | Enzimas presentes | Desventajas                                       | Otros datos   |
|---|----------------------|----------------------------------|-------------------|---|---|
| <i>Dekkera anomala/ Brettanomyces anomalus</i>          | Ácido acético        | Vinagre o clavo                  | AAT               | Formación de biofilms                             | Tolerante a amplio rango de pH, osmotolerante y efecto Custer |
|   | Fenoles etílicos     | Cuero                            |                   |   |   |
|   | Ésteres etílicos     | Afrutado o a disolvente orgánico |                   |   |   |
| <i>Dekkera bruxellensis/ Brettanomyces bruxellensis</i> | Ácido acético        | Vinagre o clavo                  | BGL, CDC, VFR     | Producción ↑[ácido acético] y sabores indeseables | Tolerante a pH, osmotolerante y efecto Custer                 |
|   | Fenoles etílicos     | Cuero                            |                   |   |   |
|   | Ésteres etílicos     | Afrutado o a disolvente orgánico |                   |   |   |

| Especie   | Compuestos con aroma | Descripción de aromas            | Enzimas presentes  | Desventajas  | Otros datos                                       |
|---|----------------------|----------------------------------|--------------------|--|---|
| <i>Hanseniaspora uvarum/</i><br><i>Kloeckera apiculata, uvarum</i>                  | Acetato de isoamilo  | Plátano o pera                   | BGL                | ---  | Tolerante al etanol y resistente a cicloheximida  |
|   | Acetato de etilo     | Afrutado o a disolvente orgánico |                    |  |   |
| <i>Torulasporea delbrueckii/</i><br><i>Candida colliculosa</i>                      | Acetato de isoamilo  | Plátano o pera                   | AAT, EST, INV, BGL | Producción ↑[acetaldehído]                             | Criotolerante, osmotolerante y tolerante a etanol |
|   | Butirato de etilo    | Plátano o manzana                |                    |  |   |
|   | Acetaldehído         | Fresa                            |                    |  |   |
| <i>Wickerhamomyces subpelliculosus/</i><br><i>Pichia o Hansenula subpelliculosa</i> | Acetato de isoamilo  | Plátano o pera                   | AAT, EST           | Formación de biofilms y producción excesiva de ésteres | ---   |
|   | Acetato de etilo     | Afrutado o a disolvente orgánico |                    |  |   |
| <i>Wickerhamomyces anomalus/</i><br><i>Pichia o Hansenula anómala</i>               | Acetato de etilo     | Afrutado o a disolvente orgánico | EST, BGL           | Formación de biofilms                                  | Sensible a etanol, osmotolerante y tolerante a pH |

\*Alcohol acetiltransferasa (AAT), esterasa (EST), invertasa (INV),  $\beta$ -glucosidasa (BGL), cinamato descarboxilasa (CDC) y vinilfenol reductosa (VFR).

- *Dekkera/Brettanomyces* sp. Como *Brettanomyces bruxellensis*, *Brettanomyces intermedim* y *Brettanomyces anomallus*. Fermenta a temperaturas entre 20°C a 32°C y en el caso de *B. bruxellensis*, es resistente a concentraciones >13 a 15% alcohol. Se caracteriza por ser capaz de metabolizar una amplia variedad de carbohidratos entre los que se incluyen la celobiosa y las dextrinas. Así como de producir la enzima  $\beta$ -glucosidasa, la cual hidroliza los glucósidos y da lugar a la aglicona con actividad aromática. No obstante, su capacidad para fermentar maltotriosa y maltosa es baja.

Esta levadura produce fenoles con aromas picantes, medicinales y ahumados y ésteres como el salicilato de metilo con aromas picantes y a menta. Así como acetato de etilo, hexanoato de etilo y octanoato de etilo con aromas a frutas tropicales y linalool,  $\beta$ -citronelol y  $\alpha$ -terpeniol que aportan aromas cítricos y florales.

Se emplea en la elaboración de cervezas *Sour* como la cerveza belga *Red Ale Flanders*, la cerveza *Gueuze* y las cervezas Lámbicas: *Belgic Lambic* y *American*

*Coolship Ale* (versión estadounidense de la cerveza *Belgic Lambic*), así como cervezas Ahumadas (ej. *Rauchbier*). Como se verá más adelante, este tipo de cervezas suelen ser sometidas a un proceso de fermentación espontánea del mosto, (Baso, *et al.*, 2016; Serra, *et al.*, 2019).

- *Wickerhamomyces anomalus*, puede crecer en un amplio rango de temperaturas (3-37°C) y condiciones de pH (2 a 12). Tolera condiciones de presión osmótica alta, pero es sensible al etanol. Es capaz de asimilar efectivamente disacáridos, hexosas, pentosas y polisacáridos, así como alcoholes, ácidos orgánicos, ácidos grasos y compuestos aromáticos.

Las levaduras del género *Wickerhamomyces* son capaces de producir etil propionato, acetato de etilo y 1-feniletanol. Estos compuestos, se caracterizan por tener actividad antifúngica y dar lugar a aromas afrutados o a disolvente orgánico, dependiendo de las concentraciones.

Se emplean en la elaboración de cervezas con bajo contenido de alcohol o sin alcohol.

- *Torulaspora delbruekii*, normalmente considerada como un microorganismo contaminante en la elaboración de cerveza. Es una levadura osmotolerante, crece bien a bajas temperaturas (criotolerante) y curiosamente, requiere de oxígeno para llevar a cabo el proceso de fermentación. Su habilidad para fermentar la glucosa es limitada.

La mayoría de las cepas del género *Torulaspora* toleran menos del 5% de alcohol presente en el mosto. No obstante, *T. delbruekii* puede tolerar niveles de alcohol mayores a 5%, así como niveles >50 mg/  $\alpha$ -iso-ácidos.

La levadura *T. delbruekii*, es capaz de hidrolizar sacarosa en glucosa y fructosa, debido a la presencia de la enzima invertasa. Sin embargo, la asimilación de maltosa, depende de la cepa y es condicionada por la presencia de la enzima maltasa y por la presencia de transportadores de maltosa.

*T. delbruekii* produce altas concentraciones de 2-metil-2-butanol (aroma afrutado) y otros compuestos volátiles como el 2-feniletanol (aroma floral, a rosas y dulce) y el n-propanol (a Brandy). Esta levadura no produce fenoles con aromas

indeseables y es responsable de la fermentación de las cervezas de trigo que generalmente tienen notas afrutadas, como es el caso de las cervezas de trigo de Bavaria.

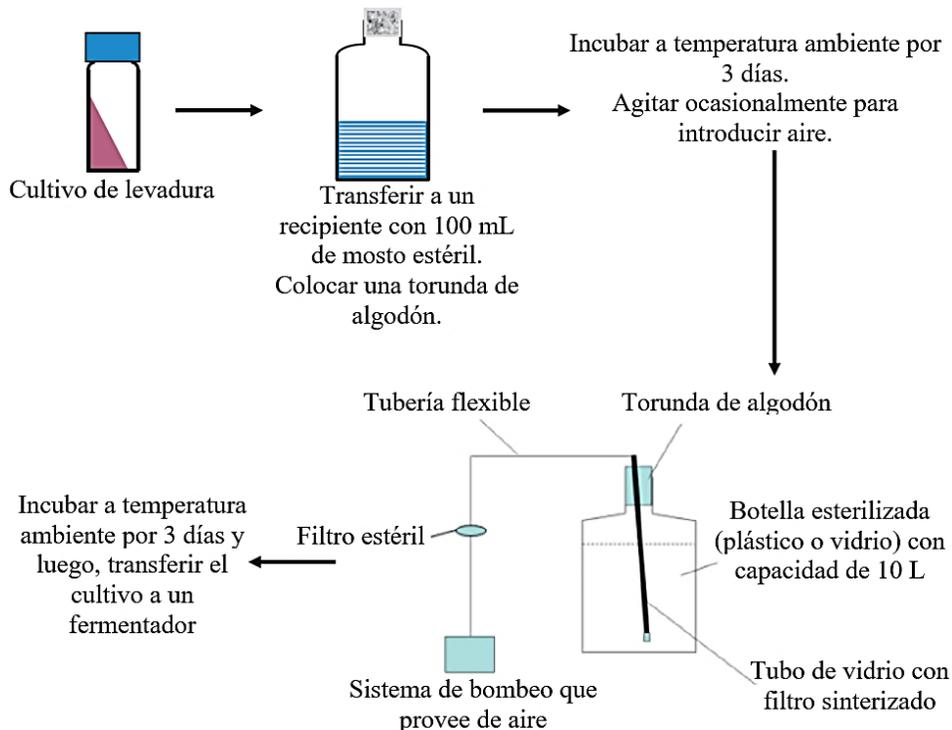
- *Saccharomyces ludwigii*, genera bajas concentraciones de alcohol al fermentar la glucosa, la fructosa y la sacarosa y su capacidad para fermentar la maltosa y la maltotriosa del mosto es baja.

Suele emplearse en la elaboración de cervezas libres de alcohol, debido a que produce ésteres y alcoholes que aportan perfiles de sabor/olores complejos.

Cultivos de levadura. Los cultivos de levadura pueden obtenerse de varias formas:

- Levadura deshidratada o en polvo. Generalmente vendida en empaques al vacío. Cerrada y en condiciones de refrigeración (2-4°C) puede durar hasta un año. Algunos fabricantes, venden mezclas de levaduras y cultivos de bacterias que suelen emplearse en la elaboración de cervezas Lámbicas.
- Cultivos de levadura almacenados. Los grandes fabricantes de cerveza suelen poseer sus propios cultivos de levadura, los cuales regularmente se encuentran almacenados en cámaras de refrigeración.
- Cultivos de levadura en medios de cultivo agar-agar (*slopes* en inglés). Algunos distribuidores de levadura, venden pequeñas botellas que contienen las células de levadura en la superficie de un medio agar.

Propagación de la levadura. Después de haber seleccionado el/los cultivo(s) de levadura a emplear en la elaboración de cerveza, se procede a llevar a cabo el proceso de propagación de la levadura, para la cual se suele usar mosto previamente esterilizado como medio de cultivo (Boulton, 2006), **Figura 4.23**.



**Figura 4.23. Esquema de la propagación de la levadura.**

Al finalizar el proceso, la levadura es transferida al fermentador.

Adaptada de Boulton C., 2006. *Chapter 4 : Fermentation*.

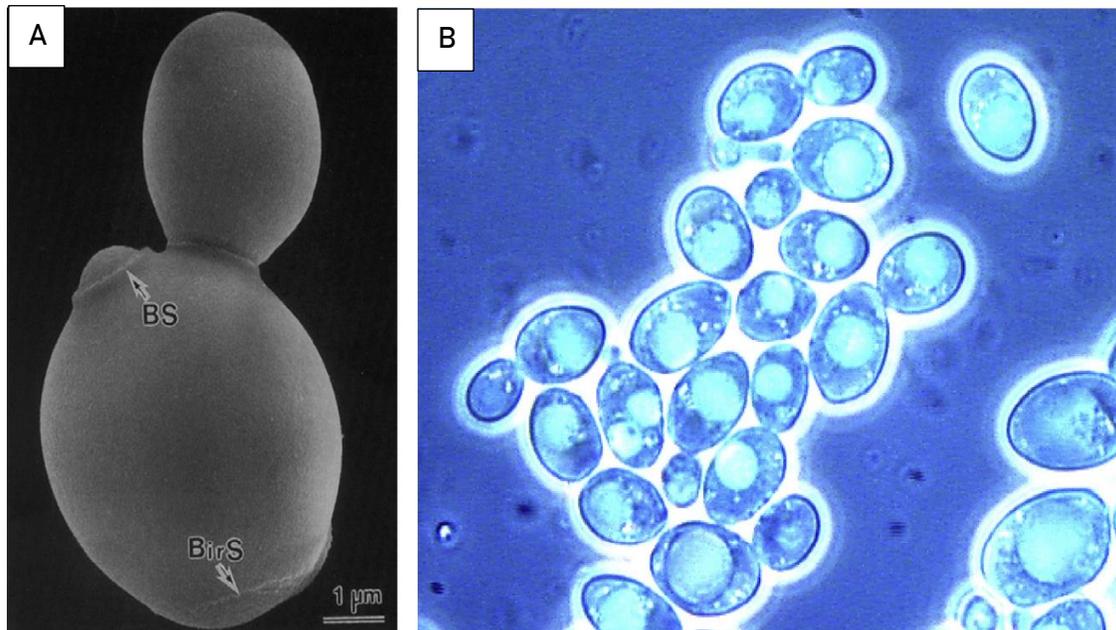
La propagación de la levadura, consiste en hacer crecer las células en el laboratorio a condiciones controladas de temperatura, pH y agitación hasta obtener una concentración de células de aprox.  $10^7$  células viables/mL mosto (Lewis y Young, 2001).

Típicamente el proceso de propagación de la levadura, se realiza dos veces al año y tiene el objetivo de garantizar la obtención de una fuente regular de levadura fresca y sana.

La eficiencia del proceso de fermentación se encuentra influenciada por los siguientes factores:

- a) Capacidad replicativa de la levadura. Las levaduras cuentan con una capacidad replicativa finita que está en función del número de divisiones celulares que puede llevar a cabo. Una vez la levadura ha llegado a su límite de divisiones, entra en un estado de senescencia y eventualmente, muere.

Es posible aproximar la edad de la levadura, mediante el conteo del número de cicatrices que presenta. Vistas al microscopio, las levaduras viables poseen una sola vacuola con forma definida, **Figura 4.24**.



**Figura 4.24. Levadura *Saccharomyces cerevisiae*.**

**A)** Micrografía electrónica de una levadura en proceso de gemación. La célula parental posee una cicatriz de nacimiento (BirS) y una cicatriz de gemación (BS).

**B)** Vista al microscopio de una cepa de *Saccharomyces cerevisiae*. Las vacuolas se muestran en un color azul claro.

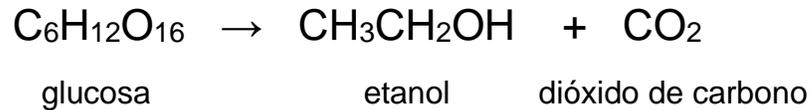
Rosentrater K., 2018. *Chapter 12: Malting, brewing, fermentation and distilling*, <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-100529-3.00012-8>

Las células en mal estado, presentan un mayor número de cicatrices y apariencia globular (debido a la reducción del tamaño de su vacuola), o bien, carecen de organelos, pues al final de su ciclo de vida, la levadura lleva a cabo un proceso de autólisis, en el cual su pared celular pierde integridad y se libera el material celular.

- b) Pureza del cultivo de levadura. El cultivo debe encontrarse libre de la presencia de otros microorganismos como bacterias y levaduras silvestres.
- c) Viabilidad de la levadura. La levadura se considera viable si  $\geq 95\%$  de las células presentes en el cultivo se encuentran vivas.

#### 4.10. Inoculación de la levadura y fermentación

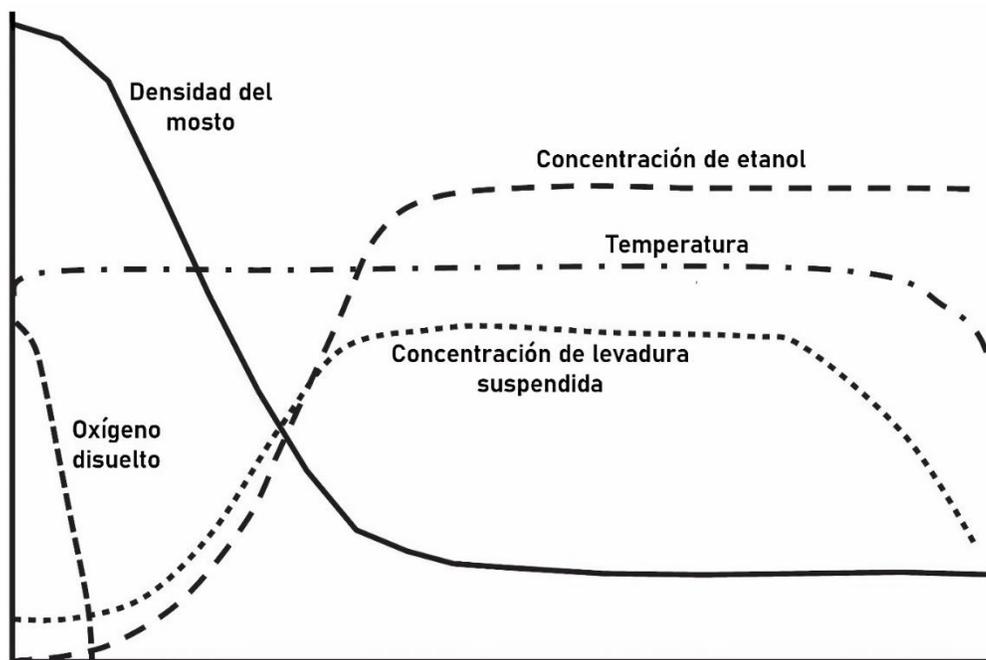
Si la levadura cumple con las condiciones anteriormente mencionadas, es inoculada al fermentador y suspendida en el mosto lupulado. La levadura absorbe el oxígeno presente en el fermentador y una vez que el oxígeno se acaba, esta comienza a llevar a cabo el proceso de fermentación:



La fermentación es un proceso bioquímico que involucra una compleja serie de reacciones químicas catalizadas por enzimas que por su extensión y complejidad no será abordada en esta recopilación.

Con el tiempo, los sistemas de fermentación han evolucionado a fin de optimizar el proceso y disminuir el riesgo de contaminación de la cerveza con microorganismos indeseables. Los fermentadores tradicionales constan de tinas rectangulares (abiertas o cerradas) de madera o piedra. Mientras que, los fermentadores modernos son abiertos o cerrados, de diversos materiales (plástico, acero inoxidable, cristal, aluminio, cobre, acero, etc.) y diferentes diseños (forma cilíndrica, esférica, de cubeta, de tina, de vaso, de garrafón o de barril con fondos planos o cónicos). Aunque por lo común son tanques cilindro cónicos de acero inoxidable (CCVs por sus siglas en inglés).

El comportamiento de la levadura en relación al tiempo que pasa en el fermentador, se observa en la **Figura 4.25**.



**Figura 4.25. Progreso típico de la fermentación.**

Se muestra los cambios en la densidad del mosto, el oxígeno disuelto, la concentración de levadura suspendida, la concentración de etanol y las condiciones de temperatura en el fermentador. Adaptada de Boulton C., 2006. *Chapter 4: Fermentation*.

Al inicio del proceso, la levadura atraviesa un periodo corto de adaptación a las condiciones del sistema, durante el cual crece lentamente a medida que aprovecha los nutrientes presentes en el mosto.

Después de la etapa de adaptación, se presenta un periodo de crecimiento exponencial, en el cual la levadura crece hasta alcanzar un máximo. Lo anterior trae como resultado, la disminución de la densidad del mosto y un incremento de la concentración de etanol.

Finalmente, se lleva a cabo una fase de declinación, en la cual los nutrientes del mosto se vuelven escasos y por ende, la levadura desacelera su crecimiento hasta que finalmente, flocula y se termina el proceso.

El producto de la fermentación se conoce como “cerveza joven o verde” y a pesar de poder ingerirse, aún presenta turbidez, carece de suficiente carbonatación y posee un perfil sensorial, físico y microbiológico inestable, por lo que es necesario llevar a cabo un proceso de maduración.

#### 4.11. Maduración

El proceso de maduración tiene como principal objetivo, proporcionarle a la cerveza una estabilidad coloidal apropiada para que cumpla con el tiempo de vida de anaquel proyectado, así como permitir que esta adquiera un perfil sensorial característico. No obstante, la maduración o acondicionamiento de la cerveza, también colabora en:

1. Inducir una segunda fermentación que permita la carbonatación de la cerveza.
2. Permitir la formación de sabores y olores provenientes de la levadura, que tengan un impacto favorable en el perfil sensorial del producto final.
3. Reducir o eliminar la turbidez de la cerveza.
4. Ajustar la cantidad de componentes. Se puede mejorar o reducir la cantidad de espuma presente en la cerveza, así como adicionar adjuntos o lúpulo para mejorar el perfil sensorial.
5. Eliminar o reducir el crecimiento de microorganismos.
6. Clarificar la cerveza de manera previa al proceso de filtración.

**Segunda fermentación.** La segunda fermentación de la cerveza, contribuye a la reducción de compuestos con aromas indeseables como diacetilo (aroma a mantequilla) y acetaldehído (manzana verde y calabaza cruda) y consiste en fermentar la cerveza bajo condiciones de baja temperatura y baja concentración de levadura. Las técnicas empleadas son las siguientes:

- Técnica *krausen*. Es una técnica tradicional alemana que consiste en añadir *krausen* a la cerveza verde y transferir la mezcla a un tanque abierto a 8°C; la aireación del tanque, permite que se eliminen aromas indeseables. Después de 24 h, el tanque se cierra con la intención de carbonatar al producto, el cual se almacena por 1 a 3 semanas. Pasado ese tiempo, se obtiene una cerveza carbonatada con un perfil sensorial estable y un sedimento en el fondo del tanque.
- Acondicionamiento a temperaturas “frías” o *Lagering*. Consiste en reducir la temperatura de la cerveza a fin de promover la floculación de la levadura y la coalescencia de los complejos polifenol-proteína que causan la turbidez de la

cerveza. La cerveza se traslada al segundo fermentador y se enfría a 10°C. Después de días o semanas, la temperatura se reduce hasta alcanzar  $\leq 1^\circ\text{C}$ , lo cual permite que el proceso de fermentación se desacelere a medida que se reduce la temperatura. El producto final se carbonata y se separa de la levadura y otros sólidos.

- Acondicionamiento a temperaturas “cálidas” (*warm conditioning* en inglés). Es un periodo de maduración posterior a la primera fermentación que pretende emplear a la levadura para reducir la presencia de cetonas vecinales (VDKs en inglés) como el diacetilo y la 2,3-pentanodiona, las cuales poseen un aroma a mantequilla y a miel y pueden producir problemas en la estabilidad del perfil sensorial de la cerveza durante el almacenamiento (Mosher y Trantham, 2017; Palmer, 2017). Hacia el final de la primera fermentación, la temperatura de fermentación se incrementa aprox. 5°C más y se mantiene a esa temperatura por un periodo considerable de tiempo. Tan pronto como la levadura termina de consumir los azúcares fermentables presentes en el mosto, esta empieza a consumir las cetonas vecinales, convirtiéndolas en metabolitos activos cuyos aromas tienen un menor impacto en el perfil sensorial de la cerveza.

Los resultados obtenidos por medio de esta técnica también pueden obtenerse mediante el uso de las otras técnicas mencionadas. Sin embargo, se requeriría de días, semanas o incluso meses para conseguir los mismos resultados que se obtienen en 12-24 h durante el acondicionamiento a temperaturas cálidas.

Algunos ajustes que se pueden realizar durante la segunda fermentación, son:

- Reducción de la turbidez. La turbidez se genera debido a la formación de complejos polifenol-proteína y la presencia de moléculas de  $\beta$ -glucano y cristales de oxalato de calcio en la cerveza. Para reducirla, durante la segunda fermentación se suele añadir la enzima papaína o la polivinilpirrolidona.
- Ajuste de sabores y aromas. El sabor de la cerveza se puede ajustar añadiendo frutas, especias o saborizantes artificiales al tanque de maduración.

#### 4.12. Cervezas *Sour*

Las cervezas tradicionales como la cerveza *Sour* caracterizada por su aroma ácido y fresco, son elaboradas a partir de una variante del proceso de fermentación conocida como fermentación espontánea. Esta fermentación se basa en utilizar las levaduras presentes en el ambiente en lugar de emplear un inóculo de características conocidas. Algunos ejemplos de cervezas pertenecientes a la categoría de cerveza *Sour*, son las cervezas Lámbicas, la cerveza *Gueuze* y la cerveza *Flanders Red Ale*.

Las cervezas Lámbicas datan del siglo XIII d.C. y se elaboran en algunas regiones de Europa como son Bélgica y el norte de Francia. Para su fabricación se suele emplear un “mosto turbio”, caracterizado por poseer altas concentraciones de proteínas y carbohidratos y contener lúpulo añejado, el cual posee la misma actividad antibacteriana que el lúpulo fresco, pero menor amargor.

Este tipo de cervezas se elaboran entre octubre y marzo, porque durante estos meses las temperaturas en Europa suelen ser <12°C. Dichas temperaturas inhiben la presencia de microorganismos descomponedores que pueden generar aromas desagradables.

El proceso de elaboración de las cervezas Lámbicas es similar al proceso convencional con la particularidad de que después de ebullición del mosto lupulado, este se transfiere a tinajas abiertas de acero inoxidable o cobre a fin de reducir su temperatura (<25°C). Esta etapa permite que el mosto se enfríe y se puedan inocular los microorganismos del ambiente. Pasadas 16 h, el mosto es trasladado a barriles de madera o metal y almacenado a 10-25°C/4 a 8 meses. Posteriormente, se lleva a cabo un proceso de maduración, el cual varía de 1 a 3 años.

La fermentación de este tipo de cervezas ocurre en 4 etapas sucesivas:

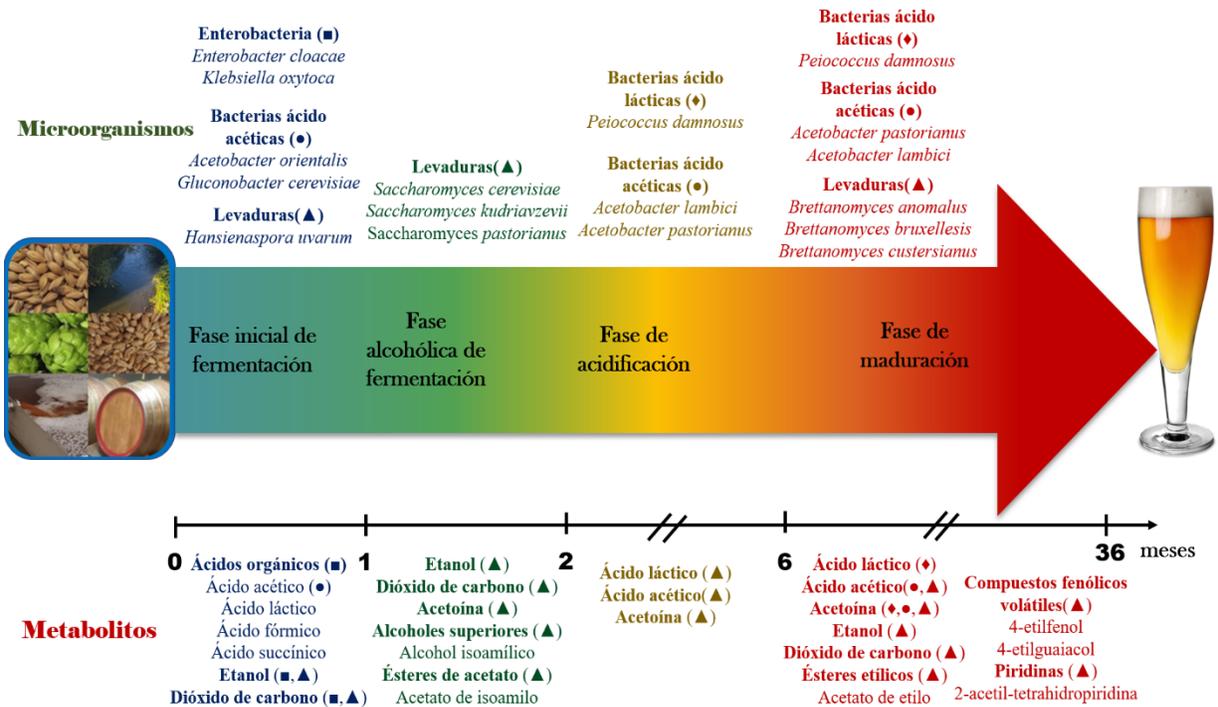
1. Fase de fermentación inicial. Dominada por la presencia de enterobacterias como *Klebsiella*, *Enterobacter cloacae* y *Klebsiella oxytoca* y algunas levaduras como *Hanseniaspora uvarum*.
2. Fase de fermentación alcohólica. En esta fase, se incrementa la concentración de etanol en el sistema. Al inicio de la fase, se observa una mayor presencia de

la levadura *Saccharomyces cerevisiae*. Mientras que, hacia el final de la fase, se observa una mayor presencia de *Saccharomyces pastorianus* y *Saccharomyces kudriavzevii*.

3. Fase de acidificación. Ocurre 1 a 4 meses después de haber iniciado la fermentación y se caracteriza por la presencia de bacterias lácticas y acetobacterias. Se producen grandes concentraciones de ácido láctico y ácido acético que reducen (pH<3.5).

Algunos de los microorganismos presentes en esta etapa son: *Pediococcus damnosus* y *Acetobacter lambici*.

4. Fase de maduración. Ocurre después de 8 meses de haber iniciado la fermentación. En esta etapa se detecta la presencia de varios microorganismos del género *Brettanomyces* y otras especies de levaduras como *P. membranifaciens*, *D. hansenii*, y *W. anomalus* (Bongaerts, et al., 2021), **Figura 4.26.**

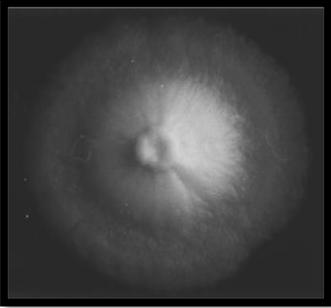
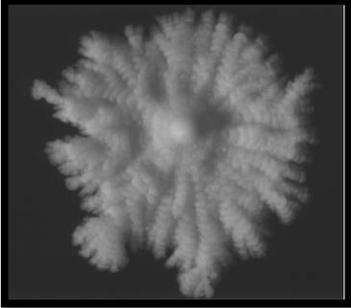
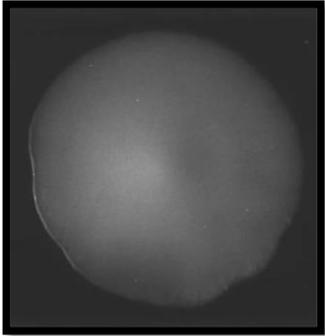


**Figura 4.26. Fases del proceso de elaboración de las cervezas Sour y los metabolitos y microorganismos involucrados en cada fase.**

Adaptada de Bongaerts D., et al., 2021. *Technological and Environmental Features Determine the Uniqueness of the Lambic Beer Microbiota and Production Process.*

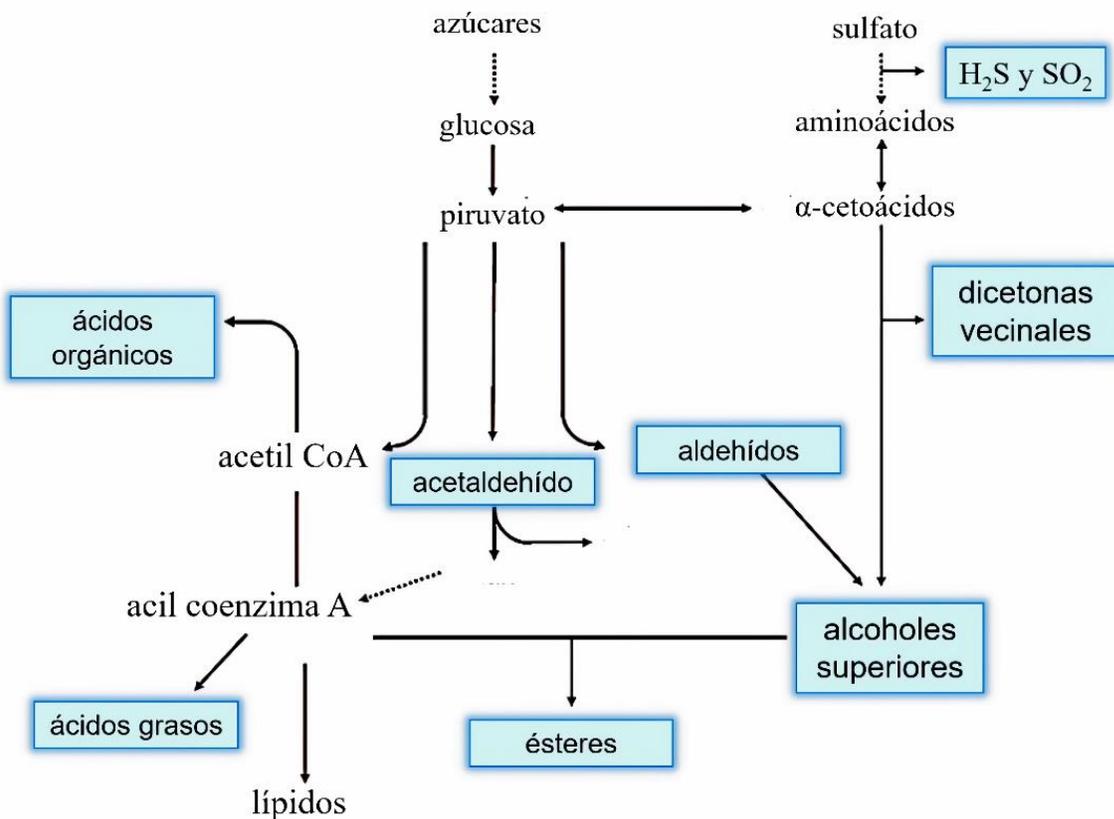
En la siguiente tabla, se muestran las diferencias entre los tres estilos de cerveza más comunes:

**Tabla 4.9. Clasificación de la cerveza de acuerdo con la levadura empleada y las condiciones de fermentación y maduración.** Lewis M. y Young T., 2001. *Brewing*; Mosher M. y Trantham K., 2017. *Brewing Science: A Multidisciplinary Approach* y Boulton C. y Quain D., 2006. *Brewing Yeast and Fermentation*.

| <b>Lager</b>   | <b>Ale</b>   | <b>Sour (Lámbicas, Gueuze)</b>   |
|--|--|--|
| <i>Saccharomyces pastorianus, carlbergensis o uvarum</i>                           | <i>Saccharomyces cerevisiae</i>  | Levaduras de la zona   |
| Fermentación a temperaturas “bajas” (8 a 12 °C)                                    | Fermentación a temperaturas “altas” (15 a 18°C)                                    | Fermentación espontánea (<12°C)  |
| Requiere de 3-10 días de fermentación  | Requiere de 3-5 días de fermentación   | Diferentes tiempos de fermentación   |
|  |  |  |
| Floculación  | Floculación  | Floculación  |
| Necesita de 10-30 días para su maduración  | Necesita de 5-10 días para su maduración   | Diferentes temperaturas de maduración  |
| Menos aroma  | Más aromática  | Muy seca   |
| Más ligera y refrescante   | Más cuerpo   | Baja presión de CO <sub>2</sub>  |
| Predomina en todo el mundo   | Se encuentra en Inglaterra y el Norte de Europa                                    | Se encuentra principalmente en Bélgica, Bruselas y sus alrededores                   |

#### 4.13. Aromas en la cerveza impartidos por la levadura (congenéricos) y otros componentes

Las levaduras además de ser capaces de convertir los azúcares fermentables en etanol y dióxido de carbono mediante el proceso de fermentación, poseen enzimas que modifican compuestos químicos mediante reacciones de reducción, oxidación y esterificación, lo cual da como resultado la formación de compuestos orgánicos volátiles y no volátiles que tienen un rol importante en el sabor, aroma y calidad final de la cerveza (Buiatti, 2008), **Figura 4.27**.



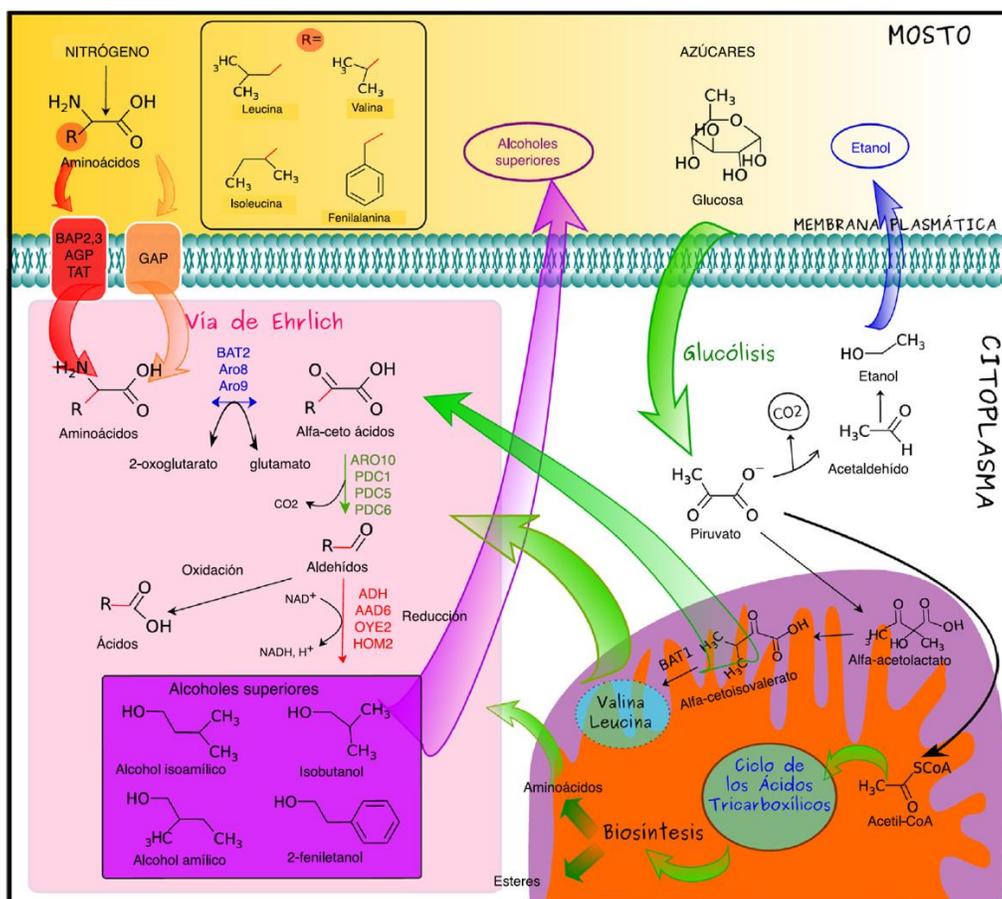
**Figura 4.27. Relación entre las rutas metabólicas que contribuyen a la formación de los principales compuestos químicos responsables del perfil sensorial de la cerveza.** Adaptada de Lodolo E., *et al.*, 2008. *The yeast Saccharomyces cerevisiae- the main character in brewing.*

De acuerdo con Liu, 2015, entre los compuestos responsables del perfil sensorial final de la cerveza, se encuentran:

- Alcoholes. Los principales alcoholes que influyen el sabor/olor de la cerveza son: etanol, 1-propanol, isobutanol, 1-pentanol, alcohol isoamílico, alcohol amílico y 2-feniletanol, **Tabla 4.10**.

**Tabla 4.10. Principales alcoholes presentes en la cerveza.** Bamforth C. y Cook D., 2019. *Food fermentation and micro-organisms*; Loviso C. y Libkind D., 2019. *Síntesis y regulación de los compuestos del aroma y sabor derivados de la levadura en la cerveza: alcoholes superiores*

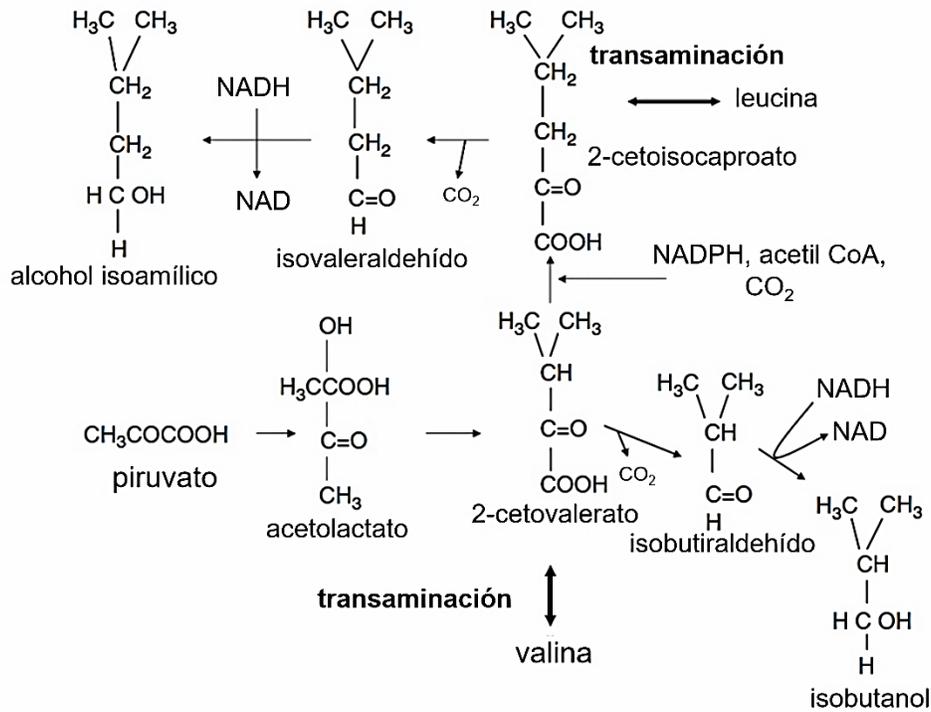
| Alcohol            | Umbral del aroma(mg/L) | Aroma percibido                      |
|--------------------|------------------------|--------------------------------------|
| Etanol             | 14 000                 | Pungente, alcohol                    |
| 1-Propanol         | 800-700                | Disolvente orgánico, dulce, alcohol  |
| Isobutanol         | 16-200                 | Disolvente orgánico, alcohol         |
| Alcohol isoamílico | 50-65                  | Alcohol, a plátano, afrutado, amargo |
| Alcohol amílico    | 50-70                  | Alcohólico, a disolvente             |
| Feniletanol        | 40-100                 | A flores, a rosas, a perfume         |



**Figura 4.28. Esquema de las principales rutas metabólicas que contribuyen a la síntesis de alcoholes.** En la membrana plasmática, BAP2,3, AGP, TAT y GAP representan proteínas transportadoras de aminoácidos. Dentro de la vía de Ehrlich (citoplasma) las flechas en azul, verde y rojo indican la acción de las enzimas aminotransferasas, descarboxilasas y deshidrogenasas, respectivamente. Loviso C. y Libkind D., 2019. *Síntesis y regulación de los compuestos del aroma y sabor derivados de la levadura en la cerveza: alcoholes superiores*.

El etanol es el producto de la acción de la levadura sobre los azúcares fermentables del mosto y en la mayoría de las cervezas, se encuentra en concentraciones 350 veces más altas que cualquier otro alcohol. Este compuesto además de proporcionar un aroma alcohólico y pungente actúa como acarreador de otros compuestos volátiles con aroma (Bamforth y Cook, 2019), **Figura 4.28.**

Por otra parte, los alcoholes superiores son producto del metabolismo secundario de la levadura y se encuentran en altas concentraciones si se comparan con otros compuestos volátiles presentes en la cerveza. Son intermediarios en la síntesis de ésteres proporcionalmente más aromáticos y responsables de impartir una variedad de aromas, cuya percepción sensorial depende de las concentraciones en las que se encuentren. Algunos aromas impartidos por este tipo de compuestos son: afrutados, florales, pungentes, a rosa y a disolvente orgánico. Los alcoholes superiores se generan por medio de dos rutas metabólicas: catabólica o ruta de Ehrlich y anabólica. En la ruta catabólica los aminoácidos presentes en el mosto son sometidos a una reacción de transaminación catalizada por los  $\alpha$ -cetoácidos de la levadura y posteriormente, a reacciones de descarboxilación y reducción para producir alcoholes. Por su parte, la ruta anabólica empieza con el piruvato (producto final de la ruta de Embden-Meyerhof-Parnas) que, al llevar a cabo la síntesis de leucina y valina, da lugar a cetoácidos, intermediarios de la ruta responsables de la producción de alcoholes. Cuando los cetoácidos se acumulan, estos son sometidos a reacciones de descarboxilación y reducción, cuyo producto final son los alcoholes superiores. La formación de alcoholes superiores y la ruta empleada para su síntesis se encuentran influenciadas por: la concentración de nitrógeno amínico libre (FAN por sus siglas en inglés), la cepa de levadura empleada y las condiciones de fermentación, **Figura 4.29.**



**Figura 4.29. Vía anabólica para la síntesis de alcoholes superiores.**  
Bamfoth C. y Cook D., 2019. *Food fermentation and micro-organisms*.

2. Aldehídos. La cerveza cuenta con una extensa cantidad de aldehídos, entre los que se encuentran: acetaldehído, hexanal, (*E*)-2-nonenal, furfural, 2-metilpropanal, 2-metilbutanal, 3-metilbutanal, 3-metiltiopropional, 2-fenilacetaldehído y benzaldehído. Estos compuestos imparten las siguientes notas: a manzana (aldehído), a malta (aldehídos ramificados), a mosto (metional), floral (2-fenilacetaldehído) y a cereza o almendra (benzaldehído). El acetaldehído es un subproducto de la fermentación, posee un umbral de detección de 5 a 50 mg/L e imparte un aroma a manzana verde. Este compuesto puede ser excretado por la levadura en pequeñas concentraciones bajo condiciones fisiológicas normales. No obstante, la concentración de este compuesto en la cerveza suele ser baja, debido a que, en una fermentación eficiente, la levadura convierte la mayor parte del acetaldehído en etanol. En la cerveza también pueden hallarse bajas concentraciones de aldehídos ramificados y 2-fenilaldehído. Estos compuestos son secretados por la levadura durante el catabolismo de aminoácidos (vía de Ehrlich).

3. Ésteres. Los ésteres de cadena corta junto con los ésteres de ácidos grasos ramificados son los componentes volátiles presentes en la cerveza con más impacto en sus características sensoriales. Se estima que en la cerveza existen al menos 100 ésteres diferentes (Loviso y Libkind, 2019).

Los ésteres producidos por la levadura pueden clasificarse en: ésteres de acetato, típicamente acetato de etilo, acetato de isoamilo y acetato de 2-feniletíl y ésteres de ácidos grasos de cadena media, principalmente hexanoato de etilo y octanoato de etilo. También se pueden encontrar presentes otros compuestos como: amil acetato, acetato de isobutilo, butirato de etilo, decanoato de etilo y dodecanoato de etilo. Por lo general, los ésteres imparten aromas frutales como pera, manzana dulce y plátano, pero también pueden aportar aromas a solvente orgánico, **Tabla 4.11.**

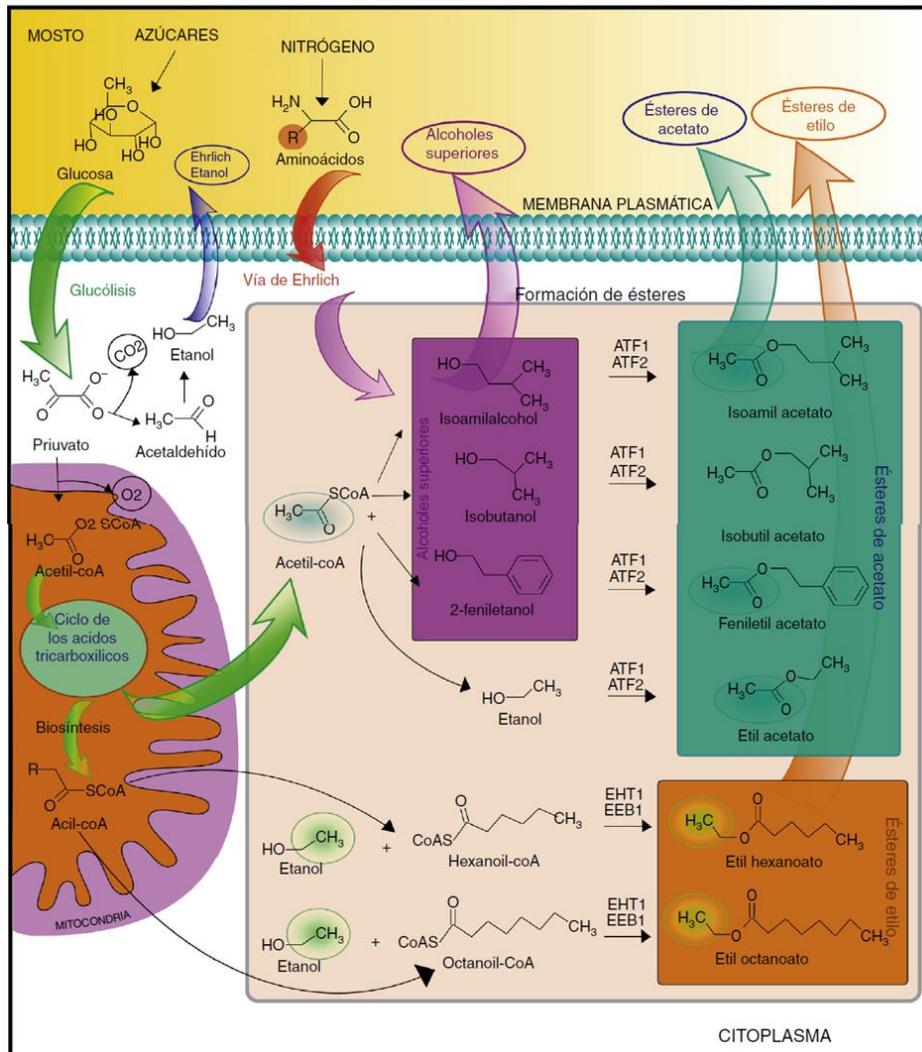
**Tabla 4.11. Algunos ésteres presentes en la cerveza.**

Loviso C. y Libkind D., 2018. *Síntesis y regulación de los compuestos del aroma y sabor derivados de la levadura en la cerveza: ésteres*; Bamfoth C. y Cook D., 2019. *Food fermentation and micro-organisms*.

| Éster                 | Umbral del aroma(mg/L) | Aroma percibido                                   |
|-----------------------|------------------------|---|
| Acetato de etilo      | 30-33                  | Disolvente, afrutado, pera                        |
| Acetato de isoamilo   | 1.0-1.2                | Plátano   |
| Isobutil acetato      | 0.2                    | Afrutado  |
| Hexanoato de etilo    | 0.22                   | A manzana, anisado                                |
| Octanoato de etilo    | 0.9                    | A manzana, dulce, afrutado, pera, plátano, floral |
| Acetato de feniletilo | 0.3-3.8                | A rosas, a miel, a manzana                        |

Los ésteres se obtienen durante la primera fermentación y su formación se encuentra asociada al metabolismo de lípidos y al crecimiento de la levadura. Estos compuestos se sintetizan en el citoplasma, a partir de una reacción que requiere de un alcohol y acetil CoA y que es catalizada por la enzima acetil transferasa. En ausencia de oxígeno, la reacción permite la formación de ésteres de acetato. Por otra parte, la combinación de cadenas largas de acil CoA y etanol dan lugar a etil ésteres.

Una vez sintetizados, los ésteres se difunden a través de la membrana plasmática de la levadura y son liberados al medio de fermentación (Loviso y Libkind, 2019), **Figura 4.30.**



**Figura 4.30. Esquema de la ruta de síntesis de ésteres dentro de la levadura.**  
 Loviso C. y Libkind D., 2019. *Síntesis y regulación de los compuestos del aroma y sabor derivados de la levadura en la cerveza: alcoholes superiores.*

La síntesis de ésteres está regulada por varios factores, entre los que se incluyen: la cepa de levadura, la temperatura, la presión hidrostática, la composición del mosto, la concentración y el tipo de azúcares fermentables y la presencia de ácidos grasos insaturados.

4. Ácidos. La cerveza posee ácidos inorgánicos (principalmente ácido fosfórico) y ácidos orgánicos que son sintetizados por la levadura durante la fermentación y maduración de la cerveza.

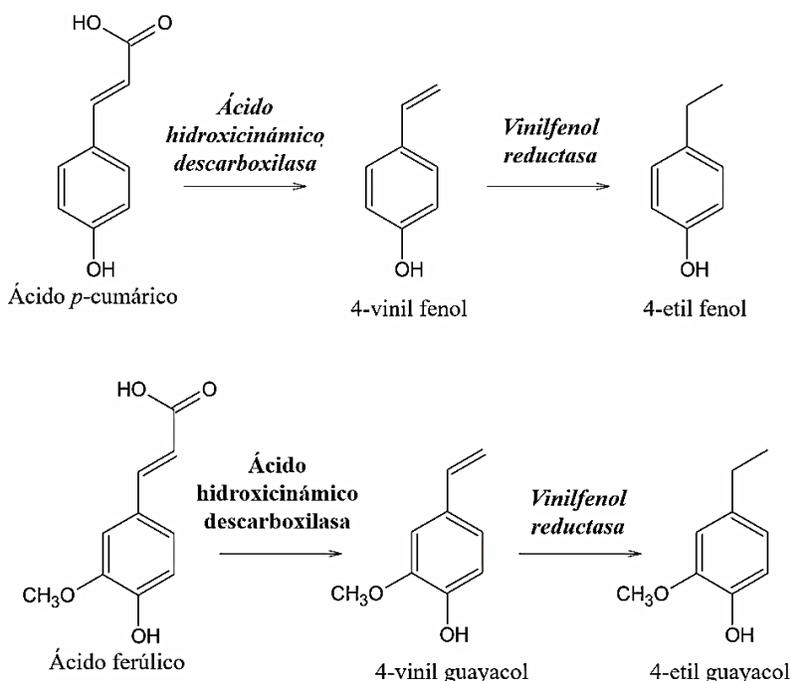
Los ácidos orgánicos contribuyen a la acidez del producto y se clasifican en volátiles y no volátiles. Entre los ácidos orgánicos volátiles se encuentran: acético (C2), butírico (C4), caproico (C6), caprílico (C8), cáprico (C10) y láurico (C12), así como, 3-metilbutanoico y 2-fenilacético que se encuentran en pequeñas cantidades, pero que aportan aromas dulces. Mientras que, entre los ácidos no volátiles se encuentran: pirúvico,  $\alpha$ -cetoglutárico, succínico y ácidos lácticos.

La cerveza también puede poseer ácidos grasos de cadena larga como son: caprílico, cáprico y láurico, debido a la ruptura de la membrana plasmática de las levaduras.

5. Compuestos fenólicos. Los compuestos fenólicos que se encuentran regularmente en la cerveza son: guayacol, 4-vinil siringol, 4-vinil guayacol, 4-vinil fenol, 4-etil guayacol, 4-etilfenol, eugenol y vainillina. La mayoría de estos compuestos, poseen notas a clavo, picantes, ahumadas, medicinales o “fenólicas”, por lo que su presencia suele ser indeseable en gran parte de los estilos de cerveza. Sin embargo, existen estilos de cerveza como las cervezas de trigo y las cervezas Lámbicas en las que la presencia de compuestos fenólicos es esencial para lograr obtener el perfil sensorial característico del producto.

La levadura es responsable de la producción del 4-vinil guayacol, el 4-vinil fenol, el 4-etil guayacol y el 4-etil fenol. Esos compuestos son sintetizados mediante la descarboxilación enzimática de ácidos fenólicos, ácido ferúlico y ácido *p*-cumárico, lo cual da lugar a la formación de 4-vinil guayacol y 4-vinilfenol, los cuales pueden o no reducirse a 4-etil guayacol y 4-etil fenol, respectivamente,

**Figura 4.31.**

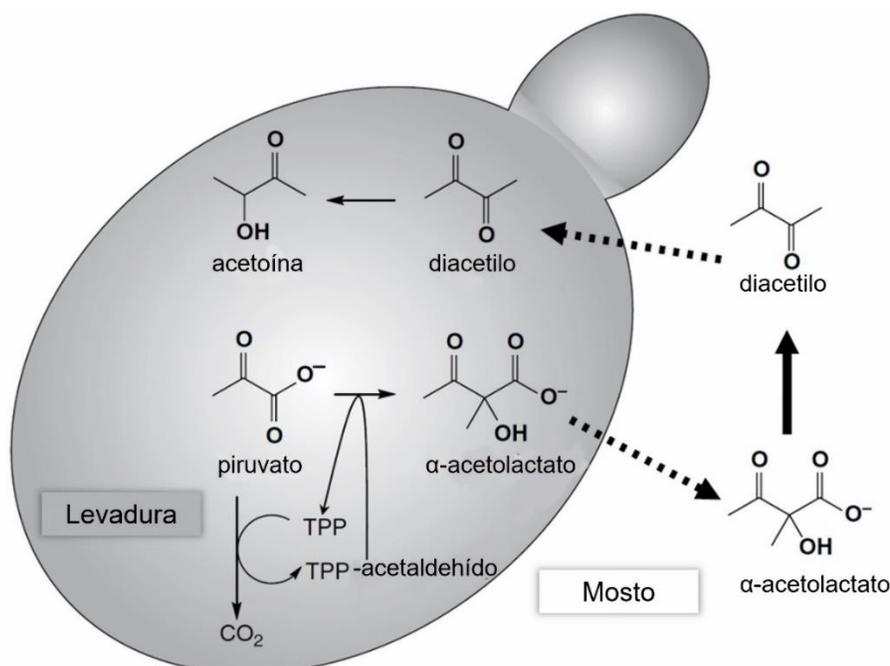


**Figura 4.31. Formación del 4-etil fenol y el 4-etil guayacol a partir de los ácidos *p*-cumárico y ácido ferúlico.** Adaptada de Tufariello M., *et al.*, 2021. *Influence of non-Saccharomyces on wine chemistry: a focus on aroma-related compounds.*

La cepa de levadura empleada en la elaboración de la cerveza también tiene implicaciones en el tipo de compuestos fenólicos presentes en el producto. Las cepas de *S. cerevisiae* solo lleva a cabo la descarboxilación enzimática, por lo que es más común que las cervezas elaboradas con esta levadura presenten una mayor concentración de 4-vinil guayacol y 4-vinil fenol. Por otra parte, las cepas de *Brettanomyces* sp., son capaces de llevar a cabo tanto la descarboxilación como la reducción, por lo que es común que se encuentre 4-etil guayacol y 4-etilfenol en las cervezas que fueron elaboradas usando esta levadura.

6. Cetonas. La cerveza contiene una baja concentración de cetonas. Algunas de las cetonas encontradas en la cerveza son: 2-nonanona,  $\beta$ -damascenona,  $\beta$ -ionona, 2,3-butanodiona y 2,3-pentanodiona. No obstante, las cetonas con mayor impacto en las características sensoriales de la cerveza son: las cetonas vecinales (VDKs), el diacetil y la 2,3-pentanodiona. Estos compuestos aportan aromas a mantequilla, a caramelo de azúcar y a palomitas, los cuales son aromas

indeseables en las cervezas *Lager*, pero pueden constituir una característica distintiva en algunos estilos de cerveza, como es el caso de las *English Ale*. Las cetonas vecinales (VDKs en inglés) pueden tener efectos desfavorables en la formación de alcoholes, pues interfieren en la producción de los aminoácidos valina e isoleucina, reduciendo la producción de alcoholes superiores por medio de la vía anabólica. La síntesis de cetonas vecinales se basa en la liberación de moléculas precursoras por parte de la levadura y su consiguiente degradación espontánea, **Figura 4.32**.



**Figura 4.32. Producción y eliminación de diacetilo por parte de la levadura.**  
Elaborada a partir de Bamfoth C. y Cook D., 2019. *Food fermentation and micro-organisms*.

Las levaduras pueden reducir la concentración de cetonas vecinales, mediante su conversión a acetoina, 2,3-butanediol y 2,3-pentenediol, los cuales poseen un umbral de olor más alto que las cetonas vecinales.

La producción de cetonas vecinales se puede regular mediante el control de la composición del mosto, por medio de la técnica de fermentación empleada (ej. aumento de temperatura a mitad de la fermentación y uso de la técnica *krausen*) y el mejoramiento de las cepas de levadura.

7. Compuestos que contienen azufre. Algunos de los compuestos con azufre que pueden ser encontrados en la cerveza son: : metanotiol o metilmercaptano, etanotiol o etilmercaptano, sulfuro de hidrógeno (H<sub>2</sub>S), sulfuro de dimetilo, disulfuro de dimetilo, metional, metionol, acetato de 3-(metiltio) propilo y 2-mercapto-3-metil-1-butanol. La mayoría de estos compuestos generan aromas indeseables como: a huevo podrido, a repollo, a cebolla o a ajo. Sin embargo, existen algunos compuestos con aromas afrutados como son 3-mercaptohexanol y acetato de 3-mercaptohexilo.

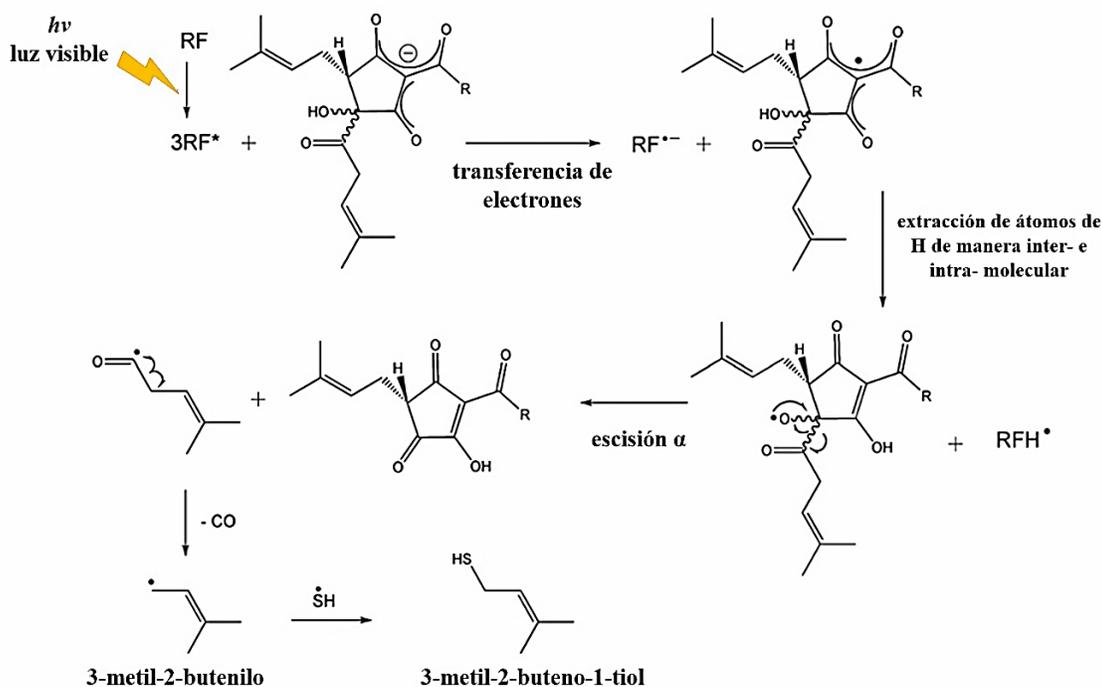
**Tabla 4.12. Compuestos azufrados presentes en la cerveza.**  
Bamfoth C. y Cook D., 2019. *Food fermentation and micro-organisms*.

| Compuesto azufrado                   | Umbral del aroma(mg/L) | Aroma percibido             |
|--------------------------------------|------------------------|-----------------------------|
| Sulfuro de hidrógeno                 | 0.005                  | Huevo podrido               |
| Dióxido de azufre                    | 25                     | Fósforos quemados           |
| Metanotiol                           | 0.002                  | A desagüe                   |
| Etanotiol                            | 0.002                  | Putrefacción                |
| Propanotiol                          | 0.0015                 | A cebolla                   |
| Dimetilsulfuro                       | 0.03                   | A maíz dulce                |
| Disulfuro de dimetilo                | 0.0075                 | Vegetales podridos          |
| Trisulfuro de dimetilo               | 0.0001                 | Vegetales podridos, cebolla |
| Tioacetato de S-metilo               | 0.05                   | Repollo cocido              |
| Sulfuro de dietilo                   | 0.0012                 | Vegetales cocidos, ajo      |
| Metional                             | 0.25                   | Papa cocida                 |
| 3-metil-2-buteno-1-tiol (preniltiol) | 0.000 0004-0.01        | A zorrillo                  |
| 2-furfuril mercaptano                | 0.000 0004-0.01        | A goma                      |

El sulfuro de hidrógeno (H<sub>2</sub>S) posee un aroma a huevo podrido y es uno de los compuestos producidos por la levadura a partir de la degradación de la cisteína o el glutatión y de la reducción asimilativa de sulfato y sulfito, especialmente en condiciones donde no hay suficiente nitrógeno. Su concentración generalmente disminuye hacia el final de la fermentación, debido a su reasimilación o unión a las células de levadura. No obstante, el H<sub>2</sub>S puede reaccionar con aldehídos

insaturados y cetonas para generar tioles con aromas tanto deseables como indeseables. Tioles como el 2-mercaptoetanol, el 3-mercaptoetanol, el 3-mercaptohexanol, el 4-mercapto-4-metil-2-pentanona, así como el éster acetato de 3-mercaptohexilo son generados durante la fermentación, debido a la degradación de la cisteína y la homocisteína presentes en el mosto.

El “azorrillamiento” o “quemado” de la cerveza, este asociado a la presencia del compuesto 3-metil-2-buten-1-tiol o preniltiol, **Figura 4.33**.



**Figura 4.33. Mecanismo de reacción para la obtención de 3-metil-2-buten-1-tiol.**

Adaptada de Caballero I., *et al.*, 2012. *Iso- $\alpha$ -acids, bitterness, and loss of beer quality during storage.*

El preniltiol puede ser detectado a muy bajas concentraciones y es producido cuando los iso- $\alpha$ -ácidos del lúpulo se exponen a la luz (UV o visible), fenómeno que propicia su degradación. Para que se lleve a cabo la síntesis de esta sustancia, es necesaria la excitación de la molécula riboflavina, la cual en presencia de luz se convierte en una especie fotoreactiva que tiene una fuerte afinidad por los electrones y iones hidrógeno. La irradiación de los iso- $\alpha$ -ácidos induce la transferencia de un electrón desde el tricarbonilo ionizado hacia la riboflavina en estado de triple energía ( $3RF^*$ ), lo cual da lugar a la formación de

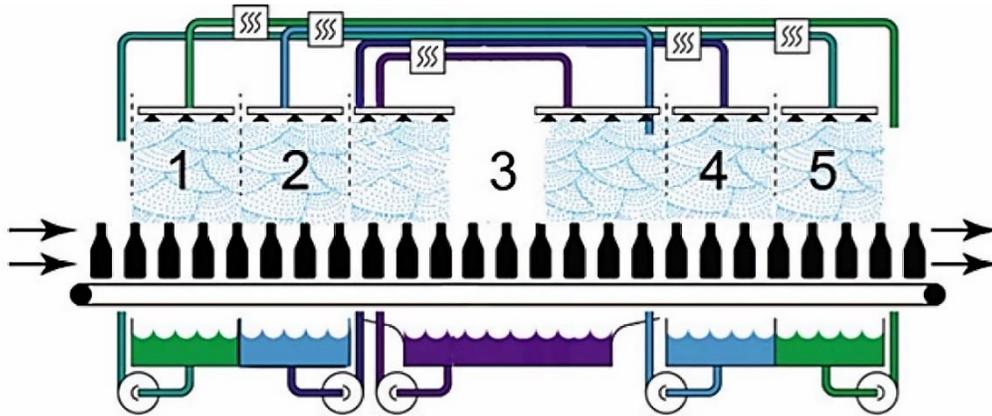
radicales triacilmetilo. Estos radicales se estabilizan mediante la extracción de átomos de H, dando lugar a radicales alcoxi-. Seguidamente, los radicales alcoxi- se escinden para formar el 4-metil-3-pentenilo y el 3-metilbutil-2-enilo, el cual es el principal precursor del 3-metil-2-buteno-1-tiol en presencia de una fuente de sulfuro disponible (Caballero, *et al.*, 2012).

#### **4.14. Tratamientos posteriores a la maduración**

Después del proceso de maduración, la cerveza puede someterse a un proceso de filtración profunda en la que las partículas indeseables pasan a través de un lecho de filtrado de gran profundidad y son retenidas dentro de ese medio.

Con la intención de retirar la levadura residual procedente del proceso de fermentación y reducir la presencia de microorganismos como levaduras silvestres y bacterias que puedan afectar la estabilidad de la cerveza, se lleva a cabo la pasteurización anterior o posterior al empaçado. Las cervecerías usualmente operan en el rango de 5-20 PU y los métodos empleados son:

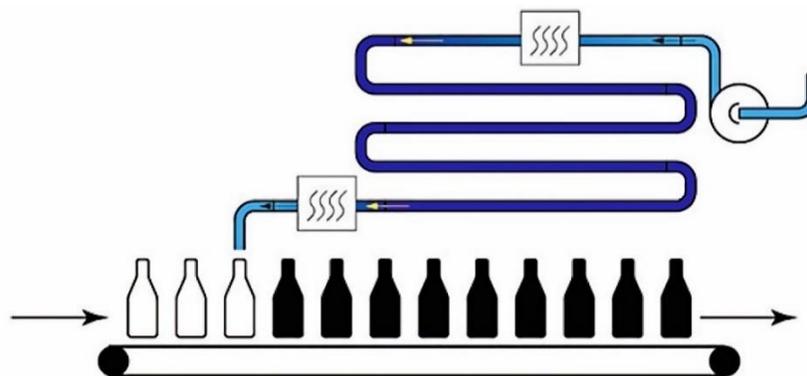
- Pasteurización en túnel (después del empaçado). Este método se emplea para pasteurizar empaques con pequeños volúmenes como es el caso de botellas y latas. No se recomienda para la pasteurización de barriles, pues se requeriría de una enorme cantidad de energía para asegurarse que el producto haya sido eficientemente pasteurizado. El proceso se lleva a cabo de la siguiente manera:
  1. La cerveza se empaça y sella.
  2. El producto empaçado, pasa a través de un túnel de pasteurización, donde se esparce agua caliente en constante recirculación.
  3. Se incrementa la temperatura del sistema hasta obtener la temperatura de pasteurización requerida para el producto (típicamente de 60°C) y se mantiene así, hasta llegar al tiempo de reposo deseado (10-20 min).
  4. Se esparce agua fría sobre el producto para que su temperatura descienda.



**Figura 4.35. Esquema de la pasteurización en túnel.** La temperatura del sistema se incrementa en las regiones 1 y 2 y disminuye en las regiones 4 y 5. La región 3 corresponde a la temperatura de pasteurización deseada. Mosher M. y Trantham K., 2017. *Brewing Science: A Multidisciplinary Approach*.

- Pasteurización rápida o “flash” (antes del empaçado). Este método es empleado para el llenado de barriles y consiste en:

Calentar la cerveza terminada en intercambiadores de calor hasta que el producto alcance la temperatura de pasterización deseada (típicamente 72°C). La cerveza es transportada a través de un arreglo de tuberías que mantienen al producto el tiempo suficiente para que la pasteurización sea eficiente (30 a 60 segundos). Finalmente, el producto se empaça en recipientes asépticos y se enfría antes de sellar, **Figura 4.34**.



**Figura 4.34. Esquema de la pasteurización rápida.** Consiste en tres regiones: un intercambiador de placas que calienta la cerveza hasta la temperatura deseada, un arreglo de tuberías que mantiene las condiciones de pasteurización y una región de enfriamiento. Mosher M. y Trantham K., 2017. *Brewing Science: A Multidisciplinary Approach*.

## 5. SUBPRODUCTOS DEL PROCESO DE ELABORACIÓN DE CERVEZA

Los residuos alimentarios son aquellas fracciones comestibles y no comestibles obtenidas a partir de la producción, procesado, venta y consumo de un alimento y caracterizadas por poseer una alta carga de material orgánico. Se estima que alrededor del 20% del suministro de alimentos orientados al consumo alimenticio individual a nivel mundial, está conformado por este tipo de residuos que, en la mayoría de los casos, son desechados mediante su incineración o disposición en veraderos o rellenos sanitarios (Baquero, 2017; Bragança, *et al.*, 2022).

El creciente interés por la conservación del medio ambiente y la creación de procesos sustentables, resalta la necesidad de que las empresas adopten sistemas de economía circular que promuevan la aplicación de estrategias que permitan el uso eficiente de los recursos y la reducción o eliminación de los residuos a lo largo de la cadena de suministro. La transformación de los residuos alimentarios en subproductos es una de las estrategias más eficientes, pues al mismo tiempo que se reduce el impacto ambiental de los procesos industriales, se genera un aumento en los ingresos económicos de las empresas.

La Industria Cervecera es responsable de generar anualmente alrededor de 13,000 millones de hectolitros de aguas residuales y  $33 \times 10^6$  toneladas de residuos sólidos. Por su lado, se estima que la Industria Cervecera Artesanal Mexicana produce alrededor de 492,050 hL de aguas residuales y 335 toneladas de residuos sólidos. La Industria Cervecera Mexicana es reconocida por usar eficiente el agua que emplea en la elaboración de cerveza (2.6 L / 1 L de cerveza), dada su inversión en equipamiento y tecnología que permite un tratamiento más eficiente de las aguas residuales. No obstante, el uso de los subproductos aún se considera un área de oportunidad, debido a su nula o escasa aplicación en las plantas cerveceras artesanales.

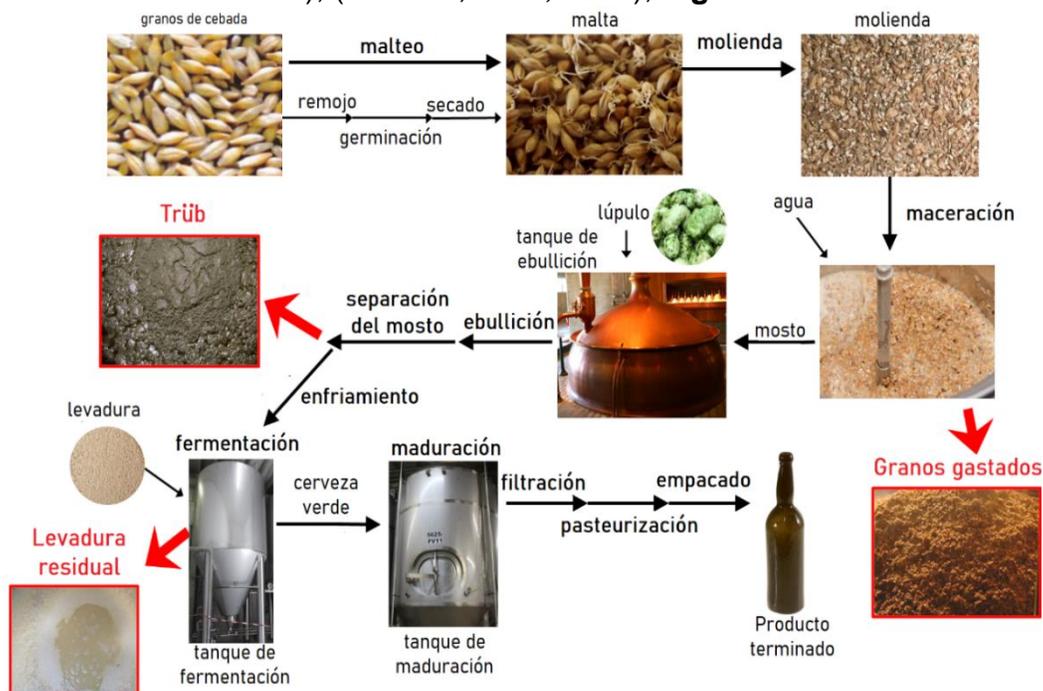
La materia sólida obtenida a partir de la elaboración de cerveza posee un alto valor nutricional, dada la presencia de altas concentraciones de carbohidratos, proteínas y aminoácidos, lípidos, fibra, vitaminas, minerales y compuestos fenólicos, cuyas proporciones dependen principalmente de la variedad de cebada, adjuntos

empleados, el tipo de lúpulo y levadura añadidos, así como los tiempos y condiciones de procesamiento, **Tabla 5.1**.

**Tabla 5.1. Principales componentes presentes en los subproductos del proceso de elaboración de cerveza.** Adaptada de Dos Santos T., Moretzsohn P. y Camporese E., 2014. *Solid wastes in brewing process: a review.*

| SÓLIDOS SUSPENDIDOS  |               |      |                   |
|----------------------|---------------|------|-------------------|
| Componente           | Grano agotado | Trüb | Levadura residual |
| Carbohidratos        |               | ✓    | ✓                 |
| Fibra                | ✓             | ✓    |                   |
| Proteína             | ✓             | ✓    | ✓                 |
| Aminoácidos libres   | ✓             |      | ✓                 |
| Lípidos              |               | ✓    | ✓                 |
| Vitaminas            | ✓             |      | ✓                 |
| Minerales            |               | ✓    | ✓                 |
| Compuestos fenólicos | ✓             | ✓    |                   |

Los principales residuos generados durante la elaboración de cerveza son: agua residual (3-10 L por cada litro de cerveza), grano agotado húmedo (140-200 g por cada litro de cerveza), levadura residual (1-4 g por cada litro de cerveza) y *trüb* (3 g por cada litro de cerveza), (Karlović, *et al.*, 2020), **Figura 5.1**.

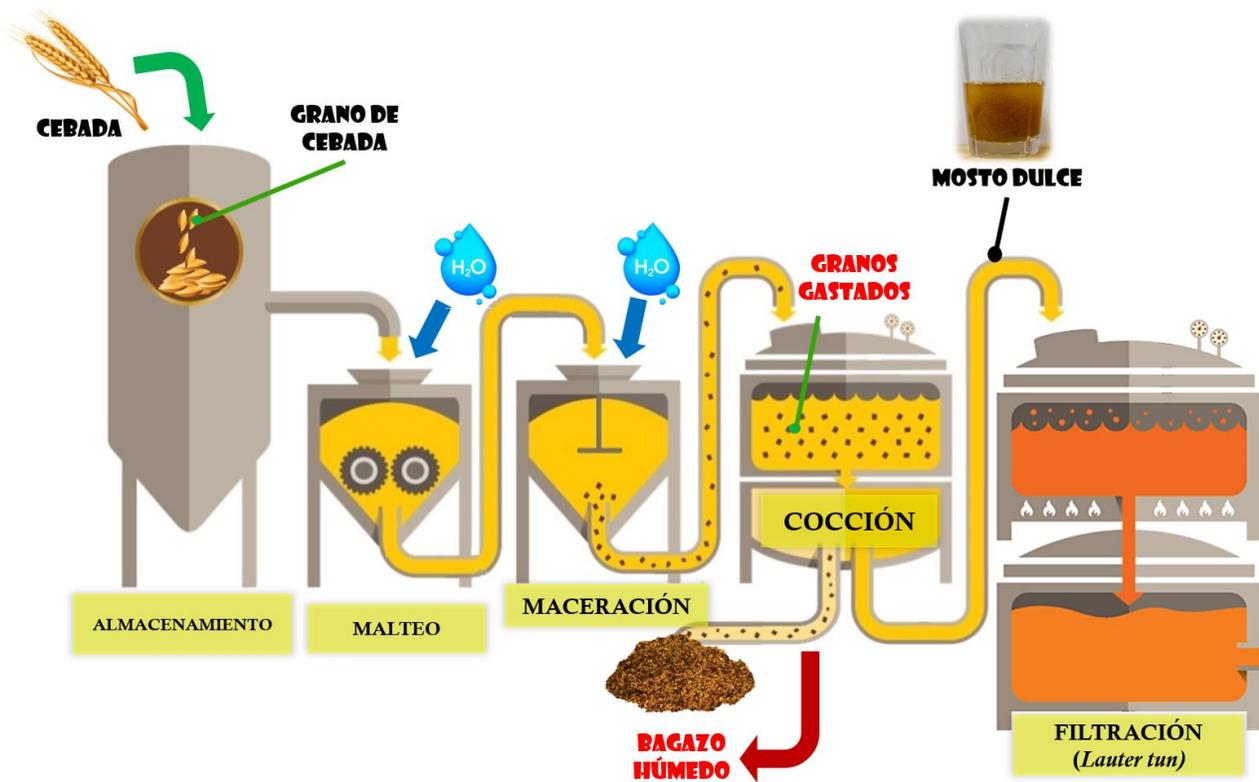


**Figura 5.1. Proceso de elaboración de cerveza y subproductos asociados.** Adaptada de Rachwał K., *et al.*, 2020. *Utilization of brewery wastes in food industry.*

Las características, composición química y aplicación industrial de cada uno de los subproductos mencionados, se describirá a continuación:

### 5.1. Grano agotado, bagazo o *Brewer's spent grains (BSGs)*

Es el subproducto sólido mayoritario de la elaboración de cerveza (representa el 85% del total de residuos generados) y está conformado por la cáscara, fracciones de pericarpio y fragmentos del endospermo del grano de cebada, **Figura 5.2.**



**Figura 5.2. Esquema de la obtención del bagazo durante la elaboración de cerveza.**

El bagazo se obtiene durante la maceración y es separado del mosto por filtración antes de la etapa de ebullición. Se estima que, por cada 100 kg de malta, se generan de 125 a 130 kg de bagazo húmedo. Dicha humedad del grano, depende de si la filtración se realiza en tanques de filtrado (75-81%) o con un filtro-prensa (50-55%), **Figura 5.3 A y 5.3 B.**



**Figura 5.3. A) Etapa unitaria, separación del grano agotado del mosto dulce; B) Flujo del mosto dulce a través del filtro-prensa.**

El grano agotado se caracteriza por conservar alrededor del 30% de las propiedades de la malta, por lo que presenta altas concentraciones de fibra dietética, proteínas y lípidos, así como concentraciones significativas de minerales, vitaminas y compuestos fenólicos, **Tabla 5.2.**

**Tabla 5.2. Composición química general del grano agotado**

Elaborada a partir de Färças A., *et al.*, 2017; Rachwał K., *et al.*, 2020; Amoriello T. y Cioritti R., 2021.

| Componente                       | Valor (%) |
|----------------------------------|-----------|
| Fibra dietética:                 | 20-70     |
| 1. Hemicelulosa (Arabinosilanos) | 20-42     |
| 2. Celulosa                      | 12-25     |
| 3. Lignina                       | 8-28      |
| Proteínas                        | 15-35.5   |
| Lípidos                          | 3.9-11    |
| Minerales                        | 2-7.9     |
| Vitaminas y polifenoles          | 0.7-4.2   |

La fibra dietética presente en el grano agotado, está conformada por polisacáridos diferentes al almidón, entre los que se encuentran: la hemicelulosa (en forma de arabonoxilanos), la celulosa y la lignina. Aunque también pueden encontrarse polisacáridos como el almidón y los  $\beta$ -glucanos y trazas de azúcares fermentables como la manosa, la glucosa y la galactosa.

Las principales proteínas presentes en el bagazo son prolaminas, glutelinas, globulinas y albúminas.

Por otro lado, los lípidos del subproducto se dividen principalmente en mono-, di- y triglicéridos, ácidos grasos, fosfolípidos y compuestos esteroideos. Los lípidos solubles como los tocoferoles (11.3  $\mu\text{g/g}$ ) y los tocotrienoles (11.3  $\mu\text{g/g}$ ), han presentado actividad antioxidante (Skendi, *et al.*, 2018), **Tabla 5.3.**

**Tabla 5.3. Compuestos químicos presentes en el grano agotado.**

Elaborada a partir de Lynch K., *et al.*, 2016; Bianco A., *et al.*, 2020; Amoriello T. y Cioritti R, 2021.

| Componente             |                          | Valor             |
|------------------------|--------------------------|-------------------|
| Otros<br>carbohidratos | Almidón                  | 1-13%             |
|                        | $\beta$ -glucanos        | 0.3-13%           |
| Polifenoles            | Ácido ferúlico           | 1 860-1 948 mg/g  |
|                        | Ácido <i>p</i> -cumárico | 565-794 mg/g      |
| Minerales              | Fósforo                  | 1 977-2 000 ppm   |
|                        | Calcio                   | 1 038.5-1 040 ppm |
|                        | Magnesio                 | 687.5-690 ppm     |
|                        | Silicio                  | 240-242 ppm       |
| Vitaminas              | Colina                   | 1 800 ppm         |
|                        | Niacina                  | 44 ppm            |
|                        | Ácido pantoténico        | 8.5 ppm           |
|                        | Riboflavina              | 1.5 ppm           |
|                        | Tiamina                  | 0.7 ppm           |
|                        | Piridoxina               | 0.7 ppm           |
|                        | Ácido fólico             | 0.2 ppm           |
|                        | Biotina                  | 0.1 ppm           |

Los minerales se encuentran en concentraciones menores a 0.5% e incluyen al: calcio, cobalto, cobre, hierro, magnesio, manganeso, fósforo, potasio, selenio, sodio y azufre. Mientras que, las vitaminas que forman parte del grano agotado, son: colina, niacina, ácido pantoténico, riboflavina, tiamina, piridoxina, ácido fólico y biotina (Mussatto, *et al.*, 2006).

El bagazo también es una buena fuente de compuesto fenólicos, pues se han reportado concentraciones significativas de ácido ferúlico y ácido *p*-cumárico y la presencia del ácido cafeico, el ácido siríngico y flavonoides. Dependiendo del método empleado para la extracción de polifenoles a partir del grano agotado, se pueden obtener valores 2.14 a 9.90 mg ácido gálico/g y un contenido de flavonoides de 0.02-4.61 mg ácido gálico/g (Färças, *et al.*, 2017).

### 5.1.1. Caracterización de los componentes bioactivos y con propiedades funcionales presentes en el grano agotado

1. Aminoácidos esenciales y proteínas. Alrededor del 30% de la composición total de las proteínas del grano agotado se encuentra conformada por aminoácidos esenciales y no esenciales. De entre los aminoácidos esenciales, la lisina (14.3%) es de particular interés, dado que este aminoácido es limitante en cereales destinados al consumo humano (Färças, *et al.*, 2017), **Tabla 5.4.**

**Tabla 5.4. Aminoácidos esenciales y no esenciales presentes en el grano agotado.**

Elaborada a partir de Bianco A., *et al.*, 2020; Färças A., *et al.*, 2017.

| Aminoácido esencial | Valor (%) | Aminoácido no esencial        | Valor (%) |
|---------------------|-----------|-------------------------------|-----------|
| Histidina           | 26.3      | Ácido aspártico               | 4.8       |
| Ácido glutámico     | 16.6      | Asparagina                    | 1.5       |
| Lisina              | 14.3      | Serina                        | 3.8       |
| Leucina             | 6.1       | Arginina                      | 4.5       |
| Fenilalanina        | 4.6       | Alanina                       | 4.1       |
| Valina              | 4.6       | Tirosina                      | 2.6       |
| Isoleucina          | 3.3       | Ácido $\gamma$ -aminobutírico | 0.3       |
| Treonina            | 0.7       | Glutamina                     | 0.07      |
| Triptófano          | 0.1       |                               |           |

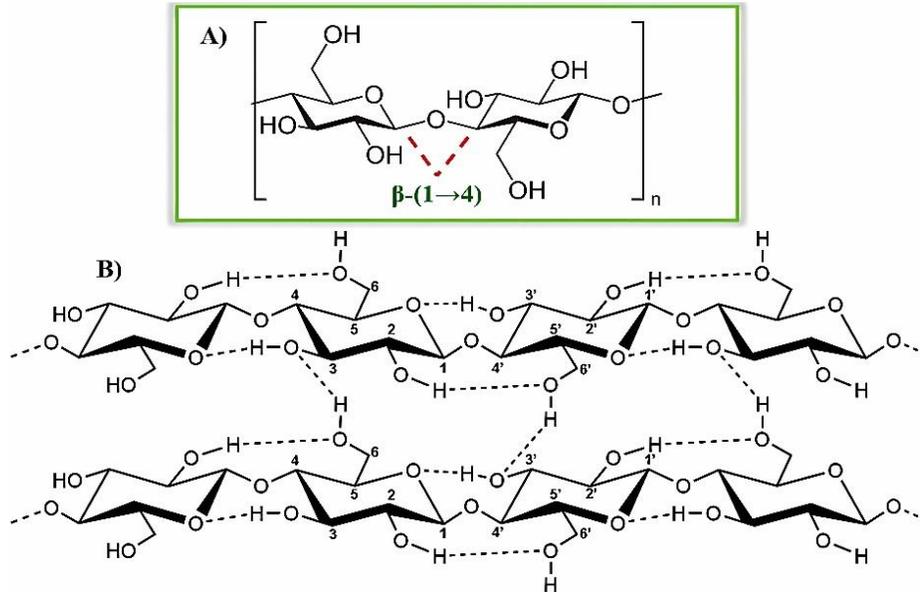
La concentración de aminoácidos esenciales en el grano agotado es menor cuando estos provienen de maltas que han sido sometidas a procesos de tostado a altas temperaturas ( $>200^{\circ}\text{C}$ ), lo cual está relacionado con la degradación térmica de los aminoácidos y al empleo de los mismos en las reacciones de Maillard.

Las prolaminas también denominadas hordeínas, son las proteínas más abundantes del grano agotado (~43% del total de proteínas), encontrándose en forma de B-hordeínas (70-80% del total de prolaminas), C-hordeínas (10-20%) y en menor medida (5%) de D-hordeínas y  $\gamma$ -hordeínas. Se caracterizan por poseer altas concentraciones de glutamina y prolina y ser deficientes en lisina, treonina y triptófano. Generalmente, se encuentran formando complejos con otras sustancias. En el bagazo también se pueden encontrarse bajas concentraciones de glutelinas, globulinas y albúminas (Finnie y Svensson, 2014; Fărças, *et al.*, 2017; Skendi, *et al.*, 2018).

Los hidrolizados proteicos de las proteínas del grano agotado, pueden ser empleados en la Industria Alimentaria como agentes emulsificantes y espumantes, dada la presencia de aminoácidos polares y no polares en su estructura química. Así como, en la fortificación proteica de ciertos productos alimenticios de consumo humano y animal, debido a que son una fuente de aminoácidos esenciales. De igual forma, los hidrolizados proteicos pueden ser empleados como nutracéuticos, pues poseen actividad antioxidante y antiinflamatoria, efecto inmunomodulador, antihiper glucémico, antihipertensivo, antitrombótico y antimicrobiano. También, son capaces de disminuir las concentraciones de colesterol y triglicéridos en sangre mediante la reducción de su absorción y de inhibir la actividad de la enzima convertidora de angiotensina. Esta enzima, convierte la molécula de angiotensina I en angiotensina II y con ello, aumenta la presión sanguínea. Lo anterior, trae como consecuencia incrementar el riesgo de padecer hipertensión, sufrir un infarto agudo de miocardio y presentar fallas renales y del corazón (Ribeiro-Oliveira, *et al.*, 2021).

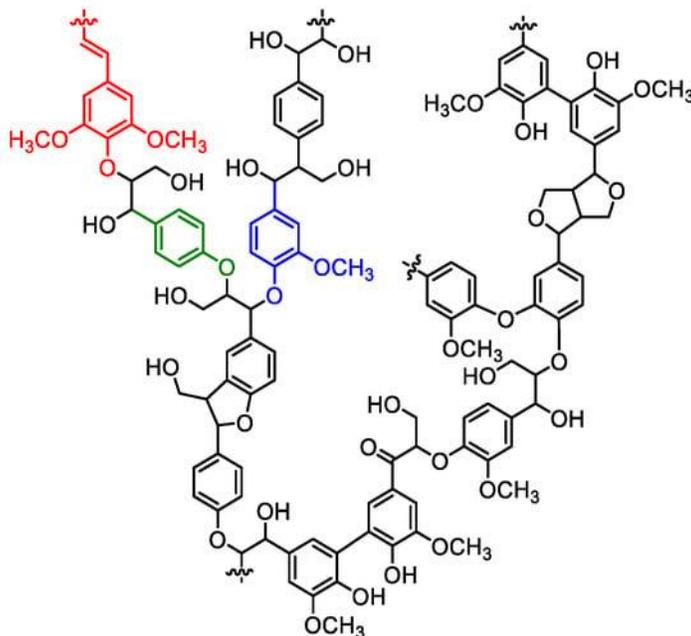
2. Celulosa y lignina. La celulosa es un homopolímero lineal conformado por monómeros de glucosa unidos por enlaces glucosídicos  $\beta$ -(1 $\rightarrow$ 4). Esta molécula es

insoluble en agua y resistente a la acción de las enzimas digestivas presentes en el intestino delgado, **Figura 5.4.**



**Figura 5.4. Estructura química de la celulosa. A)** Tipo de enlace presente en las moléculas de celulosa; **B)** Estructura primaria de la celulosa. Las cadenas de célula se encuentran unidas entre sí por puentes de hidrógeno.

Por otra parte, la lignina es un heteropolímero insoluble en agua que se deriva principalmente de tres monómeros fenilpropanoides: *p*-hidroxifenilo, guayacilo y siringilo y que se encuentra unido covalente a los polisacáridos presentes en la pared celular de los granos, **Figura 5.5.**



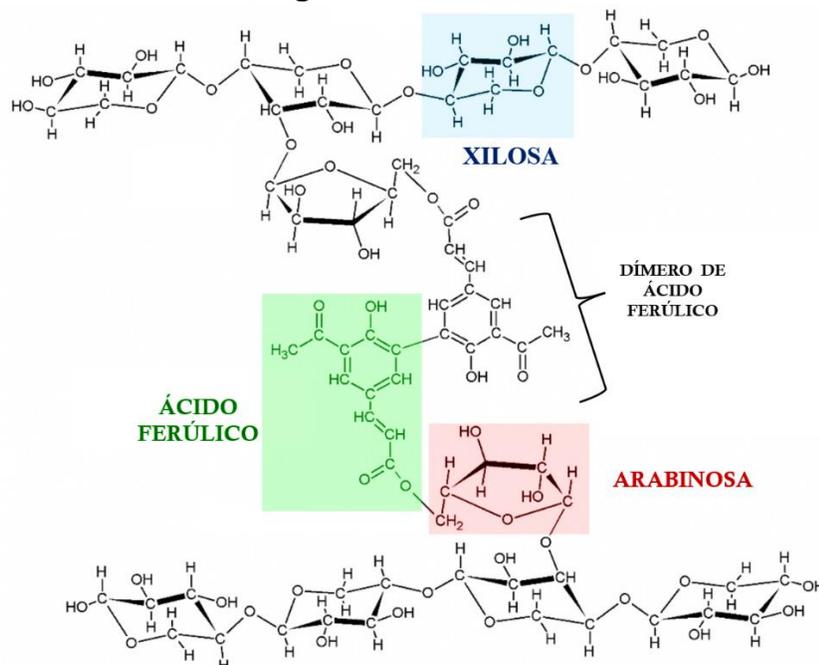
**Figura 5.5. Estructura macromolecular de la lignina.** El siringilo se muestra en color rojo, el *p*-hidroxifenilo en color verde y el guayacilo en color azul.

<https://bit.ly/42rUR7E>

Tanto la celulosa como la lignina son consideradas fibra dietética; la fibra dietética refiere a aquellos polímeros de carbohidratos con diez o más unidades monoméricas que son resistentes a la hidrólisis catalizada por las enzimas endógenas del tracto digestivo humano (CODEX, 2010).

La celulosa y la lignina al ser fibras insolubles en agua, favorecen el incremento de la viscosidad de la materia fecal, la excreción de ácidos biliares y la disminución del tiempo de tránsito intestinal de la materia fecal. Además, reducen los síntomas relacionados con el estreñimiento (Mudgil, 2017).

3. Arabinoxilanos. Los arabinoxilanos son polisacáridos heterogéneos no amiláceos con varios patrones de sustitución y grado de polimerización. Se encuentran conformados por una cadena lineal de xilosas unidas entre sí por enlaces  $\beta$ -(1 $\rightarrow$ 4) y a la cual se unen residuos de arabinosa mediante enlaces glucosídicos  $\alpha$ -(1 $\rightarrow$ 3) y/o  $\alpha$ -(1 $\rightarrow$ 2). No obstante, estos polisacáridos también pueden presentar otros sustituyentes como el ácido glucurónico, la galactosa, la manosa y los grupos acetilo. Otra particularidad de los arabinoxilanos, es su capacidad para formar enlaces tipo éster (en la posición O-5) con ácidos hidroximámicos como el ácido ferúlico y el ácido cumárico, **Figura 5.6.**



**Figura 5.6. Estructura química de los arabinoxilanos ferulados.** Adaptada de Méndez M., et al., 2019. *Arabinoxilanos y la relación de la fracción proteica remanente con la capacidad gelificante del polisacárido*, <https://bit.ly/3VEUDHO>

Los arabinoxilanos presentes en el grano agotado, son en su mayoría insolubles en agua y presentan una gran diversidad de cadenas laterales, principalmente con ácido ferúlico; aunque también pueden encontrarse cadenas con ácido glucurónico, galactosa y manosa. Entre las propiedades de los arabinoxilanos, se encuentran: capacidad para formar geles en presencia de agentes oxidantes, actividad antioxidante, quimioprotectora y antimicrobiana y efecto antiinflamatorio y prebiótico (Morales, *et al.*, 2013; Mendis y Simsek, 2014; Izydorczyk, 2014).

Los geles de arabinoxilanos ferulados son neutros, incoloros e inodoros y son poco afectados por los cambios de temperatura, de fuerza iónica y de pH, dada la presencia de enlaces covalentes de ácido ferúlico y las interacciones físicas entre las regiones lineales de xilosa. La estructura macroporosa de estos geles (40 a 400 nm) confiere a los arabinoxilanos ferulados un alto potencial de aplicación en la encapsulación y transporte de biomoléculas terapéuticas susceptibles a la degradación enzimática durante su paso por el tracto intestinal.

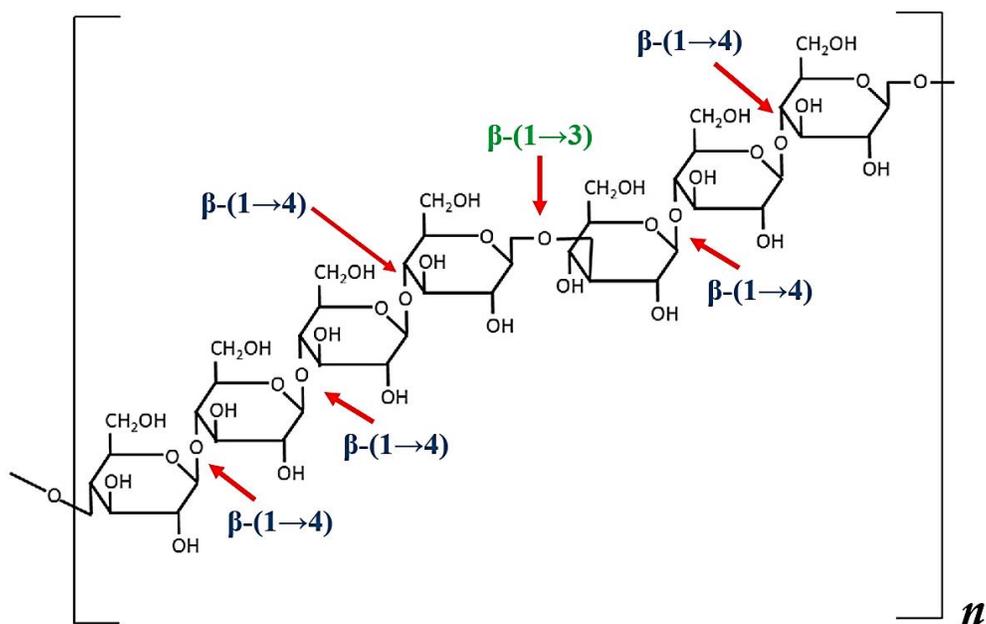
Los arabinoxilanos ferulados no son digeridos en el intestino delgado, por lo que pueden actuar como potenciales proveedores de azúcares fermentables que pueden ser degradados por la microbiota intestinal. El efecto prebiótico de estos compuestos puede incrementarse si se añaden, xilooligosacáridos (XOS). Los XOS son prebióticos que mejoran la salud intestinal al favorecer la proliferación de la microbiota benéfica (*Bifidobacterium*, *Enterococcus* y *Lactobacillus*), mientras que inhiben el crecimiento de microorganismos patógenos (*Salmonella* y *Escherichia coli*). Su obtención se basa en la descomposición de los arabinoxilanos mediante el uso de enzimas endoxilasas  $\beta$  (1 $\rightarrow$ 4).

Otro rol de los arabinoxilanos ferulados en la salud humana, es su habilidad para actuar como quimioprotectores y antioxidantes. La actividad antiinflamatoria y antioxidante de estos compuestos puede incrementarse mediante la hidrólisis de los arabinoxilanos. Esta hidrólisis se realiza mediante el uso de las enzimas feruloil esterasa y glicosil hidrolasas provenientes del microorganismo *Humicola insolens*, lo cual da lugar a la producción de oligosacáridos, oligosacáridos ferulados y ácido ferúlico libre (Izydorczyk, *et al.*, 2009).

La fermentación de los arabinosilanos solubles en agua y los XOS por parte del microbiota intestinal, está relacionada con la producción de ácidos grasos de cadena corta (butirato, propionato y acetato), los cuales colaboran en la reducción de los niveles de colesterol en sangre, mejoran la respuesta inmunológica y pueden reducir el riesgo a desarrollar cáncer de colon. Asimismo, los arabinosilanos no solubles en agua, incrementan la viscosidad de la materia fecal y disminuyen el tiempo de tránsito de la misma, retrasan el vaciamiento gástrico y reducen la motilidad intestinal. Lo anterior, también reduce los síntomas relacionados con el estreñimiento intestinal, así como induce un retraso en la respuesta a la insulina.

4.  $\beta$ -glucanos. Los  $\beta$ -glucanos son componentes minoritarios del bagazo de la cerveza. No obstante, posee varias propiedades funcionales, así como, beneficios a la salud de quien los consume.

Con relación a su estructura química, los  $\beta$ -glucanos provenientes del bagazo son homopolisacáridos conformados por cadenas lineales y no ramificadas de glucosa. Las unidades de glucosa en este compuesto, se encuentran unidas a través de enlaces  $\beta$ -(1 $\rightarrow$ 3) y  $\beta$ -(1 $\rightarrow$ 4), **Figura 5.7.**



**Figura 5.7. Estructura química de los  $\beta$ -glucanos.**

Entre las propiedades funcionales de los  $\beta$ -glucanos se encuentran: capacidad de retención de agua, habilidad para incrementar la viscosidad de disoluciones acuosas y capacidad para formar geles. Por tanto, este tipo de compuestos pueden ser empleados como agentes espesantes que modifican la textura y apariencia de las formulaciones de productos alimenticios, así como sustitutos de lípidos en la elaboración de productos reducidos en calorías como es el caso de cereales, pastas, productos de panificación, lácteos y cárnicos.

Por otra parte, los  $\beta$ -glucanos son responsables de la reabsorción de ácidos biliares, la síntesis de ácidos biliares a partir del colesterol, el retraso del vaciamiento gástrico, la regulación de glucosa en sangre, la estimulación de la secreción de la insulina y la disminución de los niveles de colesterol en sangre. Lo anterior beneficia a pacientes con diabetes tipo II e hipercolesterolemia, así como reduce el riesgo de padecer diabetes.

Al ser fibras solubles, los  $\beta$ -glucanos son fermentados por las bacterias benéficas presentes en el tracto intestinal, principalmente las pertenecientes a los géneros *Bifidobacterium* y *Lactobacillus*. Estos microorganismos producen ácidos grasos de cadena corta que reducen el pH del medio y con ello, disminuyen la presencia de bacterias patógenas. No obstante, este tipo de bacterias también producen vitaminas y tienen efectos importantes en la reducción de los niveles de colesterol, reducción del tiempo del tránsito intestinal y efecto inmunomodulador (Lazaridou y Bilianderis, 2007; Pizarro, *et al.*, 2017).

5. Lípidos y ácidos grasos. El contenido de lípidos y ácidos grasos en el bagazo es muy similar al presente en el grano de cebada y pueden dividirse en: triglicéridos (55-67% del contenido total de lípidos), ácidos grasos (18-30%), fosfolípidos (9.1%), monoglicéridos (1.7%), diglicéridos (5.7-7.7%), y compuestos esteroideos (5%) entre los que se incluyen esteroides en su forma libre y conjugados como ésteres de esteroides, estéril glucósidos, así como hidrocarburos esteroideos y cetonas esteroideas (Del Río, *et al.*, 2013), **Tabla 5.5.**

**Tabla 5.5. Ácidos grasos presentes en el grano agotado.**Elaborada a partir de Färças A., *et al.*, 2017.

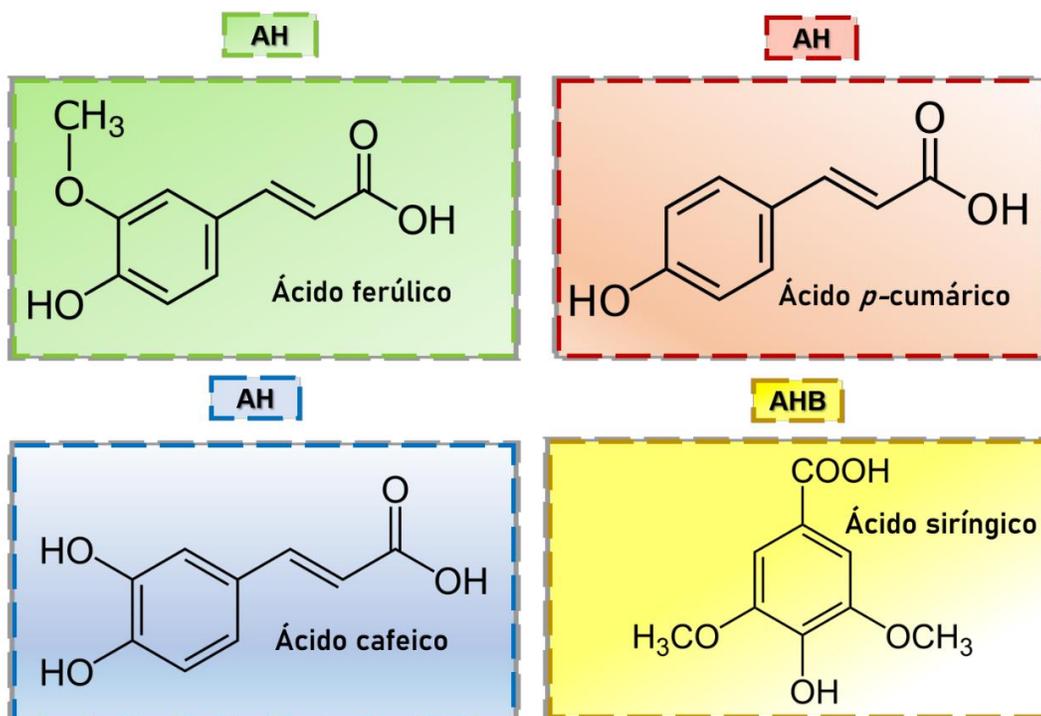
| Componente                                   | Valor (%) |
|--|-----------|
| Ácidos grasos saturados (AGS)                | 29.78     |
| Ácidos grasos monoinsaturados (AGM)          | 14.53     |
| Ácidos grasos polinsaturados (AGP)           | 55.69     |
| AGP <i>n</i> -3                              | 5.18      |
| AGP <i>n</i> -6                              | 50.51     |
| Ácidos grasos de cadena larga ( $\geq 20$ C) | 0.96      |

Los ácidos grasos más abundantes en el subproducto son: ácido linoleico (50 a 51.50%), ácido palmítico (25-26%) y ácido oleico (12-13%). Estos compuestos presentan diferentes funcionalidades como aditivos en la Industria Alimentaria, (Parekh, *et al.*, 2017), **Tabla 5.6.**

**Tabla 5.6. Funcionalidad de algunos de los lípidos provenientes del grano agotado.**Parekh I., *et al.*, 2017.

| Componente                                    | Clasificación              | Funcionalidad  |
|---|----------------------------|--|
| Ácido pentadecanoico                          | Ácido graso saturado       | Aporta sabor y aroma   |
| Ácido linoleico                               | Ácido graso poliinsaturado | Ácido graso $\omega$ -3, antioxidante, ácido graso esencial                        |
| Ácido palmítico                               | Ácido graso saturado       | Añade textura al alimento, aporta sabor y aroma, lubricante                        |
| Ácido esteárico                               | Ácido graso saturado       | Modificador de textura, agente emulsificante, suplemento alimenticio, antioxidante |
| Ácido oleico                                  | Ácido graso monoinsaturado | Antioxidante, ácido graso $\omega$ -9, anticarcinogénico, agente emulsificante     |
| Éster metílico del ácido 11,14-eicosadienoico | Ácido graso poliinsaturado | Ácido graso $\omega$ -6  |

6. Compuestos fenólicos. Los compuestos fenólicos son moléculas con uno o más grupos hidroxilo (-OH) unidos a un anillo aromático y con al menos un grupo carboxilo como grupo funcional (-COOH). Entre los compuestos fenólicos presentes en el bagazo se encuentran los ácidos hidroxinámicos (ácido ferúlico, ácido *p*-cumárico y ácido cafeico), los cuales son derivados del ácido cinámico y se caracterizan por poseer un anillo benzoico (C6-C3) asociado a una cadena de tres carbonos en su estructura, **Figura 5.8**.



**Figura 5.8. Estructuras químicas de los compuestos fenólicos presentes en el bagazo.** HA = ácidos hidroxinámicos y HAB= ácidos hidroxibenzoicos

Además de los ácidos hidroxinámicos, se puede encontrar ácidos hidroxibenzoicos como el ácido siríngico. Este tipo de compuestos comparten la estructura del ácido benzoico (C6-C1) sobre la cual se producen reacciones de hidroxilación y metilación.

Los ácidos hidroxinámicos y ácidos hidroxibenzoicos pueden encontrarse en el grano agotado en su forma libre y en mayor medida, unidos a otros componentes, como la lignina y los arabinosilanos (McCarthy, *et al.*, 2012).

La cantidad de compuestos fenólicos presentes en el bagazo, varía entre las maltas claras y oscuras, siendo menor en las maltas oscuras debido a la degradación térmica de los compuestos fenólicos durante el secado y el tostado.

Los compuestos fenólicos presentes en el grano agotado, se caracterizan por tener una alta actividad antioxidante: ácido cafeico > ácido ferúlico > ésteres de ácido ferúlico > ácido *p*-cumárico, así como poseer efectos antiinflamatorios, antiapoptóticos, anticarcinogénicos, antiaterogénicos e inmunomoduladores.

La incorporación de compuestos fenólicos en la dieta humana, favorece la salud humana al reducir el riesgo de presentar enfermedades crónicas como son la diabetes, el cáncer y enfermedades cardiovasculares.

### **5.1.2. Métodos de conservación del grano agotado**

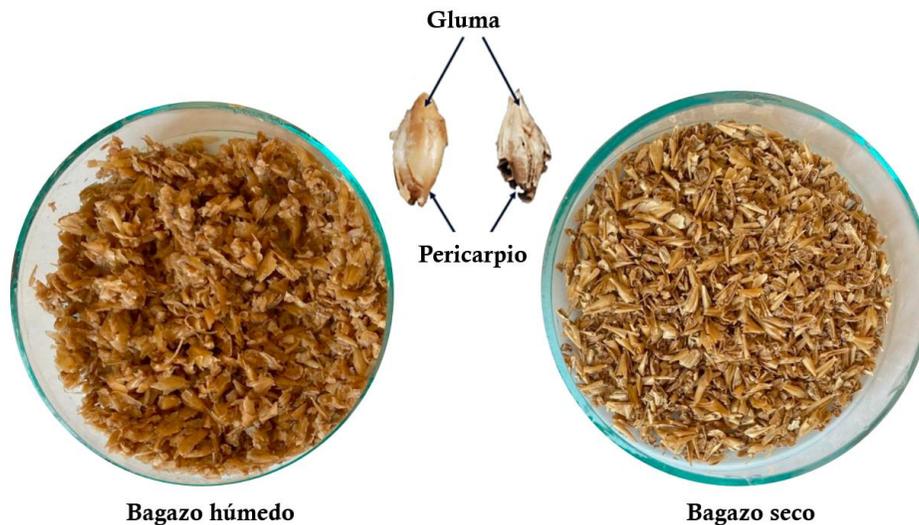
El alto contenido de humedad (75-81%), las altas concentraciones de polisacáridos y proteínas y la presencia de azúcares fermentables en el subproducto, convierte al grano agotado en un material químicamente inestable y susceptible al ataque de microorganismos.

El tiempo de vida útil del bagazo varía entre 2 a 10 días y depende en gran medida de las condiciones empleadas para su almacenamiento. Un manejo inadecuado del subproducto, puede dar lugar a la presencia de microorganismos, principalmente hongos filamentosos de los géneros *Aspergillus*, *Fusarium*, *Mucor*, *Penicillium* y *Rhizopus*; pérdida de materia sólida; la aparición de aromas indeseables y/o la reducción del valor nutricional y la palatabilidad del subproducto.

Algunas de las técnicas empleadas para favorecer la conservación y el aumento de la vida de anaquel (hasta 6 meses) del grano agotado son: secado (con energía solar, en horno, al vacío o con vapor sobrecalentado), y el uso de conservadores (conservadores comerciales y ácidos orgánicos), (Mussatto, *et al.* 2006; Bianco, *et al.*, 2020; Terefe, 2022).

Secado. El secado es el método más empleado en las cervecerías, debido a que aporta varias ventajas: es económico, proporciona estabilidad química y microbiológica al grano gastado sin afectar su composición química y reduce costos

de manipulación, transporte y almacenamiento del producto. No obstante, en el caso del secado con horno, hay un consumo de energía significativo, **Figura 5.9**.



**Figura 5.9 Grano agotado húmedo y seco.**

La técnica de secado tradicional o secado en horno, consta regularmente de dos etapas.

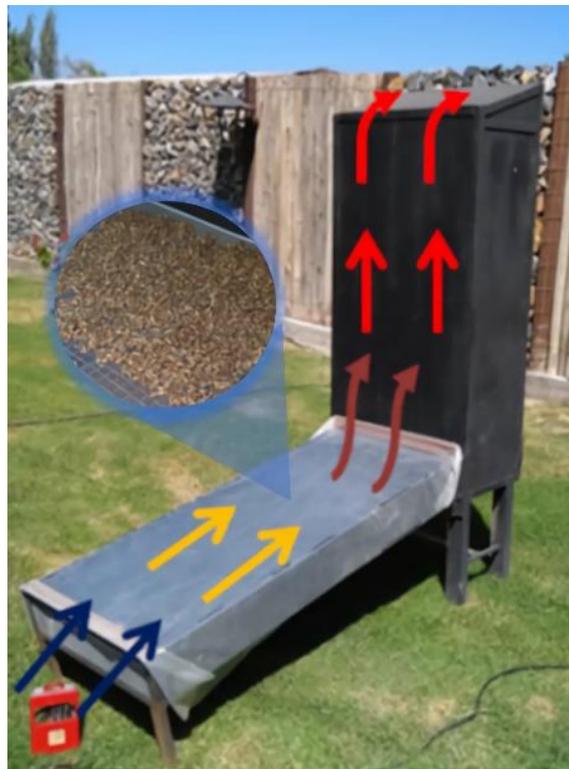
- a) En la primera etapa, se reduce el contenido de humedad del bagazo por medio del uso de un filtro-prensa, con lo cual se obtiene un contenido de humedad menor al 60%.
- b) Posteriormente, el grano agotado es sometido a un secado en horno a bajas temperaturas ( $<60^{\circ}\text{C}$ ) hasta obtener valores de humedad menores al 10%. El uso de temperaturas superiores a  $60^{\circ}\text{C}$  puede generar sabores indeseables en el subproducto, así como puede dar lugar al tostado o quemado del grano agotado.

Otra técnica empleada es el uso de un secado al vacío, el cual consiste en prensar el grano húmedo mediante un filtro-prensa (3-5 bar) y lavarlo con agua caliente ( $65.8^{\circ}\text{C}$ ), para posteriormente, someterlo a un secado al vacío que reduce su humedad hasta valores de 20-30%. Este método permite prolongar la vida de anaquel del bagazo hasta un periodo de 6 meses, (El-Shafey, 2004).

Además de las técnicas de secado mencionadas, existen otras alternativas que tienden a ser más amigables con el medio ambiente, pero que presentan limitantes

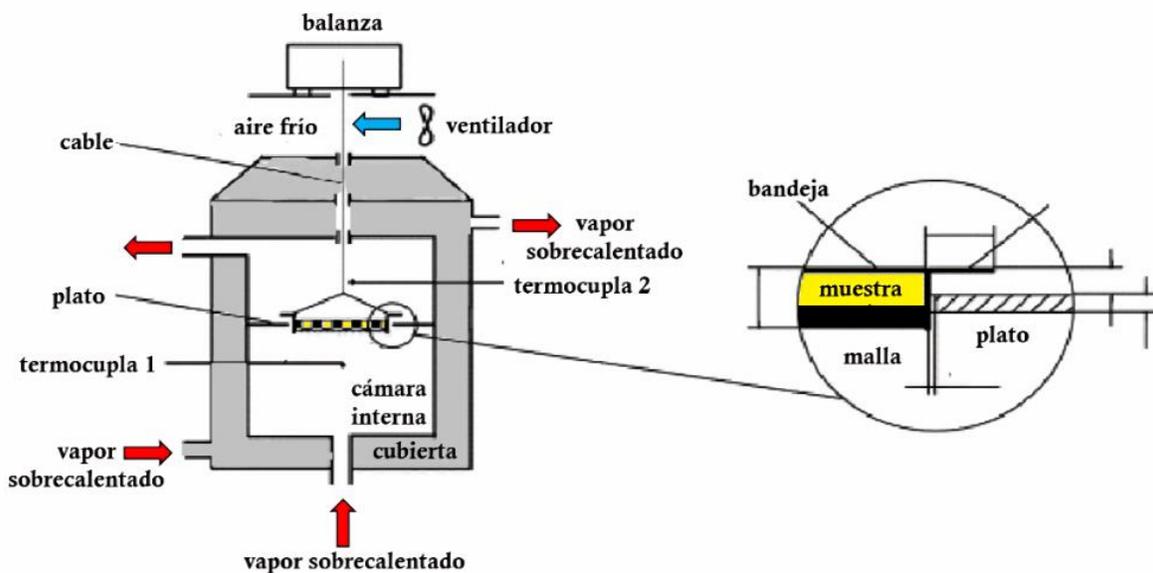
dado que aún se encuentran en proceso de experimentación, estas son el secado con energía solar y el secado con vapor sobrecalentado.

El empleo de un secador solar con convección natural, además de ser amigable con el medio ambiente, en comparación con el método tradicional, es más económico (40-45% más barato), consume menor cantidad de energía (80% menos energía) y genera un producto de mejor calidad (propiedades organolépticas similares al bagazo húmedo). No obstante, presenta la desventaja de requerir tiempos de secado largos (345-430 min.) que dependen de la hora en que se inicia el secado, así como las condiciones climatológicas. Su funcionamiento se basa en el uso de los rayos solares para calentar el interior de un deshidratador solar y con ello, reducir la humedad del grano agotado hasta obtener un valor de humedad menor al 10% (Capossio, *et al.*, 2022), **Figura 5.10.**



**Figura 5.10. Deshidratación del grano agotado por medio de un deshidratador solar.**  
Las flechas amarillas, rojas y azules muestran la circulación del aire calentado.  
El grano agotado se encuentra al interior de la cámara de secado.

El secado con vapor sobrecalentado es una de las alternativas más prometedoras, debido a que reduce los costos de energía, mejora la eficiencia del secado y reduce riesgos de explosión o incendio. Este método consiste en hacer pasar vapor sobrecalentado (110 a 160 °C) al interior de una cámara de secado, dentro de la cual se encuentra el grano agotado; si el vapor se calienta a temperaturas  $\geq 180^{\circ}\text{C}$ , se produce la gelatinización del almidón presente en el grano agotado. El proceso termina una vez que el bagazo alcanza un valor de humedad menor al 10% (Tang, *et al.*, 2005), **Figura 5.11**.



**Figura 5.11. Esquema de la cámara de secado con vapor sobrecalentado.** Adaptada de Tang Z., *et al.*, 2005. *Thin-layer drying of spent grains in superheated steam*.

Uso de conservadores. Para aumentar la vida de anaquel del grano agotado almacenado en silos, se puede añadir los siguientes conservadores: ácido láctico, ácido acético, ácido fórmico, ácido benzoico, ácido clorhídrico y ácido sulfúrico.

El ácido fórmico es el conservador más efectivo, pues inhibe el crecimiento de distintas bacterias, entre las que se incluyen las bacterias ácido lácticas, así como reduce la fermentación y la concentración de ácidos orgánicos. No obstante, también puede emplearse sorbato de potasio, debido a que inhibe el crecimiento de levaduras y hongos.

### 5.1.3. Aplicaciones en la Industria Alimentaria

Actualmente, alrededor del 70% del bagazo es empleado como pienso animal, 10% es usado en la producción de biogás y el 20% restante, es depositado en vertederos (Bianco, *et al.*,2020). El bagazo desechado como residuo alimentario, da lugar a la formación de metano (gas de efecto invernadero 25 veces más potente que el CO<sub>2</sub>) y es un potencial contaminante de las aguas freáticas, por lo que es necesaria la búsqueda de alternativas que permitan aprovechar este subproducto y de esta manera, reducir sus efectos contaminantes. Las aplicaciones del bagazo en la generación de productos con valor agregado en la Industria Alimentaria, se muestran a continuación:

#### a) Preparación de pienso animal

El grano agotado suele ser empleado en la elaboración de pienso animal para bovinos, corderos, pollos, cerdos, cabras y pescado, debido principalmente a su valor nutricional. Se emplea como bagazo húmedo y bagazo seco.

- I. El bagazo húmedo (WSG) es una buena fuente de nitrógeno y de energía, debido a la presencia de altas concentraciones de fibra dietética y concentraciones significativas de lípidos (3.9-11%), lo cual lo convierte en un suplemento alimenticio ideal para la dieta de rumiantes. Sin embargo, su empleo tiene como desventajas su corta vida de aquel (máx. 3 días después de su obtención) y que requiere de una inversión adicional para su manipulación, transporte y almacenamiento.

Radzik-Rant, *et al.*, mencionan que el uso de 35% de WSG en la elaboración de pienso animal para cordero, favoreció la ganancia de peso de los animales y redujo la presencia de grasa en la carne, así como incremento la cantidad de ácidos grasos poliinsaturados, especialmente el isómero cis-9 del ácido oleico conjugado. Por su lado, Parmenter, *et al.*, mezclaron el WSG con la dieta de ganado bovino (7.2%), obteniendo un incremento en la masa corporal de los animales y reduciendo con ello, el contenido de grasa de la carne.

- II. El bagazo seco (DSG), se posiciona como una alternativa a la harina de soya empleada en la elaboración de pienso animal para rumiantes, dado que es una fuente de proteínas de bajo costo con un valor nutricional comparable a la soya. El DSG ha demostrado mejorar la digestibilidad, producción de leche y el retorno de inversión de los productores sin afectar la microbiota intestinal de los animales. Asimismo, puede reemplazar más del 75% de la harina de soya empleada en la elaboración de piensos animales cuyo consumo está orientado a los rumiantes (Faccenda, *et al.*, 2017).

Kaur y Saxena estudiaron el efecto que tiene añadir distintas concentraciones de DSG (10, 20, 30 y 40%) a las dietas de diferentes especies de pescados y observaron un incremento en el crecimiento de los pescados catla (*Catla catla*) y rohu (*Labeo rohita*) al adicionar 30% de DSG a su dieta. No obstante, y de acuerdo a sus resultados, la respuesta a la adición de granos gastados en la dieta de pescados varía dependiendo de la especie y puede atribuirse a su habilidad para absorber y utilizar los nutrientes presentes en el DSG.

Por último, Nortey, *et al.*, investigaron el uso de una dieta elaborada con grano agotado y harina de soya (SBBSG) para pollos Broiler y llegaron a la conclusión que la mezcla SBBSG, puede ser parte de la dieta de los pollos hasta en concentraciones mayores a 16%, dado que no causa efectos adversos en la salud del animal.

## **b) Hidrolizados proteicos**

La fracción proteica del grano agotado puede ser usada para elaborar hidrolizados con actividad antioxidante, los cuales se espera puedan ser empleados como ingredientes funcionales en la elaboración de productos alimenticios enfocados en el manejo de la Diabetes tipo II y la hipertensión, así como en la modulación del sistema inmunológico.

Para llevar a cabo la hidrólisis de las proteínas presentes en el grano agotado, se pueden emplear enzimas comerciales como Alcalase®, Flavourzyme®, pepsina, Corolase®, tripsina y Protamex®. No obstante, este tipo de enzimas tienen la desventaja de ser costosas, por lo que se ha planteado como alternativa a este tipo

de enzimas, el empleo de proteasas provenientes de la levadura residual (subproducto de la elaboración de cerveza catalogado como aditivo GRAS). De acuerdo con la investigación realizada por Vieira E., *et al.*, 2016, se pueden obtener hidrolizados con una concentración de compuestos fenólicos de 1.65 mg ácido gálico/ mL y alta actividad antioxidante (1.88 mg Trolox/mL), mediante el empleo de proteasas (posiblemente peptidasas de serina y metaloproteinasas) obtenidas a partir de extractos de levadura residual en una proporción 1:0.29 sustrato/enzima y a condiciones de reacción de 50°C/6 h y pH=6.0.

### c) Productos de panificación y derivados de cereales

El grano agotado (BSG) puede ser incorporado a los productos de panificación mediante su conversión en harina, dado que la estructura granular del grano gastado impide su incorporación directa. Su adición en concentraciones de 5-10%, ha dado como resultado un incremento en el contenido de fibra, proteína, lípidos y minerales en los productos de panificación, así como ha facilitado la elaboración de dichos productos dadas las propiedades de su harina, **Tabla 5.7**.

**Tabla 5.7. Propiedades de la harina del bagazo empleada en la elaboración de productos de panificación.** Fărcaș A, *et al.*, 2014-A.

| <b>Propiedades de la harina de BSG</b>  |
|---|
| Fácil de mezclar  |
| Su contenido calórico es 50% más bajo que el presente en otras harinas de cereales  |
| Alta concentración de fibra y proteínas   |
| Fuente de una variedad de minerales, entre los que se encuentran Ca, P, Cu, Zn y Mg |
| Baja absorción de lípidos (beneficia a los rebozados y las coberturas)              |
| Alta capacidad de retención de agua   |
| Proporciona un color café uniforme y un aroma fuerte y asociado al tostado          |

La harina del bagazo de la malta o cebada malteada, ha sido empleada en la elaboración de panes, muffins, brownies, donas, panques, waffles, galletas, tortillas,

totopos, pasta y cereales para el desayuno. No obstante, dada la coloración de la harina, su uso suele restringirse a alimentos integrales.

Algunas de las investigaciones referentes al uso del bagazo de la cerveza en la elaboración de productos de panificación, se muestran en la siguiente tabla:

**Tabla 5.8. Usos del grano agotado en la elaboración de productos de panificación.**

| Producto     | Incorporación   | Conclusiones  | Referencia                     |
|--------------|---|---|--------------------------------|
| Pan de trigo | Se emplearon masas con BSG y masas con BSG fermentados con <i>Lactobacillus plantarum</i> (BSG SD). Las concentraciones de BSG adicionadas fueron 5, 10, 15 y 20% | <p>La adición de BSG y BSG SD a la masa favorece el incremento de la capacidad de retención de agua.</p> <p>Masas con 5-10% de BSG SD, presentaron características similares a las de trigo.</p> <p>Masas con BSG SD al 5% dieron lugar a un pan más suave que el control.</p> <p>Se percibió un sabor dulce en los panes adicionados con BSG y BSG SD.</p> <p>El incremento de BSG SD en la masa, favoreció un aumento en la elasticidad y resistencia a la deformación de la masa. Sin embargo, también aumentó el color de la corteza.</p> <p>Los panes elaborados con BSG y BSG SD al 10% fueron aceptados sensorialmente por los consumidores.</p> | Waters, <i>et al.</i> , 2012   |
| Pan de trigo | Adición de 5%, 10%, 15% y 20% de BSG. Los BSG fueron sometidos a un secado previo a su adicción.  | <p>La adición de BSG incrementó el contenido de fibra.</p> <p>La masa con 20% BSG tuvo un contenido de fibra 5 veces mayor y un contenido de lípidos 3 veces mayor al control.</p> <p>Se observó la presencia de nonanal, 2-pentilfurano y limoneno en los panes elaborados con BSG, principalmente en las formulaciones de 15% y 20%.</p>  | Fărcaș, <i>et al.</i> , 2014-B |

| Producto  | Incorporación   | Conclusiones   | Referencia                       |
|---|---|--|----------------------------------|
| Pan de trigo  |   | Asimismo, se observó la presencia de tolueno en los panes adicionados con 5% y 10%.<br>El color y la dureza de la miga incrementan a medida que se aumenta el contenido de BSG.<br>La aceptabilidad del consumidor se reduce a medida que se aumenta la concentración de BSG, siendo el pan adicionado al 10% el más aceptado por el consumidor. | Fărcaș, <i>et al.</i> , 2014-B   |
| Pan de trigo con kéfir y <i>Lactobacillus casei</i> | Los microorganismos fueron inmovilizados en BSG estériles (uso de autoclave)  | Los panes elaborados con BSG presentaron menor volumen en comparación con el pan comercial.<br>Los panes de masa madre tuvieron un incremento de 4 días en su vida de anaquel, así como, presentaron mayor contenido de compuestos volátiles y mayor capacidad de retención de agua.   | Plessas, <i>et al.</i> , 2007    |
| Pan de trigo  | BSG modificados por tratamiento enzimático con enzimas comerciales (Pentopan Mono BG <sup>®</sup> y Celluclast BG <sup>®</sup> ) y añadidos a la masa de trigo. | La adición de BSG aumentó la capacidad de retención del agua del pan. Sin embargo, le proporcionó un color amarillento que no influyó en la preferencia del consumidor.  | Steinmacher <i>et al.</i> , 2012 |
| Galletas  | Se adicionó BSG provenientes de 5 diferentes tipos de malta (bases y especiales) y en concentraciones de 20% a la masa para galleta                             | La sustitución de la harina de trigo por el bagazo de la cerveza, dio lugar a un producto horneado con mayor contenido de fibra, proteínas, lípidos, compuestos fenólicos y actividad antioxidante. Además, mejoró las propiedades sensoriales de las galletas.  | Fărcaș, <i>et al.</i> , 2021     |

| Producto                                   | Incorporación   | Conclusiones  | Referencia                      |
|--|---|---|---------------------------------|
| Galletas                                   |   | <p>Se identificó la presencia de compuestos volátiles (alcoholes, aldehídos, cetonas, terpenos, terpenoides, entre otros) en las galletas horneadas. Los compuestos volátiles del grupo aldehído, aportaron aromas y sabores deseables al producto final. Entre ellos, se encontraron: 2-metilpropanal, 3-metilbutanal y 2-metilbutanal.</p> <p>La textura de las galletas enriquecidas con BSG fue ampliamente aceptada por los consumidores. Estas galletas, presentaron mayor crujencia, dureza y masticabilidad que el control.</p>   | Fărças, <i>et al.</i> , 2021    |
| Elaboración de palitos de pan, pan y pizza | Se adicionó harina de BSG en concentraciones de 5 a 10% | <p>La incorporación de BSG incrementa la absorción de agua de la masa, pero reduce su fuerza, tenacidad y extensibilidad. Así mismo, se disminuye el tiempo requerido para el desarrollo de la masa.</p> <p>A medida que se aumenta la concentración de BSG, aumenta la coloración de los palitos de pan, el pan y la pizza.</p> <p>Se recomienda la adición de concentraciones no mayores a 100 gramos de BSG/ 1000 g de la mezcla para no afectar las propiedades organolépticas de los productos de panificación.</p> <p>De acuerdo con la evaluación sensorial, los productos de panificación con 5% de BSG son los más aceptables.</p> | Amoriello, <i>et al.</i> , 2020 |

| Producto           | Incorporación  | Conclusiones  | Referencia                         |
|--------------------|--|---|------------------------------------|
| Botana de garbanzo | Elaboración de una harina extruida de garbanzo, cuya base de maíz fue sustituida con BSG (10 a 30%)      | La adición de BSG redujo la expansión de la harina, proporcionó 4 veces más fibra que el control y aumento la digestibilidad de las proteínas. La harina con 30% BSG poseía más ácido fólico y almidón resistente que la elaborada únicamente con maíz.                             | Ainsworth , <i>et al.</i> , 2007   |
| Botanas horneadas  | La masa de trigo fue remplaza por BSG al 10,15 y 25%   | Las botanas horneadas con 10% presentaron un alto índice de crujencia y tuvieron una textura similar al control. Asimismo, fueron ampliamente aceptadas por los consumidores. Los panelistas percibieron la presencia de un aroma característico de las botanas elaboradas con BSG. | Ktenioudaki , <i>et al.</i> , 2013 |
| Pasta              | Se añadió BSG y huevo en polvo. El huevo en polvo fue adicionado para mejorar la estructura de la pasta. | La adición de BSG permitió la obtención de formulaciones ricas en fibra. La formulación óptima para la elaboración de una pasta enriquecida con fibra fue la siguiente: BSG 6.2 g/100g y huevo en polvo 10.2/100g.  | Cappa y Alamprese , 2017           |

#### d) Elaboración de productos cárnicos

El bagazo ha sido empleado como aditivo en la elaboración de salchichas y patés, debido a que aporta fibra a las matrices alimenticias, así como aumenta su capacidad de retención de agua y reduce pérdidas relacionadas con el cocimiento. Algunas de las aplicaciones de BSG en la elaboración de productos cárnicos, se muestran a continuación:

**Tabla 5.9. Usos del grano agotado en la elaboración de productos cárnicos.**

| Producto   | Incorporación   | Conclusiones   | Referencia                            |
|--|---|--|---------------------------------------|
| Salchichas Frankfurt                               | Los granos gastados se sometieron a un proceso de molienda y tamizado. Posteriormente, se añadieron a la preparación cárnica, según su tamaño de partícula (fino, medio y grueso) | El contenido de fibra en las salchichas y la capacidad de retención de agua de la preparación cárnica, aumentaron a medida que se incrementaba la concentración de BSG.<br>Los parámetros de textura (a excepción de la elasticidad) se redujeron a medida que se incrementaba la concentración de BSG.<br>La aceptabilidad del alimento disminuyó a medida que se incrementaba la concentración de BSG. | Özvural, <i>et al.</i> , 2009         |
| Salchichas ahumadas de puerco con vegetales y BSG  | Se prepararon salchichas adicionadas con champiñones (10,17,30%), con BSG (1.5,3 y 6%) y BSG con champiñones (3/8% y 1.5/16%)   | Las salchichas adicionadas con 3% BSG / 8% champiñones fueron las más aceptadas por los consumidores.<br>Las salchichas con más contenido de fibra fueron las adicionadas con champiñones (17%), seguidas por las de BSG/champiñones (3/8%) y con BSG (8%).  | Nagy, <i>et al.</i> , 2017            |
| Salchicha de Cuiabá<br>( <i>Cuiabana sausage</i> ) | Salchicha elaborada a base de puerco. Se añadió harina de BSG en concentraciones de 1.5%, 3%, 4.5% y 6% a la preparación cárnica.   | Se observó una mayor coloración en la salchicha a medida que se aumentaba la concentración de BSG.<br>La adición de BSG a las salchichas no mostró actividad antimicrobiana, cambios en textura o interferencias en la oxidación de los compuestos presentes en la matriz alimenticia.   | Gomes de Campos, <i>et al.</i> , 2021 |

| Producto   | Incorporación   | Conclusiones  | Referencia                            |
|--|---|---|---------------------------------------|
| Salchicha de Cuiabá<br><br>( <i>Cuiabana sausage</i> ) |   | La adición de BSG mejoró el contenido de fibra del alimento.  | Gomes de Campos, <i>et al.</i> , 2021 |
| Salchicha de pollo reducidas en grasa                  | Se elaboró una emulsión con extracto de BSG al 15% (EBSG). La masa control poseía carne de pollo y 15% grasa de lomo de cerdo. La grasa fue sustituida con concentraciones de 20, 25, 30% EBSG. | El incremento de EBSG, favoreció el aumento de la viscosidad aparente y la coloración roja y amarillenta de las salchichas. El EBSG aumentó la dureza y gomosidad de la salchicha, pero no influyó en su cohesividad. No hubo diferencias significativas en la aceptabilidad de las salchichas adicionadas con 20% EBSG y 10% grasa de puerco y las salchichas con 25% EBSG y 5% grasa de puerco. Las concentraciones 20 y 25% EBSG son ideales para la elaboración del alimento. | Choi, <i>et al.</i> , 2014            |
| Paté de pollo  | Se elaboraron extractos de fibra de BSG (FBSG) con 58.11% y 68.57% de fibra. Posteriormente, se añadió el FBSG en concentraciones de 1-4% a la preparación cárnica.                             | La adición de FBSG disminuyó el pH e incrementó las coloraciones rojizas y amarillentas de la preparación cárnica. Los patés adicionados con FBSG presentaron menores pérdidas durante el cocimiento. El paté adicionado con 3% de FBSG fue el que presentó mayor aceptabilidad con respecto a su color, sabor suavidad y jugosidad en comparación con las demás muestras.  | Kim, <i>et al.</i> , 2013             |

### **e) Elaboración de cervezas sin alcohol**

Las cervezas sin alcohol poseen un alto contenido de agua (~95%) y bajo contenido alcohólico (<1.2 % del total del producto, aunque algunos países europeos lo restringen a 0.5%). Este tipo de bebidas se consideran como una alternativa más saludable en comparación con los refrescos y bebidas con alto contenido de azúcar, debido a que poseen cantidades variables de compuestos fenólicos, variedad de vitaminas B y bajo contenido de sodio (4.5 mg/100mL de cerveza). Al mismo tiempo, aportan un bajo contenido de carbohidratos, proteínas, lípidos y, por tanto, de calorías (75-92 kJ por 100 mL), (Montanari, *et al.*, 2009; Blanco, *et al.*, 2014; López, 2016).

En 2016, López reportó la elaboración de una cerveza sin alcohol (1.07% Alc. Vol.) a partir de la obtención de un mosto elaborado mediante la maceración de una mezcla de grano agotado (90%) y sémola de maíz (10%). No obstante, es necesario que se investigue a mayor profundidad el perfil de sabor de la cerveza, ya que los consumidores se mostraron indiferentes al producto.

### **f) Elaboración de yogurt**

Para cumplir con las demandas de los consumidores que cada vez se encuentran más interesados en los ingredientes de los alimentos que consumen y los beneficios que estos aportan a su salud, la Industria del Yogurt se ha enfocado en elaborar productos con menor contenido de grasa, azúcares libres y aditivos y mayor contenido de fibra y vitaminas, así como en mejorar la viabilidad de los probióticos presentes en el yogurt mediante la adición de los mismos o de prebióticos obtenidos de diferentes fuentes (Chandan, *et al.*, 2017; Naibaho, *et al.*, 2022).

Naibaho, *et al.*, elaboraron un yogurt adicionado con BSG mediante la adición de DSG a la leche empleada (5%, 10%, 15% y 20%). Observándose que el BSG reduce los tiempos de fermentación, favorece el crecimiento de las bacterias ácido lácticas (LAB), incrementa la producción de ácido láctico y aumenta el pH, lo cual puede beneficiar a la Industria, pues se favorecería el uso de una menor cantidad de endulzantes que encubran la acidez del producto. Además, la presencia de altas

concentraciones de fibra en el BSG, contribuyen a disminuir la sinéresis del yogurt (mayores concentraciones de BSG menor sinéresis) y mantienen su viscosidad (5 a 10% BSG) durante el almacenamiento. El yogurt adicionado con 10% BSG se considera el más aceptable, debido a que mantiene los valores de viscosidad y sinéresis del yogurt.

### **g) Empacado de alimentos**

La presencia de altas concentraciones de proteínas y fibra (celulosa, arabinosanos y lignina) y concentraciones significativas de compuestos fenólicos en el grano agotado, hacen de este subproducto una potencial materia prima para la elaboración de materiales biodegradables enfocados al empackado de alimentos.

Para llevar a cabo la elaboración de empackados, se requiere secar el BSG y emplear técnicas que colaboren en la obtención de los componentes que se usarán como materia prima para la producción de empaques. El uso de la extracción asistida por microondas y del tratamiento por explosión de vapor, son dos de las opciones más eficientes y con menor consumo de energía para la obtención de los biopolímeros del grano agotado. No obstante, el uso de disolventes biodegradables también puede colaborar en la obtención de dichos componentes (Qazanfarzadeh, *et al.*, 2023).

Proaño, *et al.*, elaboraron biopelículas mediante el uso de proteínas procedentes de BSGs (BSG-PC) y los plastificantes: polietilenglicol (PEG) y glicerol en concentraciones de 0.05 a 0.25 g/g. Las biopelículas elaboradas con 0.10 y 0.15 g de BSG-PC/g PEG fueron las más prometedoras, debido a sus propiedades (mayor firmeza, capacidad de retención de agua y opacidad en comparación con las demás formulaciones) y su capacidad antioxidante.

#### **5.1.4. Otras aplicaciones**

Las aplicaciones del bagazo de la cerveza no se limitan a la Industria Alimentaria, pues el grano agotado también puede ser usado en la producción de biogás; procesos bioquímicos enfocados en obtener enzimas y compuestos químicos como

el xilitol, arabinol, ácido láctico, glicerol y etanol; en el cultivo de microorganismos como hongos (*Pleurotus*, *Agrocybe*, *Lentinus*, *Aspergillus* y *Trichoderma*) y bacterias (*Bacillus* y *Streptomyces*); la producción de recipientes biodegradables, entre otros (Mussatto, 2009).

A continuación, se describe la aplicación del bagazo en la producción de biogás y recipientes biodegradables:

### **a) Producción de biogás**

El biogás es una mezcla de metano (50-75%), dióxido de carbono (25-50%) y bajas concentraciones de sulfuro de hidrógeno, amoníaco y compuestos orgánicos volátiles, el cual puede ser empleado para calentar alimentos y generar energía eléctrica y biocombustibles (biometano líquido). Su producción mediante el uso de BSG se ha realizado empleando métodos de digestión anaeróbica, combustión, pirólisis y gasificación (He, *et al.*, 2023).

La gran mayoría de los estudios con respecto a este tema, se enfocan en la digestión anaeróbica. Sin embargo, las pequeñas cervecerías no son capaces de producir la cantidad de subproductos necesaria para que el costo de energía que implican este método sea redituable. Por ello, Ortiz, *et al.*, han propuesto como alternativa el secado del BSG por medio del uso de energía solar, seguido de una etapa de formación de *pellets* que son finalmente convertidos en biogás mediante un reactor de lecho burbujeante, el cual puede remplazar el uso de los boilers de diesel o motores de gas dentro de la cervecería y ser usado para generar la electricidad necesaria para el funcionamiento de los sistemas de enfriamiento. La implementación de este proceso, da lugar a la producción de 28.9 MW/año, lo cual implica un ahorro del 22% del consumo de combustibles fósiles requeridos por el proceso de elaboración de cerveza. Este resultado puede parecer un poco decepcionante, pero es necesario considerar que el uso de BSG en la generación de energía, reduce significativamente la cantidad de residuos producidos por la cervecería y con ello, los costos asociados a los mismos.

## **b) Elaboración de recipientes biodegradables**

La elaboración de recipientes capaces de ser degradados por la acción enzimática de los microorganismos presentes en el ambiente y conformados por una mezcla de bagazo con harina de trigo o yuca, goma guar, glicerina y agua, ha sido abordada por Zavala (2018) y Aguirre y Montes (2019), como una alternativa al uso de polietileno expandido (unicel). De acuerdo a los resultados obtenidos por ambas investigaciones, los recipientes biodegradables elaborados con BSG/yuca al 5/45% y 23/23%, presentaron la mayor resistencia e impermeabilidad y al ser degradados, tuvieron una mayor pérdida de masa. Así mismo, el secado de los platos en hornos permitió preservar la coloración y el aroma de los platos.

### **5.2. Trüb**

Es una mezcla semilíquida de color café claro a gris oscuro, conformada principalmente por residuos de lúpulo y proteínas coloidales que se desnaturalizaron y coagularon durante el proceso de cocción y formaron complejos con proteínas del mosto (proteína-proteína), polifenoles (proteína-polifenol) y resinas (proteína-resina).

El *trüb* representa alrededor del 2% del total de los residuos obtenidos durante la elaboración de cerveza. Se forma durante la etapa de cocción del mosto y es recolectado en su forma húmeda (80-90%) antes de que el mosto lupulado se someta a fermentación, **Figura 5.12.**

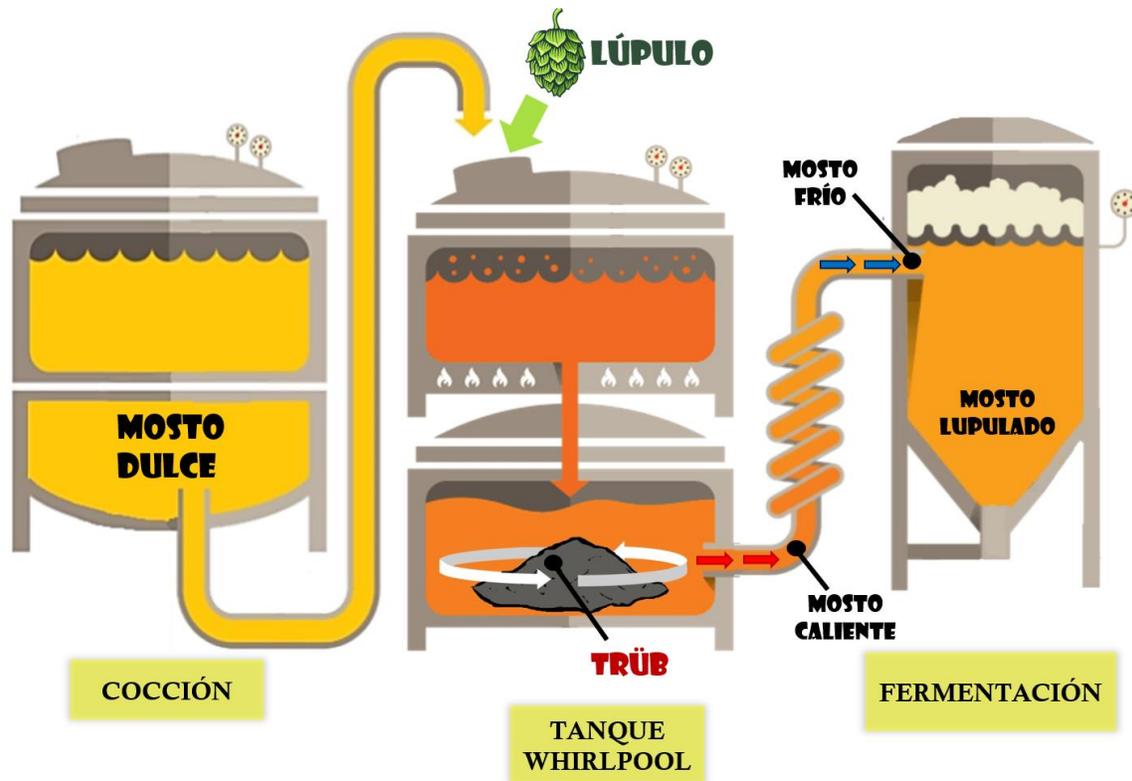


Figura 5.12. Esquema de la obtención del *trüb* durante la elaboración de cerveza.

El *trüb* comprende alrededor del 0.2-0.4% del volumen total del mosto y aprox. 85% del lúpulo añadido durante la etapa de cocción, por lo que se encuentra conformado por: una alta concentración de proteínas, en su mayoría de alto peso molecular; concentraciones significativas de fibra dietética, la cual se encuentra principalmente constituida por pectinas que incluyen los homogalacturonanos, ramnogalacturonanos y arabinogalactanos unidos a proteínas, las cuales son ricas en cisteína, treonina, serina, alanina e hidroxiprolina; bajas concentraciones de lípidos y minerales y una variedad de componentes del lúpulo, entre los que se encuentran: aceites esenciales, resinas ( $\alpha$ - y  $\beta$ - ácidos) y polifenoles, **Tabla 5.10**.

**Tabla 5.10. Composición química general del *trüb*.** Elaborada a partir de Karlović A., *et al.*, 2020; Amoriello T. y Cikoritti R., 2021.

| Componente              | Valor (%) | Componente                     | Valor (%)                 |    |
|-------------------------|-----------|--------------------------------|---------------------------|----|
| Proteínas               | 40-70     | Hidrocarburos sesquiterpénicos | 37                        |    |
| Fibra                   | 22-26     | Hidrocarburos monoterpénicos   | 27                        |    |
| Componentes del lúpulo  | 10-20     | Aceites esenciales             | Derivados no terpénicos   | 18 |
| Polifenoles             | 5-10      |                                | Sesquiterpenos oxigenados | 8  |
| Carbohidratos (almidón) | 4-8       |                                | Monoterpenos oxigenados   | 4  |
| Minerales               | 2-6.5     |                                |                           |    |
| Lípidos                 | 1-4.5     |                                |                           |    |

### 5.2.1. Caracterización de los componentes bioactivos y con propiedades funcionales presentes en el *trüb*

1. Aminoácidos y proteínas. Las proteínas presentes en el *trüb* son de interés para la elaboración de productos alimenticios, dado que poseen concentraciones significativas de aminoácidos (70.6%), de los cuales el 26.2-28.8% corresponden a aminoácidos esenciales. Las proteínas que provienen del *trüb* son una buena fuente de aminoácidos ramificados (específicamente valina, isoleucina y leucina), cuya concentración (13.6 a 15.0%) es cercana a la presente en los hidrolizados de proteína de soya (18.1%) y de caseína (19.5%), (Wallen y Marshall, 1979; Saraiva, *et al.*, 2018).

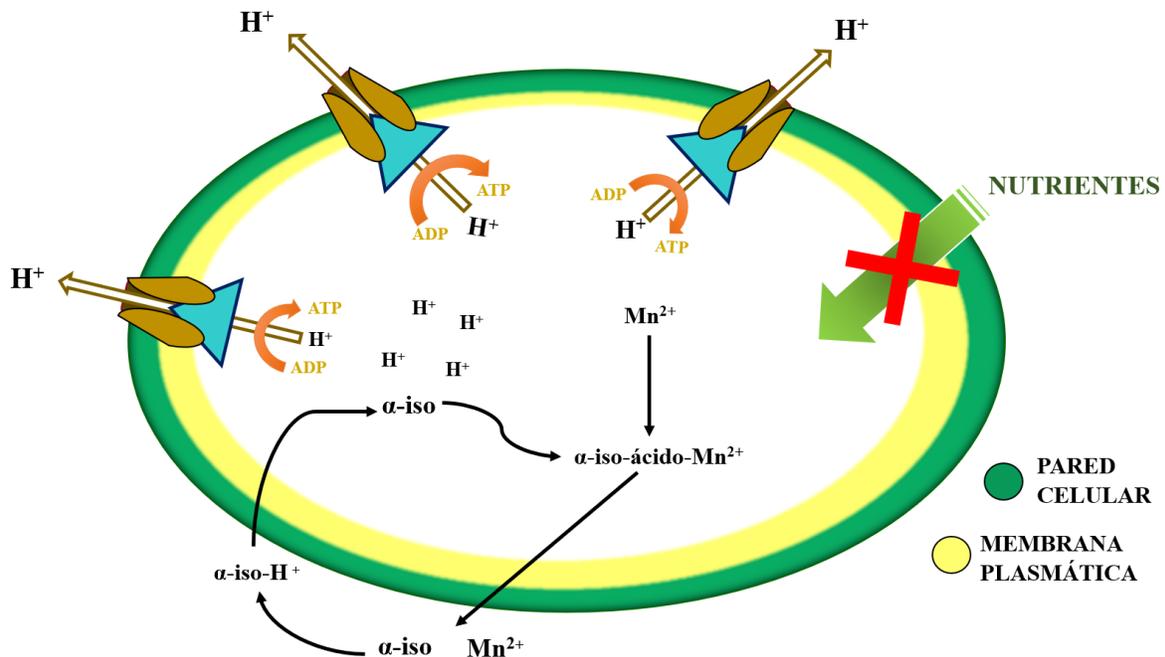
**Tabla 5.11. Aminoácidos esenciales y no esenciales presentes en el *trüb*.**  
Elaborada a partir de Wallen S. y Marshall H., 1979.

| Aminoácido esencial | Valor (%) | Aminoácido no esencial | Valor (%) |
|---------------------|-----------|------------------------|-----------|
| Leucina             | 6.6-7.1   | Ácido glutámico        | 12.2-14.9 |
| Valina              | 4.0-4.6   | Ácido aspártico        | 5.6-14.2  |
| Fenilalanina        | 4.0-4.2   | Alanina                | 4.2-5.2   |
| Isoleucina          | 3.0-3.3   | Prolina                | 4.5-5.3   |
| Lisina              | 3.0-3.2   | Serina                 | 4.0-5.8   |
| Treonina            | 2.9-3.4   | Arginina               | 3.8-11.0  |
| Histidina           | 1.7-2.1   | Glicina                | 3.1-4.5   |
| Metionina           | 1.0-1.1   | Tirosina               | 2.1-2.9   |
| Triptófano          | 0.7-1.2   | Cisteína               | 0.0-1.6   |

Las proteínas del *trüb* contribuyen en la formación de turbidez en la cerveza y la estabilidad de su espuma. Se componen principalmente por:

- a) Proteína Z. Es la albúmina más abundante en el grano de cebada (5% del total de albúminas). Se caracteriza por ser una proteína termoestable y resistente a la actividad enzimática. Es la proteína que proporciona la mayor parte de la estabilidad de la espuma de la cerveza.
  
- b) Proteína inhibidora de tripsina o proteína CMe. Es una molécula de alto peso molecular caracterizada por ser la principal responsable de la turbidez de la cerveza.
  
- c) Proteína transferidora de lípidos 1 o proteína nsLTP1. Es una proteína de bajo peso molecular, altamente termoestable y considerada como un alérgeno de la cerveza, debido a que es resistente a las enzimas proteolíticas presentes en el tracto intestinal humano (Finnie y Svensson, 2014; Jaeger, *et al.*, 2020).

2.  $\alpha$ -ácidos y  $\beta$ -ácidos (residuos del lúpulo). Los  $\alpha$ -ácidos y los  $\beta$ -ácidos presentan actividad antimicrobiana, principalmente ante bacterias Gram positivas tolerantes al etanol y a pH ácidos, como es el caso de bacterias de los géneros *Lactobacillus*, *Streptococcus*, *Staphylococcus*, *Micrococcus*, *Bacillus* y *Pediococcus*. Esta actividad se encuentra asociada a cambios en la permeabilidad de las paredes celulares de las bacterias y en el caso de *Bacillus subtilis*, a alteraciones en la membrana citoplasmática que inhiben el transporte activo de azúcares y aminoácidos, así como, imposibilitan la respiración celular y la síntesis de proteínas, ADN y ARN, **Figura 5.13**.



**Figura 5.13. Mecanismo de acción antibacteriana de los  $\alpha$ -iso-ácidos del lúpulo.**  
Elaborada a partir de Sakamoto K. y Konings W., 2003. "Beer spoilage bacteria and hop resistance".

Una vez dentro de la célula bacteriana, los  $\alpha$ -y  $\beta$ -ácidos se disocian en protones ( $H^+$ ) y aniones, debido al alto pH intracelular. Posteriormente, estos compuestos interactúan con los  $Mn^{2+}$  presentes en el citoplasma de la célula y forman complejos ácido- $Mn^{2+}$  que se transportan fuera de la célula por difusión. La salida de estos complejos, posibilita la acumulación de protones y la disminución del pH intercelular, lo cual trae como consecuencia la disipación del gradiente transmembranal ( $\Delta pH$ ) y

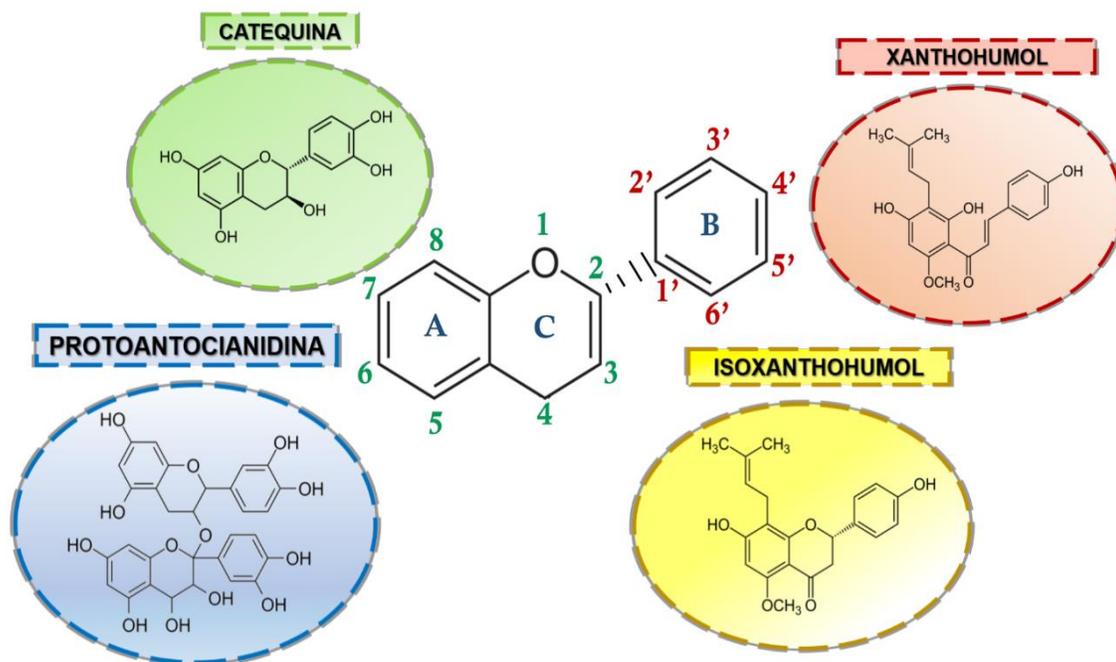
la inhibición de la fuerza protón motriz. Esto último, genera una disminución de la absorción de nutrientes que requieren de la fuerza protón motriz para su transporte y eventualmente, da lugar a la muerte de la célula.

La actividad antimicrobiana de los componentes provenientes del lúpulo, varía dependiendo del compuesto químico. Sin embargo, el aumento en el número de grupos acilo y grupos prenilo en las cadenas laterales de las moléculas, incrementa la hidrofobicidad de los compuestos y con ello, su potencial antimicrobiano.

Los  $\alpha$ -ácidos y  $\beta$ -ácidos también poseen actividad antioxidante, anticancerígena y antiinflamatoria, (Sakamoto y Konings, 2003).

3. Polifenoles. Los polifenoles son un grupo heterogéneo de sustancias constituidas por uno o más anillos aromáticos y al menos dos grupos hidroxilo (-OH). Los polifenoles presentes en el *trüb*, son principalmente flavonoides de los siguientes grupos: proantocianidinas, flavan-3-oles, flavonoles, flavanonas, flavonoides glucosídicos y flavonoides prenilados.

Los flavonoides poseen un esqueleto de difenilpropano ( $C_6-C_3-C_6$ ), el cual está conformado por dos anillos aromáticos unidos a través de tres átomos de carbono que forman un heterociclo oxigenado, **Figura 5.14**.



**Figura 5.14. Estructura química de los flavonoides y algunos ejemplos.**

Entre los flavonoides presentes en el *trüb* y considerados como compuestos bioactivos, se encuentran:

- a) Catequinas y epicatequinas. Son monómeros incoloros que poseen un grupo hidroxilo (-OH) en la posición 3 de su anillo de carbono. Usualmente, se encuentran como agliconas, oligómeros o esterificados con ácido gálico, dando lugar a la galocatequina y la epigalocatequina.
- b) Proantocianidinas. Las proantocianidinas, también llamadas “taninos condensados”, son polímeros de flavon-3-oles con efecto antimicrobiano, antioxidante, anticancerígeno y antiinflamatorio. La mayor parte de las proantocianidinas presentes en el *trüb* son procianidinas, las cuales son polímeros homogéneos de (epi)catequina.
- c) Xanthohumol. Esta chalcona posee actividad antioxidante, antiinflamatoria, actividad anticancerígena y antimicrobiana, especialmente contra bacterias Gram negativas, como *Staphylococcus* y *Streptococcus*.  
Este compuesto es capaz de inhibir la proliferación celular y la metástasis de melanomas y carcinomas hepatocelulares e impedir la proliferación, diferenciación y sobreproducción de fibroblastos inducida por TGF- $\beta$ . Así mismo, tiene efectos positivos en la reducción de la proliferación del cáncer de piel y en el mejoramiento de su elasticidad.
- d) Isoxanthohumol. Flavonoide prenilado obtenido a partir de la isomerización térmica del xanthohumol. Se caracteriza por poseer actividad antitumorífica, antioxidante y antimicrobiana, así como efectos proestrogénicos.
- e) 8-prenilnaringenina. Fitoestrógeno obtenido a partir de la isomerización del desmetilxanthohumol. Posee actividad antioxidante, puede inhibir la aparición de cáncer de mama, útero y próstata y reduce los síntomas

asociados a la menopausia, (Priest y Stewart, 2006; Mateos, 2013; Karabin, *et al.*, 2015; Żońnierczyk, *et al.*, 2015; Girisa *et al.*, 2021).

### 5.2.2. Tratamiento del *trüb*

El procesamiento de este subproducto ha recibido muy poca atención en la literatura. No obstante, se ha reportado el uso de filtros rotatorios de tambor con membranas de entre 100 a 300 micrómetros como forma de recuperación del *trüb*. Otros métodos incluyen el uso de filtros-prensa, cribas vibratorias, centrifugas, filtros de flujo cruzado y el reciclaje del *trüb* colocándolo por encima de los granos de cebada presentes en el filtro *Lauter tun* antes de iniciar la aspersion con agua. Este último método, tiene como desventajas que requiere del procesamiento del mismo tipo de malta y reduce la eficiencia de la extracción del mosto, (Bjerregaard, *et al.*, 2019).

### 5.2.3. Aplicaciones en la Industria Alimentaria

El empleo directo del *trüb* en la elaboración de productos alimenticios destinados al consumo humano y animal, se considera una actividad poco eficiente, debido a que este subproducto cuenta con un sabor amargo y desagradable, impartido por las resinas del lúpulo, los polifenoles y el 2-metil-3-butanol (sabor amargo y efecto sedante). Es por ello, que se han planteado diferentes métodos para degradar dichos compuestos. Uno de los más ecológicos, es el empleo de microorganismos capaces de degradar a los  $\alpha$ - y  $\beta$ -ácidos.

En 2008 Huszcza, *et al.*, evaluaron la capacidad de nueve cepas de microorganismos para degradar las resinas del lúpulo y la viabilidad de su uso para eliminar el sabor amargo del lúpulo y el *trüb*. Se encontró que el uso de *Trametes versicolor*, podría colaborar en la descomposición de los compuestos amargos del *trüb*, pues fue capaz de degradar completamente las humulonas y lupulonas en un periodo de 4 días en la oscuridad y de 36 h en presencia de luz. Por su parte, Huszcza y Bartmńska investigaron el uso de la levadura *Candida parapsilosis* como medio para degradar los compuestos amargos en el *trüb*, observándose que

la degradación de lupulonas y humulonas es mayor a concentraciones altas de riboflavina, presencia de luz y a temperaturas de 40°C.

También, se han planteado procesos de extracción de los compuestos amargos del *trüb*. Saraiva, *et al.*, mencionan el uso de una extracción acuosa (100 °C/1h) de 5 pasos que permitió obtener una fracción líquida (conformada por las resinas del lúpulo) y una fracción sólida (el *trüb* tratado). Este proceso, redujo significativamente el contenido de compuestos amargos en el *trüb*, así como favoreció la concentración de las proteínas presentes en el subproducto.

Cabe mencionar que los métodos anteriormente mencionados no han sido ampliamente aplicados, lo cual puede deberse a que la información sobre la extracción y la degradación de los compuestos amargos del *trüb* aún es limitada.

Independientemente de lo anterior, se pueden encontrar algunas aplicaciones del subproducto como pienso animal o aditivo alimentario:

#### **a) Pienso animal**

Dado su sabor amargo y astringente, el *trüb* suele ser empleado en la elaboración de pienso animal como parte de mezclas de grano agotado, levadura residual y harinas de leguminosas y cereales, pues dichos aditivos enmascaran sus cualidades (Priest y Stewart, 2006).

Mattioli, *et al.*, mencionan haber adicionado *trüb* liofilizado (2%), linaza extruida (3%) y mezcla de *trüb* (2%) y linaza (3%) a la dieta de conejos, observado sus efectos en la calidad, el estado oxidativo y el contenido de colesterol de su carne. En esta investigación, se concluyó que la adición de *trüb* a la dieta modificó el perfil de lípidos poliinsaturados y redujo la estabilidad oxidativa de la carne de conejo. No obstante, no se observaron efectos positivos en la calidad de la carne de conejo tras haber suplementado las dietas con *trüb*.

Por su lado, Russ y Meyer-Pittroff investigaron la adición de *trüb* y mezclas de *trüb* con levadura residual a las dietas de animales de granja, concluyendo que la mezcla levadura-*trüb* es considerada como aceptable para su uso como alimento para cerdos, a pesar de la presencia de compuestos amargos.

### a) Uso del *trüb* en otros productos alimenticios

Las altas concentraciones de proteínas y fibra dietética y su capacidad para inducir la floculación y sedimentación de las levaduras, conviertan a este subproducto en un potencial aditivo que puede ser empleado en la clarificación de cervezas y para enaltecer el valor nutricional de productos de panificación y confitería, **Tabla 5.12.**

**Tabla 5.12. Algunas de las aplicaciones del *trüb* en la Industria Alimentaria.**

| Aplicación   | Incorporación  | Conclusiones   | Referencia      |
|--|--|--|-----------------|
| Pan casero a base de harinas de cereales y leguminosas | A la masa del pan se le adicionó <i>trüb</i> en concentraciones de 6.2% y 7.1% | Los productos adicionados con <i>trüb</i> presentaron una corteza dura, una miga apelmazada y un color beige oscuro. Además, presentaron aromas tostados, a levadura y a cerveza y sabor salado y ligeramente astringente. El pH de las masas adicionadas con <i>trüb</i> (5-7), favoreció el desarrollo fermentativo y maximizó la producción de CO <sub>2</sub> en el pan formado. | Hernández, 2022 |
| Brownies caseros de chocolate                          | Adición de <i>trüb</i> en concentraciones de 20 y 40% a la masa del brownie.   | La adición de <i>trüb</i> favoreció el aumento de la concentración de fibra y proteína en el producto. El brownie con <i>trüb</i> al 40% fue el de mayor agrado por parte del consumidor.  | Santos, 2019    |
| Chocolates caseros                                     | Adición de <i>trüb</i> en concentraciones de 20, 25 y 30% al licor de cacao.   | La adición de <i>trüb</i> favoreció el aumento de la concentración de fibra y proteína en el producto.   | Santos, 2019    |

| Aplicación                | Incorporación  | Conclusiones  | Referencia                     |
|---------------------------|--|---|--------------------------------|
| Clarificación de cervezas | Extracción de los componentes del <i>trüb</i> mediante el uso de 70% acetona en agua. Adición del extracto de lúpulo a la cerveza verde. | Los extractos de lúpulo, dieron lugar a sedimentos compactos similares a los producidos por los clarificantes comerciales empleados en la clarificación de la cerveza. Además, fueron efectivos en la reducción de la turbidez de las cervezas. | Linforth, <i>et al.</i> , 2015 |

#### 5.2.4. Otras aplicaciones

El *trüb* puede ser empleado en la elaboración de fertilizantes, surfactantes, acondicionadores de suelos, pinturas, cartón y madera.

También es considerado un sustrato de bajo costo que favorece el crecimiento y esporulación de la bacteria *Bacillus sphaericus* (usada como bioinsecticida) e incrementa la vitalidad y viabilidad de la levadura *Saccharomyces cerevisiae* (Cruz, *et al.*, 2006; Priest y Stewart, 2006; Bolaños, *et al.*, 2019).

#### 5.3. Levadura residual, *surplus yeast* o *residual brewing yeast (BSY)*

La levadura residual es el segundo subproducto mayoritario de la elaboración de cerveza y constituye alrededor del 13% de los residuos sólidos obtenidos. Las cervecías suelen obtener de entre 1.5 a 4 kg de levadura húmeda (74-90%) por cada 100 L de cerveza.

Este subproducto es removido de los fermentadores o unitanques al final de la segunda fermentación y durante los días que comprenden la maduración, **Figura 5.15.**



**Figura 5.15. Esquema de la obtención de la levadura residual durante la elaboración de cerveza.**

La reinoculación de levadura se considera una práctica habitual entre los cerveceros. Sin embargo, esta tiene la desventaja de limitarse a un número específico de veces con un control microbiológico riguroso (máx. 10-11 reinoculaciones sucesivas). Emplear la misma levadura por más tiempo del sugerido, puede repercutir negativamente en la calidad sensorial del producto terminado, dada la pérdida de viabilidad de la cepa, acumulación de sustancias causantes de turbidez y la formación de compuestos indeseables durante la fermentación secundaria.

La levadura residual se encuentra conformada por una alta concentración de proteínas con alto valor biológico y buen perfil de aminoácidos esenciales, alta concentración de carbohidratos, cantidades significativas de fibra dietética y bajas

concentraciones de ácidos nucleicos (principalmente ARN), lípidos, minerales y vitaminas del complejo B, **Tabla 5.13**.

**Tabla 5.13. Composición química general de la levadura residual.** Elaborada a partir de Färças A., *et al.*, 2017; Karlović A., *et al.*, 2020; Amoriello T. y Cicoritti R., 2021.

| Componente                   | Valor (%) |
|------------------------------|-----------|
| Proteínas                    | 35-60     |
| Carbohidratos no celulósicos | 25-45     |
| Celulosa                     | 17-25     |
| Lignina                      | 8-28      |
| Vitaminas                    | 7         |
| Ácidos nucleicos             | 6-15      |
| Lípidos                      | 4-14      |
| Minerales                    | 5-7.5     |

Durante el proceso de fermentación, la levadura absorbe varios de los componentes presentes tanto en el mosto como en el lúpulo, lo cual influye en el tipo y concentración de compuestos químicos presentes en el subproducto, **Tabla 5.14**.

**Tabla 5.14. Compuestos químicos presentes en la levadura residual.** Elaborada a partir de Färças A., *et al.*, 2017; Jaeger A., *et al.*, 2020.

| Componente         | Valor                          |
|--------------------|--------------------------------|
| Polisacáridos      | β-glucanos 8 %                 |
| Resinas            | α-ácidos 167-2 074 µg/g        |
|                    | β-ácidos 487-2 557 µg/g        |
| Minerales          | Sodio 12 280 ppm               |
|                    | Magnesio 2 736 ppm             |
|                    | Potasio 915 ppm                |
|                    | Calcio 271 ppm                 |
| Vitaminas          | Colina 3 900 ppm               |
|                    | Niacina (B3) 460-772 ppm       |
|                    | Ácido pantoténico (B5) 110 ppm |
|                    | Piridoxina (B6) 551 ppm        |
|                    | Tiamina (B1) 93 ppm            |
|                    | Rivoflavina (B2) 38 ppm        |
|                    | Ácido fólico (B9) 9.7-30 ppm   |
| Biotina (B7) 1 ppm |                                |

### 5.3.1. Caracterización de los componentes bioactivos y con propiedades funcionales presentes en la levadura residual

1. Aminoácidos esenciales. Los aminoácidos que predominan en las proteínas procedentes de la levadura residual pueden clasificarse en aminoácidos esenciales y no esenciales. Los aminoácidos no esenciales más abundantes en la levadura residual son alanina, ácido glutámico, asparagina y ácido aspártico, mientras que, los aminoácidos esenciales más abundantes son lisina, leucina e isoleucina.

Los aminoácidos azufrados metionina y cisteína se encuentran en bajas concentraciones en la levadura residual, sin embargo, de acuerdo con el estudio realizado por Vieira, *et al.*, su concentración cumple con los requerimientos de aminoácidos para adultos definido por la FAO (1.7 g/100 g), **Tabla 5.15**.

**Tabla 5.15. Aminoácidos presentes en un extracto de *Saccharomyces cerevisiae* residual.** Elaborada a partir de Marson G., *et al.*, 2020.

| Aminoácido esencial | g/100 g  | Aminoácido no esencial | g/100 g  |
|---------------------|----------|------------------------|----------|
| Lisina              | 4.1-8.8  | Alanina                | 4.2-26.6 |
| Leucina             | 4.1-8.8  | Glutamina              | 7.7-18.0 |
| Isoleucina          | 2.8-5.6  | Asparagina             | 4.9-12   |
| Fenilalanina        | 2.5-5.3  | Ácido aspártico        | 4.1-11.6 |
| Histidina           | 1.3-7.3  | Glicina                | 2.9-4.9  |
| Arginina            | 0.3-11.3 | Serina                 | 2.8-6.1  |
| Valina              | 0.7-6.2  | Prolina                | 2.8-4.5  |
| Treonina            | 0.2-6.2  | Ácido glutámico        | 0.6-15   |
| Tirosina            | 0.4-4.7  |                        |          |
| Metionina           | 0.9-2.5  |                        |          |
| Cisteína            | 0.3-2.1  |                        |          |
| Triptófano          | 0.7-1.4  |                        |          |

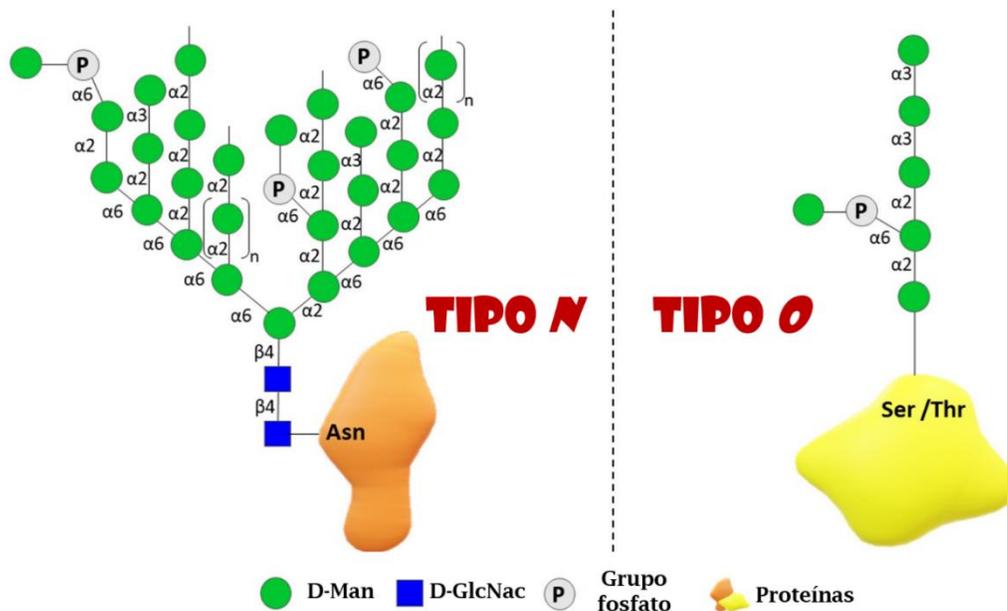
La levadura residual es de interés para la Industria Alimentaria, dado que cuenta con una alta concentración de ácido glutámico y glutamina, los cuales pueden ser utilizados como potenciadores de sabor en una amplia variedad de alimentos como bebidas lácteas, quesos, cremas, salsas, productos de panificación, entre otros.

Asimismo, los extractos de levadura son considerados como una fuente poco explorada de glutamato monosódico (MSG), potenciador del sabor umami.

Las proteínas de bajo peso molecular (<3 kDa) presentes en la levadura residual, poseen actividad antioxidante, antiinflamatoria, antihipertensiva y antiulcerosa, son capaces de inhibir la proliferación de células leucémicas, de impedir la actividad de la enzima convertidora de angiotensina (ACE) y presentan efectos positivos contra la obesidad, la diabetes tipo II y la hipertensión (Pulingundla, *et al.*, 2020; Marson, *et al.*, 2020).

2. Manoproteínas. Son glicoproteínas con alto grado de glucosilación (80-90%) y conformadas mayoritariamente por manosa (>90%) y glucosa. Representan entre 30-50% del peso seco de la pared celular (Mínguez, 2008).

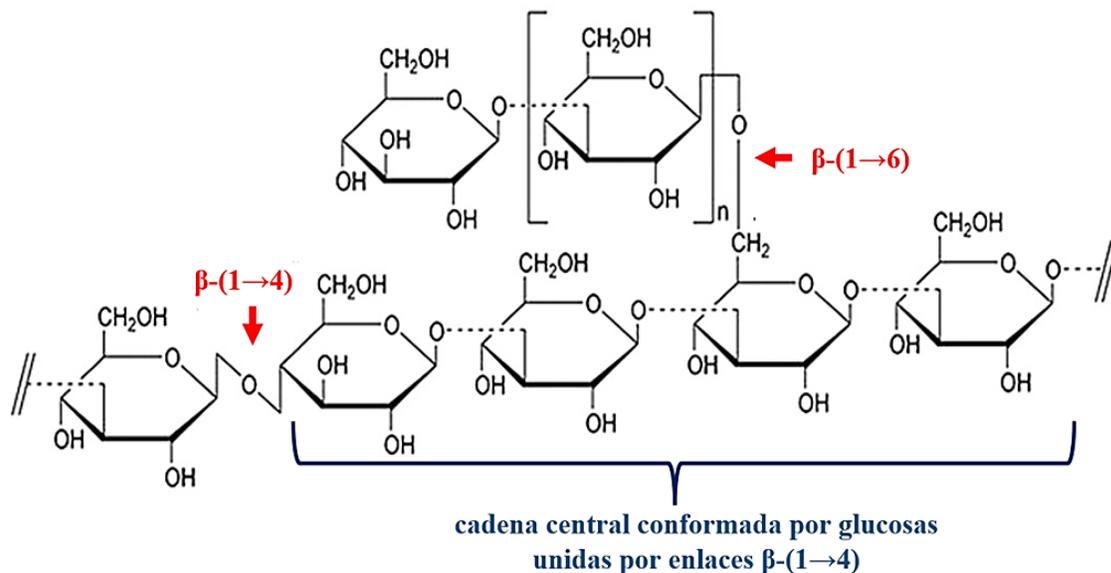
Las manoproteínas de *Saccharomyces cerevisiae*, poseen un núcleo proteico con dos tipos de cadenas glicánicas: cadenas cortas de manosa unidas a la parte proteica por medio de grupos hidroxilo presentes en residuos de serina o treonina y cadenas largas polimanosídicas ramificadas con cadenas laterales de manosa enlazadas a la parte peptídica mediante una N-acetil-glucosamina unida a un residuo de asparagina (Bastos, *et al.*, 2022), **Figura 5.16**.



**Figura 5.16. Estructura química de las N-manoproteínas y las O-manoproteínas presentes en *Saccharomyces cerevisiae*.** Man: manosa, GlcNac: N-acetil-glucosamina, Asn: asparagina, Ser: serina y Thr: treonina. Bastos B., *et al.*, 2022.

Las manoproteínas son buenos emulsificantes y estabilizantes de emulsiones y en la Industria Alimentaria, suelen ser empleadas como aditivos orientados a darle estabilidad a los vinos y como estabilizantes/emulsificantes de aderezos para ensalada. Estas proteínas también actúan como compuestos bioactivos, debido a que son inmunomoduladores y presentan actividad antimutagénica y anticarcinogénica.

3.  $\beta$ -glucanos. Representan aprox. 50% de la pared celular de las levaduras. Se encuentran conformados por cadenas de glucosa unidas por enlaces  $\beta$ -(1 $\rightarrow$ 3) y largas cadenas laterales unidas por enlaces  $\beta$ -(1 $\rightarrow$ 6), siendo los  $\beta$ -(1 $\rightarrow$ 3) glucanos los más abundantes (Pizarro, *et al.*, 2014; Mínguez, 2008), **Figura 5.17.**



**Figura 5.17. Estructura química de los  $\beta$ -glucanos de la levadura.**

En 2007 la Administración de Alimentos y Medicamentos de Estados Unidos (FDA), reconoció a los  $\beta$ -glucanos provenientes de la levadura *Saccharomyces cerevisiae* como aditivo GRAS (Generalmente Reconocidos como Seguros), debido a que estos compuestos químicos forman parte de la dieta humana. Los  $\beta$ -glucanos se usan en la Industria Alimentaria como emulsificantes, espesantes, sustitutos de lípidos, hidrocoloides, fibra dietética y coberturas.

Los  $\beta$ -glucanos de la levadura también tienen efectos positivos en la salud humana, pues son inmunomoduladores; poseen actividad antiinflamatoria, antidiabética, antimutagénica y anticarcinogénica; actúan como prebióticos; disminuyen la concentración de lípidos en sangre y estimulan la respuesta celular de la piel para combatir el envejecimiento producido por radicales libres (Yuan, *et al.*, 2019).

4. Compuestos fenólicos. Los compuestos fenólicos pueden encontrarse presentes en la levadura residual en su forma libre o conjugada y comprenden al ácido gálico, el ácido protocatecúlico, la catequina, el ácido *p*-cumárico, el ácido ferúlico, el ácido cinámico, la naringina, la quercetina y el kaempferol.

Estos compuestos se caracterizan por poseer alta actividad antioxidante, enaltecer la actividad del sistema inmunológico, prevenir enfermedades relacionadas con el envejecimiento e inhibir la proliferación de células cancerosas (Vieira, *et al.*, 2016).

5. Lípidos. Los lípidos presentes en la levadura residual son mono-, di- y triglicéridos, escualeno, lanosterol, ergosterol y ésteres de esteroides y ácidos grasos libres, **Tabla 5.16**.

**Tabla 5.16. Lípidos presentes en la levadura residual.**

Elaborada a partir de Blagović B., *et al.*, 2001.

| Componente            | Valor (%) | Ácido graso                | Valor (%) |
|-----------------------|-----------|----------------------------|-----------|
| Triacilgliceroles     | 8.6       | Láurico (12:0)             | 4.5       |
| Escualeno             | 32.6      | Lauroleico (12:1)          | 2.8       |
| Ergosterol            | 9.5       | Mirístico (14:0)           | 3.0       |
| Ésteres de esteroides | 0.7       | Miristoleico (14:1)        | 2.1       |
|                       |           | Palmítico (16:0)           | 44.2      |
|                       |           | Palmitoleico (16:1)        | 13.9      |
|                       |           | Oleico (18:1)              | 7.3       |
|                       |           | Ácido linoleico (18:2)     | 2.9       |
|                       |           | Cerótico (26:0)            | 2.4       |
|                       |           | Ácidos grasos saturados    | 68        |
|                       |           | Ácidos grasos no saturados | 32        |

Los triacilglicerolos, el escualeno, el ergosterol y los ésteres de esteroides representan aprox. el 51% del total de lípidos presentes en la levadura residual, siendo el escualeno el más abundante (31%). El escualeno es un triterpeno que actúa como adyuvante del sistema inmunológico y posee actividad antioxidante; actividad citoprotectora selectiva en células normales y frente a la toxicidad producida por quimioterapéuticos; así como actividad antitumoral, principalmente frente a cáncer de mama, colon, pulmón y piel. Los derivados del escualeno, escualano y escualamina, han sido eficazmente empleados en la elaboración de cosméticos para la piel y en el tratamiento de infecciones bacterianas, respectivamente (Blagović, *et al.*, 2001; Warleta, *et al.*, 2007)

La levadura residual también es fuente de ácidos grasos, principalmente saturados. El ácido palmítico (16:0), el ácido palmitoleico (16:1) y el ácido oleico (18:1) representan hasta el 80% del total de ácidos grasos presentes en el subproducto.

6. Ácidos nucleicos. La alta concentración de ácidos nucleicos (6-15%) restringe el uso de la levadura residual como fuente de proteínas para el consumo humano, ya que pueden incrementar en la concentración de ácido úrico en sangre y tejidos (hiperuricemia) (Puligundla, *et al.*, 2020).

No obstante, los ácidos nucleótidos y nucleósidos generados a partir de la degradación enzimática intracelular de los ácidos nucleicos presentes en la levadura pueden ser usados como potenciadores de sabor. El ácido guanílico (Guanosina-5'-monofosfato) es un derivado de la purina, caracterizado por ser un acentuador de sabor umami.

### **5.3.2. Tratamiento de la levadura residual**

Después de su recolección, la levadura residual es filtrada por medio de filtros de tambor rotativo, filtros-prensa de placas empotradas, filtros-prensa de platos y marcos, filtros-prensa de membrana o filtros de flujo cruzado. Posteriormente, la levadura residual es almacenada a 5°C, debido a que temperaturas superiores pueden dar lugar a la disminución de los sólidos solubles presentes en la levadura y a la formación de espuma generada durante el metabolismo del glucógeno.

La levadura residual puede encontrarse en el mercado en forma de pasta (forma en la que se retira del fermentador), de concentrado (levadura sometida a una deshidratación posterior a su recolección) y de extracto líquido o sólido (obtenido a partir de la hidrólisis enzimática o química de las células), **Figura 5.18**.



**Figura 5.18. Formas comerciales de la levadura residual.**

- a) Levadura en pasta. Si la levadura será empleada en la elaboración de algún producto alimenticio, esta debe someterse a un proceso de inactivación posterior a su obtención. Generalmente, la inactivación de la levadura se lleva a cabo mediante el uso de agentes químicos como el ácido propiónico, el ácido fórmico y el acetato de etilo. Aunque también puede realizarse por medio de un secado a 75°C, el cual deshidrata a la célula y desnaturaliza su membrana plasmática. Finalmente, se añaden ácidos orgánicos que permiten su conservación.
  
- b) Concentrados de levadura. La levadura se pasteuriza (60°C) y se seca por aspersión (250-450 °C) hasta obtener un contenido final de humedad del 10%. Finalmente, el concentrado es sometido a un paso de enfriamiento. Si se requiere eliminar las sustancias que generan el sabor amargo (polifenoles y resinas) de la levadura residual, es necesario llevar a cabo un paso previo al secado por aspersión. Este paso consiste en realizar un lavado con detergentes alcalinos (2% NaOH y tripolifosfato de sodio) que, dependiendo de su composición, incrementan el pH hasta valores 7-10. Posteriormente, la levadura

se somete a microfiltración y a un último lavado, cuya intención es eliminar los residuos del detergente.

- c) Extractos de levadura. Los extractos de levadura residual son obtenidos a partir de la lisis de las células, principalmente por autólisis o plasmólisis.

La autólisis es la degradación de la célula por medio de enzimas endógenas que, en el caso de la levadura incluyen: proteasas, nucleasas, glucanasas y fosfolipasas. La autólisis es un proceso que se lleva a cabo al final del ciclo de crecimiento de la célula y al comienzo de su muerte celular y usualmente, se realiza a condiciones de temperatura de entre 30 a 60°C por 12 a 24 h.

Por otro lado, la plasmólisis refiere a la modificación del proceso de autólisis de la levadura y se logra mediante la adición de sales inorgánicas (NaCl) y compuestos orgánicos (acetato de etilo, acetato de amilo).

Una autólisis o proteólisis prolongada puede dar lugar a la pérdida de varios componentes presentes en la levadura residual (ej. polifenoles y vitaminas).

Los hidrolizados de levadura, se obtienen mediante el uso de enzimas exógenas y generalmente, comerciales como son Flavourzime®, Protamex® y Alcanase®, las cuales han reportado buenos rendimientos con respecto a la hidrólisis de proteínas y la presencia de compuestos funcionales y bioactivos. Tanto los extractos como los hidrolizados de proteína provenientes de la levadura residual, son usados en una amplia cantidad de alimentos, principalmente como saborizantes y potenciadores de sabor. Sus usos incluyen:

1. Productos cárnicos: pasteles de carne, hamburguesas, salchichas (0.5-2%)
2. Curado de carnes (0.5%)
3. Sustitutos de carne: ayudan a enmascarar los sabores indeseables asociados a los cereales.
4. Productos de panificación: enmascaran los sabores asociados a agentes leudantes y la levadura.
5. Salsas y *gravies*: *gravies* con carne y salsas de queso (0-4-2.5%).

6. Sopas instantáneas y caldos Boullions (hasta 10%)
7. Quesos y productos sabor a queso (0.5-1.5%)
8. Condimentos: sazónadores y marinados (>95%)
9. Botanas de papa y galletas (0.2-2%), (Priest y Stewart, 2006).

### 5.3.3. Aplicaciones en la Industria Alimentaria

La levadura residual tiene una demanda química de oxígeno (COD) de 0.53 kg /h, por lo que no puede ser tratada junto con las aguas residuales del proceso de elaboración de cerveza, debido a que esto podría traer como consecuencia la eutrofización (acumulación de nutrientes) de cuerpos de agua (Jaeger, *et al.* 2020). Lo anterior, hace necesaria la proposición y empleo de alternativas que permitan aprovechar este subproducto. A continuación, se muestran algunas aplicaciones de la levadura residual en la Industria Alimentaria:

#### a) Pienso animal

Para la elaboración de piensos animales, se puede utilizar la levadura residual en forma de extractos, hidrolizados, húmeda, seca, o bien, en forma de mezclas de levadura con grano agotado, *trüb*, harinas de cereales y soya. El consumo de los piensos, está orientado a rumiantes, aves, caballos, cerdos y pescados.

Wohlt, *et al.*, reportaron que la implementación de 10 y 20 g de levadura a una dieta a base de maíz en ganado lechero, favoreció la ganancia de peso y la producción de leche.

Por otro lado, Oliveira, *et al.*, sustituyeron la harina de maíz por levadura residual seca en la dieta de ovejas y observaron que esta última, puede reemplazar hasta el 100% de la harina de maíz, sin que ello genere efectos adversos ni problemas en la digestibilidad o en el tiempo de alimentación. Por su parte, Milewski, *et al.*, mencionan que la adición de *Saccharomyces cerevisiae* a la dieta de corderos, incrementa la masa corporal, el crecimiento y el desarrollo de músculo en los animales. Además, la levadura fungió como prebiótico y estimuló al sistema inmune de los animales.

En relación al uso de levadura residual en la elaboración de piensos para animales acuáticos, Nguyen, *et al.*, mencionan que la levadura residual puede reemplazar alrededor del 60% de la dieta empleada del camarón gigante de Malasia (*Macrobrachium rosenbergii*). Por otro lado, Muzinic, *et al.*, reportaron que una dieta elaborada con 85% harina de soya y 5% levadura residual, puede reemplazar el uso de la harina de pescado empleada como alimento para cangrejos de garra roja. Lo anterior, puede ayudar a reducir los gastos involucrados en la alimentación de los cangrejos e incrementar las ganancias de los productores. Por su parte, Estévez, *et al.*, mencionan que la adición de una mezcla de levadura residual al 30% y grano agotado al 15% en la dieta de dorada (*Sparus aurata*), dio mejores resultados en comparación con la harina de pescado, pues favoreció el crecimiento del animal, la digestibilidad de proteínas (85-95%) y la composición final del filete de pescado. Por último, Levic, *et al.*, mencionan que el empleo de una mezcla del grano agotado (85%), la fracción líquida del bagazo (10%) y la levadura residual (5%) como pienso para la alimentación de gallinas, favoreció la producción de huevo y la capacidad reproductiva de las gallinas.

## **b) Elaboración de productos de panificación**

La presencia de altas concentraciones de proteínas con un buen perfil de aminoácidos esenciales, carbohidratos, fibra dietética (especialmente  $\beta$ -glucanos), lípidos, vitaminas B y minerales como el selenio y el cromo, hace de la levadura un producto ideal para la fortificación de productos de panificación. No obstante, su adición a este tipo de alimentos se encuentra condicionada por la presencia de los componentes del lúpulo y la formación de compuestos volátiles y desagradables durante el proceso de manufactura de la cerveza.

Entre las características asociadas a los panes elaborados con levadura residual (BSY) se encuentran: un incremento en el valor nutricional del producto, aparición de compuestos volátiles (deseables e indeseables), mayor coloración de la miga a medida que se aumenta la concentración de BSY y cambios en su elasticidad y volumen. Algunas de las investigaciones realizadas con respecto al tema, se muestran a continuación:

**Tabla 5.17. Productos de panificación elaborados mediante la adición de levadura residual.**

| Producto      | Incorporación   | Conclusiones   | Referencia                     |
|---------------|---|--|--------------------------------|
| Pan casero    | Se adicionaron 10 g de levadura residual seca (DBSY) a 500 g de una mezcla comercial de harina blanca | <p>La adición de BSY incrementó la concentración de <math>\beta</math>-glucanos en el pan (de 65 a 100 mg/ 50 pan)</p> <p>La fortificación con DBSY, dio como resultado un pan con miga más oscura. Además, mejoró la elasticidad de la miga y la costra e incrementó las concentraciones de hexanal (aroma indeseable).</p> <p>Se identificó la presencia de compuestos volátiles con aroma, los cuales fueron: 3-metilbutanal, 3-metil-1-butanol, 2-feniletanol, hexanal y <i>trans</i> 2-nonenal.</p> | Martins, 2015                  |
| Pan de trigo  | Empleo de 2% <i>Saccharomyces cerevisiae</i> residual (Lager y Ale) en la elaboración de pan          | <p>Las levaduras residuales dieron lugar a una masa con mayor fuerza y más producción de gas en comparación con la masa elaborada con levadura para panadería.</p> <p>El pan elaborado con levadura residual presentó volúmenes específicos altos y mayor tiempo de vida de anaquel.</p>   | Heitmann, <i>et al.</i> , 2015 |
| Pastel vegano | Se adicionó <i>Saccharomyces cerevisiae</i> residual seca (DBSY) a la masa de un pastel vegano        | <p>La adición de DBSY aumentó el contenido de proteína (33%), lípidos (60%) y carbohidratos (32%) presentes en el pastel.</p> <p>No obstante, la utilización de levadura residual se encuentra limitada, debido a la presencia de componentes del lúpulo transferidos a la levadura durante la fermentación.</p>   | Coldea, 2017                   |

### c) Productos cárnicos

El uso de aditivos con altas concentraciones de proteínas en la elaboración de productos cárnicos, es una práctica común en la Industria Alimentaria, pues reduce costos de producción y puede, mejorar las características (físicas, sensoriales y nutricionales) del producto. Entre los beneficios asociados al uso de este tipo de residuos, se encuentran la disminución de pérdidas por cocción, la estabilización de emulsiones y el mejoramiento de la textura (fuerza y firmeza) de productos cocidos. Con respecto a la adición de levadura residual (BSY), esta puede ayudar a incrementar el valor nutricional y la textura de los productos cárnicos, debido a la presencia de fibra dietética ( $\beta$ -glucanos) y altas concentraciones de proteínas con valor biológico, **Tabla 5.18**.

**Tabla 5.18. Productos cárnicos elaborados mediante la adición de levadura residual.**

| Producto  | Incorporación  | Conclusiones   | Referencia                      |
|---|--|--|---------------------------------|
| Bolas de carne, hamburguesas y salchicha para <i>hot dogs</i> | La levadura residual se sometió a un proceso previo de extracción de los compuestos amargos (NBSY). Posteriormente, la NBSY (20%) se mezcló con harina de soya y se añadió a la preparación cárnica. | La palatabilidad, textura y sabor de los productos con BSY y harina de soya, fueron comparables con las muestras control. La adición de BSY colaboró en aumentar la concentración de proteínas.  | Gibson y Dwivedi, 1970          |
| Jamón de puerco cocido  | Se mezcló 1% de extracto de BSY con la salmuera, se inyectó al jamón y se distribuyó en la matriz alimentaria por medio de una máquina de volteo de vacío.   | La adición del extracto de BSY incrementó la dureza y la masticabilidad del jamón. Además, se observó un aumento en el contenido de proteínas, minerales y aminoácidos. No se observaron diferencias significativas en las características físicas ni sensoriales del alimento control y el adicionado con BSG durante 12 y 90 días. | Pancrazio, <i>et al.</i> , 2016 |

### c) Uso como aditivo en otros productos alimenticios

La levadura residual es un aditivo GRAS que ha sido empleado en la elaboración y clarificación de bebidas vegetales, alimentos ricos en lípidos y ensaladas. Sin embargo, su uso suele ser limitado debido a la presencia de compuestos amargos provenientes del lúpulo. La separación de los compuestos amargos presentes en la levadura residual, puede realizarse mediante un lavado con disolventes alcalinos u orgánicos de manera previa a su extracción. No obstante, estos métodos suelen ser costosos y requieren de un alto volumen de agua que será desechada como agua residual. Como alternativa, se ha planteado una técnica que combina el uso de disolventes con la homogenización de la levadura residual a condiciones de pH=10 y tratamientos térmicos mayores a 50°C. Este método ha demostrado conservar las propiedades nutricionales de la levadura residual, sin embargo, es necesario realizar más investigaciones al respecto (Nand, 1987; Jaeger, *et al.*, 2020).

En relación a la adición de la levadura residual a distintas matrices alimenticias, se han encontrado las siguientes investigaciones:

**Tabla 5.19. Productos alimenticios elaborados mediante la adición de levadura residual.**

| Producto                                  | Incorporación  | Conclusiones  | Referencia                        |
|---|--|---|-----------------------------------|
| Mayonesa adicionada con $\beta$ -glucanos | La levadura residual fue sometida a un proceso de autólisis, centrifugada y tratada con compuestos alcalinos para extraer a los $\beta$ -glucanos. La grasa de la mayonesa fue sustituida por $\beta$ -glucanos en concentraciones de 25, 50 y 75% | Las mayonesas adicionadas con beta-glucanos tenía mayor cantidad de agua y menos calorías que la mayonesa control.<br>A medida que se incrementó la cantidad de $\beta$ -glucanos en la mayonesa, se observa una reducción en el pH después de 2 meses de almacenamiento.<br>Las mayonesas adicionadas con beta-glucanos presentaron mayor estabilidad durante el almacenamiento.<br>Las mayonesas con no más de 50% de $\beta$ -glucanos añadidos son aceptables para el consumidor. | Worrasinchai <i>et al.</i> , 2005 |

| Producto                                | Incorporación   | Conclusiones  | Referencia                             |
|---|---|---|--|
| Aderezo para ensalada con manoproteínas | <p>La levadura residual fue sometida a un proceso de autólisis, centrifugada y tratada con etanol para extraer las manoproteínas (MP).</p> <p>Se adicionó 0.8 g MP a 100 g de aderezo</p> | <p>El aderezo con manoproteínas provenientes de la levadura residual fue altamente estable. Asimismo, tuvo amplia aceptación entre los consumidores.</p>  | Ferreira de Melo, <i>et al.</i> , 2015 |
| Jugo de zanahoria y betabel             | <p>La levadura residual fue tratada con 4% NaCl para eliminar los compuestos amargos, sometida a autólisis y añadida a los jugos.</p>   | <p>Los jugos de zanahoria con ABSY presentaron un mayor contenido de calcio, fósforo y hierro en comparación con los jugos de betabel con ABSY. El jugo de betabel y zanahoria fermentado y con ABSY fue el que presentó proporciones óptimas de pigmentos, vitaminas y minerales.</p> <p>La levadura residual favoreció el crecimiento de bacterias ácido lácticas en los jugos fermentados.</p> | Rakin, <i>et al.</i> , 2007            |
| Yogurt con $\beta$ -glucanos            | <p>Se añadieron al yogurt, <math>\beta</math>-glucanos provenientes de levadura residual en concentraciones de 0.15%-0.9%</p>   | <p>La adición de <math>\beta</math>-glucanos al 0.3% dio lugar a un yogurt con las mismas características sensoriales y estabilidad que un yogurt natural. Concentraciones de 0.75 y 0.9% de <math>\beta</math>-glucanos, dieron lugar a olores indeseables, sabores amargos y yogures espesos.</p>   | Piotrowska, <i>et al.</i> , 2009       |

| Producto                     | Incorporación  | Conclusiones   | Referencia                       |
|------------------------------|--|--|----------------------------------|
| Yogurt con $\beta$ -glucanos | Se añadieron al yogurt, $\beta$ -glucanos provenientes de levadura residual en concentraciones de 0.15%-0.9% | La adición de $\beta$ -glucanos previno el cremado del yogurt, pues los beta glucanos impiden la acumulación de grasa sobre su superficie. No obstante, estos compuestos también favorecen la acumulación de sedimentos. | Piotrowska, <i>et al.</i> , 2009 |

### 5.3.4 Otras aplicaciones

La levadura residual también puede ser empleada en la remediación de suelos y aguas mediante la biotransformación y precipitación de metales pesados; como sustrato para el cultivo de microorganismos (*Lactobacillus* sp. y *Pediococcus* sp.) y para producir compuestos orgánicos (etanol y ácido láctico), (Ferreira, *et al.*, 2010; Soares y Soares, 2012 y Stănilă y Mihăescu, 2015).

## 6. CONCLUSIONES

- El grano agotado, el *trüb* y la levadura residual, son subproductos generados en la Industria Cervecera y representan un gran potencial como se describió al poderse emplear en formulación de alimentos, suplementos y aditivos alimentarios enfocados a la fortificación de productos para consumo humano.
- Debido a que contienen moléculas consideradas como bioactivas, son aplicables para la elaboración de alimentos funcionales, generando productos novedosos con cualidades sensorialmente atractivas que podrían enaltecer las características de las matrices alimentarias.
- Por su versatilidad, dichos materiales ya se utilizan en la preparación de piensos animales, debido a que poseen altas concentraciones de fibra dietética y proteínas y cuentan con cantidades significativas de polifenoles, lípidos, minerales y vitaminas.
- Considerando sus aplicaciones en la Industria Alimentaria, la facilidad de su extracción y tratamiento, así como los posibles beneficios que asume su consumo, el subproducto más factible para su aprovechamiento en la Industria Alimentaria es el *Trüb*, seguido por la levadura residual y finalmente, por el grano agotado.
- El aprovechamiento de los subproductos cerveceros además de maximizar los rendimientos económicos relacionados con el proceso productivo, favorece la obtención de productos con valor agregado. Dichas acciones contribuyen a lo que se conoce como economía circular, donde se cuida y se preserva el medio ambiente al hacer uso de materiales contaminantes.
- Es necesario realizar más investigaciones con respecto a la extracción de los compuestos presentes en los subproductos obtenidos a partir de la

elaboración de la cerveza, así como su integración a diferentes productos alimenticios.

## 7. GLOSARIO DE TÉRMINOS

- **Aditivo GRAS:** término empleado por la FDA para referirse a aquellas sustancias que son usadas como aditivos alimentarios y que se consideran seguras para consumo cuando son utilizadas conforme las buenas prácticas de manufactura.
- **Actividad de agua (*water activity-A<sub>w</sub>*):** refiere a la cantidad de agua disponible en un alimento que puede ser empleada por los microorganismos para su crecimiento y/o para llevar a cabo reacciones químicas y bioquímicas. Se expresa en el rango de 0 a 1 y en términos termodinámicos, es la relación entre la presión parcial de vapor de agua en el alimento entre la presión parcial del agua destilada a las mismas condiciones de temperatura:

$$A_w = \frac{P_{\text{vapor en el alimento}}}{P_{\text{agua pura}}}$$

- **Adjunto (*adjunct*):** cualquier fuente de carbohidratos distinta a la malta que contribuye en el aporte de azúcares fermentables presente en el mosto. También se define como cualquier ingrediente usado en la elaboración de la cerveza diferente al agua, la malta, la levadura o el lúpulo.
- **Amargor (*Bitterness*):** sabor amargo y astringente proveniente de los  $\alpha$ -iso-ácidos del lúpulo. Véase *nivel de amargor*.
- **Azúcar reductor (*reducing sugar*):** son aquellos carbohidratos (monosacáridos o disacáridos) que pueden donar electrones a otras moléculas y, por tanto, actuar como agentes reductores. La presencia de un grupo cetona (C=O) o un grupo aldehído (-CHO) en el carbohidrato, permiten su actividad como agente reductor. Los azúcares reductores pueden ser detectados mediante la prueba de Benedict.
- **Cereal cooker:** recipiente empleado para la cocción de adjuntos sólidos como el arroz y las sémolas de maíz, los cuales requieren temperaturas superiores a las de la maceración. Los adjuntos sólidos aportan almidón

gelatinizado que puede ser empleado por la levadura durante la fermentación.

- **Cerveza verde (*green beer*):** nombre que se le da a la cerveza antes de ser sometida a la etapa de maduración.
- **Compuesto aromático (*aromatic compound*):** compuesto orgánico que posee un anillo de benceno en su estructura.
- **Compuesto heterocíclico (*heterocyclic compound*):** compuesto cíclico en el que uno o más de los átomos del anillo son elementos distintos al carbono. Pueden ser aromáticos o no aromáticos.
- **Demanda química de oxígeno (*chemical oxygen demand, COD*):** parámetro que mide la cantidad de oxígeno requerido por una porción de materia orgánica disuelta en una suspensión y susceptible a ser oxidada por medios químicos. Se emplea para medir el grado de contaminación y se expresa en miligramos de oxígeno diatómico por litro (mg O<sub>2</sub>/L).  
Entre mayor sea el valor de COD, más serio será el problema de contaminación del agua.
- **Economía circular (*circular economy*):** sistema económico que se basa en modelos de negocio que reemplazan el concepto de “fin de vida útil” por reducir, reutilizar, reciclar y recuperar materiales en los procesos de producción, distribución y consumo, con el objetivo de lograr un desarrollo sustentable, lo que implica crear calidad ambiental, prosperidad económica y equidad social al beneficio de las generaciones actuales y futuras.
- **Enzima (*enzyme*):** polímero de aminoácidos que cataliza una reacción química específica.
- **Enzima diastásica (*diastatic enzyme*):** enzimas encargadas de catalizar la hidrólisis del almidón y dar lugar a azúcares fermentables y no fermentables.
- **Escala de color EBC:** escala de medición del color desarrollada por el Institute of Brewing y la Convención Europea de Cerveza (European Brewing Convention). Es empleada en la clasificación de los colores de cervezas, maltas, disoluciones de caramelo y similares. El método EBC implica medir el color de una muestra de cerveza mediante el uso de un espectrofotómetro

a una longitud de onda de 430 nm. La ecuación empleada para la obtención de los valores EBC es:

$$\text{Color EBC} = A_{430}(\text{celda } 10 \text{ mm}) \times 25$$

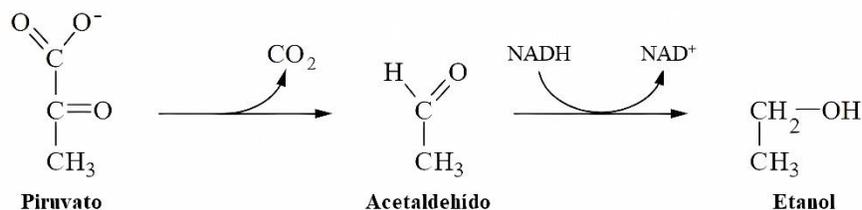
El valor de color se expresa en °EBC.

- **Escala de color ASBC (American Society of Brewing Chemists):** escala estadounidense desarrollada para medir el color de la cerveza. El método de referencia estandarizado (Standard Reference Method) mide el color de las muestras mediante el uso de un espectrofotómetro a una longitud de onda de 430 nm. La ecuación empleada es la siguiente:

$$\text{Color SRM} = A_{430}(\text{celda } 10 \text{ mm}) \times 10 \times 1.27$$

El valor se expresa en °SRM y se usa como símil de la escala Lovibond®.

- **Escala de Lovibond®:** escala de medición del color de líquidos coloreados. Fue desarrollada en 1893 y se basa en 84 estándares de cristal calibrados. Estos cristales, poseen distintas densidades de magenta (rojo), amarillo, azul y neutro y se encuentran graduados desde insaturado hasta totalmente saturado. Para definir el color de la muestra, esta se compara con una combinación de los tres colores primarios y filtros neutros. El color de la muestra se expresa en grados Lovibond®.
- **Eutrofización (*eutrophication*):** fenómeno que se caracteriza por generar turbidez en los cuerpos de agua, condiciones anóxicas y la muerte y descomposición de la flora y fauna acuática.
- **Fermentación alcohólica (*alcoholic fermentation*):** forma de respiración anaerobia en la que el piruvato (producto final de la glucólisis) se convierte en etanol y dióxido de carbono:



- **Filtro *Lauter tun*:** recipiente de paredes rectas, tuberías metálicas, cuchillos sostenidos por brazos anclados a un eje en el centro del recipiente y un fondo

redondeado con ranuras en forma de cuña. Este aparato, tienen la función de facilitar la separación del mosto y el grano agotado.

- **Floculación (*flocculation*):** refiere a la habilidad de la levadura para agruparse y formar agregados que dan lugar a flóculos suspendidos en la superficie del tanque de fermentación o sedimentos en el fondo del fermentador.
- **Grado alcohólico (*Alcohol content or ABV*):** es la relación que tiene el volumen de alcohol etílico presente en la bebida entre el volumen total de la misma expresada en porcentaje (%v/v). El Instituto de cervecería y la Sociedad estadounidense de químicos cerveceros (ASBC por sus siglas en inglés), proveen varios métodos enfocados en la medición del contenido de alcohol en la cerveza, no obstante, el método más popular es el método de destilación. Este método consiste en destilar 100 mL de una muestra de cerveza filtrada y medir la gravedad específica del destilado mediante un picnómetro.
- **Grano agotado o bagazo (*brewers spent grains or BSGs*):** subproducto sólido generado durante la maceración y separado del mosto dulce antes de la etapa de cocción por medio del filtro *Lauter tun*. Se conforma por la cascarilla, partes de la aleurona y el pericarpio y remanentes del endospermo del grano de cebada.
- **Inoculación de levadura (*pitching*):** refiere a la acción de introducir un cultivo de levadura activa al mosto. La adición de levadura al fermentador, es un paso crucial para iniciar fermentación e indispensable para generar aromas y sabores durante la maduración de la cerveza.
- **Isomerización (*isomerization*):** proceso químico mediante el cual una molécula es transformada en otra con la misma fórmula molecular, pero con diferente estructura o arreglo de átomos en el espacio.
- **Isómero (*isomer*):** los isómeros son compuestos que tienen la misma fórmula molecular, pero poseen diferentes estructuras o arreglos de átomos. Pueden ser isómeros de constitución o estereoisómeros.

Los isómeros constitucionales o estructurales, difieren en el orden en que están unidos sus átomos (p. ej. varía la posición de sus grupos funcionales). Mientras que, los estereoisómeros, difieren en el arreglo de sus grupos en el espacio (p. ej. *cis-* o *trans-*).

- **Krausen:** término alemán empleado para referirse a la espuma que se forma sobre el mosto lupulado durante la primera fermentación. Suele adicionarse durante la maduración, con la intención de proporcionar una fuente de levaduras y azúcares fermentables para la segunda fermentación.
- **Levadura residual (*residual yeast, surplus or brewing spent yeast (BSY)*):** refiere a las células de levadura que han sido recolectadas al final de la fermentación y que, debido a su baja o nula actividad, no pueden ser reinoculadas al fermentador.
- **Lúpulo (*hops*):** flor femenina de la planta *Humulus Lupulus* y añadida a la cerveza para impartir amargor y un perfil de sabor/aroma característico.
- **Macerador (*Mash mixer*):** recipiente con paletas rotativas en el fondo. Permite mezclar la malta con agua a condiciones de temperatura controladas y con ello, dar lugar a la formación del mosto.
- **Malta base:** maltas usualmente claras que han sido sometidas a una etapa de malteo y secado previo a su uso. Poseen alto poder diastásico y su función principal es aportar las enzimas necesarias para la modificación del almidón y otros componentes presentes en la cerveza.
- **Mosto (*wort*):** extracto acuoso obtenido a partir del malteo de la cebada.
- **Mosto dulce (*sweet wort*):** refiere al mosto que sale del macerador y que no ha sido sometido a cocción.
- **Mosto lupulado (*hopped o bitter wort*):** término empleado para referirse al mosto que ha sido sometido a cocción con o sin adicionado de lúpulo durante su estadía en el tanque de ebullición.
- **Nitrógeno amínico libre (*Free Amino Nitrogen o FAN*):** refiere al grupo de compuestos nitrogenados disponibles para la nutrición y multiplicación de la levadura. Es la suma de los aminoácidos, iones amonio y pequeños péptidos

(dipéptidos y tripéptidos) presentes en el mosto. Bajos contenidos de FAN dan lugar a procesos de fermentación insuficientes o de inicio lento.

- **Nivel de amargor, medido en unidades IBU (*International Bitterness Unit-IBU*):** es una medida cuantitativa de la cantidad de iso- $\alpha$ -ácidos presentes en la cerveza o el mosto. Se mide en Unidades Internacionales de Amargor (IBU por sus siglas en inglés) y para obtenerlo, una muestra de cerveza acidificada y desgasificada se somete a una extracción con solventes orgánicos, para posteriormente medir la cantidad iso- $\alpha$ -ácidos presentes en la cerveza en un espectrofotómetro a una longitud de onda de 275 nm. La ecuación empleada se muestra a continuación:

$$IBU = A_{275} \times 50$$

- **Prebiótico (*prebiotic*):** los prebióticos son componentes de la dieta (principalmente carbohidratos no digeribles) que, al ser fermentados, puede dar lugar a cambios específicos en la composición y/o actividad de un número limitado de microorganismos presentes en el tracto intestinal, confiriendo así beneficios al huésped.
- **Primera fermentación (*first fermentation*):** periodo en que la levadura emplea los azúcares fermentables del mosto para dar lugar a la formación de etanol y CO<sub>2</sub>.
- **Poder diastásico (*diastatic power*):** medida de la capacidad de la malta para convertir el almidón en azúcares fermentables durante el macerado. Puede medirse en grados Lintner (usada en EUA) o mediante el índice de Windisch y Kolbasch (también llamado índice W-K y usado por la Convención Europea de Cerveza). La relación entre ambas unidades es:

$$Lintner = \frac{\text{índice WK} + 16}{3.5}$$

- **Segunda fermentación (*second fermentation*):** proceso de maduración subsecuente a la primera fermentación y que requiere de la actividad de la levadura.
- **Sustentabilidad, sostenibilidad o desarrollo sustentable (*sustainability*):** es aquello que satisface las necesidades de la generación

actual sin comprometer la capacidad de las futuras generaciones para satisfacer sus propias necesidades.

- **Unidades de pasteurización (*pasteurization units-PU*s):** las unidades de pasteurización (PU en inglés) son una medida del tratamiento térmico aplicado a la cerveza durante la etapa de pasteurización. Una unidad de pasteurización refiere al efecto que tiene calentar el producto durante 60°C/ 1 min. sobre su carga microbiana.
- **Tanque Whirlpool:** *Whirlpool* es un vocablo inglés que significa “remolino o torbellino”. Los tanques *Whirlpool* son recipientes cilíndricos con una apertura de 0.5 a 1 m., por medio de la cual se hace pasar de manera tangencial el mosto lupulado. Posteriormente, el mosto es separado del *trüb* por medio del flujo rotacional del mosto.
- ***Trüb*:** vocablo alemán que significa “brumoso o nublado”. Refiere al precipitado pegajoso que se forma en el tanque de ebullición durante la cocción del mosto y que es separado del mosto por medio del uso de un tanque *Whirlpool*. Este compuesto predominantemente por residuos de lúpulo y proteínas.

## 8. REFERENCIAS

- ACERMEX, 2018. "Reporte de la Industria Cervecera Independiente Mexicana". <https://bit.ly/3KURlpl>
- Ainsworth, P., İbanoğlu, Ş., Plunkett, A., İbanoğlu, E., y Stojceska, V., 2007. "Effect of brewers spent grain addition and screw speed on the selected physical and nutritional properties of an extruded snack". *Journal of Food Engineering*, 81(4), 702–709. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2007.01.004>
- Aguirre M. y Montes S., 2019. "Empleo de un residuo de la Industria Cervecera en el desarrollo de recipientes biodegradables implementando recubrimientos para mejorar la impermeabilidad". Tesis de Licenciatura Mancomunada. Universidad Nacional Autónoma de México. Facultad de Química.
- Amoriello T. y Ciccoritti R., 2021. "Sustainability: Recovery and Reuse of Brewing-Derived By-Products". *Sustainability*, 2021,13(4), 2355, <https://doi.org/10.3390/su13042355>
- Amoriello T., Mellara, F., Galli, V., Amoriello M. y Ciccoritti, R., 2020. "Technological Properties and Consumer Acceptability of Bakery Products Enriched with Brewers' Spent Grains". *Foods*, 9, 1492. <https://doi.org/10.3390/foods9101492>
- Anderson H., Santos I., Hildenbrand Z., Schug K., 2019. "A review of the analytical methods used for beer ingredient a finished product analysis and quality control". *Analytica Chimica Acta* 1085, 1-20. <https://doi.org/10.1016/j.aca.2019.07.061>
- Baiano A., 2020. "Craft beer: An overview". *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, Wiley, 1829-1856. <https://doi.org/10.1111/1541-4337.12693>

- Bamforth C., 2016. “*Brewing Materials and Processes. A Practical Approach to Beer Excellence*”. London: Academic Press, 27-47 y 50-52. ISBN: 978-0-12-799954-8
- Bamforth C. y Cook D., 2019. “*Food Fermentation and Micro-organisms*”. Segunda edición. London: Wiley-Blackwell 43-91. ISBN: 978-1-405-19872-1
- Baquero M., 2017. “Residuos Alimentarios: análisis y propuesta de metodología de cuantificación”. Tesis de Maestría. Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales y de Telecomunicación. Universidad de Cantabria.
- Baso R., Alcarde A. y Portugal C., 2016. “Could non-Saccharomyces yeast contribute on innovative brewing fermentations?”. Elsevier. *Food Research International*, 86, 112-120. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2016.06.002>
- Bastos B., Oliveira P., Gaspar V., Mano J., Coimbra M., Coelho E., 2022. “Brewer's yeast polysaccharides. A review of their exquisite structural features and biomedical applications”. *Carbohydrate Polymers*, 277. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2021.118826>
- Bianco A., Budroni M., Zara S., Mannazzu I., Fancello F. y Zara G., 2020. “The role of microorganisms on biotransformation of brewers' spent grain”. *Applied Microbiology Biotechnology*, 104, 8661–8678. <https://doi.org/10.1007/s00253-020-10843-1>
- Bjerregaard M., Charalampidis A., Frøding R., Shetty R., Pastell H., Jacobsen C., Zhuang S., Pinelo M., Hansen P. y Høbley T., 2019. “Processing of brewing by-products to give food ingredient streams”. *European Food Research and Technology*, 245, 545–558. <https://doi.org/10.1007/s00217-018-03224-6>
- Blagović, B., Rupčić J., Mesarić M., Georgiú K. y Marić V., 2001. “Lipid Composition of Brewer's Yeast”. *Food Technology and Biotechnology*, 39, 175 a 181.

- Blahuskova V. y Jancar J., 2019. "Study connective capabilities of solid residues from the waste incineration". *Journal of Environmental Management*, 231, 1048-1055. <https://10.1016/j.jenvman.2018.10.112>
- Blanco C., Caballero I., Barrios R. y Rojas A., 2014. "Innovations in the brewing industry: light beer". *International Journal of Food sciences and Nutrition*, Vol. 65(5), 655-660. <https://doi.org/10.3109/09637486.2014.893285>
- Bragança T., Bierhalz G., Correia M.y Estevez M., 2022. "Chapter 33. Food waste and by-product valorization as an integrated approach with zero waste. Future challenges". En Bhat R., 2022. *Future Foods. Global Trends, Opportunities, and Sustainability Challenges*. Academic Press. ISBN: 978-0-323-91001-9.
- Benner M., 2017. "Be a part of the biggest thing to happen in the beer world in a lifetime". *SIBA Journal- The Society of Independent Brewer's Magazine* 106,7. <https://bit.ly/3MuK9s7>
- Bernáldez A., 2013. "Cerveza artesanal en México". Universidad Autónoma del Estado de México. *Revista Culinaria*, 6, 56-63. <https://bit.ly/3LeKez7>
- Brewers Association, 2022. "Brewers Association Releases Annual Craft Brewing Industry Production Report and Top 50 Producing Craft Brewing Companies for 2021". <https://bit.ly/3rHpOEA>
- Brewers Association, 2022. "Craft brewer definition". <https://bit.ly/40PCclJ>
- Brewers Association, 2022. "Support Independent Beer". <https://www.brewersassociation.org/independent-craft-brewer-seal/>
- Brewers Association, 2022. "Year in Beer 2022". <https://www.brewersassociation.org/year-in-beer/>
- Bolaños A. y Suarez C., 2019. "Evaluación de los efectos del polvo de trüb en la vitalidad y viabilidad de *Saccharomyces cerevisiae* CEN.PK para la producción de cerveza". Universidad de los Andes, <https://bit.ly/42sy4ZE>

- Boulton C., 2006. "Chapter 4 : Fermentation". En Boulton C. y Quain D., 2006. *Brewing Yeast and Fermentation*. Wiley-Blackwell, 111-152. <https://doi.org/10.1002/9780470976524>
- Buglass A., 2010. "Chapter 2.6 Beer". En Buglass A., 2010. *Handbook of Alcoholic Beverages: Technical, Analytical and Nutritional Aspects I and II*. Chichester: John Wiley and Sons, 132-210. <https://doi.org/10.1002/9780470976524>
- Buiatti S., 2008. "Chapter 20. Beer Composition: An Overview". En Preedy V. *Beer in Health and Disease Prevention*, 213-225. Academic Press. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-373891-2.X0001-6>
- Caballero I., Blanco A. y Porras M., 2012. "Iso- $\alpha$ -acids, bitterness and loss of beer quality during storage". *Trends in Food Science & Technology*, 26, 21-30. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2012.01.001>
- Cabras I. y Higgins D., 2016. "Beer, brewing and business history". *Routledge Taylor & Francis Group*, 58, 5, 609-624. <http://dx.doi.org/10.1080/00076791.2015.1122713>
- Capece A., Romaniello R., 2018. "Conventional and Non-conventional Yeast in Beer Production". *Fermentation*, 4, 38. <https://doi.org/10.3390/fermentation4020038>
- Cappa C. y Alamprese C., 2017. "Brewer's spent grain valorization in fiber-enriched fresh egg pasta production: Modelling and optimization study". *Lebensmittel-Wissenschaft Und Technologie [Food Science and Technology]*, 82, 464–470. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2017.04.068>
- Capossio J., Fabani M., Reyes. Urrutia A., Torres-Sciancalepore R., Deng Y., Bayens J., Rodríguez R. y Mazza G., 2022. "Sustainable Solar Drying of Brewer's Spent Grains: A Comparison with Conventional Electric Convective Drying". *Processes*, 10, 339, 1-18. <https://doi.org/10.3390/pr10020339>

- Carley S. y Yahng L., 2018. "Willingness to pay for sustainable beer". *PLoS ONE* 13(10): e0204917. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0204917>
- Cervecistas, 2018. "Historia de la cerveza". <https://bit.ly/3y4JRQv>
- Cerveza Minerva, 2022. "Cultura cervecera". <https://www.cervezaminerva.mx/cultura-cervecera>
- Cerveza Minerva, 2022. "Nuestro origen". <https://www.cervezaminerva.mx/nuestro-origen>
- Chandan R., Gandhi A. y Shah N., 2017. "Chapter 1. Yogurt: Historical Background, Health Benefits, and Global Trade". En Shah N., 2017. *Yogurt in Health and Disease Prevention*. Academic Press, 3-29. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-805134-4.00001-8>.
- Choi M., Choi Y., Kim H., Hwang, K., Song, D., Lee, S. y Kim, C., 2014. "Effects of replacing pork back fat with brewer's spent grain dietary fiber on quality characteristics of reduced-fat chicken sausages". *Korean Journal for Food Science of Animal Resources*, 34(2), 158–165. <https://doi.org/10.5851/kosfa.2014.34.2.158>
- Chrysochou P., 2014. "Drink to get drunk or stay healthy? Exploring consumers' perceptions motives and preferences for light beer". *Food Quality and Preference*, Vol. 31, 156-163. <https://doi.org/10.1016/j.foodqual.2013.08.006>
- CODEX ALIMENTARIUS, 2010. "Directrices del Codex sobre etiquetado nutricional". *CAC/GL 2-1985*, Rev. 1 – 1993. <https://bit.ly/44UIW4f>
- Coldea T., Mudura E., Rotar A., Cuibus L., Pop C. y Darab C., 2017. "Brewer's spent yeast exploitation in Food Industry". *Hops and Medicinal Plants*, 25,1 a 2, 94-99. <https://bit.ly/3O25hXD>
- Colpo I., Rasquin D., Soares de Lima M., Santos M. y Sellitto M., 2022. "Economic and Financial Feasibility of a Biorefinery for Conversion of Brewers' Spent

Grain into Special Flour”. *Journal of Open Innovation: Technology, Market, and Complexity*. 8, 79. <https://doi.org/10.3390/joitmc8020079>

Cruz C., De Aguiar P. y Sérvulo E., 2006. “Production of *Bacillus sphaericus* entomopathogenic biomass using brewery residues”. *Applied Biochemistry and Biotechnology*, 131(1–3), 659–667. Recuperado el 17/04/2023, <https://doi.org/10.1385/ABAB:131:1:659>

Cruz D., 2020. “Iniciativa que reforma y adiciona diversas disposiciones de la ley del impuesto especial sobre producción y servicios, a efecto de crear una cuota fija para la cerveza artesanal, a cargo de la senadora Gina Andrea Cruz Blackledge del grupo parlamentario de acción nacional”. <https://bit.ly/42Klsvk>

Del Río J., Prinsen P. y Gutiérrez A., 2013. “Chemical composition of lipids in brewer's spent grain: A promising source of valuable phytochemicals”. *Journal of Cereal Science*, 58, Issue 2, 248-254. <https://doi.org/10.1016/j.jcs.2013.07.001>.

Deloitte, 2017. “La Cerveza Artesanal. Una experiencia multisensorial”. <https://bit.ly/3qPzOhN>

Dos Santos T., Moretzsohn P. y Camporese E., “Solid wastes in brewing process: a review”. *Journals of Brewing and Distilling*, 5 (1), 1-9. <https://bit.ly/44ZGfy8>

Dwivedi B., Gibson D. y Bell J., 1972. “Nutritive Value of Meat Substitute Prepared from Brewers' Yeast and Isolated Soy Protein”. *Canadian Institute of Food Science and Technology Journal*, 5, Issue 3, 155-158. [https://doi.org/10.1016/S0315-5463\(72\)74112-7](https://doi.org/10.1016/S0315-5463(72)74112-7)

EL ECONOMISTA, 2017. “Cervezas artesanal potencia al mercado”. <https://bit.ly/42MpnbO>

ELFENEMEX, 2022. “Cervezas artesanales mexicanas 2022”. <https://bit.ly/3AefTdQ>

El-Shafey E., Gameiro M., Correia P. y Carvalho J., 2004. "Dewatering of Brewer's Spent Grain Using a Membrane Filter Press: A Pilot Plant Study". *Separation Science and Technology*, 39:14, 3237-3261, <https://doi.org/10.1081/SS-200028775>

EPA. "Clear Water Act Analytical Methods". <https://bit.ly/3CwWXlq>

Estévez A., Padrell L., Iñarra B., Orive M. y San Martín D., 2021. "Brewery by-products (yeast and spent grain) as protein sources in gilthead seabream (*Sparus aurata*) feeds". *Aquaculture*, 543, 736921. <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2021.736921>

Expansión, 2019. "La producción de cerveza artesanal creció 70% en México". <http://bit.ly/3Ncihb8>

Expansión, 2021. "Los cerveceros artesanales insisten en el "piso parejo" y el cambio en impuestos". <https://bit.ly/43JvWgU>

Faccenda A., Zambom M., Castagnara D., De Avila A., Fernandes T., Eckstein, E., Anschau F. y Schneider C., 2017. "Use of dried brewers' grains instead of soybean meal to feed lactating cows". *Revista Brasileira de Zootecnia*, 46(1), 39 a 46. <https://doi.org/10.1590/s1806-92902017000100007>

Fărcaș A., Socaci S., Chis M., Pop O., Forgarasi M., Păucean A., Igual M. y Michiu D., 2021. "Reintegration of Brewers Spent Grains in the Food Chain: Nutritional, Functional and Sensorial Aspects". *Plants* 10, 2504. <https://doi.org/10.3390/plants10112504>

Fărcaș A., Socaci S., Mudura E., Dulf F., Vodnar D., Tofană M. y Salanță L., 2017. "Exploitation of Brewing Industry Wastes to Produce Functional Ingredients". *InTech*. <https://doi.org/10.5772/intechopen.69231>

Fărcaș A., Socaci S., Tofană, M., Mureșan, C., Mudura, E., Salanță, L., & Scrob, S., 2014-**B**. "Nutritional properties and volatile profile of brewer's spent grain

supplemented bread”. *Romanian Biotechnological Letters*, 19(5), 9705-9714.  
<http://www.rombio.eu/vol19nr5/8.pdf>

Fărcaș A., Tofană M., Socaci S., Mudura E., Scrob S., Salanță L. y Muresan V., 2014-A. “Brewers’ spent grain. A new potential ingredient for functional foods”. *Journal of Agroalimentary Processes and Technologies*, 20(2), 137-141. <http://journal-of-agroalimentary.ro>

Ferreira de Melo A., Leite de Souza E., Barbosa da Silva V. y Magnani M., 2015. “Stability, nutritional and sensory characterization of French salad dressing made with mannoprotein from spent brewer’s yeast”. *Food Science and Technology* 62, 771-774. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2014.06.050>

Ferrera O., Pinho O., Vieira E. y Tavarela J., 2010. “Brewer’s *Saccharomyces* yeast biomass: characteristics and potential applications”. *Trends in Food Science & Technology*, 21, 77-84. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2009.10.008>

Finnie C. y Svensson B., 2014. “Chapter 6 - Barley Grain Proteins”. En Shewry P. y Ullrich S., 2014. *Barley*. Segunda edición. American Associate of Cereal Chemists International, AACC International Press, 123-168. <https://doi.org/10.1016/B978-1-891127-79-3.50006-8>

Garavaglia C. y Swinnen J., 2017. “Economics of the Craft Beer Revolution: A Comparative International Perspective”. En Garavaglia C. y Swinnen J., 2017. *Economics Perspectives of Craft Beer*. Palgrave Macmillan, Cham. ISBN: 978-3-319-58234-4.

García M., 2022. “Eutrofización: una visión general”. Universidad Autónoma de Coahuila: *CienciAcierta*, 47. <https://bit.ly/3GwvOHR>

Gibson D. y Dwivedi B., 1970. “Production of Meat Substitutes from Spent Brewers’ Yeast and Soy Protein”. *Canadian Institute of Food Technology Journal*, 3, Issue 3, 113 a 115. [https://doi.org/10.1016/S0008-3860\(70\)74291-8](https://doi.org/10.1016/S0008-3860(70)74291-8)

- Girisa S., Saikia Q., Bordoloi D., Banik K., Monisha J., Daimary U., Verma E., Ahn K. y Kunnumakkara A., 2021. "Xanthohumol from Hop: Hope for cancer prevention and treatment". *IUBMB Life*. 73: 1016– 1044. <https://doi.org/10.1002/iub.2522>
- Gomes de Campos K., Nascimento de Farias A., Becker G., Silva de Britto G., Soares W., Nascimento E., Scabora M., Rodrigues E., Picanço N. y Gomes de Faria, 2021. "Quality measurements of cuiabana-type pork sausages added with brewing by-product flours". *Meat Science*, 179(108441). <https://doi.org/10.1016/j.meatsci.2021.108441>
- Gómez R., Campos D., Aguilar C. y Madureira A., 2021. "Valorization of food agro-industrial by-products: From the past to the present and perspectives". *Journal of Environmental Management*, 299, 1-10. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.113571>
- Guillén I., Rendón A. y Morales A., 2016. "Un acercamiento a la competitividad del sector de cerveza artesanal mexicana". <https://bit.ly/3Czx8Hz>
- Heitmann M., Zannini E. y Arendt E., 2015. "Impact of different beer yeasts on wheat dough and bread quality parameters". *Journal of Cereal Science*, 63, 49-56. Recuperado el 03/05/2023, de, <https://doi.org/10.1016/j.jcs.2015.02.008>
- He Y., Allen J. y Huang H., 2023." Food By-Products Valorization Technologies: Brewer's Spent Grain". Reference Module in Food Sciences.
- Hernández P., 2022. "Elaboración de un producto de panificación a base de harinas de leguminosas y cereales complementado con trüb". Tesis de Licenciatura. Universidad Nacional Autónoma de México. Facultad de Química.
- Hoalst-Pullen N., Patterson M., Mattord R. y Vest M, 2014. "Sustainability Trends in the Regional Craft Beer Industry". *The Geography of Beer*. Springer Science+Business media Dordrecht, 109-116, [https://doi.org/10.1007/978-94-007-7787-3\\_11](https://doi.org/10.1007/978-94-007-7787-3_11)

- Hornsey I., 2003. "A history of beer and brewing". Cambridge: The Royal Society of Chemistry, 1-361. ISBN: 0854046305
- Huszcza, E. y Bartmańska, A., 2008. "The implication of yeast in debittering of spent hops". *Enzyme and Microbial Technology*, 42(5), 421–425  
<https://doi.org/10.1016/j.enzmictec.2008.01.004>
- Huszcza E., Bartmańska A., Anioł M., Mączka W., Żołnierczyk A., Wawrzeńczyk C., 2008. "Degradation of hop bitter acids by fungi". *Waste Management*, 28, Issue 8,1406-1410. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2007.06.014>
- INEGI, 2020. "Colección de estudios sectoriales y regionales. Conociendo la Industria de la cerveza". México: Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI).
- Izydorczyk M., 2009. "Chapter 23. Arabinoxylans". En Phillips G. y Williams P., 2009. *Handbook of Hydrocolloids*. Segunda edición. Woodhead Publishing Series in Food Science, Technology and Nutrition, 653-692.  
<https://doi.org/10.1533/9781845695873.653>
- Izydorczyk M., 2014. "Chapter 5. Barley Arabinoxylans: Molecular, Physicochemical, and Functional Properties". *Barley*. Segunda edición. American Associate of Cereal Chemists International, AACC International Press, 123-168. <https://doi.org/10.1016/B978-1-891127-79-3.50006-8>
- Jaeger, A., Arendt, E., Zannini, E., y Sahin, A., 2020. "Brewer's spent yeast (BSY), an underutilized brewing by-product". *Fermentation*, 6(4), 123. Recuperado el 02/05/2023, de <https://doi.org/10.3390/fermentation6040123>
- Karabin M., Hudcova T., Jelinek L. y Dostalek P., 2015. "Biotransformations and biological activities of hop flavonoids". *Biotechnology Advances*, 33, Issue 6, Part 2, 1063-1090. <https://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2015.02.009>.

- Karlović A., Jurić A., Ćorić N., Habschied K., Krstanović V. y Mastanjević K., 2020. “By-Products in the Malting and Brewing Industries-Re-Usage Possibilities”. *Fermentation*, 6, 82. <https://doi.org/10.3390/fermentation6030082>
- Kaur V. y Saxena P., 2004. “Incorporation of brewery waste in supplementary feed and its impact on growth in some carps”. *Bioresource Technology*, 91, Issue 1, 101-104. [https://doi.org/10.1016/S0960-8524\(03\)00073-7](https://doi.org/10.1016/S0960-8524(03)00073-7)
- Kim H., Hwang K., Song D., Lee S., Choi M., Lim Y., Choi J., Choi Y., Kim H. y Kim C., 2013. “Effects of dietary fiber extracts from brewer’s spent grain on quality characteristics of chicken patties cooked in convective oven”. *Korean Journal for Food Science of Animal Resources*, 33(1), 45–52. <https://doi.org/10.5851/kosfa.2013.33.1.45>
- Kirin Holdings, 2022. “Global beer consumption by Country in 2021”. <https://bit.ly/3AepMIIm>
- Kirin Holdings, 2022. “Global beer consumption by Country in 2020”. <https://bit.ly/3e0xkGZ>
- Knez M., Španinger E., Jože I., Knez Ž. y Bren U., 2019. “Hops Compounds: Extraction Techniques, Chemical Analyses, Antioxidative, Antimicrobial, and Anticarcinogenic Effects”. *Nutrients*, enero 24; 11 (2): 257. <https://doi.org/10.3390/nu11020257>
- Ktenioudaki, A., Crofton, E., Scannell, A. G. M., Hannon, J. A., Kilcawley, K. N., y Gallagher, E., 2013. “Sensory properties and aromatic composition of baked snacks containing brewer’s spent grain”. *Journal of Cereal Science*, 57(3), 384 a 390. <https://doi.org/10.1016/j.jcs.2013.01.009>
- Larrouyet C., 2015.” Desarrollo sustentable: origen y evolución y su implementación para el cuidado del ambiente”. Universidad Nacional de Quilmes. <https://bit.ly/2LcWKwI>

- Lazaridou A. y Biliaderis C., 2007. "Molecular aspects of cereal  $\beta$ -glucan functionality: Physical properties, technological applications and physiological effects". *Journal of Cereal Science*, 46, Issue 2, 101-118. <https://doi.org/10.1016/j.jcs.2007.05.003>
- Lederman N., 2017. "Las leyes de pureza que mantienen la cerveza de Baviera sin cambios desde hace medio milenio". <https://bbc.in/2RaAyHJ>
- Levic J., Djuragic O., Sredanovic S., 2010. "Use of new fee from brewery by-products for breeding layers". *Romanian Biotechnological Letters*, 15 (5), 5559 a 5565. <https://bit.ly/3MqlcN8>
- Lewis M. y Young T., 2001. "Brewing". Segunda Edición. New York: Springer Science + Business Media, LLC, 3, 8-10, 57-70 y 155, <https://doi.org/10.1007/978-1-4615-0729-1>
- Linforth R., Westwood K., Somani A., Doherty N., y Cook D., 2015. "Hop proanthocyanidins for the fining of beer: Hop proanthocyanidins for the fining of beer". *Journal of the Institute of Brewing. Institute of Brewing (Great Britain)*, 121(4), 490–495. <https://doi.org/10.1002/jib.250>
- Liu S., 2015. "Impact of yeast and bacteria on beer appearance and flavour". En Hill A., 2015. *Brewing Microbiology: Managing Microbes, Ensuring Quality and Valorising Waste*. Woodhead Publishing, 357-374. <https://doi.org/10.1016/B978-1-78242-331-7.00017-4>
- López F., 2016. "Estudio de la viabilidad del método de granos gastados (bagazo) para la elaboración de una cerveza artesanal libre de alcohol". Tesis de Licenciatura. Universidad Nacional Autónoma de México. Facultad de Estudios Superiores Cuautitlán.
- Loviso C. y Libkind D., 2019. "Síntesis y regulación de compuestos del aroma y el sabor derivados de la levadura en la cerveza: alcoholes superiores". *Revista*

*Argentina de Microbiología*, 51(4), 386-397.  
<https://doi.org/10.1016/j.ram.2018.08.006>

Lynch K., Steffen E y Arendt E., 2016. "Brewers' spent grain: a review with an emphasis on food and health". *Journal of The Institute of Brewing*. 122, Issue 4, 553-568. <https://doi.org/10.1002/jib.363>

Marson, G., de Castro, R., Belleville, M., y Hubinger, M., 2020. "Spent brewer's yeast as a source of high added value molecules: a systematic review on its characteristics, processing and potential applications". *World Journal of Microbiology and Biotechnology*, 36(7), 95. <https://doi.org/10.1007/s11274-020-02866-7>

Martins Z., Erben M., Gallardo A., Silva R., Barbosa I., Pinho O. y Ferreira, I., 2015. "Effect of spent yeast fortification on physical parameters, volatiles and sensorial characteristics of home-made bread". *International Journal of Food Science & Technology*, 50(8), 1855–1863. <https://doi.org/10.1111/ijfs.12818>

Mateos M., 2013. "Relación estructura actividad de proantocianidinas procedentes de fuentes naturales de origen animal". Universidad de Barcelona. Facultad de Química. <https://bit.ly/3W05Kv8>

Mattioli S., Castellini C., Mancini S., Roscini V., Mancinelli A., Cotozzolo E., Pauselli M. y Dal Bosco A., 2020. "Effect of trub and/or linseed dietary supplementation on in vivo oxidative status and some quality traits of rabbit meat". *Meat Science*, 163, 108061. <https://doi.org/10.1016/j.meatsci.2020.108061>

McCarthy A., O'Callaghan Y., Piggott C., FitzGerald R. y O'Brien N., 2013. "Brewers' spent grain; bioactivity of phenolic component, its role in animal nutrition and potential for incorporation in functional foods: a review". *The Proceedings of the Nutrition Society*, 72(1), 117–125. <https://doi.org/10.1017/S0029665112002820>

- Mendis M. y Simsek S., 2014. "Arabinoxylans and human health". *Food Hydrocolloids*, 42, Part 2, 239-243. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2013.07.022>
- Meusdoerffer F., 2009. "A Comprehensive History of Beer Brewing". En Eßlinger H., 2009. *Handbook of Brewing: Processes, Technology, Markets*. Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, 111-152. <https://doi.org/10.1002/9783527623488.ch1>
- Milewski S., Wójcik R., Zaleska B., Małaczewska J., Tański Z. y Siwicki A., 2013. "Effect of *Saccharomyces cerevisiae* dried yeast on the meat performance traits and selected indicators of humoral immunity in lambs". *Acta Vet. Brno.*, 82, 147–151 [https://actavet.vfu.cz/media/pdf/avb\\_2013082020147.pdf](https://actavet.vfu.cz/media/pdf/avb_2013082020147.pdf)
- Mínguez Z., 2008. "Manoproteínas y enzimas en la extracción y estabilidad de color de vinos tempranillo". Tesis Doctoral. España: Universidad de la Rioja.
- Montanari L., Marconi O., Mayer H. y Fantozzi P., 2009. "Chapter 6. Production of Alcohol-Free Beer". En Preedy V., 2009., *Beer in Health and Disease Prevention*. Academic Press, 61-75. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-373891-2.00006-7>
- Morales A., Niño G., Carvajal E., Gardea A., Torres P., López Y., Rascón A. y Lizardi J., 2013. "Los arabinoxilanos ferulados de cereales. una revisión de sus características fisicoquímicas y capacidad gelificante". *Revista Fitotecnia Mexicana*, 36 (4), 439-446. <https://bit.ly/3O9UtH2>
- Mosher M. y Trantham K., 2017. "*Brewing Science: A Multidisciplinary Approach*". Cham: Springer, 96-99, 105, 111-116, 250-255, 299 y 300. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-46394-0>
- Mussatto S., Dragone G. y Roberto I., 2006. "Brewers' spent grain: generation, characteristics and potential applications". *Journal of Cereal Science*, 43, Issue 1, 1-14. <https://doi.org/10.1016/j.jcs.2005.06.001>

- Mussatto, S., 2014. "Brewer's spent grain: A valuable feedstock for industrial applications", *Journal Science Food Agriculture* 94, 1264–1275.
- Mudgil D., 2017. "Chapter 3. The Interaction Between Insoluble and Soluble Fiber". En Samaan R., 2017. *Dietary Fiber for the Prevention of Cardiovascular Disease*. Academic Press, 35-59. Recuperado el 20/04/2023, de <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-805130-6.00003-3>
- Muzinic, L., Thompson K., Morris A., Webster C., Rouse D. y Manomaitis L., 2004. "Partial and total replacement of fish meal with soybean meal and brewer's grains with yeast in practical diets for Australian red claw crayfish *Cherax quadricarinatus*". *Aquaculture* (Ámsterdam, Países bajos), 230(1–4), 359 a 376. [https://doi.org/10.1016/s0044-8486\(03\)00420-4](https://doi.org/10.1016/s0044-8486(03)00420-4)
- Nagy M., Semeniuc C., Socaci S., Pop C., Rotar A., Sălăgean C. y Tofană, M., 2017. "Utilization of brewer's spent grain and mushrooms in fortification of smoked sausages". *Food Science and Technology*, 37(2), 315–320. <https://doi.org/10.1590/1678-457x.23816>
- Naibaho J., Butula N., Jonuzi E., Korzeniowska M., Laaksonen O., Föste M., Kütt M. y Yang B., 2022. "Potential of brewers' spent grain in yogurt fermentation and evaluation of its impact in rheological behaviour, consistency, microstructural properties and acidity profile during the refrigerated storage". *Food Hydrocolloids*, 125, 107412. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2021.107412>
- Nand, K., 1987. "Debittering of spent brewer's yeast for food purposes". *Food/Nahrung*, 31: 127-131. <https://doi.org/10.1002/food.19870310208>
- Nguyen N., Trinh L., Chau D., Baruah K., Lundh T. y Kiessling A., 2019. "Spent brewer's yeast as a replacement for fishmeal in diets for giant freshwater prawn (*Macrobrachium rosenbergii*), reared in either clear water or a biofloc environment". *Aquaculture Nutrition*, 25, 970–979. <https://doi.org/10.1111/anu.12915>

Norma Oficial Mexicana. NOM-199-SCFI-2017. Bebidas alcohólicas-Denominación, especificaciones fisicoquímicas, información comercial y métodos de prueba.

Norma Oficial Mexicana. NOM-127-SSA1-1994. Salud ambiental, agua para uso y consumo humano-límites permisibles de calidad y tratamientos a que debe someterse el agua para su potabilización.

Nortey T., Frimpong R. y Naazie A., 2018. "Effect of metabolizable energy content and ileal amino acid digestibility of sorghum-barley brewer's spent grain (SBSBG) on growth, carcass and blood parameters in broilers". *Journal of Animal and Feed Research*, 8, Issue 2, 20-32. <https://bit.ly/3M0vVgH>

Olajire A., 2020. "The brewing industry and environmental challenges". *Journal of Cleaner Production* 256: 1-22. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2012.03.003>

Oliveira R., Oliveira R., Bezerra L., Nascimento T., de Pellegrini C., de Freitas Neto M., do Nascimento N. Jr. y de Souza W., 2016. "Substitution of corn meal with dry brewer's yeast in the diet of sheep". *Revista Colombiana de Ciencias Pecuarias*, 99–107. <https://bit.ly/3laHyk5>

Ortiz I., Torreiro Y., Molina G., Maroño M. y Sánchez J., 2019. "A Feasible Application of Circular Economy: Spent Grain Energy Recovery in the Beer Industry". *Waste Biomass Valor* 10, 3809–3819. <https://doi-org.pbidi.unam.mx:2443/10.1007/s12649-019-00677-y>

Oxford Economics, 2022. "Beer's global economic footprint". London: 1-50. <https://bit.ly/3H0oep6>

Özvural E., Vural H., Gökbulut İ. y Özboy-Özbaş Ö., 2009. "Utilization of brewer's spent grain in the production of Frankfurters". *International Journal of Food Science & Technology*, 44(6), 1093–1099. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2621.2009.01921.x>

- Palmer J., 2017. “*How to Brew. Everything you need to know to brew great beer every time*”. Cuarta edición. Colorado: Brewers Publications. ISBN: 1938469356
- Pancrazio G., Cunha S., de Pinho, P., Loureiro M., Meireles S., Ferreira I. y Pinho O, 2016. “Spent brewer’s yeast extract as an ingredient in cooked hams”. *Meat Science*, 121, 382–389. <https://doi.org/10.1016/j.meatsci.2016.07.009>
- Parekh I., Khanvilkar, A, Naik, A., 2017. “Barley–wheat brewers’ spent grain: A potential source of antioxidant rich lipids”. *Journal Food Process Preservation*. 41: e13244. <https://doi.org/10.1111/jfpp.13244>
- Parmenter R., Rickard J. y James D., 2018. “Case Study: Effects of inclusion of wet brewers’ grains on the growth performance, carcass characteristics, and meat quality of finishing cattle”. *The Professional Animal Scientist*, 34, Issue 5, 505-512. <https://doi.org/10.15232/pas.2018-01725>
- Piotrowska A., Waszkiewicz-Robak B., Swiderski F., 2009. “Possibility of beta-glucan from spent brewer’s yeast addition to yogurts”. *Polish Journal of Food and Nutrition Sciences*, 59 (4), 299-302. <https://bit.ly/41xbsGb>
- Pizarro S., Ronco A. y Gotteland M., 2014. “β-glucanos: ¿qué tipos existen y cuáles son sus beneficios en la salud?”. *Revista chilena de nutrición*, 41(4). <https://bit.ly/3Bp7xR8>
- Plessas S., Trantallidi, M., Bekatorou, A., Kanellaki, M., Singh - Nee Nigam, P., y Koutinas, A., 2007. “Immobilization of kefir and *Lactobacillus casei* on brewery spent grains for use in sourdough wheat bread making”. *Food Chemistry*, 105(1), 187-194. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2007.03.065>
- Poelmans E. y Swinnen J., 2011. “From Monasteries to Multinationals (and Back): A Historical Review of the Beer Economy”. *Journal of Wine Economics*, 6 (2), 2011, 196-216. <https://doi.org/10.1017/S1931436100001607>

- Priest, F. y Stewart G., 2006. “*Handbook of Brewing*”. Segunda edición. CRC Press.  
<https://doi.org/10.1201/9781420015171>
- Proaño J., Salgado P., Cian R., Mauri A. y Drago S., 2020. “Physical, structural and antioxidant properties of brewer’s spent grain protein films”. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 100(15), 5458–5465.  
<https://doi.org/10.1002/jsfa.10597>
- Puligundla P., Mok C. y Park S., 2020. “Advances in the valorization of spent brewer's yeast, *Innovative Food Science & Emerging Technologies*”, 62, 102350. <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2020.102350>
- Qazanfarzadeh Z., Ganesan A., Mariniello L., Conterno L., Kumaravel V., 2023. “Valorization of brewer's spent grain for sustainable food packaging”. *Journal of Cleaner Production*, 385, 135726.  
<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.135726>.
- Rachwał K., Waśko A., Gustaw K. y Polak-Berecka M., 2020. “Utilization of brewery wastes in food industry”. *PeerJ*, 8: e9427. <https://doi.org/10.7717/peerj.9427>
- Radzik-Rant A., Rant W., Niżnikowski R., Świątek M., Szymańska Ż., Ślęzak, M. y Niemiec, T., 2018. “The effect of the addition of wet brewer’s grain to the diet of lambs on body weight gain, slaughter value and meat quality”. *Archives Animal Breeding*, 61(2), 245–251. <https://doi.org/10.5194/aab-61-245-2018>
- Rakin M., Vukasinovic M., Siler-Marinkovic S. y Maksimovic M., 2005. “Contribution of lactic acid fermentation to improve nutritive quality vegetable juices enriched with brewer’s spent yeast autolysates”. *Food Chemistry* 100 (2), 599-602. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2005.09.077>
- Ribeiro-Oliveira R., Martins Z., Sousa J., Ferreira I., Diniz C., 2021. “The health-promoting potential of peptides from brewing by-products: An up-to-date review”. *Trends in Food Science & Technology*, 118, Part A, 143-153.  
<https://doi.org/10.1016/j.tifs.2021.09.019>

- Rivadeneira M., 2020. "Propuesta de reutilización de los residuos del proceso de producción de cerveza artesanal para incremento de la productividad de la empresa Holy Krank". Tesis de Licenciatura. Universidad Tecnológica Indoamericana. Facultad de Ingeniería y Tecnologías de la Información y Comunicación.
- Russ W. y Meyer-Pittroff Roland, 2003. "The use of phenolic protein precipitates (trub) from beer production in animal feed". *Monatsschrift für Brauwissenschaft*, 56, 84<sup>a</sup>, 88.
- Rhys D., Styles D. y Lane E., 2021. "Thirsty work: Assessing the environmental footprint of craft beer". *Sustainable Production and Consumption*, 27, 242-253. <https://doi.org/10.1016/j.spc.2020.11.005>
- Saldaña D., 2018. "Evaluación de la generación de residuos de manejo especial de la Cervecería de Colima e implementación de medidas para su minimización y aprovechamiento". <https://bit.ly/3CAAd6N6>
- Sakamoto K. y Konings W., 2003. "Beer spoilage bacteria and hop resistance". *International Journal of Food Microbiology*, 89, Issues 2–3, 105-124 [https://doi.org/10.1016/S0168-1605\(03\)00153-3](https://doi.org/10.1016/S0168-1605(03)00153-3)
- Santos I., 2019. "Propuestas para el aprovechamiento del trüb obtenido del proceso cervecero en productos de confitería". Tesis de Licenciatura. Universidad Nacional Autónoma de México. Facultad de Química.
- Saraiva B., Anjo F., Vital A., Maldonado da Silva L., Ogawa C., Sato F., Coimbra L. y Matumoto-Pintro P., 2019. "Waste from brewing (trub) as a source of protein for the food industry". *International Journal of Food Science & Technology*, 54(4), 1247–1255. <https://doi.org/10.1111/ijfs.14101>
- Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural. Gobierno de México, 2019. "Producción de cerveza en México: una historia para celebrar". <https://bit.ly/3IK5U3Q>

- Serra M., Funch B. y Forster J., 2019. "The raise of *Brettanomyces* yeast species for beer production". En Neves R., Bachmann H., Boerjan W. y Ralph J., 2019. *Current opinion in Biotechnology*. Elsevier, 56, 30-35. <https://doi.org/10.1016/j.copbio.2018.07.009>
- Skendi A., Harasym J. y Galanakis C., 2018. "Chapter 7. Recovery of high added-value compounds from brewing and distillate processing by-products". En Galanakis C., 2018. *Sustainable Recovery and Reutilization of Cereal Processing By-Products*. Woodhead Publishing Series in Food Science, Technology and Nutrition, 189-225. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-102162-0.00007-1>
- Soares E. y Soares H., 2012. "Bioremediation of industrial effluents containing heavy metals using brewing cells of *Saccharomyces cerevisiae* as a green technology: a review". *Environmental Science and Pollution Research*, 1, 1066-1083. <https://doi.org/10.1007/s11356-011-0671-5>
- Speers A. y Forbes J., 2015. "Chapter 1. Yeast: an overview". En Hill A., 2015. *Brewing microbiology. Managing Microbes, Ensuring Quality and Valorizing waste*. Woodhead Publishing, 3-9. <https://doi.org/10.1016/B978-1-78242-331-7.00001-0>
- Stănilă A. y Mihăescu T., 2015. "Amino Acids in Brewer's yeast involved in heavy metal bioabsorption from waste water". *Bulletin of University of Agricultural Sciences and Veterinary Medicine Cluj, Napoca Agriculture*, 72(1). <https://doi.org/10.15035/buasvmcn-agr:11172>
- Steinmacher N., Honna F., Gasparetto A., Anibal D. y Grossmann M., 2012. "Bioconversion of brewer's spent grains by reactive extrusion and their application in bread-making". *Food Science and Technology*, 46, Issue 2, 542-547. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2011.11.011>.
- Tamashiro S., 2021. "Usan residuos cerveceros como insumos productivos". <https://bit.ly/46aAm1F>

- Tang Z., Cenkowski S., Izydorczyk M., 2005. "Thin-layer drying of spent grains in superheated steam". *Journal of Food Engineering*, 67, Issue 4, 457-465. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2004.04.040>
- Tenge C., 2009. "Chapter 5. Yeast". En Eßlinger H., 2009. *Handbook of Brewing: Processes, Technology, Markets*. Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, 119-144. <https://doi.org/10.1002/9783527623488.ch5>
- Terefe G., 2022. "Preservation techniques and their effect on nutritional values and microbial population of brewer's spent grain: a review". *CABI Agriculture Bioscience* 3, 51. <https://doi.org/10.1186/s43170-022-00120-8>
- The Beer Times, 2022. "ACERMEX, el sello de cerveza artesanal mexicana que se replica en el mundo". <https://bit.ly/3mP8WwL>
- Toro-Gonzalez D., 2017. "The Craft Brewing Industry in Latin America". *Agricultural & Applied Economics Association*, 3<sup>rd</sup> quarter, 32 (3). <https://bit.ly/46dcue7>
- Varona B., González R., Pérez R. y Pérez M., 2007. "Análisis del intercambiador de calor de placas enfriador de mosto en la cervecería 'Tínima' ". *Tecnología Química*, septiembre-diciembre, 16, 3, 61-67. ISBN: 0041-8420.
- Vieira B., Silva K., Mendonça A., Sawata M., da Costa M. y Ferreira F., 2019. "Beer Molecules and Its Sensory and Biological Properties: A Review". *Molecules*, 24(8):1568,1-19. <https://doi.org/10.3390/molecules24081568>
- Vieira, E., Teixeira, J y Ferreira I., 2016. "Valorization of brewers' spent grain and spent yeast through protein hydrolysates with antioxidant properties". *European Food Research and Technology*, 242, 1975–1984. <https://doi.org/10.1007/s00217-016-2696-y>
- Villacreces S., Blanco A., Caballero I., 2022. "Developments and characteristics of craft beer production process". *Food Bioscience: Science Direct*, 45. <https://doi.org/10.1016/j.fbio.2021.101495>

- Wallen S. y Marshall H., 1979. "Protein quality evaluation of spent hops". *Journal of Agricultural Food Chemistry*. May-Jun;27(3):635-6. <https://doi.org/10.1021/jf60223a027>
- Warleta F., Ruiz J., Campos M., Serrano M. y Gaforio J., 2007. "El escualeno, componente minoritario del aceite de oliva, y su relación con el cáncer". <https://bit.ly/3M3lrNO>
- Waters D., Jacob F., Titze J., Arendt E. y Zannini E., 2012. "Fiber, protein and mineral fortification of wheat bread through milled and fermented brewer's spent grain enrichment". *European Food Research and Technology*, 235, 767–778. <https://doi.org/10.1007/s00217-012-1805-9>
- Wohlt J., Corcione T. y Zajac P., 1998. "Effect of Yeast on Feed Intake and Performance of Cows Fed Diets Based on Corn Silage during Early Lactation". *Journal of Dairy Science*, 81, 1345–1352. [https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302\(98\)75697-8](https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302(98)75697-8)
- Worrasinchai S., Suphantharika M., Pinjai S. y Jamnong P., 2005. "β-glucan prepared from spent brewer's yeast as a fat replacer in mayonnaise". *Food hydrocolloids*, 20, Issue 1, 68-78. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2005.03.005>
- Yuan H., Lan P., He Y., Li C. y Ma X., 2020. "Effect of the Modifications on the Physicochemical and Biological Properties of β-Glucan. A Critical Review". *Molecules*, 25, 57. <https://doi.org/10.3390/molecules25010057>
- Zavala D., 2018. "Elaboración de platos biodegradables utilizando un residuo de la Industria Cervecera". Tesis de Licenciatura. Universidad Nacional Autónoma de México. Facultad de Química.
- Zenith Advisory, 2017. "Craft beer in Europe. The emergency of craft beer". <https://bit.ly/3rGvxu5>

Żołnierczyk A., Mączka W., Grabarczyk M., Wińska K., Woźniak E., Anioł M., 2015.  
“Isoxanthohumol. Biologically active hop flavonoid”. *Fitoterapia*, 103, 71-82.  
<https://doi.org/10.1016/j.fitote.2015.03.007>