Escuela Superior Politécnica del Litoral

Facultad de Ciencias Naturales y Matemáticas

Diseño del proceso de producción de cerveza a partir de pan masa madre blanco caducado.

INGE-2713

Proyecto Integrador

Previo la obtención del Título de:

Ingeniero Químico

Presentado por:

Melany Patricia Mero Suárez

Jorge Isaac Cazar Freire

Guayaquil - Ecuador

Año: 2024

Dedicatoria

A mis padres, por inculcarme el valor de la perseverancia y por creer en cada uno de mis sueños. Gracias por cada sacrificio, su esfuerzo constante y amor incondicional me han permitido llegar hasta aquí. Este logro es tan suyo como mío, porque sin ustedes no habría sido posible.

A mis hermanos, quienes han soportado con paciencia la peor parte de mi estrés académico y, aun así, siempre me brindaron su apoyo incondicional. Gracias, Shey, por esas conversaciones nocturnas que, aunque parecían casuales, fueron un refugio para aliviar el estrés acumulado. Isa, ahora es tu turno de culminar este camino universitario; estamos seguros de que lo harás con éxito.

A mí misma, por no rendirme, por encontrar vida en los sueños y recordar que siempre hay una siguiente página.

Melany Patricia Mero Suárez

Dedicatoria

Este proyecto se lo dedico a mis padres, por todo el amor que me han brindado siempre, por sus enseñanzas y esfuerzos que me ha permitido ser y llegar a donde estoy el día de hoy.

A mi hermano, por su apoyo y ejemplo de superación que me ha inspirado a intentar siempre dar lo mejor de mí.

A Mickella, por su amor y compañía durante estos años, por su apoyo incondicional y por impulsarme a ser mejor cada día.

A mi familia toda, que siempre están pendientes de mis progresos, logros y dispuestos a ofrecerme cualquier ayuda.

A mis amigos del colegio, quienes me han acompañado gran parte de mi vida y han sabido apoyarme y distraerme del estrés propio del camino universitario.

Jorge Isaac Cazar Freire

Agradecimientos

Nuestro más sincero agradecimiento a nuestro tutor, Ph.D. Joel Vielma**,** quien con su guía, conocimiento y retroalimentación fue un gran apoyo para el desarrollo de este proyecto.

A Ing. Camilo Ramírez por su desinteresado apoyo y significativos aportes en este proyecto.

A Ph.D Joan Vera y Ing. Julio de la Paz, por siempre estar dispuestos a ayudarnos o darnos un consejo.

A nuestros compañeros de carrera, con quienes compartimos ese desafiante camino. Gracias por enriquecer nuestra experiencia académica con su compañerismo.

A ESPOL por los desafíos y oportunidades, que nos demostraron la satisfacción de una meta cumplida.

Finalmente, gracias a nuestro compañero de tesis por creer desde el inicio en este proyecto.

Melany Mero y Jorge Cazar

Declaración Expresa

Nosotros Melany Patricia Mero Suárez y Jorge Isaac Freire acordamos y reconocemos que:

La titularidad de los derechos patrimoniales de autor (derechos de autor) del proyecto de graduación corresponderá al autor o autores, sin perjuicio de lo cual la ESPOL recibe en este acto una licencia gratuita de plazo indefinido para el uso no comercial y comercial de la obra con facultad de sublicenciar, incluyendo la autorización para su divulgación, así como para la creación y uso de obras derivadas. En el caso de usos comerciales se respetará el porcentaje de participación en beneficios que corresponda a favor del autor o autores.

La titularidad total y exclusiva sobre los derechos patrimoniales de patente de invención, modelo de utilidad, diseño industrial, secreto industrial, software o información no divulgada que corresponda o pueda corresponder respecto de cualquier investigación, desarrollo tecnológico o invención realizada por nosotros durante el desarrollo del proyecto de graduación, pertenecerán de forma total, exclusiva e indivisible a la ESPOL, sin perjuicio del porcentaje que nos corresponda de los beneficios económicos que la ESPOL reciba por la explotación de nuestras innovación, de ser el caso.

En los casos donde la Oficina de Transferencia de Resultados de Investigación (OTRI) de la ESPOL comunique los autores que existe una innovación potencialmente patentable sobre los resultados del proyecto de graduación, no se realizará publicación o divulgación alguna, sin la autorización expresa y previa de la ESPOL.

Guayaquil, 10 de octubre del 2024.

Melany Patricia Mero Suárez

Jorge Isaac Cazar Freire

Evaluadores

Firmado electrónicamente por:
MARIA VERONICA
ORDONEZ PAZMINO

MSc. María Verónica Ordóñez Pazmiño

Profesor de Materia

Firmado electrónicamente por:
JOEL EDUARDO VIELMA
PUENTE

Ph.D. Joel Eduardo Vielma Puente

Tutor de proyecto

Resumen

El proyecto se enfoca en diseñar un proceso de producción de cerveza estilo *bitter* utilizando pan masa madre blanco caducado como sustituto parcial de la malta, reduciendo el desperdicio alimentario e impulsando la economía circular. El objetivo principal es optimizar la proporción de insumos fermentables mediante un diseño experimental Central Compuesto Circunscripto y evaluar la calidad de la cerveza obtenida conforme la NTE INEN 2262 y criterios antioxidantes. Se utilizó una metodología estándar de producción cervecera adaptada al uso de pan caducado, integrado técnicas como maceración, fermentación y análisis fisicoquímico. También se realizó un diseño a escala meso mediante simulación en Aspen Plus para validar el escalamiento del proceso. Los resultados mostraron que la cerveza cumple con los estándares de calidad, alcanzando un contenido alcohólico de 3,88% v/v y actividad antioxidante elevada (117,65 mg CEAC/L) y parámetros fisicoquímicos dentro de los límites normativos. Además, el diseño escalado demostró viabilidad técnica y económica con un costo unitario de $0,64/botellas y un margen de utilidad del 70%. El proyecto concluye que la integración del pan caducado en la producción de cerveza en una solución rentable, técnica y ambientalmente viable, que puede ser implementada a nivel industrial para revalorizar residuos de panaderías.

Palabras claves: Economía circular, pan caducado, cerveza *Bitter,* sostenibilidad industrial.

Abstract

The project focuses on designing a bitter style beer production process using expired white sourdough bread as a partial substitute for malt, reducing food waste and promoting circular economy. The main objective is to optimize the proportion of fermentable inputs through a Circumscribed Central Compound experimental design and to evaluate the quality of the beer obtained according to NTE INEN 2262 and antioxidant criteria. A standard brewing methodology adapted to the use of expired bread was used, integrating techniques such as maceration, fermentation and physicochemical analysis. A meso-scale design was also carried out through simulation in Aspen Plus to validate the scaling of the process. The results showed that the beer meets quality standards, reaching an alcohol content of 3,88% v/v and high antioxidant activity (117,65 mg CEAC/L) and physicochemical parameters within regulatory limits. In addition, the scaled design demonstrated technical and economic feasibility with a unit cost of $0,64/bottles and a profit margin of 70%. The project concludes that the integration of expired bread in beer production is a cost-effective, technically and environmentally viable solution that can be implemented at the industrial level to revalue bakery waste.

Key words: Circular economy, expired bread, Bitter beer, industrial sustainability.

Índice general

Resumen I

Abstract II

Índice general III

Simbología IX

Índice de figuras XI

Índice de tablas XIII

Capítulo 1 1

1.1 Introducción 2

1.2 Descripción del Problema 2

1.3 Justificación del Problema 3

1.4 Objetivos 4

1.4.1 Objetivo general 4

1.4.2 Objetivos específicos 4

1.5 Marco teórico 4

1.5.1 Consumo y desperdicio de pan a nivel mundial 4

1.5.2 Pan Masa Madre 5

1.5.3 Uso de pan caducado en la producción de cerveza 6

1.5.4 La cerveza y sus estilos 6

1.5.5 Términos cerveceros básicos 8

1.5.6 Antecedentes de cerveza en base a pan 9

1.5.7 Proceso estandarizado para elaborar cerveza 9

1.5.8 Requisitos para la producción de cerveza a partir de pan caducado 12

1.5.9 Metodología de superficie de respuesta (MSR) 13

Capítulo 2 15

2.1 Metodología 16

2.2 Diseño experimental 16

2.2.1 Justificación de la metodología y diseño experimental seleccionado 16

2.2.2 Número de experimentos 17

2.2.3 Rangos y niveles experimentales 18

2.3 Población, muestra y lugar de estudio 18

2.4 Cantidad de insumos fermentables 19

2.4.1 Cantidad de cebada malteada 20

2.4.2 Cantidad de pan masa madre blanco caducado. 20

2.5 Distribución de los experimentos 21

2.6 Aseguramiento de la calidad de los datos 22

2.7 Ingredientes, materiales, equipos para la obtención de la cerveza estilo *bitter* 22

2.7.1 Ingredientes 22

2.7.2 Materiales y reactivos 23

2.7.3 Equipos 24

2.8 Procedimiento para la obtención de la cerveza *bitter* 24

2.8.1 Limpieza y desinfección de materiales y equipos 24

2.8.2 Recepción y preparación de los insumos fermentables. 25

2.8.3 Maceración 26

2.8.4 Filtración y lavado 27

2.8.5 Cocción y adición de lúpulo 27

2.8.6 Enfriamiento y fermentación 28

2.8.7 Medición de densidad 29

2.8.8 Limpieza y desinfección de botellas 30

2.8.9 Carbonatación y envasado 30

2.8.10 Diagrama de flujo del proceso cervecero partir de pan 32

2.9 Métodos de Análisis fisicoquímicos 33

2.9.1 Determinación del contenido de alcohol 33

2.9.2 Determinación de acidez 34

2.9.3 Determinación de pH 35

2.9.4 Determinación de contenido de hierro, cobre y zinc 36

2.9.5 Determinación de fenoles 38

2.9.6 Determinación de actividad antioxidante 41

2.10 Desafíos durante la experimentación 43

2.11 Diseño de planta a escala meso para la producción de cerveza a partir de pan 43

2.11.1 Software de simulación 43

2.11.2 Diagrama de bloques del proceso 43

2.11.3 Equipos necesarios 44

Capítulo 3 48

3.1 Resultados y análisis 49

3.1.1 Resultados y análisis de la determinación de alcohol de la cerveza estilo bitter 49

3.1.2 Análisis de proporciones óptimas de ingredientes 52

3.1.3 Resultados y análisis de la determinación de acidez aplicando el método por titulación con hidróxido de sodio 55

3.1.4 Resultados y análisis de la determinación de pH 57

3.1.5 Resultados y análisis de la determinación de hierro, zinc y cobre.....58

3.1.6 Resultados y análisis de la determinación de fenoles 60

3.1.7 Resultados y análisis de la determinación de la actividad antioxidante por el método de FRAP 63

3.2 Resultados de la simulación del proceso cervecero a partir de pan masa madre blanco caducado 66

3.3 Análisis económico del diseño de producción de cerveza a partir de pan masa madre blanco caducado 69

3.3.1 Costo unitario de producción 69

3.3.2 Evaluación de rentabilidad.....73

Capítulo 4.....76

4.1 Conclusiones y recomendaciones 77

4.1.1 Conclusiones.....77

4.1.2 Recomendaciones 78

Referencias.....80

Apéndices.....87

Anexos 93

Abreviaturas

a.C	Antes de Cristo
ABTS	Ácido 2,2’-azino-bis(3-etilbenzotiazolina-6-sulfónico)
ABV	Alcohol By Volume
ARCSA	Agencia Nacional de Regulación, Control y Vigilancia Sanitaria
BAL	Bacterias ácido-lácticas
BPM	Buenas Prácticas de Manufactura
DCCC	Diseño Central Compuesto Circunscripto
CEAC	Vitamin C Equivalent Antioxidant Capacity
EBC	European Brewery Convention
EKG	East Kent Golding
ESPOL	Escuela Superior Politécnica del Litoral
FAO	Food and Agriculture Organization
FCNM	Facultad de Ciencias Naturales y Matemáticas
FRAP	Ferric Reducing Antioxidant Power
FCV	Facultad de Ciencias de la Vida
GEI	Gases de efecto invernadero
GAE	Equivalentes de ácido gálico
IBU	International Bittering Units
INEN	Instituto Ecuatoriano de Normalización
IPA	India Pale Ale
IR	Índice de refracción
MSR	Metodología de superficie de respuesta
NTE	Norma Técnica Ecuatoriana

ODS	Objetivos de Desarrollo Sostenible
SRM	Standard Reference Method
SUS	Steel Use Stainless
TPTZ	2,4,6-tripidil-S-triazina
UPS	Universidad Politécnica Salesiana
USDA	United States Department of Agriculture

Simbología

%	Porcentaje
$	Dólares estadounidenses (USD)
≥	Mayor o igual que
°Brix	Cantidad de sólidos disueltos en un líquido
°C	Grados Celsius
CH_4	Metano
CO_2	Dióxido de Carbono
°F	Grados Fahrenheit
g	Gramo
g/kg	Gramo por kilogramo
gpm	Galones por minuto
H^+	Ion de hidrógeno
HNO_3	Ácido nítrico
HP	Horsepower
Hz	Hercio
kg	Kilogramo
kg/h	Kilogramo por hora
kg/m^3	Kilogramo por metro cúbico
L	Litro
lb	Libra
L/h	Litros por hora
m	metro
%m/m	Porcentaje masa en masa

mg/dm^3	Miligramo por decímetro cúbico
mg/L	Miligramos por litro
mg GAE/100 g	Miligramos de equivalentes de ácido gálico por cada 100 gramos de muestra
mg GAE/mL	Miligramos de equivalentes de ácido gálico por mililitro
mg CEAC/L	Miligramos de capacidad antioxidante equivalente de vitamina C por litro
mL	Mililitro
mM	Milimolar
%m/v	Porcentaje masa-volumen
N	Normalidad
nm	nanómetro
NaOH	Hidróxido de sodio
pH	Potencial de hidrógeno
ppm	Partes por millón
Q	Caudal
rpm	Revoluciones por minuto
S.G.	Gravedad específica
UFC/g	Unidades formadoras de colonias por gramo
UND	Unidad
UV	Radiación ultravioleta
µL	Microlitro
V	Voltio
%v/v	Porcentaje volumen a volumen
W	Vatio (Watts)

Índice de figuras

Figura 1 Diagrama de Flujo de elaboración de cerveza artesanal 11

Figura 2 Equipo cervecero artesanal de la UPS.....19

Figura 3 Limpieza de equipos y materiales 25

Figura 4 Trituración de pan masa madre blanco.....25

Figura 5 Molienda de la cebada malteada 26

Figura 6 Proceso de maceración 26

Figura 7 Filtración y lavado del mosto 27

Figura 8 Cocción del mosto y adición de lúpulos.....28

Figura 9 Sistema de refrigeración.....29

Figura 10 Barriles de fermentación en la cámara de enfriamiento 29

Figura 11 Medición de densidad del mosto 30

Figura 12 Desinfección de botellas.....30

Figura 13 Carbonatación y envasado de la cerveza 31

Figura 14 Producto final de un lote 31

Figura 15 Diagrama de Fujo: Producción de cerveza a partir de pan.....32

Figura 16 Sistema de destilación simple.....34

Figura 17 Determinación de acidez por titulación.....35

Figura 18 Determinación potenciométrica de pH.....36

Figura 19 Digestión de muestras de cerveza 37

Figura 20 Determinación de metales 38

Figura 21 Preparación de la curva estándar de ácido gálico.....39

Figura 22 Extracción de polifenoles de la muestra de cerveza.....40

Figura 23 Determinación de fenoles usando el reactivo de Folin-Ciocalteu.....41

Figura 24 Determinación de actividad antioxidante.....42

Figura 25 Diagrama de bloques del proceso cervecero a partir de pan 43

Figura 26 Descortezadora de pan modelo DPN-2232 44

Figura 27 Trituradora de pan 44

Figura 28 Molino de malta eléctrico.....44

Figura 29 Macerador.....45

Figura 30 Filtrador de mosto 45

Figura 31 Sistema de enfriamiento 45

Figura 32 Bomba centrífuga sanitaria.....46

Figura 33 Fermentador.....46

Figura 34 Sistema de carbonatación 46

Figura 35 Sistema de embotellado.....47

Figura 36 Etiquetadora.....47

Figura 37 Diagrama de dispersión con respecto a la cantidad de pan 53

Figura 38 Diagrama de dispersión con respecto a la cantidad de malta 53

Figura 39 Superficie de respuesta del DCCC 54

Figura 40 Curva estándar de ácido gálico.....61

Figura 41 Curva estándar de ácido ascórbico 64

Figura 42 Diagrama de la simulación de producción de cerveza a partir de pan masa madre blanco caducado.....68

Figura 43 Diagrama de flujo del proceso de producción de cerveza a partir de pan masa madre blanco caducado.....68

Figura 44 Lotes de cerveza 93

Figura 45 Desgasificación de muestras de cerveza 93

Figura 46 Equipos utilizados en los análisis fisicoquímicos 94

Figura 47 Resultados de optimización del sistema.....95

Índice de tablas

Tabla 1 Cervezas comerciales en base a pan 9

Tabla 2 Requisitos físicos y químicos establecidos por la NTE INEN 2262 13

Tabla 3 Variables del diseño experimental 16

Tabla 4 Parámetros esperados del proceso cervecero por lote.....19

Tabla 5 Datos del pan masa madre blanco.....20

Tabla 6 Distribución de los experimentos del DCCC.....21

Tabla 7 Ingredientes para la formulación del mosto.....22

Tabla 8 Materiales y reactivos para la elaboración de la cerveza 23

Tabla 9 Equipos para la elaboración de la cerveza 24

Tabla 10 Curva patrón de ácido gálico preparada a partir de una solución de 1000 mg/L.....38

Tabla 11 Curva patrón de ácido ascórbico preparada a partir de una solución de 1000 mg/L 42

Tabla 12 Equipamiento para el diseño de planta a escala meso 44

Tabla 13 Resultados de destilados obtenidos de los lotes de cerveza.....49

Tabla 14 Datos obtenidos mediante método picnométrico.....50

Tabla 15 Resultados de contenido alcohólico de los lotes de cerveza.....51

Tabla 16 Resultados de optimización del sistema 55

Tabla 17 Resultados de acidez total expresado como ácido láctico de la cerveza.....56

Tabla 18 Resultados de pH de los lotes de cerveza 58

Tabla 19 Concentraciones de hierro, zinc y cobre en muestras de cerveza 59

***T*abla 20** Datos de la curva estándar de ácido gálico 61

Tabla 21 Concentración de fenoles en muestras de cerveza.....62

Tabla 22 Datos de la curva estándar de ácido ascórbico.....64

Tabla 23 Actividad antioxidante en muestras de cerveza 65

Tabla 24 Nomenclatura de equipos usados en el proceso de producción 69

Tabla 25 Materia prima requerida y costos para 1000 L de cerveza 70

Tabla 26 Energía requerida y costos para 1000 L de cerveza 71

Tabla 27 Costo de mano de obra mensual 71

Tabla 28 Costo unitario de producir 1000 L de cerveza 72

Tabla 29 Costo de equipos 73

Tabla 30 Valores anuales para el cálculo de indicadores de rentabilidad 74

Tabla 31 Indicadores de rentabilidad del proceso de producción de cerveza escalado 75

Capítulo 1

1.1 Introducción

Las panificadoras enfrentan un desafío significativo debido a la ineficiencia en la gestión de excedentes de producción, lo que resulta en grandes volúmenes de pan caducado y pérdidas económicas considerables. Este problema contribuye al desperdicio alimentario y al incremento de las emisiones de Gases de Efecto Invernadero (GEI), agravando el impacto ambiental global.

En particular, el pan de masa madre blanco, por su alto contenido de almidones fermentables, tiene un alto potencial de reutilización en procesos fermentativos. Este estudio propone la elaboración de cerveza estilo *bitter* utilizando pan de masa madre blanco caducado como sustituto parcial de la malta, mediante la implementación de un Diseño Central Compuesto Circunscripto (DCCC) para optimizar las proporciones de pan y malta, evaluando las propiedades fisicoquímicas y la actividad antioxidante de la cerveza obtenida, destacando su potencial en la reducción de radicales libres en el cuerpo humano. Además, se evalúa la viabilidad técnica y económica de este proceso. Esta solución innovadora promueve la economía circular, reduce el desperdicio alimentario y responde a la demanda de productos sostenibles en la industria cervecera artesanal.

1.2 Descripción del Problema

El sector panificador enfrenta una problemática significativa relacionada con la gestión ineficiente de pan caducado, lo cual genera pérdidas financieras y un impacto ambiental relevante debido que la acumulación de residuos orgánicos al descomponerse libera gases contaminantes como CO_2 y CH_4.

A nivel local, una planta panificadora de Guayaquil ha registrado 558 unidades de pan de masa madre blanco caducado entre julio de 2023 y diciembre de 2024, y un total de 40620 unidades de panes no vendidos en un año, reflejando una ineficiente planificación productiva

y falta de estrategias para la revalorización de excedentes o desechos. Esta situación es representativa de un problema sectorial panadero en la gestión de excedentes.

Por lo tanto, se plantea como solución la revalorización del pan caducado como insumo parcial fermentable para la producción cervecera. Al transformar un desecho en un producto con valor agregado, se reduce su desperdicio, minimizando los efectos adversos sobre el medio ambiente y fomentando la sostenibilidad industrial.

1.3 Justificación del Problema

La motivación principal de la presente investigación radica en la necesidad de mitigar el impacto económico y ambiental causado por el desperdicio de pan en la industria panificadora, mediante su revalorización como insumo parcial fermentable en la producción cervecera.

Desde una perspectiva económica, esta solución ofrece a las panificadoras una estrategia viable para reducir pérdidas financieras derivadas de panes no vendidos, y genera un nuevo flujo de ingresos. Adicionalmente, para la industria cervecera, la incorporación de ingredientes no convencionales responde a la creciente demanda del mercado por productos artesanales sostenibles, lo que fortalece su competitividad y diferenciación en un sector en expansión.

A nivel ambiental, se busca reducir el desperdicio alimentario y las emisiones de GEI, alineándose con los principios de la economía circular al reincorporar recursos desaprovechados en un proceso productivo. Por lo tanto, esta iniciativa respalda el Objetivo de Desarrollo Sostenible (ODS) 12: Producción y Consumo Responsables, al fomentar prácticas sostenibles y optimizar recursos.

A largo plazo, el diseño experimental propuesto se puede comercializar como un paquete de soluciones, incluyendo simulaciones y protocolos para convertir pan caducado en un insumo cervecero, lo que podría generar licencias de uso y asesorías técnicas.

1.4 Objetivos

1.4.1 Objetivo general

Diseñar el proceso de producción de cerveza estilo *Bitter* a partir de pan masa madre blanco caducado para la revalorización de residuos de plantas panificadoras.

1.4.2 Objetivos específicos

1. Producir cerveza estilo *Bitter* con pan masa madre blanco caducado, a partir de un diseño central compuesto circunscripto.
2. Evaluar la calidad a partir de los criterios de la norma NTE INEN 2262 y la actividad antioxidante usando los métodos FRAP y ABTS de la cerveza obtenida.
3. Escalar el proceso de producción de cerveza estilo *Bitter* a partir de pan de masa madre blanco caducado.

1.5 Marco teórico

1.5.1 Consumo y desperdicio de pan a nivel mundial

El desperdicio de alimentos es un problema global de gran relevancia, y el sector panificador contribuye de manera significativa. De acuerdo con la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO), aproximadamente un tercio de los alimentos producidos a nivel mundial para consumo humano se pierde o desperdicia anualmente, lo que genera graves consecuencias ambientales, sociales y económicas (FAO, 2023). La industria alimentaria es responsable de una porción considerable de las emisiones de gases de efecto invernadero y en la huella de carbono global (Coelho, Prista, & Sousa, 2024).

Este problema afecta especialmente a productos perecederos como el pan, dado que es un alimento básico en la dieta diaria humana, con un consumo promedio global estimado de

59 a 70 kg por persona al año (Mesta-Corral, Gómez García, Balagurusamy, Torres-León, & Hernández-Almanza, 2024), su exceso de producción resulta en grandes cantidades de pan duro o viejo destinado a degradación anaeróbica y/o incineración. Por ejemplo, en Europa se estima que un 10% de los 100 millones de toneladas de pan horneado anualmente se desperdicia. Solo en el Reino Unido, un 44% del pan se pierde a lo largo de la cadena de suministro y consumo, lo que equivale a 20 millones de rebanadas por día y 292000 toneladas al año, contribuyendo a 584000 toneladas de emisiones de CO_2 (Narisetty, y otros, 2021). Según el Servicio Agrícola Exterior del Departamento de Agricultura de los Estados Unidos (USDA), en Ecuador, el consumo promedio per cápita de trigo en los años 2021 – 2022 fue de aproximadamente 45 kg, de los cuales 27 kg se destinaron a pan, 11,7 kg a pasta y 6,3 kg da panadería/galletas (Espinosa, 2021). Aunque no existe estadística específica local que cuantifique su desperdicio, el impacto es evidente en ciudades de alta demanda, como Guayaquil.

1.5.2 Pan Masa Madre

La masa madre es un agente leudante natural utilizado en la panificación que contiene una mezcla simbiótica de una o dos especies de levaduras silvestres que pertenecen a los géneros *Saccharomyces* y *kazachstania*. También se compone de hasta tres bacterias ácido-lácticas (BAL), principalmente especies del género *Lactobacillus*. Este fermento se prepara al mezclar agua y harina, dando lugar a una comunidad microbiana compleja que fermenta la masa, desarrollando aromas y sabores únicos. Las BAL predominan en concentraciones de 10^8 UFC/g, mientras que las levaduras están en una proporción de 100:1 con relación a las BAL. Por otra parte, el pH de una masa madre madura varía generalmente entre 3,7 a 4,2 (Osorio Licona, 2024).

Durante el proceso de fermentación, las BAL generan compuestos bioactivos como ácido láctico, ácido acético y exopolisacáridos que contribuyen a mejorar la digestibilidad, textura y conservación del pan. En términos de composición, el pan de masa madre presenta niveles más altos de ácidos orgánicos y mayor actividad antioxidante en comparación con panes convencionales (Osorio Licona, 2024). Estos beneficios funcionales, nutricionales y cualidades sensoriales organolépticas, combinados con un proceso de fermentación controlado, hacen del pan de masa madre un recurso ideal para su revalorización en procesos fermentativos como la producción de cerveza. Puesto que, las cepas presentes en la masa madre son capaces de fermentar la maltosa, el principal carbohidrato del mosto cervecero (Marongiu, y otros, 2015).

1.5.3 Uso de pan caducado en la producción de cerveza

La reintroducción de pan sobrante en la cadena de valor alimentaria reduce las pérdidas económicas de las panificadoras y el impacto ambiental por emisiones de carbono durante su producción y eliminación, contribuyendo a la disminución del desperdicio de alimentos. La cerveza, por sus características técnicas y flexibilidad en los procesos productivos, se presenta como un producto óptimo para aprovechar estos excedentes. El pan, compuesto principalmente por almidón (500 – 750 g/kg), azúcares (3 – 50 g/kg) y proteínas (100 – 150 g/kg), es un precursor ideal de bioproductos fermentados debido a su alto contenido en almidón es una fuente viable de azúcares fermentables. El pan utilizado en la producción de etanol alcanza un rendimiento de 350 – 370 g/kg de sustrato seco, incluso con moho, el rendimiento puede alcanzar los 240 g/kg (Coelho, Prista, & Sousa, 2024).

1.5.4 La cerveza y sus estilos

La cerveza es una bebida alcohólica elaborada por fermentación de granos de cebada u otros cereales, su proceso de fabricación fue el primer logro bioquímico de la humanidad,

cuenta con evidencia arqueológica que incluye documentos escritos, primero en Babilonia y después en Egipto desde el 8000 a.C., donde los babilónicos ya elaboraban al menos 20 estilos de cerveza. La producción a gran escala empezó originalmente en Egipto alrededor del 2500 a.C., desde allí las técnicas y procesos se expandieron a Europa. (Huxley, 2006)

A partir del siglo VI, la producción se concentra en monasterios y tabernas regentadas por la cervecera local, a lo largo de Europa. En el siglo XIV, los puntos de elaboración se desplazan a centros privados que fueron creciendo en calidad y control, debido a la creación de normas reguladoras sobre la pureza. La Revolución Industrial transformó su producción y distribución a gran escala con invenciones como el termómetro y la máquina de vapor. (Gatón, 2021) (Huxley, 2006)

Los estilos de cerveza moderna tienen sus raíces en cuatro localidades de Europa: *Pilsen*, *Munich*, Londres y *Burton-on-Trent*. Aunque el estilo *Pilsner* domina el mercado global, las *Ales* Inglesas son más populares entre cerveceros artesanales, dentro de las cuales cabe destacar dos:

Ordinary Bitter. Descendiente de IPA, creada a principios del siglo XX incorporando *Crystal Malt* a la receta para reducir los períodos de maduración y evitar sabores verdes. Presenta un aroma de lúpulo medio, con ligeras notas de malta y un toque de caramelo, su color característico es dorado pálido-cobrizo claro. Posee amargor medio-alto y espuma un poco cremosa. (Huxley, 2006)

Special o Best Bitter. Descendiente de IPA desarrollada a comienzos del siglo XX, a diferencia del estilo *Ordinary*, incorpora mayor cantidad de *Crystal Malt* para acortar la maduración. Ofrece un perfil similar con un toque extra de malta, presenta un aroma de lúpulo medio destacando notas de caramelo, con color dorado-cobrizo claro brillante y amargor medio-alto. (Huxley, 2006)

1.5.5 Términos cerveceros básicos

Los términos a continuación fueron tomados de Palmer (2006) y serán usados a lo largo del proyecto:

Ale. Tipo de cerveza elaborada con levaduras de fermentación alta (temperatura alta) lo que le da sabores frutales o especiados.

Amargor (IBU). Unidad Internacional de Amargor (*International Bitterness Units*), unidad más precisa que mide la intensidad del amargor en la cerveza, determinada por los ácidos del lúpulo.

Carbonatación. Nivel de dióxido de carbono (CO_2) presente en la cerveza, responsable de las burbujas y la sensación efervescente.

Color. Medido en SRM (*Standard Reference Method*) o EBC (*European Brewery Convention*), indica el tono de la cerveza.

Cuerpo. Sensación de densidad o peso de la cerveza en la boca, descrito como ligero, medio o robusto.

Grado alcohólico (ABV). Porcentaje de alcohol por volumen (*Alcohol by Volume*), que indica la cantidad de alcohol presente en la cerveza.

Lúpulo. Flor disponible en forma compactada/comprimida (*pellets*), tapas/tabletas (*plugs*), o enteros (*whole*). Utilizada en la elaboración de cerveza para añadir amargor, aroma y propiedades conservantes.

Malta. Cereal germinado y secado que aporta los azúcares necesarios para la fermentación y contribuye al color y sabor de la cerveza.

Mosto. Líquido azucarado que se obtiene tras la maceración y que, después de la fermentación, se convierte en cerveza.

1.5.6 Antecedentes de cerveza en base a pan

Debido al creciente interés por minimizar el desperdicio de pan, han emergido varias cervezas comerciales a nivel mundial que incorporan pan en su producción, respaldando la viabilidad técnica del presente proyecto (Gatón, 2021):

Tabla 1

Cervezas comerciales en base a pan

Cerveza	Año de lanzamiento	Descripción
Babylone	2015	Creada en Bélgica por el *Brussels Beer Project*, inspirada en las antiguas tradiciones cerveceras de Babilonia.
Toast Real Ale	2016	Creada en Reino Unido por Hackney Brewery basada en la receta del *Brussels Beer Project.*
Loafer Beer	2019	Producida por la cadena australiana *Woolworths*.
Bread Ale	2020	Producida por *Crust Brewing* en Singapur.

Nota. Información obtenida de (Díez, 2020)

1.5.7 Proceso estandarizado para elaborar cerveza

El proceso cervecero tradicional incluye las siguientes etapas (Palmer, 2006):

Recepción. Inspección de la malta para asegurar la ausencia de contaminantes.

Molienda. Los granos de cebada malteada se muelen para romper la cáscara y liberar los almidones necesarios para la fermentación.

Maceración. La malta molida se mezcla con agua caliente para convertir almidones en azúcares fermentables. Esta mezcla, conocida como mosto, se mantiene a temperaturas y tiempos específicos para optimizar la conversión. Se ajusta el pH entre 5,2 y 5,4.

Filtración y Lavado. El mosto se filtra para separar los sólidos restantes y se lava con agua caliente para extraer la mayor cantidad de azúcares fermentables, obteniendo un mosto con menor turbidez.

Cocción. El mosto filtrado se hierve y se añade lúpulos, los cuales aportan amargor, sabor y propiedades antimicrobianas. El tiempo de cocción es de 45 – 90 minutos para mejorar el porcentaje de isomerización de ácidos-alfa. La cocción esteriliza el mosto y permite extraer los compuestos de los lúpulos para conseguir los sabores finales esperados según el estilo de la cerveza.

Enfriamiento. El mosto debe enfriarse rápidamente a 18°C – 32 °C antes de traspasar al recipiente de fermentación para evitar la proliferación de bacterias. Este enfriamiento provoca un golpe de frío que precipita proteínas, polifenoles y betaglucanos contribuyendo a la estabilización de la cerveza durante su almacenamiento y reduce la cantidad de turbidez en el producto final.

Fermentación. Se añaden levaduras al mosto enfriado para transformar los azúcares simples, como glucosa y maltosa, en alcohol etílico y CO_2. Este proceso controlado a 18°C dura de una a dos semanas según el tipo de cerveza.

Maduración. La cerveza se almacena en tanques de maduración a 4°C para equilibrar su sabor y mejorar la claridad eliminando cualquier residuo. Esta etapa dura algunos días hasta varias semanas según el estilo.

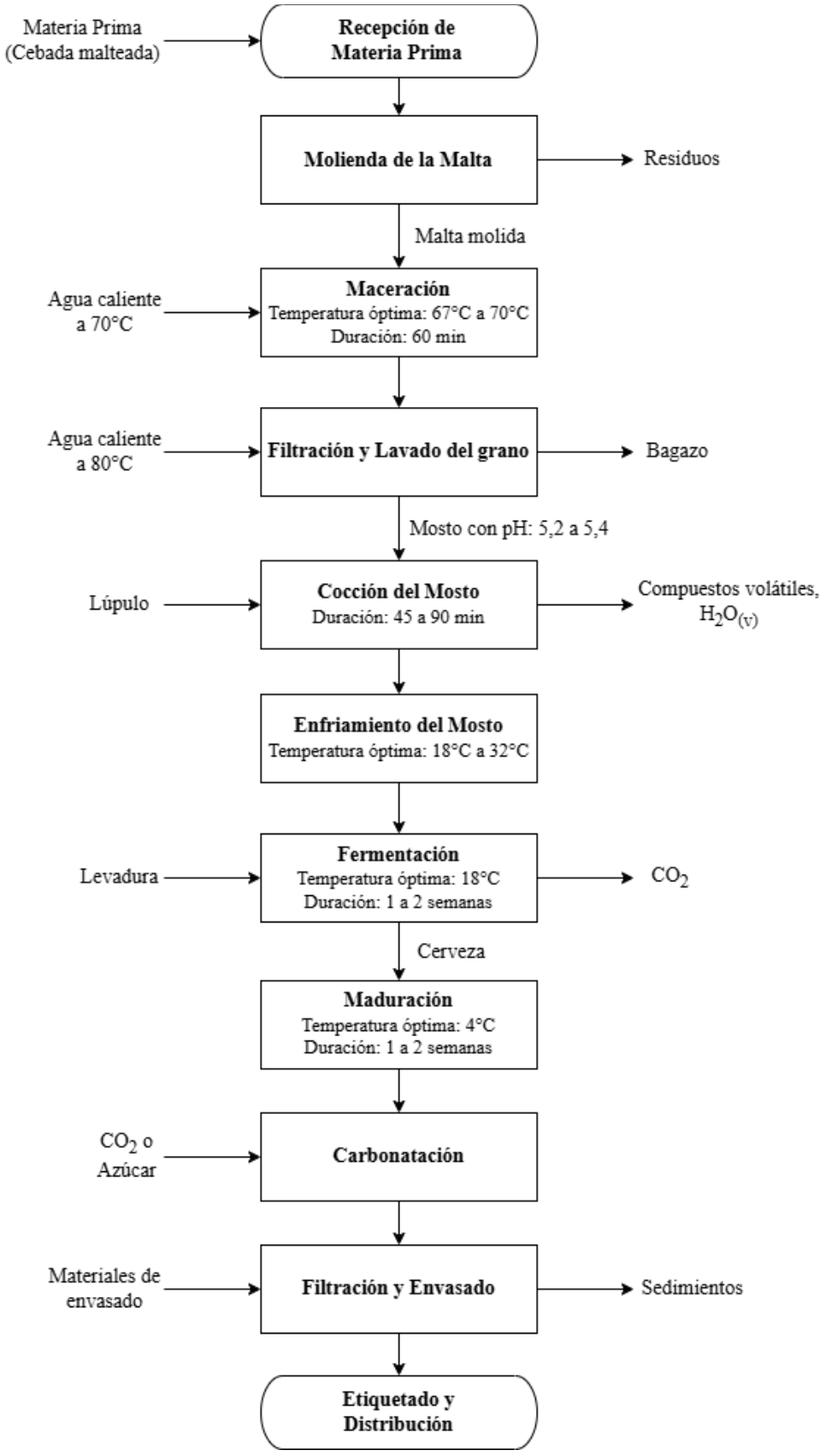
Carbonatación. Se adiciona azúcar o CO_2 para generar la efervescencia deseada en la bebida.

Filtración y Embotellado. La cerveza se filtra nuevamente para eliminar las partículas restantes y se embotella o envasa en frío.

Etiquetado. Las botellas se etiquetan y quedan listas para su distribución y consumo.

Figura 1

Diagrama de Flujo de elaboración de cerveza artesanal



1.5.8 Requisitos para la producción de cerveza a partir de pan caducado

Normativa sanitaria. La producción debe cumplir estrictamente las normativas de manipulación de alimentos y bebidas alcohólicas vigentes en Ecuador, minimizando riesgos de contaminación o afectación a la salud pública al utilizar pan caducado. La planta panificadora debe implementar Buenas Prácticas de Manufactura (BPM) según las directrices del ARCSA, garantizando la seguridad e inocuidad del pan caducado como insumo seguro en la producción de cerveza.

Requisitos organolépticos. La cerveza debe cumplir estándares sensoriales que aseguren su calidad:

Apariencia. Color uniforme acorde al estilo, sin sedimentos visibles. La espuma debe formar una capa homogénea abundante, estable y de buena retención.

Aroma. Perfil de la malta debe ser agradable y armonizar con el aroma proporcionado por el lúpulo.

Sabor. El amargor debe estar equilibrado con el dulzor de la malta, sin ser excesivo.

Cuerpo y textura. Sensación adecuada según el estilo, ni demasiado acuoso o espeso.

Requisitos fisicoquímicos. La cerveza debe cumplir con los requisitos fisicoquímicos establecidos por la NTE INEN 2262: bebidas alcohólicas, cerveza y sus requisitos. De tal manera, que se garantice su aptitud para el consumo y calidad comercial en Ecuador. Los criterios específicos están detallados en la Tabla 2.

Tabla 2

Requisitos físicos y químicos establecidos por la NTE INEN 2262

Requisitos	Unidad	Mínimo	Máximo	Método de ensayo
Contenido alcohólico a 20°C	% (v/v)	1,0	10,0	NTE INEN 2322
Acides total, expresado como ácido láctico	% (m/m)	-	0,3	NTE INEN 2323
Carbonatación	Volúmenes de CO_2	2,2	3,5	NTE INEN 2324
pH	-	3,5	4,8	NTE INEN 2325
Contenido de hierro	mg/dm^3	-	0,2	NTE INEN 2326
Contenido de cobre	mg/dm^3	-	1,0	NTE INEN 2327
Contenido de zinc	mg/dm^3	-	1,0	NTE INEN 2328
Contenido de arsénico	mg/dm^3	-	0,1	NTE INEN 2329
Contenido de plomo	mg/dm^3	-	0,1	NTE INEN 2330

Nota. Datos tomas de (INEN, 2013).

Requisito de etiquetado. Para su comercialización, la cerveza debe cumplir con el Reglamento Sanitario de Etiquetado de Alimentos procesados para el consumo humano y la norma NTE INEN 1933, que regula el rotulado y requisitos de bebidas alcohólicas. La información obligatoria debe ser clara y visible para los consumidores.

1.5.9 Metodología de superficie de respuesta (MSR)

La MSR es una estrategia experimental y de análisis que permite encontrar condiciones de operación óptimas de un proceso que puede presentar problemas para obtener respuestas buscadas o mejoras, por lo que se plantea un diseño de experimentos secuenciales en una dirección adecuada hasta lograr encontrar el nivel de mejoras deseado. Este método consta de una región experimental y de operabilidad, la experimental está delimitada por los rangos de experimentación utilizados con respecto a cada variable, mientras que la de

operabilidad es el conjunto de condiciones donde el proceso puede ser operado. Es clave tener presente esta visión de las regiones, ya que el punto óptimo que interesa encontrar puede estar representado en cualquier parte de la región de operabilidad, aunque implique estar dentro o fuera de la región experimental, es decir que, a diferencia de otras metodologías que buscan el valor "ganador" dentro de un conjunto de experimentos, este se encarga de sobreponer ambas regiones y seleccionar un punto óptimo sea que este haya sido parte de los rangos experimentales propuestos o no, el cual sería la mejor combinación de valores de las variables estudiadas en toda la región de operabilidad.

La metodología de superficie de respuesta tiene tres principales aspectos: diseño, modelo y técnica de optimización, estos tres se complementan entre si con la finalidad de hallar el punto de optimización de un proceso.

Diseño. Implica el diseño de un experimento apropiado basado en lo que se conoce actualmente sobre la posible ubicación de punto óptimo.

Modelo. Comprende la ecuación matemática que relaciona la variable de respuesta con las variables de estudio planteadas en el diseño.

Optimización. Formado por técnicas matemáticas que funcionan para obtener la información correcta sobre el punto óptimo que tiene el modelo.

Capítulo 2

2.1 Metodología

2.2 Diseño experimental

El diseño conceptual del proceso de producción de cerveza a partir de pan masa madre blanco caducado se basó en la adaptación del proceso cervecero tradicional, considerando el pan como sustituto parcial de la malta, optimizando su integración en las etapas de maceración y fermentación. La metodología inició con un diseño experimental central compuesto circunscripto (DCCC) que permitió evaluar los efectos combinados de dos factores principales: cantidad de pan y cantidad de malta, identificando las condiciones óptimas para maximizar la calidad del producto final.

2.2.1 Justificación de la metodología y diseño experimental seleccionado

La selección del diseño experimental DCCC se fundamenta en su capacidad para modelar interacciones complejas y efectos curvilíneos entre las variables independientes y la variable dependiente representadas en la Tabla 3, permitiendo analizar la relación decreciente o saturante del grado alcohólico con diferentes proporciones específicas de insumos fermentables.

Tabla 3

Variables del diseño experimental

Variable Dependiente	Variables Independientes
Grado de alcohol	Cantidad de pan masa madre blanco Cantidad de malta

Esta elección se respaldó por estudios recientes que demuestran la eficacia para optimizar procesos de fermentación y revalorizar residuos alimentarios. Ortiz et al. (2023) destacan que los procesos fermentativos aplicados a residuos, como pan o subproductos industriales, son clave en la economía circular al generar productos de alto valor agregado y

minimizar el impacto ambiental. Por su parte, Faria et al. (2023) subrayan que el uso de diseños experimentales robustos, como el DCCC, permite optimizar las condiciones operativas y obtener los mejores rendimientos en la producción de bioproductos a partir de residuos agroalimentarios. Además, Ma et al. (2018) demuestran que estos diseños factoriales y compuestos permite evaluar múltiples variables para identificar interacciones y efectos no lineales, mejorando la eficiencia de procesos biotecnológicos.

2.2.2 Número de experimentos

El número de experimentos del DCCC se determinó con la ecuación (2. *1*).

$$N = 2^k + 2k + n_c \quad (2.\ 1)$$

Donde:

N, número de experimentos

k, número de factores

2^k, puntos factoriales

2k, puntos axiales

n_c, número de repeticiones en el punto central

Las dos variables independientes se establecieron como puntos factoriales y se incluyó un punto central con una repetición, dando un total de 9 experimentos distribuidos de la siguiente manera:

Puntos Factoriales. 4 ensayos en las esquinas del espacio experimental, combinaciones extremas de niveles mínimo y máximo de ambos factores.

Puntos Axiales. 4 experimentos fuera del rango definido por los niveles mínimo y máximo, permitiendo identificar efectos curvilíneos.

Punto Central. 1 experimento en el punto central para evaluar la reproducibilidad y detectar interacciones no lineales.

2.2.3 Rangos y niveles experimentales

En el diseño experimental se consideraron tres niveles y se establecieron rangos representativos para cada insumo, con la finalidad de analizar el efecto individual y combinado de ambos factores sobre las características del producto final, asegurando una formulación balanceada del mosto y técnicamente viable para la producción.

Nivel mínimo. Menor proporción (30% pan, 30% malta).

Nivel central. (50% pan, 50% malta), condiciones intermedias.

Nivel máximo. Mayor proporción (70% pan, 70% malta).

Rango de los puntos axiales. Se calculó aplicando la ecuación (2. 2), depende de un parámetro alfa (α), que define la distancia de estos puntos respecto al centro del diseño.

$$Valor\ axial = Nivel\ central\ \pm \left(\alpha \times \frac{rango\ del\ factor}{2}\right) \quad (2.\ 2)$$

Para un diseño circunscripto, α se calcula con la ecuación (2. 3).

$$\alpha = \sqrt{Número\ de\ factores} \quad (2.\ 3)$$

En este caso, el nivel central fue 0,5 y el rango total de cada factor fue 0,40, entonces:

Punto axial mínimo: 0,21715

Punto axial máximo: 0,78284

2.3 Población, muestra y lugar de estudio

El pan masa madre blanco caducado utilizado provino de una planta panificadora ubicada al norte de Guayaquil, que era destinado a ser desechado por no cumplir con los estándares de venta. Los demás ingredientes enlistados en la Tabla 7 se obtuvieron de proveedores comerciales para cervecerías artesanales.

El estudio se realizó en el laboratorio de procesos industriales de la Universidad Politécnica Salesiana (UPS) que dispone de un equipo para elaboración de cerveza artesanal mostrado en la Figura 2, y los análisis fisicoquímicos se ejecutaron en el Laboratorio

consolidado de Síntesis y Caracterización Química de FCMN y en el Laboratorio de Suelos y Nutrición Vegetal de FCV, ambos de ESPOL.

Figura 2

Equipo cervecero artesanal de la UPS

2.4 Cantidad de insumos fermentables

La cantidad de insumos fermentables varían según el porcentaje definido por el DCCC, como se muestra en la Tabla 6. Para ello, se establecieron previamente los parámetros esperados de la cerveza por lote, detallados en la Tabla 4.

Tabla 4

Parámetros esperados del proceso cervecero por lote

Parámetros	**Datos**
Volumen final de mosto por lote	12 L
Grado alcohólico a 20°C	4
Densidad inicial de fermentación (Di)	1045 kg/m^3
Densidad del H_2O a 4°C (D_{H_2O})	1000 kg/m^3
Punto de densidad	45
IBU	25 – 35
Índice de color SRM	8 – 14
Rendimiento de malta *Pale*	81%*
Rendimiento de extracción	70%*

Nota. *Datos de rendimientos obtenidos de Matemática de la cerveza (2018).

Contenido de azúcar total. Se calculó utilizando la ecuación (2. *4*).

$$Azúcar\ Total = \frac{Punto\ de\ Densidad}{4} \times 10 \times Volumen\ final \quad (2.\ 4)$$

$$Punto\ de\ Densidad = Di - D_{H_2O\ a\ 4°C} \quad (2.\ 5)$$

Como resultado, se requirieron 1350 g de azúcar para el proceso cervecero, distribuidos según los porcentajes correspondientes a cada factor en cada experimento.

2.4.1 Cantidad de cebada malteada

Se consideró el extracto potencial de la malta, en otras palabras, el contenido de azúcar extraíble de la malta. En este caso, se empleó malta *Pale* cuyo rendimiento máximo es del 81%. Además, se contempló el rendimiento de extracción, que en procesos promedios alcanza el 70% del azúcar disponible (Oddone, 2018).

$$Cantidad\ de\ malta = \frac{Azúcar\ total \times \%\ de\ malta}{Rendimiento\ de\ la\ malta\ \times Rendimiento\ de\ extracción} \quad (2.\ 6)$$

2.4.2 Cantidad de pan masa madre blanco caducado.

Cantidad de almidón. Se estimó a partir de los valores nutricionales del pan presentados en la Tabla 5, una porción de 100 g contiene 44 g de carbohidratos totales. Aplicando la ecuación (2. 7), se determinó que aproximadamente 41 g corresponden a almidón por porción.

$$Cantidad\ de\ almidón = Carbohidratos\ totales - Fibra \quad (2.\ 7)$$

Tabla 5

Datos del pan masa madre blanco

Parámetro	Datos
Tamaño de porción	100 g
Carbohidratos totales	44 g
Fibra	3 g

Nota. Información nutricional obtenida del empaque del producto.

Rendimiento del almidón en el pan. Se pesaron 100 g de muestra triturada de pan recién horneado, se colocó en una estufa a 103°C durante aproximadamente 6 horas hasta que el peso se mantuvo constante en 51,2685 g. Sustituyendo los valores en la ecuación (2. 8) se obtuvo un rendimiento de almidón en peso seco de 79,97% ≈ 80%.

$$Rendimiento\ de\ almidón = \frac{Cantidad\ de\ almidón}{Peso\ de\ la\ muestra\ seca} \times 100 \qquad (2.\ 8)$$

Posteriormente, se determinó la cantidad de pan empleando con la ecuación (2. 9).

$$Cant.de\ pan = \frac{Azúcar\ total \times \%\ de\ pan \times Tamaño\ de\ porción}{Rend.del\ almidón\ \times Rend.de\ extracción \times Cant.de\ almidón\ por\ porción} \qquad (2.\ 9)$$

2.5 Distribución de los experimentos

La Tabla 6 muestra las combinaciones de los factores definidas por el diseño experimental y la cuantificación de las cantidades de los insumos de la sección 2.4.

Tabla 6

Distribución de los experimentos del DCCC

Ensayo	Porcentaje de pan (%)	Porcentaje de Malta (%)	Cantidad de pan masa madre blanco caducado (g)	Cantidad de malta (g)
Lote 1	30	30	1763,94	714,29
Lote 2	70	30	4115,85	714,29
Lote 3	30	70	1763,94	1666,67
Lote 4	70	70	4115,85	1666,67
Lote 5	21,715	50	1276,80	1190,48
Lote 6	78,284	50	4602,94	1190,48
Lote 7	50	21,715	2939,90	517,02
Lote 8	50	78,284	2939,90	1863,90
Lote 9	50	50	2939,90	1190,48

2.6 Aseguramiento de la calidad de los datos

Al incluir puntos factoriales, axiales y centrales, el diseño exploró exhaustivamente el espacio experimental con un número eficiente de ensayos, asegurando una representación precisa de las relaciones entre las variables sin requerir un número excesivo de experimentos.

Respecto al MSR, que es la técnica de optimización utilizada, la validez de los datos obtenidos mediante el método radica en que el modelo debe estar debidamente ajustado para explorar la superficie descrita y encontrar la combinación de valores en las variables que dan como resultado el punto óptimo de respuesta, para ello se realizó un análisis canónico el cual consiste en la determinación de un punto estacionario sobre el cual el plano tangente tiene una pendiente igual a cero y es el candidato a óptimo.

2.7 Ingredientes, materiales, equipos para la obtención de la cerveza estilo *bitter*

2.7.1 Ingredientes

Los ingredientes empleados en la formulación del mosto para obtener un volumen final aproximado de 12 L por lote se describen en la Tabla 7.

Tabla 7

Ingredientes para la formulación del mosto

Ingredientes	Cantidad
Agua potable para maceración	14 L
Agua potable para lavado	3 L
Levadura *Dry Heritage English Ale*. Marca *Pinnacle*	11,5 g
Lúpulo *East Kent Golding*	25 g
Pan masa madre blanco caducado	*
Malta *Pale Ale*. Marca *Castle Malting*	*

Nota. *Cantidades según las combinaciones experimentales definidas por el DCCC presentados en la Tabla 6.

2.7.2 Materiales y reactivos

Los materiales y reactivos usados en cada lote se detallan en la Tabla 8.

Tabla 8

Materiales y reactivos para la elaboración de la cerveza

Materiales	**Capacidad**	**Cantidad**
Vaso de precipitación	100 mL	1 UND
Vaso de precipitación	1000 mL	1 UND
Bureta de vidrio	50 mL	1 UND
Espátula	-	1 UND
Cuchillo de sierra	-	1 UND
Recipiente de plástico	50 L	1 UND
Doble fondo para olla de maceración	-	1 UND
Cedazo de acero inoxidable	-	2 UND
Paleta de acero inoxidable	-	2 UND
Malla para lúpulo	-	1 UND
Manguera mallada	-	3 UND
Barril fermentador	20 L	1 UND
Airlock de 3 piezas americano	-	1 UND
Densímetro. Marca *Chase*	-	1 UND
Bureta de vidrio	500 mL	1 UND
Botella de vidrio ámbar	330 mL	20 UND
Tapa *twist off bronce*	-	20 UND
Balde plástico	20 L	1 UND
Reactivos		
Agua destilada		
Citrosan		
Sanitizante de Frutas		

2.7.3 Equipos

Los equipos utilizados en el desarrollo del producto se mencionan en la Tabla 9.

Tabla 9

Equipos para la elaboración de la cerveza

Equipos	Capacidad	Cantidad
Licuadora. Marca *TOPLINE*	1500 mL	1 UND
Termómetro digital. Marca *Checktemp*	-50 a 150 °C Presión±0,2°C	1 UND
Báscula de banco. Marca *OHAUS*	Máx. 60 lb (30 kg)	1 UND
Molino de doble rodillo. Marca *BREWFERM*	50 kg/h	1 UND
Olla de acero inoxidable con termómetro y válvula. Marca *Beerland*	20 L	3 UND
Intercambiador de calor de placas. Marca *Blichmann Therminator*	10 gpm, 58°F entrada de agua. 2 gpm, 68°F salida de mosto (1,040 S.G.)	1 UND
Bomba de preparación de cerveza. Marca *Blichmann RipTide*	3500 rpm, 115 V, 50/60 Hz, 1/20 HP	1 UND
Bomba de recirculación de agua	85 W, $Q_{máx.}$: 4000 L/h	1 UND
Refractómetro	0 – 90% Brix	1 UND
Chapadora de botellas de banco	-	1 UND

2.8 Procedimiento para la obtención de la cerveza *bitter*

La producción de la cerveza *bitter* a partir de pan masa madre blanco caducado requirió múltiples etapas detalladas a continuación:

2.8.1 Limpieza y desinfección de materiales y equipos

Se preparó una solución desinfectante en un vaso de precipitación con 1 L de agua destilada y 8 mL de citrosan para limpiar los materiales y equipos y así reducir contaminantes a niveles manejables.

Figura 3

Limpieza de equipos y materiales

2.8.2 Recepción y preparación de los insumos fermentables.

El pan masa madre blanco caducado y malta se inspeccionaron para garantizar la ausencia de contaminantes. Los granos de malta se molieron utilizando un molino de doble rodillo para romper la cáscara y liberar los azúcares. En cuanto al pan, se retiró la corteza para reducir la incorporación de sal en la fermentación, considerando que la sal se concentra en la superficie debido a la rápida evaporación del agua durante su cocción, lo cual afecta el sabor de la cerveza. Después el pan se trituró en licuadora para obtener partículas finas asegurando una integración eficiente y mejorar la extracción en la maceración. Finalmente, se pesaron en una báscula calibrada las cantidades de pan triturado y malta molida según las combinaciones experimentales definidas por el DCCC.

Figura 4

Trituración de pan masa madre blanco

Figura 5

Molienda de la cebada malteada

2.8.3 Maceración

En cada lote se mezclaron la malta molida y el pan triturado con 14 L agua potable a 75°C en una olla con doble fondo. Se controló que la temperatura del mosto se mantuviera en un rango de 68°C a 70°C durante 60 minutos para acelerar la actividad enzimática promoviendo la conversión de almidones en azúcares fermentables.

Figura 6

Proceso de maceración

a) b) c)

Nota. a) Doble fondo para olla de maceración. b) Incorporación de insumos fermentables a la olla de maceración. c) Control de la temperatura del mosto.

2.8.4 Filtración y lavado

El mosto fermentable se filtró con dos tamices para eliminar residuos sólidos que traspasaron el doble fondo. Se lavó el bagazo con 3 L de agua potable a 80°C para extraer la mayor cantidad de azúcares fermentables. Al final de este proceso se obtuvo aproximadamente 16 L de mosto con menor turbidez.

Figura 7

Filtración y lavado del mosto

a) b)

Nota. a) Filtración del mosto. b) Lavado del bagazo.

2.8.5 Cocción y adición de lúpulo

El mosto filtrado se llevó a ebullición y se añadieron 25 g de lúpulo EKG al comienzo del hervor, contiene 4,5 – 6,5% de ácidos alfa aportando amargor moderado y aroma especiado/floral a la cerveza (Palmer, 2006). Se revolvió el mosto cada 5 minutos con una paleta para mejorar la extracción de los lúpulos y se controló la formación de espuma para evitar derrames. La cocción varió para cada lote entre 70 – 90 minutos hasta obtener 12 L de volumen final.

Figura 8

Cocción del mosto y adición de lúpulos

a) b)

Nota. a) Cocción del mosto. b) Lúpulos EKG

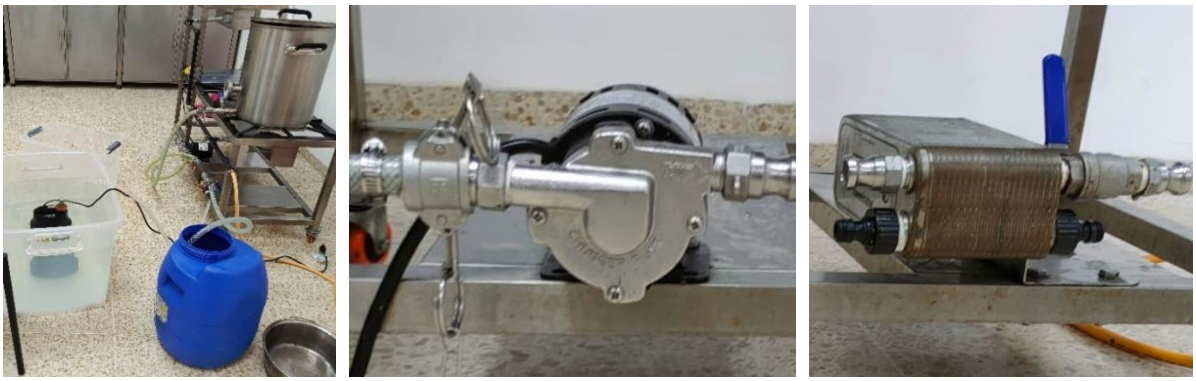
2.8.6 Enfriamiento y fermentación

Antes de traspasar el mosto al fermentador, se enfrió a 25°C – 32°C con un intercambiador de calor de placas, utilizando una bomba y mangueras desinfectadas en su interior para evitar la proliferación de bacterias, provocando una recirculación en la misma olla de cocción. Una vez colocado el mosto enfriado en el barril, se añadieron 11,5 g de levadura tipo *Ale* que aporta aromas ligeramente afrutados y de ésteres, con un toque dulce (AB MAURI, 2023). Luego se insertó inmediatamente el *airlock*. La fermentación se realizó a 18°C durante 7 días en una cámara de enfriamiento, debido que este tipo de levadura se inactiva por debajo de los 12°C (Palmer, 2006).

Figura 9

Sistema de refrigeración

a) b) c)



Nota. a) Sistema de refigeración b) Bomba marca *Blichmann RipTide* c) Intercambiador de calor de placas marca *Blichmann Therminator*.

Figura 10

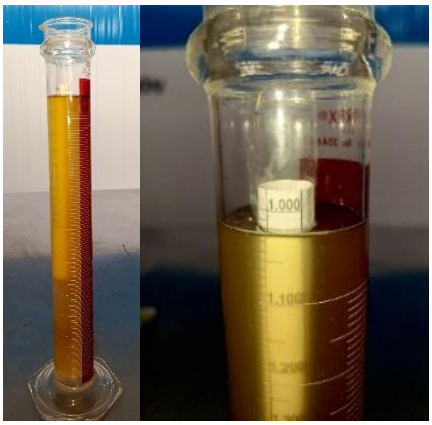
Barriles de fermentación en la cámara de enfriamiento

2.8.7 Medición de densidad

El control de la densidad se realizó cada dos días hasta que el valor sea constante para monitorear la evolución de la fermentación. Para ello, se tomaron muestras de 350 mL en una bureta y se midió con un densímetro. La disminución progresiva indicó la conversión de azúcares en alcohol.

Figura 11

Medición de densidad del mosto



2.8.8 Limpieza y desinfección de botellas

Cada lote requirió aproximadamente 20 botellas de vidrio. Se preparó una solución desinfectante llenando un balde plástico con 12 L de agua y se agregó 4 cucharadas de sanitizantes de frutas, luego se sumergieron las botellas y tapas durante 5 minutos.

Figura 12

Desinfección de botellas

2.8.9 Carbonatación y envasado

Antes de envasar, se añadió 2 g de azúcar a cada botella para provocar la carbonatación deseada en la cerveza. Se llenó cuidadosamente las botellas hasta el cuello y se taparon con ayuda de una chapadora. El almacenaje de las botellas fue un lugar templado a

18°C. La carbonatación requirió de aproximadamente 2 semanas y se obtuvo una capa fina de levadura en el fondo de las botellas.

Figura 13

Carbonatación y envasado de la cerveza

a) b) c)

Nota. a) Adicción de 2g azúcar a cada botella. b) Llenado de las botellas. c) Colocación de tapas.

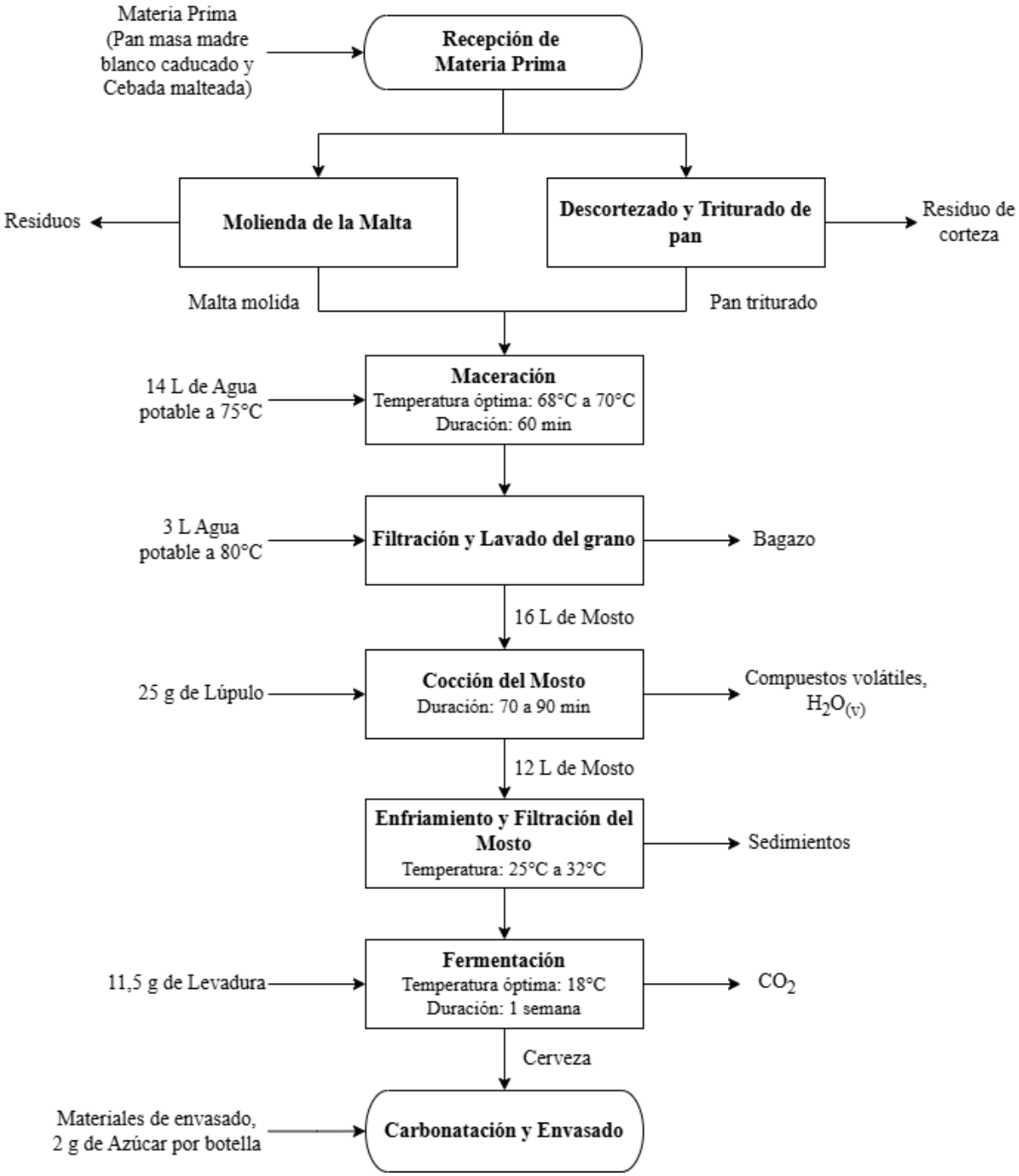
Figura 14

Producto final de un lote

2.8.10 Diagrama de flujo del proceso cervecero partir de pan

Figura 15

Diagrama de Fujo: Producción de cerveza a partir de pan



2.9 Métodos de Análisis fisicoquímicos

2.9.1 Determinación del contenido de alcohol

Para la determinación del contenido alcohólico, se empleó el método volumétrico por duplicado propuesto por la norma NTE INEN 2322. Se colocó una muestra de 100 mL de cerveza desgasificada a 25°C en un balón de destilación, se añadió 50 mL de agua y se homogenizó la mezcla. Se conectó el balón al sistema de destilación y se procede a destilar en un rango de 78°C y 82°C durante 60 minutos. Al finalizar, se midió el volumen obtenido del destilado y se procedió a calcular su gravedad específica acuerdo con el método picnométrico.

Método picnométrico. Pesar el picnómetro vacío previamente lavado y secado en una estufa a 100°C por una hora. Luego llenar el picnómetro con agua destilada a 20°C y colocar en un baño atemperador a 20°C por media hora, secar cuidadosamente y pesar. Posterior, verter el agua y llenar con el destilado obtenido completando el volumen con agua destilada, realizar el baño por media hora para ajustar la temperatura a 20°C, secar y pesar. Determinar su gravedad específica a 20°C/20°C aplicando la ecuación (2. 10). El porcentaje de alcohol en volumen se lee en el Apéndice B a partir de la gravedad específica del destilado.

$$Gravedad\ específica\ \frac{20°C}{20°C} = \frac{m_c - m_o}{m_a - m_o} \qquad (2.\ 10)$$

Donde:

m_o, masa del picnómetro vacío

m_c, masa del picnómetro con muestra a 20°C

m_a, masa del picnómetro con agua destilada a 20°C

Figura 16

Sistema de destilación simple

2.9.2 Determinación de acidez

Para la determinación de acidez total como porcentaje de ácido láctico, se aplicó el método de titulación con fenolftaleína por duplicado propuesta por la norma NTE INEN 2323. Se llevó 250 mL de agua destilada a ebullición en un vaso de precipitación de 500 mL y se mantuvo durante 2 minutos. Posteriormente, se añadió 24 mL de cerveza desgasificada continuando el calentamiento por un minuto. Terminado el calentamiento, se agitó la muestra por unos 5 segundos y se dejó enfriar a temperatura ambiente, seguidamente se añadió 0,5 mL del indicador fenolftaleína. Finalmente, se tituló con hidróxido de sodio 0,1 N hasta que la solución cambió a un color rosado pálido. Se registró el volumen consumido de valorante y se aplicó la ecuación (2. 11) para calcular la acidez total.

$$Acidez\ Total = \frac{V_{NaOH} \times 10}{V_m \times Y_s \times 0{,}09} \qquad (2.\ 11)$$

Donde:

V_{NaOH}, volumen de hidróxido de sodio 0,1 N (mL)

V_m, volumen de la muestra de cerveza (mL)

Y_s, gravedad específica de la cerveza a 20°C

Figura 17

Determinación de acidez por titulación

a) b) c)

Nota. a) Ebullición de la muestra. b) Titulación con NaOH 0,1N. c) Muestras neutralizadas tras titulación.

2.9.3 Determinación de pH

Para la determinación de pH se empleó el método potenciométrico por duplicado según la norma NTE INEN 2325. Se filtró una muestra de 100 mL de cerveza desgasificada a través de papel filtro, se colocó en un vaso de precipitación y se enfrió a 20°C. A continuación, se limpió el electrodo del potenciómetro con agua destilada y se secó con papel absorbente. Para medir el pH se introdujo el electrodo en la muestra evitando tocar las paredes del vaso, se lee el valor de pH que refleja el equipo. El pH de la cerveza se obtuvo promediando los valores mediante la ecuación (2. 12).

$$\overline{pH} = \frac{pH_1 + pH_2}{2} \qquad (2.\ 12)$$

Donde:

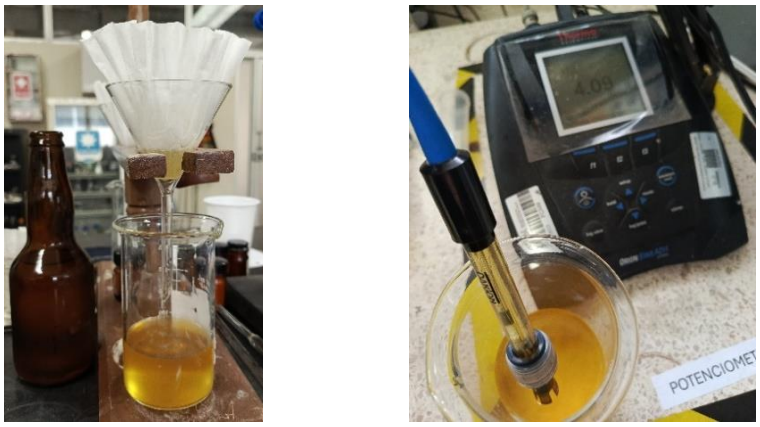
$\overline{pH}$, pH promedio de la muestra analizada

pH_n, pH medido, n = 1, 2

Figura 18

Determinación potenciométrica de pH

a) b)



Nota. a) Filtración de cerveza. b) Lectura de pH con potenciómetro.

2.9.4 Determinación de contenido de hierro, cobre y zinc

Para la determinar la presencia de hierro, cobre y zinc en la cerveza se utilizó el método de espectrometría de emisión atómica con plasma de acoplamiento inductivo (ICP-OES) por triplicado, el cual es una técnica analítica que identifica y cuantifica distintos elementos de la tabla periódica. (Barzallo, Vera, Gavin, & Lazo, 2021)

Digestión de la muestra. Se colocaron 5 mL de cerveza previamente desgasificada en un crisol de porcelana de 50 mL, se colocó en una plancha de calentamiento a 180°C hasta que se observe completamente seca. Luego de que se enfríe se añadió 5 mL de ácido nítrico concentrado, para diluir el contenido orgánico, y se lo llevó de nuevo a la plancha de calentamiento hasta que se elimine la gran parte de residuos de ácido nítrico. Se introdujo el crisol en la mufla, se ajustó la temperatura hasta los 375°C y se la mantuvo hasta que finalice la emanación de humos. Seguidamente, se elevó la temperatura hasta los 450°C permaneciendo en este valor durante 1 hora y 30 minutos, seguidamente se la retiró de la mufla y se dejó enfriar a temperatura ambiente. El proceso de digestión requirió una segunda calcinación para remover residuos de carbón que habían quedado en el crisol, para ello se agregó 1 mL de una solución ácido nítrico-agua en relación 1:1 a la muestra fría y se colocó

nuevamente en la mufla a 450°C durante 10 minutos para finalmente diluir el material calcinado en una proporción de 2 mL de ácido clorhídrico 8M y 8 mL de agua destilada. (INEN, 2002)

El proceso de digestión se realizó por triplicado usando tres botellas diferentes para descartar sesgo experimental y calcular un resultado promedio entre ellas, también se preparó un blanco en donde se llevó a cabo el mismo proceso, pero a una muestra de agua destilada para comparar los resultados obtenidos, tal como se puede observar en la Figura 19.

Figura 19

Digestión de muestras de cerveza

a) b) c)

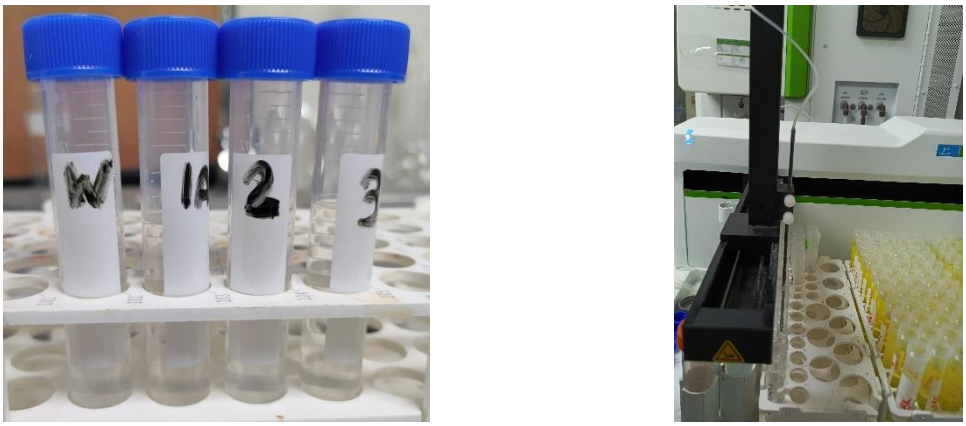
Nota. a) Ebullición de las muestras y el blanco. b) Descomposición de compuestos orgánicos con HNO_3 c) Muestras después del secado en la mufla.

Lectura de las trazas de metales en la muestra. Se utilizó un espectrofotómetro de emisión atómica-ICP marca *Perkin Elmer*, el cual fue previamente calibrado con soluciones estándar correspondientes a los metales que se requieren analizar. Se colocó la muestra diluida con ácido clorhídrico en tubos de ensayo de plástico de 15 mL (Figura 20) y se ingresó al sistema el peso de la muestra utilizada para que el quipo reporte la cantidad de metales por cantidad de muestra en ppm (mg/Kg). Una vez iniciado el proceso de lectura se obtienen los datos de manera simultánea de las muestras analizadas.

Figura 20

Determinación de metales

a) b)



Nota. a) Muestras en tubos Falcon. b) Lectura de las muestras en el espectrofotómetro de emisión atómica-ICP marca *Perkin Elmer*.

2.9.5 Determinación de fenoles

Para la determinación de fenoles totales se aplicó el método del reactivo de Folin-Ciocalteu (García Martinez, Fernández Segovia, & Fuentes López).

Preparación de la curva estándar de ácido gálico. A partir de una solución madre de ácido gálico de 1000 mg/L, se prepararon 7 soluciones patrón de 10 mL en concentraciones crecientes indicadas en la Tabla 10. Las soluciones se colocaron en tubos de ensayo rotulados y se agitaron mediante un vortex a 2500 rpm durante 5 minutos, y se refrigeraron protegidas por completo de la luz.

Tabla 10

Curva patrón de ácido gálico preparada a partir de una solución de 1000 mg/L

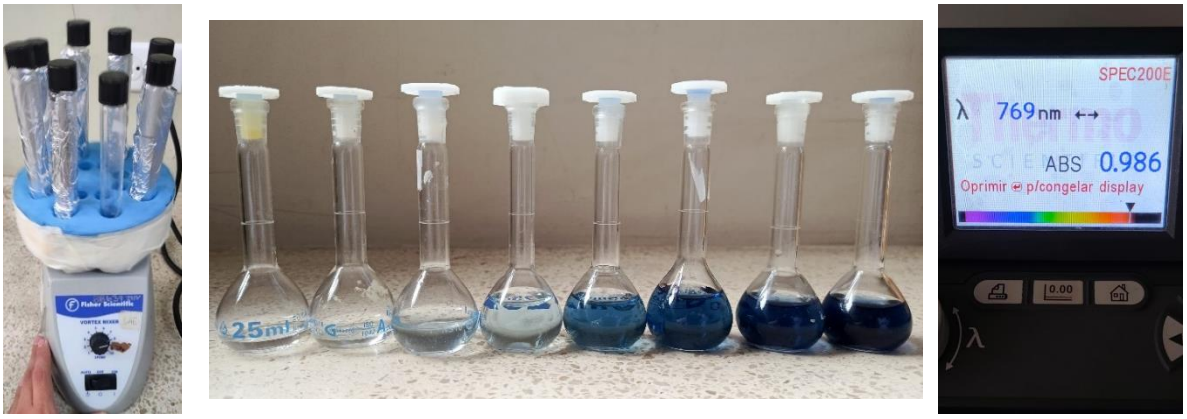
Reactivos	**Concentración (mg/L) de la curva patrón de ácido gálico**							
	0	**20**	**50**	**100**	**200**	**300**	**400**	**500**
Ácido gálico (mL)	0	0,2	0,5	1	2	3	4	5
Agua (mL)	10	9,8	9,5	9	8	7	6	5

Luego, se tomó 250 µL de cada solución patrón de ácido gálico, incluyendo la disolución de 0 ppm, se colocaron en matraces aforados de 25 mL, añadiendo 15 mL de agua destilada y 1,25 mL del reactivo de Folin-Cioalteau, homogeneizando para dejar reposar 8 minutos a oscuras. Terminado el tiempo de reposo se adicionó 6 mL de carbonato sódico al 7,5% m/v para asegurar un pH básico de 10 y favorecer la reacción, se aforó hasta los 25 mL con agua destilada, se agitaron los matraces y se incubó en oscuridad a temperatura ambiente durante 2 horas para generar el color azul característico. Finalmente se midió la absorbancia a 769 nm utilizando un espectrofotómetro UV-Visible marca *Thermo Scientific*.

Figura 21

Preparación de la curva estándar de ácido gálico

a) b) c)



Nota. a) Homogenización de soluciones estándar con Vortex marca *Fisher Scientific*. b) Colorimetría obtenida en soluciones estándar de ácido gálico. c) Lectura de absorbancia en espectrofotómetro UV-Visible marca *Thermo Scientific*.

Preparación de extracto de polifenoles de la muestra de cerveza. Se diluyó la cerveza desgasificada con metanol puro en relación 1:2 en dos tubos Falcon. La mezcla se homogeneizó en un vortex a 2500 rpm durante 5 minutos y se centrifugó a 4000 rpm durante 15 minutos a 10°C para recuperar el sobrenadante.

Figura 22

Extracción de polifenoles de la muestra de cerveza

a) b) c)

Nota. a) Homogenización de muestras con Vortex marca *Fisher Scientific* b) Centrifugación de muestras. c) Tubos Falcon con el extracto de polifenoles.

Determinación de polifenoles en la muestra de cerveza.

Se colocó 250 µL del sobrenadante en 6 matraces aforados de 25 mL. A 3 de estos matraces se agregó 2 mL de la disolución patrón de ácido gálico a 20 ppm para usar como control positivo y verificar la consistencia de los resultados. A continuación, se siguió el mismo procedimiento que los patrones; se añadió 15 mL de agua destilada y 1,25 mL del reactivo de Folin-Cioalteau, se dejó reposar 8 minutos a oscuras. Se incorporó 6 mL de carbonato sódico y se incubó durante el mismo tiempo y a las mismas condiciones. Se leyó la absorbancia de las muestras a 769 nm en el espectrofotómetro UV-Visible marca *Thermo Scientific.*

Figura 23

Determinación de fenoles usando el reactivo de Folin-Ciocalteu

a) b)

Nota. a) Colorimetría obtenida en las muestras. b) Lectura de absorbancia en espectrofotómetro UV-Visible marca *Thermo Scientific*.

2.9.6 Determinación de actividad antioxidante

Para determinar la capacidad antioxidante en la cerveza se aplicó el método de FRAP, que cuantifica la capacidad reductora de la muestra (Moura Rufino, et al., 2006). Se prepararon las siguientes soluciones en ausencia de luz para evitar oxidación: 100 mL de metanol-agua (50%), 10 mL de ácido clorhídrico (40 mM), 100 mL de cloruro férrico (20 mM), 100 mL de ácido ascórbico (1000 ppm), 1 L de una solución tampón de acetato (0,3 M) y 3 mL de la solución TPTZ (10 mM).

Posteriormente, se preparó 50 mL de la solución del reactivo FRAP (10 mM), mezclando 25 mL de la solución tampón de acetato, 2,5 mL de la solución de cloruro férrico y 2,5 mL de la solución TPTZ, manteniendo el procedimiento a oscuras, sabiendo que el tiempo disponible es instantáneo.

Luego se realizó la curva patrón preparando 7 soluciones en tubos de ensayo rotulados, donde se mezcló la solución de ácido ascórbico y metanol en diferentes concentraciones (Tabla 11).

Tabla 11

Curva patrón de ácido ascórbico preparada a partir de una solución de 1000 mg/L

Reactivos	Concentración (mg/L) de la curva patrón de ácido ascórbico						
	0	**50**	**100**	**200**	**300**	**400**	**500**
Ácido ascórbico (mL)	0	0,5	1	2	3	4	5
Metanol (mL)	10	9,5	9	8	7	6	5

En una tercera etapa, se preparó el extracto de la muestra de cerveza, mezclando la bebida desgasificada con solución de metanol-agua, se homogenizó en dos tubos Falcon usando un agitador vortex a 2500 rpm durante 5 minutos, y se centrifugó a 4000 rpm durante 15 minutos a 10 °C para recuperar el sobrenadante. Finalmente, a 10 tubos de ensayo rotulados, se añadió 1,8 mL del reactivo de FRAP y 0,2 mL de agua destilada. A los primeros 7 tubos, se añadió adicionalmente 40 µL de las soluciones patrón (Tabla 11), en los siguientes 3 tubos se adicionaron 40 µL del sobrenadante recuperado después de la centrifugación. Para culminar, los tubos se colocaron en baño María a 37°C durante 10 minutos, y se midió la absorbancia a 597 nm en el espectrofotómetro UV-Visible marca *Thermo Scientific*.

Figura 24

Determinación de actividad antioxidante

a) b)

Nota. a) Baño María de las soluciones estándares y muestras. b) Colorimetría obtenida en las muestras.

2.10 Desafíos durante la experimentación

Un desafío fue la obtención constante de pan masa madre caducado, ya que su disponibilidad depende de la producción local. Para asegurar la cantidad necesaria, se estableció un acuerdo con la panificadora para garantizar su recolección. Además, se enfrentaron problemas para enfriar el mosto después de la cocción debido a los cortes de energía.

2.11 Diseño de planta a escala meso para la producción de cerveza a partir de pan

En este apartado se procedió con el diseño de planta escala meso para la producción de cerveza utilizando pan masa madre blanco caducado como sustituto parcial de la malta, considerando una producción de 1000 L de cerveza por lote.

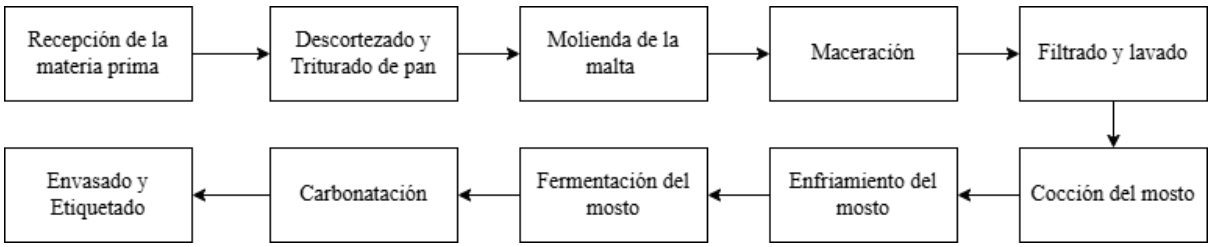
2.11.1 Software de simulación

Para diseñar de la planta se utilizó el *software* de simulación *Aspen Plus* ya que permite crear modelos de procesos químicos a diferentes escalas.

2.11.2 Diagrama de bloques del proceso

Figura 25

Diagrama de bloques del proceso cervecero a partir de pan



2.11.3 Equipos necesarios

Producir un lote a escala meso requiere de los equipos detallados en la Tabla 12.

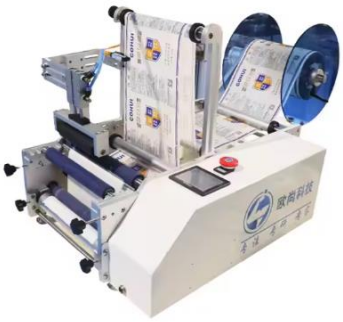
Tabla 12

Equipamiento para el diseño de planta a escala meso

Funcionalidad	Equipo
Descortezadora de pan. Equipo utilizado para retirar la corteza al pan con la finalidad de eliminar el sabor salado del mosto. Posee una sierra de acero inoxidable de 1 pulgada x 2.54 m.	**Figura 26** *Descortezadora de pan modelo DPN-2232* *Nota.* (Argencas Bolivia, 2020)
Trituradora de pan. Procesa el pan descortezado para hacer migas de pan y poder integrarlas con la cebada antes de la etapa de maceración. Esta trituradora está fabricada con acero inoxidable y tiene una capacidad de 100 kg/h.	**Figura 27** *Trituradora de pan* *Nota.* (Alibaba, 2024)
Molino para malta. Equipo con capacidad de 80-120 kg/h, material principal de construcción acero inoxidable 304. Tritura la cebada malteada, sin convertirla en polvo, para poder extraer los azúcares	**Figura 28** *Molino de malta eléctrico* *Nota.* (Alibaba, 2024)

que contiene durante el proceso de maceración.	
Macerador. Caldera de maceración de acero inoxidable 304 con una capacidad 1000 L. Se utiliza para producir el mosto manteniendo una temperatura estable de tal forma que se garantiza una conversión enzimática óptima.	**Figura 29** *Macerador* *Nota.* (Alibaba, 2024)
Filtrador de mosto. Equipo de acero inoxidable que retiene restos de pan presentes en el mosto después de la etapa de maceración y otros ingredientes durante la cocción para reducir la cantidad de sedimento al momento del embotellado.	**Figura 30** *Filtrador de mosto* *Nota.* (Alibaba, 2024)
Sistema de enfriamiento. Para enfriar el mosto se plantea un sistema de enfriamiento conformado por un intercambiador de placas a contracorriente y un enfriador de agua, permitiendo disminuir la temperatura del mosto rápidamente para realizar la inoculación con la levadura, garantizando las condiciones adecuadas para el crecimiento de microorganismos de fermentación.	**Figura 31** *Sistema de enfriamiento* *Nota.* (Alibaba, 2024)

Bomba centrífuga sanitaria. **E**laborada de acero inoxidable de una sola etapa. Este equipo sirve de transporte del mosto a las diferentes etapas de producción por lo que es de grado alimenticio y posee un flujo máximo de 120 m^3/h.	**Figura 32** *Bomba centrífuga sanitaria* *Nota. (Alibaba, 2024)*
Fermentador. Equipo de acero inoxidable 304 con capacidad de 1000 L, donde ocurre la fermentación de los azúcares extraídos dentro de un rango de 16-20°C durante 7 días. Este mismo equipo se utiliza para la etapa de maduración a 0°C durante 14 días, en este proceso la levadura cae hasta el fondo del fermentador clarificándola.	**Figura 33** *Fermentador* *Nota.* (Alibaba, 2024)
Sistema de carbonatación. Una vez completada la etapa de fermentación y maduración se procede a realizar una carbonatación forzada de la cerveza utilizando un mezclador de gas de CO_2, el cual está fabricado con acero inoxidable SUS304 con una capacidad de 1000 L/h.	**Figura 34** *Sistema de carbonatación* *Nota. (Alibaba, 2024)*

Sistema de embotellado. Semiautomático permite un llenado y sellado de botellas de forma eficiente y no compromete la carbonatación. Se usarán botellas de vidrio de 330 mL**.**	**Figura 35** *Sistema de embotellado* *Nota. (Alibaba, 2024)*
Etiquetadora. Equipo que coloca etiquetas adhesivas a las botellas permitiendo que la productividad sea más alta y reduciendo el tiempo de operatividad en esta etapa.	**Figura 36** *Etiquetadora*  *Nota. (Alibaba, 2024)*

Capítulo 3

3.1 Resultados y análisis

3.1.1 Resultados y análisis de la determinación de alcohol de la cerveza estilo bitter

Para garantizar que los destilados obtenidos (Tabla 13) fuera etanol, resultó necesario determinar los índices de refracción (IR) de los lotes, cuyos promedios varían entre 1,3410 y 1,3598. Estos valores fueron comparados con el IR de etanol puro a 20°C, que es de aproximadamente 1,3611 (CRC Handbook of Chemistry and Physics, 2014).

Tabla 13

Resultados de destilados obtenidos de los lotes de cerveza

Ensayo	Índice de refracción	Promedio de IR	Destilado obtenido (mL)	Promedio de destilado (mL)	Desviación estándar
Lote 1	1,3404 1,3444	1,3424	3,1 2,7	2,90	0,2828
Lote 2	1,3436 1,3534	1,3485	3,2 1,4	2,30	1,2728
Lote 3	1,3470 1,3477	1,3474	2,9 3,1	3,00	0,1414
Lote 4	1,3530 1,3550	1,3540	1,7 1,0	1,35	0,4950
Lote 5	1,3466 1,3432	1,3449	3,8 3,2	3,50	0,4243
Lote 6	1,3475 1,3456	1,3466	4,3 1,3	2,80	2,1213
Lote 7	1,3435 1,3385	1,3410	2,8 2,4	2,60	0,2828
Lote 8	1,3610 1,3585	1,3598	5,1 3,4	4,25	1,2021
Lote 9	1,3483 1,3471	1,3477	2,7 2,8	2,75	0,0707

El IR promedio de los lotes no alcanza el IR del etanol puro, indicando una mezcla alcohólica diluida, debido a la composición compleja de la cerveza, que contiene agua, etanol y otros compuestos volátiles que se destilan simultáneamente, generando una sobreestimación del contenido alcohólico. Además, la desviación estándar de los volúmenes de destilado refleja gran variabilidad en las cantidades obtenidas entre las destilaciones de cada lote. Por ello, fue necesario aplicar el método picnométrico explicado en la sección 2.9.1 empleando los datos experimentales promedios de la Tabla 14, para determinar la gravedad específica del destilado a 20°C, propiedad directamente relacionada con la concentración de etanol en la mezcla. Posteriormente, se consultó la tabla estandarizada (Apéndice B) para estimar el contenido alcohólico con mayor exactitud.

Tabla 14

Datos obtenidos mediante método picnométrico

Muestra	Peso de picnómetro seco (g)	Peso del picnómetro con agua destilada (g)
1	26,6359	51,6073
2	26,6365	51,6077
Promedio	26,6362	51,6075

Según la NTE INEN 2262, el contenido alcohólico permitido para cervezas oscila entre 1 y 10% v/v, por ende, todos los lotes cumplen con este requisito. Los resultados presentados en la Tabla 15 evidencian que proporciones equilibradas de insumos fermentables, como el lote 1 (30% pan, 30% malta) y el lote 9 (50% pan, 50% malta) producen porcentajes alcohólicos moderados, de 3,29% y 2,52% v/v respectivamente. Sin embargo, estas combinaciones no alcanzan el objetivo de 4% v/v establecido en el diseño experimental. El incremento de malta aumenta significativamente el contenido alcohólico, por ejemplo, el lote 8 (50% pan, 78,284% malta) registra el mayor valor 6,39% v/v, dado que

la malta aporta un perfil enzimático más eficiente y una mayor cantidad de azúcares fácilmente fermentables por las levaduras que favorecen la producción de etanol.

Tabla 15

Resultados de contenido alcohólico de los lotes de cerveza

Ensayo	Peso del picnómetro con destilado obtenido (g)	Gravedad específica del destilado a 20°C	Contenido de alcohol de la cerveza (%v/v)
Lote 1	51,4871	0,99518	3,29
Lote 2	51,4931	0,99542	3,13
Lote 3	51,4666	0,99436	3,88
Lote 4	51,4748	0,99469	3,64
Lote 5	51,4974	0,99559	3,01
Lote 6	51,5543	0,99787	1,43
Lote 7	51,5012	0,99574	2,90
Lote 8	51,3822	0,99098	6,39
Lote 9	51,5150	0,99630	2,52

Por el contrario, lotes con exceso de pan reducen la eficiencia fermentativa, tal es el caso del lote 6 (78,284% pan, 50% malta) que presenta el menor contenido alcohólico 1,43% v/v. Puesto que, si bien el pan masa madre blanco proporciona almidones que complementa la fermentación, también contiene grasas y sal que pueden inhibir parcialmente la actividad de las levaduras. Además, cantidades excesivas de pan podrían diluir el mosto, reduciendo la concentración de azúcares fermentables. Por otra parte, bajos niveles de malta, como el lote 7 (50% pan, 21,715% malta), limitan la conversión de azúcares fermentables, restringiendo la producción de etanol. En base a este análisis, proporciones de malta (70-50%) combinadas

con cantidades moderadas de pan (20-30%) tienden a generar mejores resultados, como se observa en el lote 3, que alcanza un valor de contenido alcohólico cercano al objetivo.

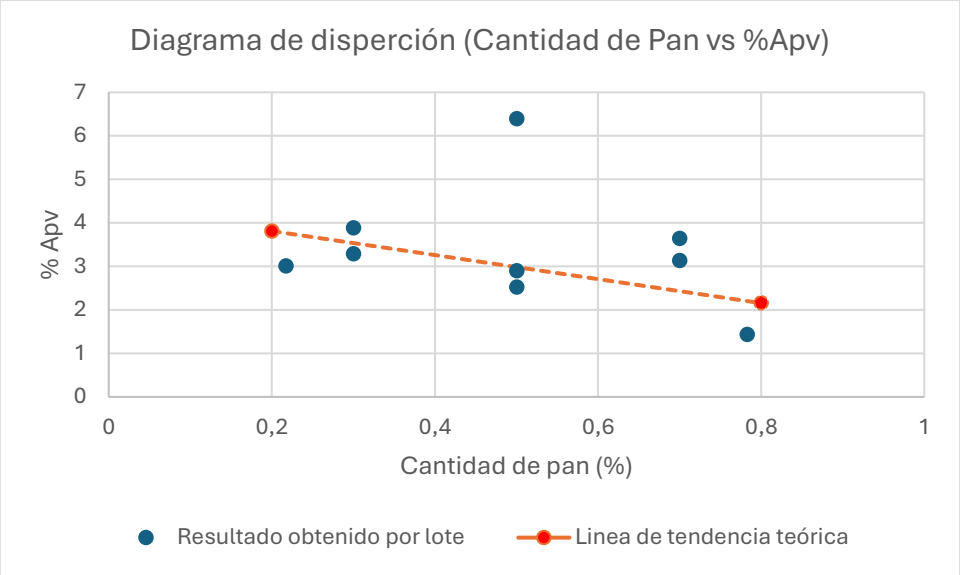
3.1.2 Análisis de proporciones óptimas de ingredientes

El diseño compuesto central circunscrito permite identificar las proporciones óptimas de pan masa madre blanco caducado y malta para maximizar el contenido de alcohol del producto final, así como minimizar la variación de la variable de respuesta con respecto al contenido alcohólico esperado.

Para verificar la validez y adaptación de los valores de contenido alcohólico obtenidos al diseño estadístico, se bosquejaron dos diagramas de dispersión relacionando las variables dependientes (cantidad de pan y malta) con la variable de respuesta (contenido alcohólico), con la finalidad de identificar valores residuo o anómalos con respecto a la tendencia teórica del modelo. En la Figura 37 se observa un valor muy elevado y alejado de la línea de tendencia teórica correspondiente al resultado del lote 8 (50% Pan y 78% Malta), a pesar de guardar relación con los cálculos, su desviación de la línea de tendencia puede afectar al índice de correlación de la superficie de respuesta, por lo que se lo etiqueta como valor anómalo y se remueve del análisis del DCCC.

Figura 37

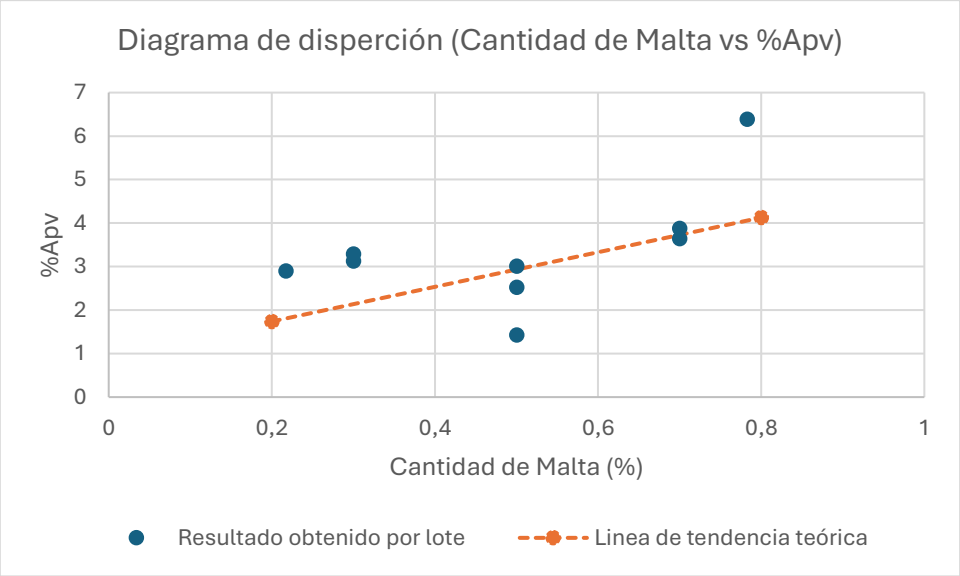
Diagrama de dispersión con respecto a la cantidad de pan



Adicionalmente, en la Figura 38 se observa un valor muy bajo, correspondiente al resultado del lote 6 (78% Pan y 50% Malta), alejado de la línea de tendencia teórica y sin relación alguna con los cálculos de contenido alcohólico teórico alcanzado. Debido a esto, también se lo cataloga como resultado anómalo y se elimina del análisis del DCCC.

Figura 38

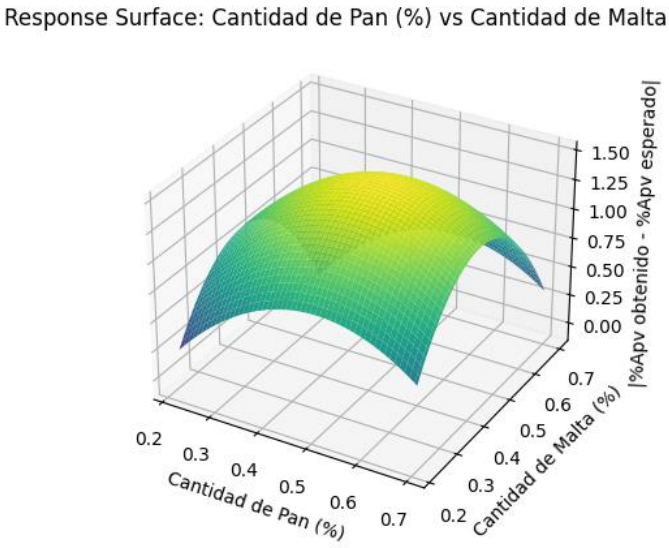
Diagrama de dispersión con respecto a la cantidad de malta



Una vez excluidos los resultados anómalos del análisis se generó una superficie de respuesta correspondiente al diseño experimental (Figura 39) en donde se puede observar una cúpula la cual hace referencia a la existencia de un máximo local, esto indica que en ese punto se maximiza la cantidad de alcohol producido. El análisis reveló que la proporción óptima para minimizar la diferencia entre el porcentaje de alcohol obtenido y el esperado es de 22% Pan y 70% Malta, es decir, en este punto el contenido de alcohol de la cerveza obtenido experimentalmente será lo más cercano posible a lo calculado estequiométricamente, verificando lo analizado en la sección 3.1.1. Así mismo, para maximizar la producción de alcohol se obtiene que la proporción óptima sería casi 1:1, con cierta inclinación hacia la cantidad de malta por el perfil enzimático que posee, lo cual en porcentajes sería 51% Pan y 54% Malta (Tabla 16).

Figura 39

Superficie de respuesta del DCCC



También se analizó el índice de correlación R^2 que refleja el modelo matemático generado con respecto a los resultados ingresados el cual fue de 0.869 (Figura 47), lo cual, al estar por encima de 0.7, se considera como una correlación fuerte demostrando la fiabilidad del modelo para fines de optimización. (de la Vara Salazar & Gutierrez Pulido, 2008)

Tabla 16

Resultados de optimización del sistema

Parámetros óptimos	Porcentaje de pan (%)	Porcentaje de malta (%)
Minimizar	22	70
Maximizar	51	54
R	0,869	

Con base en los análisis de contenido alcohólico y proporciones optimas se escogió el lote 3 para realizar el resto de los estudios fisicoquímicos, ya que posee los resultados más cercanos a los propuestos por el diseño experimental.

3.1.3 Resultados y análisis de la determinación de acidez aplicando el método por titulación con hidróxido de sodio

El método titulométrico permite determinar la concentración total de ácido en la cerveza mediante una base estándar con concentración conocida. Para cuantificar la acidez total expresada como ácido láctico, se calculó la gravedad específica de la cerveza a 20°C aplicando el método picnométrico. Los resultados de la Tabla 17 muestran variaciones en la acidez promedio entre lotes, atribuibles a las diferentes proporciones de insumos fermentables. Lotes con porcentaje de pan $\geq$ 50% tiende a elevar la acidez total, como el lote 6 (78,284% pan, 50% malta) y el lote 4 (70% pan, 70% malta), que presentan una acidez promedio de 0,29% m/m cercana al límite máximo 0,30% m/m permitido por la NTE INEN 2262. Mientras que el lote 8 (50% pan, 78, 284% malta) y el lote 9 (50% pan, 50% malta) superan este límite, acideces de 0,31% m/m y 0,35% m/m, respectivamente. Esto se debe a que el pan masa madre contiene ácidos orgánicos, como el ácido láctico y en menores trazas el ácido acético, generados durante la fermentación de carbohidratos por bacterias ácido-

lácticas propias de la masa madre (Gómez Ibañez, 2021). Estos ácidos preexistentes son transferidos al mosto cervecero incrementando directamente la acidez del medio.

Tabla 17

Resultados de acidez total expresado como ácido láctico de la cerveza

Ensayo	Peso del picnómetro con cerveza (g)	Gravedad específica de la cerveza a 20°C	Volumen consumido de NaOH (mL)	Acidez Total (%m/m)	Promedio de acidez total (%m/m)	Desviación estándar
Lote 1	52,1862	1,0232	6,6 5,5	0,24 0,20	0,22	0,0285
Lote 2	52,8429	1,0495	6,4 6,7	0,23 0,24	0,23	0,0076
Lote 3	52,3200	1,0285	4,9 5,4	0,18 0,20	0,19	0,0129
Lote 4	52,8818	1,0510	7,8 8,4	0,28 0,30	0,29	0,0151
Lote 5	52,0159	1,0164	5,9 5,1	0,22 0,19	0,20	0,0209
Lote 6	52,9933	1,0555	8,1 8.2	0,29 0,29	0,29	0,0025
Lote 7	52,6299	1,0409	5,8 6,5	0,21 0,23	0,22	0,0178
Lote 8	52,1988	1,0237	8.4 8,5	0,31 0,31	0,31	0.0026
Lote 9	52,4695	1,0345	9,6 9,8	0,35 0,36	0,35	0,0051

Además, durante la fermentación alcohólica anaerobia, las levaduras metabolizan los azúcares fermentables (glucosa, maltosa y maltotriosa) provenientes de la hidrólisis del

almidón del pan y de la malta (Coelho, Prista, & Sousa, 2024), desarrollando subproductos en pequeñas cantidades como ácidos orgánicos (láctico y propiónico) que contribuyen a la acidez total. Cabe destacar que lotes con menor proporción de pan, como el lote 3 (30% pan, 70% malta) y el lote 5 (22% pan, 50% malta), muestran baja acidez promedio, 0,19% m/m y 0,20% m/m, respectivamente, debido a una menor contribución de ácidos orgánicos derivados del pan.

*3.1.4 **Resultados y análisis de la determinación de pH***

Los resultados de pH presentados en la Tabla 18, se encuentran dentro del rango levemente ácido de 3,5 – 4,8 establecido por la NTE INEN 2262. Como se mencionó con anterioridad, lotes con porcentaje de pan ≥ 50% presentan mayor contenido de acidez total, debido que un pH bajo de mosto puede modificar la ruta metabólica de las levaduras durante la fermentación, favoreciendo la formación de ácidos orgánicos que liberan protones (H^+) en el medio, disminuyendo el pH final de la cerveza. Tal es el caso del lote 9 (50% pan, 50% malta) que destaca por mayor acidez con un pH promedio de 3,82. En contraste, un mayor contenido de malta presenta pH ligeramente más bajo en comparación con lotes con menos malta, por ejemplo, lote 4 (70% pan, 70% malta) y lote 2 (70% pan, 30% malta), con pH promedio de 4,20 y 4,31 respectivamente. Debido a que la malta contiene compuestos tamponadores, como fosfato que estabiliza el pH durante el macerado, manteniendo un rango óptimo para favorecer la actividad enzimática, y así mejorar la extracción de azúcares y otros compuestos esenciales. Como consecuencia, un pH levemente bajo en los lotes con más malta puede mejorar la extracción de alfa-ácidos del lúpulo, intensificando el amargor.

Tabla 18

Resultados de pH de los lotes de cerveza

Ensayo	Medición de pH	pH promedio	Desviación estándar
Lote 1	3,98 3,93	3,96	0,0354
Lote 2	4,29 4,32	4,31	0,0212
Lote 3	4,11 4,09	4,10	0,0141
Lote 4	4,19 4,20	4,20	0,0071
Lote 5	4,00 3,95	3,98	0,0354
Lote 6	4,28 4,29	4,29	0,0071
Lote 7	3,91 3,87	3,89	0,0283
Lote 8	3,97 3,99	3,98	0.0141
Lote 9	3,82 3,81	3,82	0,0071

3.1.5 Resultados y análisis de la determinación de hierro, zinc y cobre

Se realizó la determinación de hierro, zinc y cobre por triplicado para mejorar la precisión de los resultados y verificar el cumplimiento de los límites correspondientes a la norma NTE INEN 2262 (Tabla 2).

Tabla 19

Concentraciones de hierro, zinc y cobre en muestras de cerveza

Metales	Concentración en la cerveza (mg/L)	Promedio (mg/L)	Desviación estándar	Concentración en el Blanco (mg/L)
Fe	6,16 5,15 4,54	5,28	0,818	1,85
Zn	1,52 0,76 0,71	0,90	0,454	0,24
Cu	0,85 0,86 0,78	0,83	0,044	0,29

Cuantificación de hierro. La concentración de hierro promedio en la cerveza es de 5,28 mg/L con una baja desviación estándar de 0,818 (Tabla 19), este valor se encuentra muy por encima del límite de la norma, la cual estipula un máximo de 0,2 mg/L. A pesar de estos valores elevados, el hierro no afecta negativamente a la salud del consumidor, ya que forma parte esencial en la nutrición del ser humano. Sin embargo, altas concentraciones de hierro podrían afectar ligeramente en el olor y sabor de la bebida, además de catalizar un proceso oxidativo reduciendo su tiempo de vida útil, lo cual disminuye la calidad de la cerveza. Esta excesiva presencia de hierro puede deberse a una contaminación general del agua usada para la elaboración de cerveza, ya que la lectura del blanco (agua) también arrojó una concentración de hierro por encima de lo permitido. (Mohamed, Guillaume, Abdulwali, & Al. Maqtari, 2020)

Cuantificación de zinc. La concentración promedio de zinc en la cerveza es de 0,9 mg/L con una desviación estándar baja de 0.454, este valor si se encuentra dentro del rango permitido por la norma con un máximo de 1,0 mg/L. Sin embargo, se puede observar que una

de las tres muestras presenta un valor elevado de 1,52 mg/L, este puede ser considerado un resultado anómalo ya que las concentraciones de las otras dos muestras varían mínimamente entre sí, cumplen con la norma y guardan relación con el valor medido del blanco que también contiene una cantidad pequeña del metal analizado.

Cuantificación de cobre. En este apartado se observa la menor desviación estándar entre los tres elementos cuantificados (0,044), lo cual garantiza precisión en el resultado de la medición. La concentración de cobre promedio en la cerveza es de 0,83 mg/L estando dentro del rango permisible que tiene como máximo 1,0 mg/L evitando problemas gastrointestinales causados por la presencia de este metal como nauseas, vómito y dolor abdominal. (Mohamed, Guillaume, Abdulwali, & Al. Maqtari, 2020)

3.1.6 Resultados y análisis de la determinación de fenoles

Curva de calibración. Una vez registrados los datos de absorbancia medidos en el espectrofotómetro UV-visible a 769 nm para cada solución patrón (Tabla 20), se realizó la curva de calibración de ácido gálico (Figura 40), obteniendo una tendencia lineal con un coeficiente de correlación R^2 de 0,9927 $\geq$ 0,98, lo que indica una fuerte relación lineal entre la concentración de ácido gálico y la absorbancia, garantizando calcular con precisión y exactitud las concentraciones desconocidas de las muestras de cerveza dentro del rango de linealidad mediante interpolación de la curva estándar. Fuera de este rango, podría haber desviaciones no lineales (Ramos & Talero, 2022)

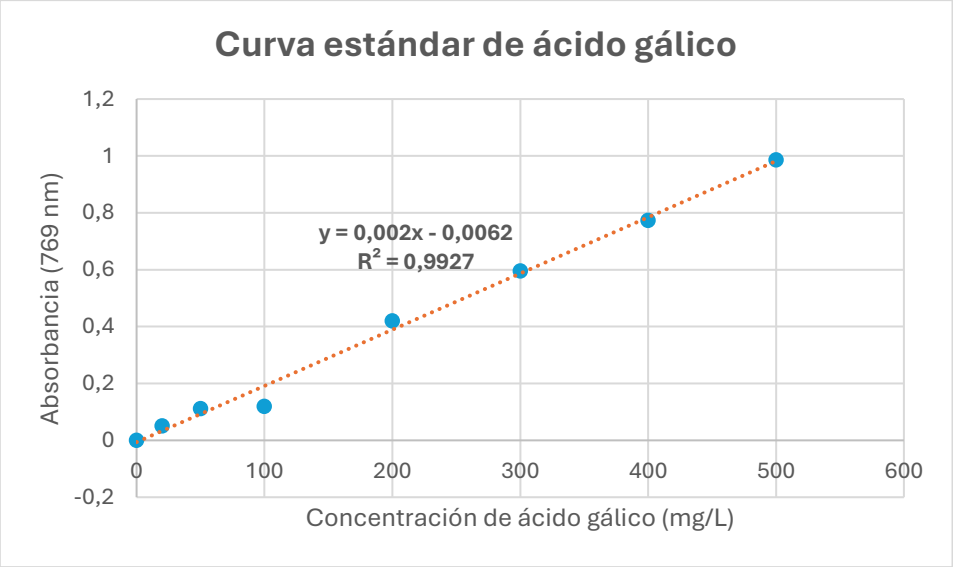
Tabla 20

Datos de la curva estándar de ácido gálico

Concentración de ácido gálico (mg/L)	Absorbancia (769 nm)
0	0
20	0,050
50	0,111
100	0,119
200	0,419
300	0,595
400	0,773
500	0,986

Figura 40

Curva estándar de ácido gálico



$$y = 0{,}002x - 0{,}0062 \quad (3.\ 1)$$

La curva estándar de ácido gálico generó una ecuación de tipo $y = mx + b$, donde:

y, absorbancia medida de la muestra

m, pendiente de la curva estándar

b, intersección en el eje y (absorbancia del blanco)

x, concentración de fenoles (mg/L)

Determinación del contenido de fenoles totales. Se procedió a sustituir los valores absorbancia de la muestra de cerveza diluida, medidas por triplicado, en la ecuación de la curva estándar (3. 1) para calcular la concentración de fenoles totales por medio del despeje de x. Además, se ajustó los valores multiplicando por 2 que corresponde al factor de dilución utilizado 1:2 (4 mL de muestra de cerveza en 8 mL de metanol puro). Los resultados se expresan en equivalentes de ácido gálico (mg GAE/mL).

Tabla 21

Concentración de fenoles en muestras de cerveza

Absorbancia de la muestra (769 nm)	Concentración de ácido gálico (mg/L)	Concentración de fenoles totales (mg GAE/mL)	Promedio	Desviación estándar
0,219	106,40	0,213		
0,210	101,90	0,204	0,204	0,0085
0,202	97,90	0,196		

González et al. (2001) afirma que "el contenido de compuestos fenólicos en cervezas varía significativamente entre artículos, oscilando entre 50 – 350 mg GAE/L". Según Pachas (2019) "las cervezas artesanales presentan concentraciones de polifenoles totales en un rango de 0,70 – 1,33 mg GAE/mL dependiendo del tipo de malta, para maltas *Pale Ale* el contenido fenólico promedio es de 0,85 mg GAE/mL. Mientras que las cervezas industriales tienen un promedio de 0,53 mg GAE/mL" (p. 29). Por otra parte, un caso de estudio de cerveza artesanal elaborada con levadura autóctona *S. cerevisiae* aislada de una masa madre artesanal, registró 169 mg GAE/L de contenido de polifenoles (Mascia, y otros, 2015).

La concentración promedio de fenoles totales en la cerveza estudiada (lote 3) fue de 0,204 mg GAE/mL con una baja desviación estándar de 0,0085. La concentración obtenida está considerablemente por debajo del rango para cervezas artesanales y también alejado del

promedio para cervezas industriales. Sin embargo, dicho valor es superior a la concentración reportado en la cerveza artesanal con levadura autóctona de masa madre. Este incremento moderado puede deberse a una mayor extracción de fenoles aportados por la malta *Pale Ale,* por tener la mayor proporción de insumo (70%) en la receta, en comparación con la proporción de pan (30%), el cual también contribuye al contenido fenólico, pero en menor medida. Según Delgadillo et al. (2023) un pan masa madre artesanal elaborado con harina de trigo refinada contiene 20,25 mg GAE/100 g en base húmeda, y depende de factores como la fermentación de la masa madre y formulación del pan, además del tiempo, temperatura y reacciones de Maillard involucradas en el horneado; que pueden aumentar el contenido de compuestos fenólicos en comparación con un pan comercial.

3.1.7 Resultados y análisis de la determinación de la actividad antioxidante por el método de FRAP

Durante la medición de la absorbancia de las soluciones estándar, se produjo una saturación del espectrofotómetro UV-visible utilizado ya que reflejaba la absorbancia máxima que puede medir el equipo para las soluciones más concentradas (300, 400 y 500 ppm). Esta excesiva concentración hace que la solución absorba casi toda la luz en la longitud de onda de interés, resultando en un valor de absorbancia fuera del rango medible. Por lo que para obtener los resultados reales de absorbancia se diluyeron dichas soluciones con agua destilada, se midió y luego se multiplicó por el factor de dilución.

Curva de calibración. Una vez registrados los datos de absorbancia medidos como se explicó previamente (Tabla 22), se realizó la curva de calibración de ácido ascórbico (Figura 41), obteniendo una tendencia lineal con un coeficiente de correlación R^2 de 0,9791 $\gtrapprox$ 0,98, indicando una fuerte relación lineal entre la concentración de ácido ascórbico y la absorbancia, igual que lo analizado en la determinación de fenoles. (Ramos & Talero, 2022).

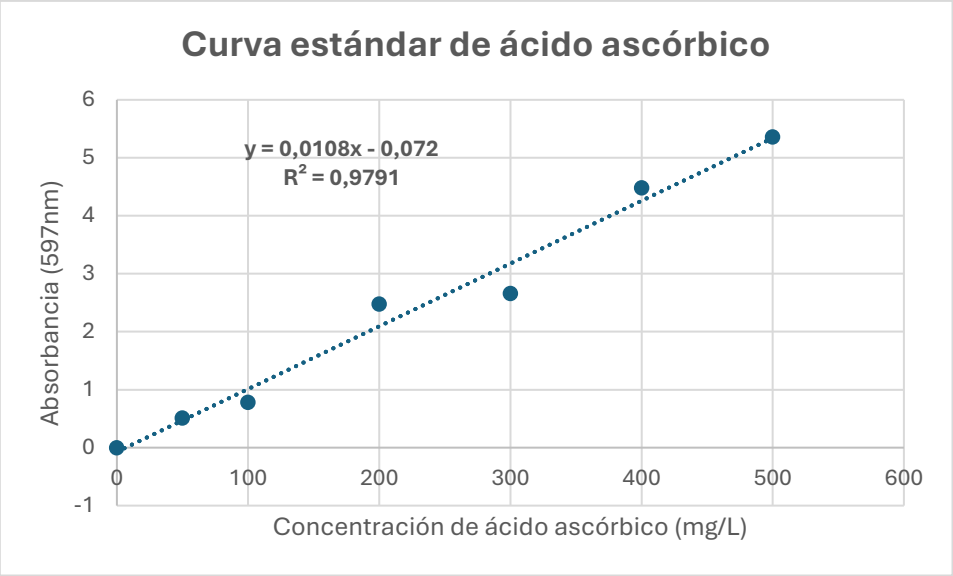
Tabla 22

Datos de la curva estándar de ácido ascórbico

Concentración de ácido ascórbico (mg/L)	Absorbancia (597 nm)
0	0
50	0,513
100	0,784
200	2.48
300	2.66
400	4.48
500	5.36

Figura 41

Curva estándar de ácido ascórbico



$$y = 0{,}0108x - 0{,}072 \quad (3.\ 2)$$

La curva estándar de ácido ascórbico generó la ecuación (3. 2) donde:

y, absorbancia medida de la muestra

x, concentración de ácido ascórbico equivalente (mg/L)

Cuantificación de la actividad antioxidante. Se procedió a reemplazar los resultados de absorbancia de las muestras diluidas de cerveza, medidas por triplicado, en la

ecuación (3. 2) generada por la curva estándar, despejando la variable x. Además, se ajustó los valores multiplicando por 2 que corresponde al factor de dilución utilizado 1:2 (4 mL de muestra de cerveza en 8 mL de la solución de metanol). Los resultados se expresan en miligramos equivalente de Ácido ascórbico por litro de cerveza (mg CEAC/L).

Tabla 23

Actividad antioxidante en muestras de cerveza

Absorbancia (597 nm)	Concentración de ácido ascórbico (mg/L)	Actividad antioxidante (mg CEAC/L)	Promedio	Desviación estándar
0,596	61,85	123,70		
0,541	56,76	113,52	117,65	5,3554
0,553	57,87	115,74		

Rincón et al. (2010), en un estudio de cervezas venezolanas, reporta que “la capacidad antioxidante representada por el poder reductor varió lo valores de 43,26 a 86,03 Equivalentes de Ácido Ascórbico mg/L”. Mientras que, según Gonzales et al. (2001) “la actividad antioxidante global de las cervezas artesanales oscila entre los valores mínimos y máximos de 12 y 56 mg CEAC” (p. 26).

La actividad antioxidante promedio obtenida mediante el método de FRAP fue de 117,65 mg CEAC/L, con una desviación estándar de 5,3554 (Tabla 23). Al reportar el valor en mg/L (ppm) en rango de valores se hace más amplio y por ende suelen a estar más dispersos entre sí, lo cual justifica la desviación alta calculada. Respecto al poder reductor de la cerveza, la capacidad antioxidante es considerablemente superior al rango presentado anteriormente con respecto a cervezas artesanales, este aumento se puede deber a la combinación de ciertos fenoles que no aportan mucho al análisis de fenoles totales, como las catequinas y ácidos presentes en el pan, lo cual puede mostrar un efecto sinérgico,

incrementando la actividad antioxidante más allá de lo esperado. (Pejcz, Lachowicz-Wisniewska, Nowicka, Wojciechowicz-Budzisz, & Harasym, 2024)

3.2 Resultados de la simulación del proceso cervecero a partir de pan masa madre blanco caducado

Para la simulación se planteó un proceso de producción de etanol mediante la fermentación de una sustancia acuosa con contenido de azúcares fermentables por un proceso de evaporación tal y como se observa en la Figura 42. Con el fin de simular la entrada de Pan y Malta se plantea dos corrientes de glucosa pura que ingresan al macerador (MASH) junto con una corriente de agua pura inicial a 70°Cel primer mosto pasa a otro tanque de mezcla para el proceso de *mashout* donde se añaden 3 litros de agua a 80°C. Seguidamente llega al proceso de cocción en donde se calienta el mosto en el equipo BREW hasta la ebullición, por la corriente de arriba sale vapor de agua y debajo el mosto concentrado. Finalmente, la sustancia resultante se enfría hasta los 20°C en el equipo COOLING y pasa al reactor FERMENT para el proceso de fermentación que ocurre a 16°C, donde se generan dos corrientes de salida, en una se libera parte del gas generado en la fermentación y en la otra se tiene el producto final que sería la cerveza.

Cabe recalcar que el equipo que se encuentra al final del diagrama de flujo (B1) simula el proceso de destilación para determinar el contenido alcohólico que posee la bebida con una relación volumétrica entre la cantidad de cerveza obtenida después de la fermentación y la cantidad de etanol destilado. La cantidad en volumen de cerveza obtenida después de una hora de cocción es 12,2 L el cual es muy cercano al esperado (12 L), mientras que para el alcohol destilado se obtuvo 0,698 L, por lo que finalmente se obtendría un porcentaje de contenido alcohólico del 5,72%, este no se acerca al valor esperado de 4% debido a que al correr la simulación en Aspen Plus se genera un caso ideal en el que toda la glucosa que ingresa en el proceso se convierte en etanol lo cual no sucede en la realidad. Por

otro lado, relacionando los datos de porcentaje alcohólico total real (3,88%) y teórico se obtiene un rendimiento real del equipo del 69%, lo cual, valida los cálculos realizados para la determinación de las cantidades de insumos en la receta, ya que se asumió inicialmente un rendimiento del 70%.

Además de servir como validación de lo realizado a nivel micro (laboratorio) la simulación fue utilizada también con el propósito de escalar el proceso de elaboración de cerveza a un nivel meso donde se planteó una producción de 1000 L de cerveza por lote, para lo cual se utilizó el mismo mecanismo de simulación expuesto anteriormente pero con los respectivos cambios en las corrientes de entrada para cada uno de los insumos, siendo las cantidad proporcionales a las utilizadas en el modelo experimental, sin contar la cantidad de agua para el proceso de *mashout*, ya que al ser un escalado más grande se busca ahorrar la mayor cantidad de agua posible. En el Apéndice C se puede observar la cantidad de cerveza obtenida para esta simulación es de 997,8 L en una hora de cocción, este es muy cercano al esperado (1000 L), mientras que en cantidad de etanol se obtuvo 58,03L, por lo que el grado alcohólico final para este diseño de escala meso sería de 5,82%, este ligero aumento con respecto a lo generado anteriormente se deber a que al tener menos cantidad en litros de la esperada, el mosto está un poco más concentrado de azúcares fermentables por lo que tendrá, en consecuencia, una mayor concentración alcohólica. Este escalamiento se encuentra representado en un diagrama de flujo de procesos (Figura 43) en la que se encuentran presentes todos los equipos propuestos en la sección 2.11.3 junto con una tabla de nomenclaturas (Tabla 24).

Figura 42

Diagrama de la simulación de producción de cerveza a partir de pan masa madre blanco caducado

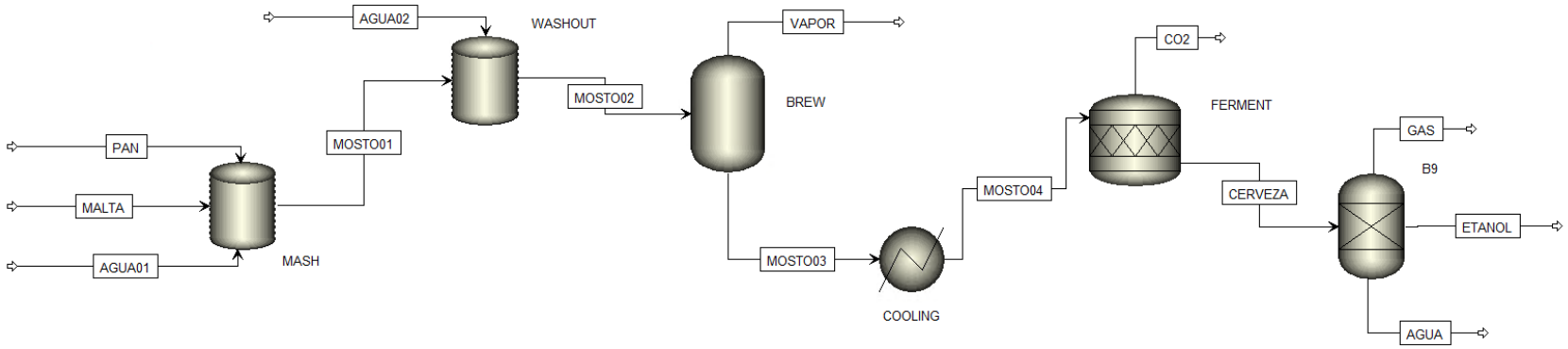


Figura 43

Diagrama de flujo del proceso de producción de cerveza a partir de pan masa madre blanco caducado

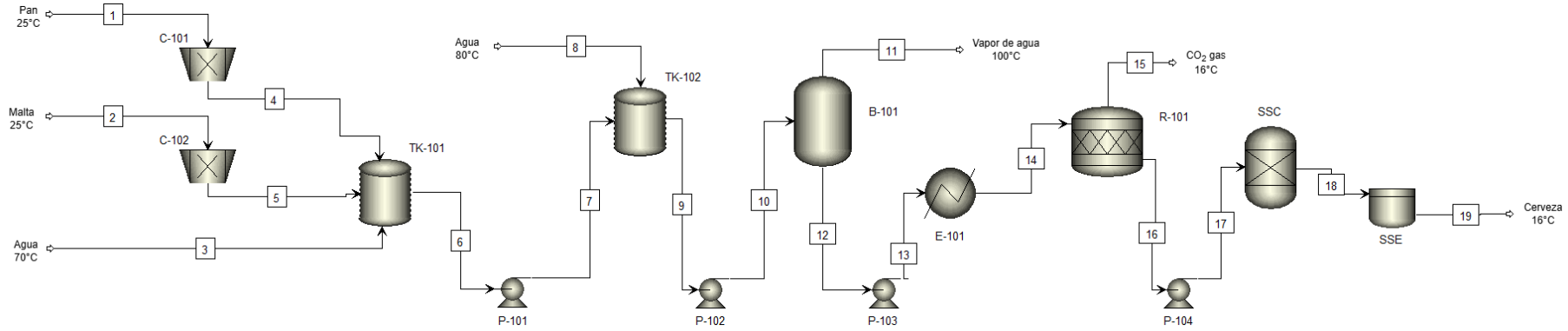


Tabla 24

Nomenclatura de equipos usados en el proceso de producción

Nomenclatura	Descripción del equipo
C-101	Trituradora de Pan
C-102	Molino para malta
TK-101	Macerador
TK-102	Tanque de *Mashout*
P-101	Bomba centrífuga sanitaria
P-102	Bomba centrífuga sanitaria
B-101	Hervidor
P-103	Bomba centrífuga sanitaria
E-101	Intercambiador de calor de placas
R-101	Fermentador
P-104	Bomba centrífuga sanitaria
SSC	Sistema de carbonatación
SSE	Sistema de embotellado

3.3 Análisis económico del diseño de producción de cerveza a partir de pan masa madre blanco caducado

3.3.1 Costo unitario de producción

Este cálculo es esencial para entender la rentabilidad del proceso, para realizar el análisis se debe considerar los equipos necesarios, la materia prima, y los costos operativos asociados, incluyendo la mano de obra.

Frecuencia de producción. Dependerá de la disponibilidad y recolección del pan caducado. Si el pan se recolecta diaria o semanalmente y se cuenta con un lugar de almacenamiento adecuado, se puede producir cada 3 días o elaborar 2 a 3 lotes por semana. En cambio, si la recolección es mensual se puede planificar 8 a 9 lotes distribuidos durante el mes para optimizar el uso de la materia. Por lo tanto, para el diseño se propuso una

producción de 3 lotes semanales de 1000 L de cerveza cada uno, y así tener una frecuencia sostenible de 12000 L mensuales.

Costo de materia prima. Con base a las proporciones del lote 3 (70% malta y 30% pan), las cantidades de ingredientes (Tabla 7) y materiales (Tabla 8) utilizados en la elaboración de 12 L de volumen final del diseño experimental, se cuantificó el requerimiento de las cantidades de materia prima enlistadas en la Tabla 25 para producir 1000 L de cerveza por lote, lo que equivale a 3030 botellas de 330 mL.

Tabla 25

Materia prima requerida y costos para 1000 L de cerveza

Materia prima	Utilizada por lote	Costo Unitario (USD)	Costo Total por lote (USD)	Costo Total Mensual (USD)
Pan masa madre blanco caducado	146,99 kg	$ 0,20/kg	$ 352,88	$ 588,00
Malta *Pale Ale.* Marca *Castle Malting*	138,89 kg	$ 1,72/kg	$ 2.866,69	$ 2.047,49
Lúpulo *East Kent Golding*	2,08 kg	$ 44,00/kg	$ 91,52	$ 1.098,24
Levadura *Dry Heritage English Ale*. Marca *Pinnacle*	1 kg	$ 174,96/kg	$ 174,96	$ 2.099,52
Agua potable	1050 L	$ 0,00059/L	$ 0,62	$ 7,43
Botellas de 330 mL y Tapa *twist off bronce*	3030 UND	$ 0,38/UND	$1.151,40	$13.816,80
CO_2	2200 L	$ 0,03/L	$ 66,00	$ 792,00
Etiquetas	3030 UND	$0,0025/UND	$ 7,58	$ 90,90
Costo total de materia prima			$1.760,36	$21.124,36

Energía del proceso. Se consideró la energía requerida para aumentar la temperatura en el macerador y hervidor, así como, disminuir y mantener la temperatura durante 7 días en el fermentador, y posteriormente a 14 días para la etapa de maduración, asumiendo que el

sistema necesita un 10% de la energía inicial cada día para compensar las pérdidas térmicas. Adicional, la tarifa de consumo de 1501 a 2500 kWh es de aproximadamente 0,27 ctvs/kWh establecida por la Corporación Nacional de Electricidad.

Tabla 26

Energía requerida y costos para 1000 L de cerveza

Equipo	Energía (MJ)	Energía Total (MJ)	Energía Total (kWh)
Macerador	140,58	670,97	186,40
Mashout	54,39		
Hervidor	244,8		
Fermentador	231,20		
Tarifa de consumo			0,27
Costo Total de Energía por lote (USD)			$ 50,33
Costo Total de Energía Mensual (USD)			$ 603,92

Costo de mano de obra. Depende de factores como el número de empleados necesarios, el salario promedio y las horas trabajadas parar completar la producción.

Tabla 27

Costo de mano de obra mensual

Concepto		Valor
Número de empleados requeridos		5
Salario promedio		500
Salario por hora de producción	$	3,13
Horas mensuales de producción		96
Costo por empleado	$	300,00
Costo mensual de la mano de obra	$	1.500,00

Con una producción mensual de 36360 botellas y un costo total mensual de $23228,28, que incluye la suma del costo de materia prima, la energía del proceso y el costo de mano de obra; resultando un costo unitario de 0,64/ botella. Según Cuevas (2002) recomienda vender el producto a un precio que sea 3 veces más el costo unitario de producción, siguiendo la ecuación (3. 3), se consideró un margen de utilidad bruta del 70%, con un precio de venta de $2,13/botella. Estos datos reflejan un modelo competitivo y eficiente para una planta a escala meso, siempre que se garantice el suministro constante de pan caducado, y se contemplen todos los costos indirectos (logística, marketing, mantenimiento entre otros).

Tabla 28

Costo unitario de producir 1000 L de cerveza

Concepto	Valor
Producción Mensual (botellas)	36360
Costo Total Mensual (USD)	$23.228,28
Costo Unitario de Producción (USD/botella)	$ 0,64
Precio de Venta (USD/botella)	$ 2,13
Margen de Utilidad Bruta	70,00%

$$MU = 1 - \left(\frac{C_{FU}}{P_V}\right) \quad (3.\ 3)$$

Donde:

MU, margen de utilidad

C_{FU}, costo fijo unitario de una botella de 330 mL

P_V, precio de venta de una botella de 333 mL

A continuación, se enlistan el precio de los equipos necesarios para la implementación de la planta en la Tabla 29.

Tabla 29

Costo de equipos

Equipo	Unidad	Costo Unitario (USD)	Costo Total (USD)
Descortezadora de pan	1	$2.200,00	$ 2.200,00
Trituradora de pan.	1	$1.980,00	$ 1.980,00
Molino para malta	1	$1.250,00	$ 1.250,00
Macerador	2	$8.000,00	$ 16.000,00
Filtrador de mosto	1	$ 400,00	$ 400,00
Sistema de enfriamiento	1	$ 400,00	$ 400,00
Bomba centrífuga sanitaria	4	$ 400,00	$ 1600,00
Fermentador	3	$ 1.300,00	$ 3.900,00
Sistema de carbonatación	1	$3.900,00	$3.900,00
Sistema de embotellado.	1	$7.000,00	$ 7.000,00
Etiquetadora	1	$1.000,00	$ 1.000,00
Costo Total de equipo			$39.630,00

3.3.2 Evaluación de rentabilidad

El estudio de la evaluación económica es la finalización de una secuencia que comprende el análisis de factibilidad de un proyecto con la finalidad de determinar si es rentable invertir en él. Para ello, se calculó y se analizó el Valor Actual Neto (VAN) y la Tasa Interna de Retorno (TIR), aplicando las siguientes ecuaciones:

$$VAN = -P + \sum_{n=1}^{N} \frac{Q_n}{(1 + TMAR)^n} \quad (3.\ 4)$$

Donde:

P, Inversión inicial

Q_n, Flujo neto del periodo n

TMAR, Tasa de descuento

N, Años proyectados

$$TMAR = i + f + (if) \tag{3. 5}$$

Donde:

i, Premio al riesgo

f, Índice inflacionario

Finalmente, el TIR muestra la tasa de interés máxima a la que puede ser comprometer préstamos, sin caer en futuras pérdidas grandes de dinero, para esto se busca una tasa que aplicada al flujo neto hace que el VAN sea cero. (Vásquez-García, et al., 2017)

$$0 = -P + \sum_{n=1}^{N} \frac{Q_n}{(1 + TIR)^n} \tag{3. 6}$$

Una vez obtenidos los valores descritos en la Tabla 30, para seguir con el análisis de rentabilidad se plantea 5 años de proyección para determinar la viabilidad de recuperar la inversión, siendo este el valor "N".

Tabla 30

Valores anuales para el cálculo de indicadores de rentabilidad

Concepto	Valor
Índice de inflación (%)	1.17
Premio al riesgo (%)	15
Costos Anuales	$ 278.739,37
Ingresos Anuales	$ 836.134,48
Flujo neto esperado	$ 557.395,11
Inversión inicial	$ 62.858,28

Nota. El índice de inflación y premio al riesgo se obtuvieron de la programación macroeconómica 2024-2028 hecha por el Ministerio de Economía y Finanzas del Ecuador

Según Baca (2013), "los criterios de evaluación son: si VAN ≥ 0, se acepta la inversión; si VAN < 0, se rechaza" y "si la TIR ≥ TMAR, se acepta la inversión, es decir, si el rendimiento de la empresa es mayor que el mínimo fijado como aceptable, la inversión es

económicamente rentable". Como se puede observar en la Tabla 31, los valores obtenidos cumplen con ambos de los criterios para aceptar la inversión de un proyecto siendo el VAN ($1.722.287,74) mayor que cero y la TIR (88,67%) mayor que la TMAR (16,95%), con esto se podría decir que el proyecto planteado es rentable y presenta un buen valor actual neto ya que este excede el millón de dólares.

Tabla 31

Indicadores de rentabilidad del proceso de producción de cerveza escalado

Indicador	Valor
TMAR (%)	16.95
Valor Actual Neto	$ 1.722.287,74
Tasa Interna de Retorno (%)	88.67

Capítulo 4

4.1 Conclusiones y recomendaciones

4.1.1 Conclusiones

- Se logró diseñar un proceso para la elaboración de cerveza estilo *bitter* utilizando pan masa madre blanco caducado como sustituto parcial de la malta, empleando un diseño central compuesto circunscripto (DCCC). El análisis del contenido alcohólico y la evaluación de proporciones óptimas revelaron que las combinaciones con 51% pan y 54% malta permiten maximizar la producción de alcohol, mientras que una proporción de 22% pan y 70% malta genera resultados más cercanos a los valores esperados teóricamente. Además, la exclusión de resultados anómalos mejoró la fiabilidad del modelo, obteniendo un coeficiente de correlación de 0,869, considerando fuerte. Por ello, el lote 3, con resultados cercanos al diseño propuesto, fue seleccionado como el punto óptimo para los estudios fisicoquímicos posteriores demostrando la viabilidad técnica del proceso.
- La cerveza producida cumple con los estándares de calidad establecidos por la norma NTE INEN 2262. El lote 3 presentó un contenido alcohólico de 3,88% v/v, una acidez total adecuada de 0,19% m/m y pH de 4,20; valores dentro de los rangos permitidos, debido a las proporciones equilibradas de malta y pan. Su actividad antioxidante, medida mediante métodos FRAP, alcanzó un promedio de 117,65 mg CEAC/L, superando ampliamente los rangos reportados para las cervezas artesanales. Este incremento puede atribuirse a un efecto sinérgico entre los fenoles del pan y la malta, con una concentración de fenoles totales de 0,204 mg GAE/mL, inferior al rango para cervezas artesanales e industriales, pero superior a estudios previos de cervezas elaboradas con levadura asiladas de masa madre. En cuanto a la concentración de metales, se observaron niveles de zinc (0,9 mg/L) y cobre (0,83 mg/L) dentro de los

límites permitidos, garantizando la seguridad del consumo. Sin embargo, la concentración de hierro (5,28 mg/L) excedió significativamente el máximo establecido probablemente debido a contaminación del agua utilizada en el proceso, la cual podría afectar la estabilidad y calidad de la cerveza a largo plazo. En general, la cerveza cumple con la mayoría de los criterios normativos destacando por su funcionalidad antioxidante y viabilidad como un producto innovador y sostenible.

- La simulación en Aspen plus y el escalamiento del proceso de producción de cerveza de estilo *Bitter* a partir de pan masa madre blanco caducado confirmaron la viabilidad técnica y económica del proyecto. A nivel meso, se obtuvo un rendimiento cercano al esperado con una producción de 997.8 L de cerveza por lote y un contenido alcohólico de 5,82%. El escalamiento se diseñó para optimizar recursos, como la reducción del uso de agua en el proceso de *mashout*, asegurando la eficiencia operativa. Económicamente, el modelo presenta un costo competitivo $0,64/botella, con un precio de venta estimado de $2,13/botellas que permite alcanzar un margen de utilidad bruta del 70%. Además, los indicadores financieros respaldan la rentabilidad del proyecto, con un VAN de $1.722.287,74 y TIR del 88,66%, ambos superiores a los lumbares aceptables. Este análisis demuestra que el proceso es escalable, rentable y sostenible; siempre que se garantice el suministro constante de pan caducado y se gestionen eficientemente los costos indirectos.

4.1.2 Recomendaciones

- Realizar experimentos adicionales con proporciones ajustadas de pan y malta para alcanzar el contenido alcohólico objetivo de 4% v/v. Esto incluye explorar combinaciones más específicas entre 30% y 50% de los insumos fermentables para maximizar el rendimiento sin superar los límites de acidez y pH establecidos.

- Se recomienda, luego de triturar el pan, someter a un pretratamiento térmico de secado en un horno a 90 °C durante 1 hora para reducir el contenido de agua en el pan y concentrar su materia seca, como almidones y azúcares, lo cual aumentaría la cantidad de insumos fermentables disponibles durante el proceso de maceración y fermentación, y así mejorar la eficiencia en la producción de etanol. Además, ayuda a eliminar microorganismos indeseados presentes en el pan caducado que podrían afectar la calidad del mosto y la fermentación. Por otra parte, al secar el pan se extiende su vida útil como insumo, facilitando el almacenamiento y manejo en la planta.
- Investigar y probar la adición de otros ingredientes naturales ricos en compuestos fenólicos, como hierbas o frutas, para aumentar la capacidad antioxidante de la cerveza. Esto podría posicionar al producto como una opción más saludable y diferenciada en el mercado.
- Asegurarse que al momento de triturar el pan las partículas no queden demasiado finas ya que después de la maceración el mosto puede quedar demasiado turbio y al ser las partículas tan pequeñas puede llegar a ser muy difícil de filtrar o remover, esta situación puede influir en el producto final, generando sabores, olores y aspecto no deseados en la cerveza.

Referencias

AB MAURI. (2023). *Levadura seca y activa para la producción de cerveza. Heritage English Ale.* Ficha Técnica, AB Biotek. Obtenido de www.abbiotek.com

Alibaba. (2024). *www.alibaba.com*. Obtenido de Electric Grain Grinder Malt Mill Corn Grinder Grain Roller Mill Malt Mill 1000kg/h - Buy Malt Mill 1000kg grain Roller Mill electric Grain Grinder Malt Mill Corn Grinder Product on Alibaba.com: https://www.alibaba.com/product-detail/electric-grain-grinder-malt-mill-corn_1601112996241.html?spm=a2700.galleryofferlist.normal_offer.d_image.36a313a09LFnQ6

Alibaba. (2024). *www.alibaba.com*. Obtenido de Filtro de mosto de cerveza industrial inoxidable de 5 micras, tierra de diatomeas, filtro de cerveza para el hogar, carcasa de filtro de vela de cerveza: https://www.alibaba.com/product-detail/Stainless-Industrial-5-Micron-Beer-Wort_1601265518260.html?spm=a2700.7735675.0.0.3355RujvRujvWx&s=p

Alibaba. (2024). *www.alibaba.com*. Obtenido de Caldera de elaboración de cerveza Mash Tun Lauter Tun para micro cervecería: https://www.alibaba.com/product-detail/brewing-boiler-mash-tun-lauter-tun_1600175116616.html?spm=a2700.galleryofferlist.normal_offer.d_title.1f2b13a00ZqKx1

Alibaba. (2024). *www.alibaba.com*. Obtenido de Fermentadores de cerveza de 500L y 1000L, Micro fermentador de cerveza, equipo de fabricación para la venta: https://www.alibaba.com/product-detail/500L-1000L-Beer-Fermenters-Micro-

Beer_1600069847261.html?spm=a2700.galleryofferlist.p_offer.d_title.45f413a0keLpJf&s=p

Alibaba. (2024). *www.alibaba.com*. Obtenido de Panko-máquina automática para hacer migas de pan, trituradora de pan, precio: https://www.alibaba.com/product-detail/Automatic-Panko-Bread-Crumb-Maker-Machine_60818923468.html?spm=a2700.galleryofferlist.normal_offer.d_title.361d13a0q0XNl5

Alibaba. (2024). *www.alibaba.com*. Obtenido de Evaporador soldado Placa de intercambiador de calor de 25kw 75kw 225kw Peter heizungen Intercambiador de Calor F80 F120t F85 S500t Sr-B3-23A Sr-B3-52A Srb3-95A: https://www.alibaba.com/product-detail/Evaporator-Brazed-Plate-Heat-Exchanger-25kw_60770465310.html?spm=a2700.galleryofferlist.topad_classic.d_title.1fa713a038LbZ8

Alibaba. (2024). *www.alibaba.com*. Obtenido de Mezclador de Gas de CO2 para bebidas carbonatadas con tanque único a pequeña escala: https://www.alibaba.com/product-detail/Small-Scale-Single-Tank-Carbonated-Soft_1600072810046.html?spm=a2700.galleryofferlist.p_offer.d_title.161c13a0TK9sJ5&s=p

Alibaba. (2024). *www.alibaba.com*. Obtenido de Máquina de llenado Manual de vino, bebidas carbonizadas, de vidrio, semiautomática: https://www.alibaba.com/product-detail/Manual-filler-capping-wine-drink-carbonated_1600586000953.html?spm=a2700.galleryofferlist.normal_offer.d_title.2b4213a0s5B5Ck

Alibaba. (2024). *www.alibaba.com*. Obtenido de Etiquetadora redondas de botellas de vino adhesiva semiautomática rápida Manual 2024: https://www.alibaba.com/product-

detail/2024-Manual-Fast-Semi-Automatic-Adhesive_62131058522.html?spm=a2700.galleryofferlist.normal_offer.d_title.151013a05z4q0c

Alibaba. (2024). *www.alibaba.com*. Obtenido de Wenzhou Compass Alta calidad Sanitaria Tri Clamp Motor de transferencia de leche Potencia Acero inoxidable SS304 Grado alimenticio 2HP Bomba centrífuga: https://www.alibaba.com/product-detail/Wenzhou-Compass-High-Quality-Sanitary-Tri_1601076846868.html?spm=a2700.galleryofferlist.p_offer.d_title.777e13a0sST5xK&s=p

Argencas Bolivia. (23 de julio de 2020). *Argencas Bolivia*. Obtenido de Descortezadora DPN-2232 Argental: https://argencas.com/product/descortezadora-dpn-2232/

Barzallo, D., Vera, H., Gavin, C., & Lazo, R. (2021). Determinación simultanea de mateales traza en muestras de suelo mediante espectrometría de emisión atómica con plasma de acoplamiento inductivo (ICP-OES). *Ecuadorian Science Journal, 5*, 4.

Cabrera, C., De Mena, C. M., Lorenzo, M. L., & López, M. C. (1995). Determinación de hierro, cobre, zinc y manganeso en bebidas alcohólicas por espectrofotometría de absorción atómica con atomización electrotérmica. *Ars Pharmaceutica,* 81-91.

Coelho, P., Prista, C., & Sousa, I. (29 de Marzo de 2024). Brewing Mainly from Stale Bread: A Pale Ale Case Study. *Beverages*. doi:https://doi.org/10.3390/beverages10020023

CRC Handbook of Chemistry and Physics (95 ed.). (2014). Taylor & Francis Group. Obtenido de https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/4557662/mod_resource/content/1/CRC%20Handbook%20of%20Chemistry%20and%20Physics%2095th%20Edition.pdf

Cuevas Villeas, C. F. (2002). Fijación de precios Costo Plus (Costo más margen) y Target Costing (Costeo Objetivo). *ESTUDIOS Gerenciales*, 17-18. Obtenido de http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=21208301

de la Vara Salazar, R., & Gutierrez Pulido, H. (2008). *Análisis y diseño de experimentos.* México D.F.: McGraw-Hill Interamericana.

Delgadillo-Díaz, M., Álvarez-Romero, A., Baleón-Ortega, K., & Ortiz-Salazar, F. (2023). Determinación de antioxidantes durante el procesos de elaboración en panes artesanales fermentados. *Ecosistemas y Recursos Agropecuarios*, 6-8. doi:10.19136/era.a10nIII.3707

Díez, I. D. (2020). *Nuevas tendencias en el uso de adjuntos cerveceros: utilización de pan y adjuntos no amiláceos.* Universidad de Valladolid, Valladolid.

Espinosa, E. (06 de Abril de 2021). Grain and Feed Annual. *United States Department of Agriculture Foreign Agricultural Service*.

FAO. (2023). Revealing the true cost of food to transform agrifood systems. *The State of Food and Agriculture 2023*. doi:https://doi.org/10.4060/cc7724en

Faria, D. J., Azevedo de Carvalho, A. P., & Conte Junior, C. A. (22 de October de 2023). Valorization of Fermented FoodWastes and Byproducts: Bioactive and Valuable Compounds, Bioproduct Synthesis, and Applications. *Fermentation*. doi:https://doi.org/10.3390/ermentation9100920

García Martinez, E., Fernández Segovia, I., & Fuentes López, A. (s.f.). *Determinación de polifenoles totales por el método de Folin-Ciocalteu.* ETSIAMN. Universitat Politécnica de Valencia, Valencia.

Gatón, F. A. (2021). Elaboración y estudio analítico de cerveza artesanal a partir de distintos tipos de pan. *(Tesis de maestría).* Universidad de Valladolid, Valladolid.

Gómez Ibañez, J. (2021). *Microbiata de las masas madres.* Trabajo Fin de Grado, Universidad Zaragoza, Ciencia y Tecnología de los Alimentos.

González San José, M. L., Muñiz Rodríguez, P., & Valls Bellés, V. (2001). *Actividad antioxidante de la cerveza: estudios in vitro e in vivo.* Universidad de Burgos, Departamento de Bioctenología y Ciencia de los Alimentos. Centro de información: Cerveza y Salud.

Huxley, S. (2006). *La Cerveza. Poesía líquida - Un manual para cervesiáfilos.* Valencia: Ediciones Tarea, S.L.

INEN . (2002). *NTE INEN 2325: Bebidas alcohólicas. Cerveza. Determinación del pH.* Quito.

INEN. (2002). *NTE INEN 2322: Bebidas alcohólicas. Cerveza. Determinación de alcohol.* Quito.

INEN. (2002). *NTE INEN 2323: Bebidas alcohólicas. Cerveza. Determinación de la acidez total.* Quito.

INEN. (2002). *NTE INEN 2329: Bebidas alcohólicas. Cerveza. Determinación de arsénico.* Quito.

INEN. (2013). *NTE INEN 2262: Bebidas alcohólicas. Cerveza. Requisitos.* Quito. Obtenido de Bebidas alcohólicas. Cerveza. Requisitos: https://odaninkasiquito.files.wordpress.com/2015/08/inen-2-262-cerveza.pdf

Ma, H., Li, H., Gang, J., & Wang, Q. (2019). Optimization of ethanol fermentation form fruit and vegetable waste by Plackett-Burman and orthogonal experimental design. *Bioresources*. Obtenido de https://bioresources.cnr.ncsu.edu/resources/optimization-of-ethanol-fermentation-from-fruit-and-vegetable-waste-by-plackett-burman-and-orthogonal-experimental-design/

Marongiu, A., Zara, G., Legras, J.-L., Del Caro, A., Mascia, I., Fadda, C., & Budroni, M. (2015). Novel starters for old processes: use of Saccharomyces cerevisiae strains isolated from artisanal sourdough for craft beer production at a brewery scale. *Industrial Microbiology and Biotechnology, 42*, 87-88. doi:https://doi.org/10.1007/s10295-014-1525-1

Mascia, I., Fadda, C., Dostálek, P., Karabín, M., Zara, G., Budroni, M., & Del Caro, A. (2015). Is it possible to create an innovative craft durum wheat beer with sourdough yeasts? A case study. *Institute of Brewing & Distilling*, 284-285. doi:DOI 10.1002/jib.215

Mesta-Corral, M., Gómez García, R., Balagurusamy, N., Torres-León, C., & Hernández-Almanza, A. Y. (2024). Technological and Nutritional Aspects of Bread Production: An Overview of Current Status and Future Challenges. *Foods*. doi:https://doi.org/10.3390/foods13132062

Mohamed, F., Guillaume, D., Abdulwali, N. A.-H., & Al. Maqtari, M. (2020). ICP-OES assisted determination of the metal content of some fruit juices from Yemen's market. *Heliyon*.

Moura Rufino, M. d., Elesbão Alves, R., Sousa de Brito, E., Maia de Morais, S., Sampaio, C. d., Pérez-Jiménez, J., & Saura-Calixto, F. D. (2006). *Metodologia científica: Determinação da actividade antioxidante total em frutas pelo método de Redução do Ferro (FRAP).* Fortaleza: Ministério de Agricultura, Pecuãria e Abastecimiento.

Narisetty, V., Cox, R., Willoughby, N., Aktas, E., Tiwari, B., Matharu, A., . . . Kumar, V. (11 de Agosto de 2021). Recycling bread waste into chemical building blocks using a circular biorefining approach. *Sustainable Energy & Fuels*. doi:https://doi.org/10.1039/D1SE00575H

Oddone, S. (2018). *Matemática de la cerveza* (1a ed.). Buenos Aires: Autores de Argentina.

Ortiz Sanchez, M., García, P.-J. I., Alzate Ramírez, A. F., & Cardona Alzate, C. A. (10 de March de 2023). Potential and Restrictions of Food-Waste Valorization through Fermentation Processes. *Fermentation*. doi:https://doi.org/10.3390/fermentation9030274

Osorio Licona, E. M. (2024). *Caracterización Fisicoquímica, Microbiológica y Sensorial de un Pan Tipo Campesino Elaborado con Masa Madre Tipo I de Harina de Semillas de Huauzontle (Chenopodium berlandieri ssp. Nuttalliae).* Maestría en Ciencia de los Alimentos, Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, Instituto de Ciencias Agropecuarias, México.

Pachas, J. C. (2019). Contenido de Polifenoles totales y capacidad antioxidante en cervezas artesanales e industriales. *Peruvian Agricultural Research, 1*(1), 29. doi:https://doi.org/10.51431/par.v1i1.480

Palmer, J. J. (2006). *How to brew.* (tercera, Ed.) Brewers Publications.

Pejcz, E., Lachowicz-Wisniewska, S., Nowicka, P., Wojciechowicz-Budzisz, A., & Harasym, J. (2024). Enhancing antioxidant activity and modulating FODMAPs levels in inoculated sourdough rye bread . *LWT - Food Science and Technology*.

Ramos, A. F., & Talero, V. (2022). *Análisis de los compuestos fenólicos antioxidantes en diferentes bagazos de cerveza artesanal "Master Beer".* Proyecto integral de grado, Fundación Universidad de América, Facultad de Ingenierías, Bogotá.

Vásquez-García, A., Matus-Gardea, J., Cetina-Alcalá, V., Sangerman-Jarquín, D., Rendón Sánchez, G., & Caamal Cauich, I. (2017). Análisis de rentabilidad de una empresa integradora de aprovechamiento de madera de pino. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 649-659.

Apéndices

Apéndice A

Registro de la elaboración de lotes

Parámetros	Lote 1	Lote 2	Lote 3	Lote 4	Lote 5	Lote 6	Lote 7	Lote 8	Lote 9
Porcentaje de Malta	30%	30%	70%	70%	50%	50%	22%	78%	50%
Porcentaje de Pan	30%	70%	30%	70%	22%	78%	50%	50%	50%
Cantidad de Malta teórica (g)	714,3	714,3	1666,7	1666,7	1190,5	1190,5	517,0	1863,9	1190,5
Cantidad de Malta real (g)	716	716	1670	1670	1192	1192	520	1864	1192
Cantidad de Pan teórica (g)	1763,9	4115,9	1763,9	4115,9	1276,8	4602,9	2939,9	2939,9	2939,9
Cantidad de Pan real (g)	1764	4146	1766	4116	1278	4604	2972	2942	2940
Volumen de agua para maceración (L)	14	14	14	14	14	14	14	14	14
Temperatura de maceración (°C)	68	69	70	68	68,8	70	68	68	70
Tiempo de maceración (min)	60	60	60	60	60	60	60	65	60
Volumen de agua de lavado (L)	3	3	3	3	3	3	3	3	3
Temperatura del agua de lavado (°C)	80	80	79,9	80	80,4	80	80	80	80
Tiempo de cocción (min)	85	65	70	65	75	60	60	71	75
Cantidad de lúpulo (g)	26	26	26	26	26	26	26	26	26
Cantidad de levadura (g)	12	12	12	12	12	12	12	12	12
Volumen final del mosto (L)	12	12	12	12	12	12	12	12	12
Densidad inicial experimental (kg/m^3)	1040	1068	1060	1062	1039	1067	1053	1069	1049
Temperatura de fermentación (°C)	18	18	18	18	18	18	18	18	18
Densidad día 2 (kg/m^3)	1030	-	-	1055	1030	-	1040	-	-
Densidad día 4 (kg/m^3)	-	1060	1035	1050	-	-	-	1040	-
Densidad día 5 (kg/m^3)	1025	-	1032	-	-	1067	-	1039	1040
Densidad día 6 (kg/m^3)	-	1055	-	-	1021	1067	1042	1030	1040
Densidad día 7 (kg/m^3)	1025	1055	1030	1050	1021	-	-	1030	1040
Densidad día 8 (kg/m^3)	-	-	-	-	-	1067	1040	1025	1040
Densidad final calculada (kg/m^3)	1021	1047	1026	1049	1014	1053	1039	1022	1031
Cantidad de azúcar por botella (g)	2	2	2	2	2	2	2	2	2
Cantidad de botellas de 330 mL	12	13	18	11	20	13	16	19	13

Apéndice B

Tablas estandarizadas de NTE INEN 2322

Gravedad especifica 20°C/20°C	% v/v	% m/m	G/100 cm^3	Gravedad especifica 20°C/20°C	% v/v	% m/m	G/100 cm^3	Gravedad especifica 20°C/20°C	% v/v	% m/m	G/100 cm^3
1,000 00	0,00	0,00	0,00	0998 66	0,90	0,71	0,71	0,997 33	180	143	1,43
0,999 97	0,02	0,02	0,02	863	0,92	0,73	0,73	730	182	145	1,45
994	0,04	0,03	0,03	860	0,94	0,74	0,74	727	184	146	1,46
991	0,06	0,05	0,05	85 7	0,96	0,76	0,76	725	186	148	1,48
988	0,08	0,06	0,06	854	0,98	0,77	0,77	722	188	149	1,49
0,999 85	0,10	0,08	0,08	0,998 51	1,00	0,79	0,79	0,997 19	1,90	1,51	1,51
982	0,12	0,10	0,10	848	1,02	0,81	0,81	716	1,92	1,53	1,53
979	0,14	0,11	0,11	845	1,04	0,82	0,82	713	1,94	1,54	1,54
976	0,16	0,13	0,13	842	1,06	0,84	0,84	710	1,96	1,56	1,56
973	0,18	0,14	0,14	839	1,08	0,85	0,85	707	1,98	1,57	1,57
0,999 70	0,20	0,16	0,16	0, 998 36	1,10	0,87	0,87	0,007 04	2,00	1,59	1,59
967	0,22	0,18	0,18	833	1,12	0,89	0,89	701	2,02	1,61	1,61
964	0,24	0,19	0,19	830	1,14	0,90	0,90	698	2,04	1,62	1,62
961	0,26	0,21	0,21	827	1,16	0,92	0,92	695	2,06	1,64	1,64
958	0,28	0,22	0,22	824	1,18	0,93	0,93	692	2,08	1,65	1,65
0,999 55	0,30	0,24	0,24	0,998 21	1,20	0,95	0,95	0,996 89	2,10	1,67	1,67
952	0,32	0,26	0,26	818	1,22	0,97	0,97	686	2,12	1,69	1,69
949	0,34	0,27	0,27	815	1,24	0,98	0,98	683	2,14	1,70	1,70
945	0,36	0,29	0,29	813	1,26	1,00	1,00	681	2,16	1,72	1,72
942	0,38	0,30	0,30	810	1,28	1,01	1,01	678	2,18	1,73	1,73
0,999 39	0,40	0,32	0,32	0,998 07	1,30	1,03	1,03	0,996 75	2,20	1,75	1,75
936	0,42	0,34	0,34	804	1,32	1,05	1,05	672	2,22	1,76	1,76
933	0,44	0,35	0,35	801	1,34	1,06	1,06	669	2,24	1,78	1,78
930	0,46	0,37	0,37	798	1,36	1,08	1,08	667	2,26	1,79	1,79
927	0,48	0,38	0,38	795	1,38	1,09	1,09	664	2,28	1,81	1,81
0,999 24	0,50	0,40	0,40	0,997 92	1,40	1,11	1,11	0,996 61	2,30	1,82	1,82
921	0,52	0,41	0,41	789	1,42	1,13	1,13	658	2,32	1,84	1,84
918	0,54	0,43	0,43	786	1,44	1,14	1,14	655	2,34	1,85	1,85
916	0,56	0,44	0,44	783	1,46	1,16	1,16	652	2,36	1,87	1,87
913	0,58	0,46	0,46	780	1,48	1,17	1,17	649	2,38	1,88	1,88
0,999 10	0,60	0,47	0,47	0,997 77	1,50	1,19	1,19	0,996 46	2,40	1,90	1,89
907	0,62	0,49	0,49	774	1,52	1,21	1,21	643	2,42	1,92	1,91
904	0,64	0,50	0,50	771	1,54	1,22	1,22	640	2,44	1,93	1,92
901	0,66	0,52	0,52	769	1,56	1,24	1,24	638	2,46	1,95	1,94
898	0,68	0,53	0,53	766	1,58	1,25	1,25	635	2,48	1,96	1,95
0,998 95	0,70	0,55	0,55	0,997 63	1,60	1,27	1,26	0,996 32	2,50	1,98	1,97
892	0,72	0,57	0,57	760	1,62	1,29	1,28	629	2,52	2,00	1,99
889	0,74	0,58	0,58	757	1,64	1,30	1,29	626	2,54	2,01	2,00
886	0,76	0,60	0,60	754	1,66	1,32	1,31	624	2,56	2,03	2,02
883	0,78	0,61	0,61	751	1,68	1,33	1,32	621	2,58	2,04	2,03
0,998 80	0,80	0,63	0,63	0,997 48	1,70	1,35	1,34	0,996 18	2,60	2,06	2,05
877	0,82	0,65	0,65	745	1,72	1,37	1,36	615	2,62	2,08	2,07
874	0,84	0,66	0,66	742	1,74	1,38	1,37	612	2,64	2,09	2,08
872	0,86	0,68	0,68	739	1,76	1,40	1,39	609	2,66	2,11	2,10
869	0,88	0,69	0,69	736	1,78	1,41	1,40	606	2,68	2,12	2,11
0,996 03	2,70	2,14	2,13	0,994 75	3,60	2,86	2,84	0,003 49	4,50	3,58	3,55
600	2,72	2,16	2,15	472	3,62	2,88	2,86	346	4,52	3,60	3,57
597	2,74	2,17	2,16	469	3,64	2,89	2,87	344	4,54	3,61	3,58
595	2,76	2,19	2,18	467	3,66	2,91	2,89	341	4,56	3,63	3,60
592	2,78	2,20	2,19	464	3,68	2,92	2,90	339	4,58	3,64	3,61
0,995 89	2,80	2,22	2,21	0,994 61	3,70	2,94	2,92	0,993 36	4,60	3,66	3,63
586	2,82	2,24	2,23	458	3,72	2,96	2,94	333	4,62	3,68	3,65
583	2,84	2,25	2,24	455	3,74	2,97	2,95	330	4,64	3,69	3,66
580	2,86	2,27	2,26	453	3,76	2,99	2,97	328	4,66	3,71	3,68
577	2,88	2,28	2,27	450	3,78	3,00	2,98	325	4,68	3,72	3,69
0,995 74	2,90	2,30	2,29	0,994 47	3,80	3,02	3,00	0,993 22	4,70	3,74	3,71
571	2,92	2,32	2,31	444	3,82	3,04	3,02	319	4,72	3,76	3,73
568	2,94	2,33	2,32	441	3,84	3,05	3,03	316	4,74	3,77	3,74
566	2,96	2,35	2,34	439	3,86	3,07	3,05	314	4,76	3,79	3,76
563	2,98	2,36	2,35	436	3,88	3,08	3,06	311	4,78	3,80	3,77

Gravedad especifica 20°C/20°C	% v/v	% m/m	G/100 cm^3	Gravedad especifica 20°C/20°C	% v/v	% m/m	G/100 cm^3	Gravedad especifica 20°C/20°C	% v/v	% m/m	G/100 cm^3
0,995 60	3,00	2,38	2,37	0,994 33	3,90	3,10	3,08	0,993 08	4,80	3,82	3,79
557	3,02	2,40	2,39	430	3,92	3,12	3,10	305	4,82	3,84	3,81
554	3,04	2,41	2,40	427	3,94	3,13	3,11	303	4,84	3,85	3,82
552	3,06	2,43	2,42	425	3,96	3,15	3,13	300	4,86	3,87.	3,84
549	3,08	2,44	2,43	422	3,98	3,16	3,14	298	4,88	3,88	3,85
0,995 46	3,10	2,46	2,45	0,994 19	4,00	3,18	3,16	0,992 95	4,90	3,90	3,87
543	3,12	2,48	2,47	416	4,02	3,20	3,18	292	4,92	3,92	3,89
540	3,14	2,49	2,48	413	4,04	3,21	3,19	289	4,94	3,93	3,90
537	3,16	2,51	2,50	411	4,06	3,23	3,21	287	4,96	3,95	3,92
534	3,18	2,52	2,51	408	4,08	3,24	3,22	284	4,98	3,96	3,93
0,995 31	3,20	2,54	2,53	0,994 05	4,10	3,26	3,24	0,992 81	5,00	3,98	3,95
528	3,22	2,56	2,54	402	4,12	3,28	3,26	278	5,02	4,00	3,97
525	3,24	2,57	2,56	399	4,14	3,29	3,27	276	5,04	4,01	3,98
523	3,26	2,59	2,57	397	4,16	3,31	3,29	273	5,06	4,03	4,00
520	3,28	2,60	2,59	394	4,18	3,32	3,30	271	5,08	4,04	4,01
0,995 17	3,30	2,62	2,60	0,993 91	4,20	3,34	3,32	0,992 68	5,10	4,06	4,03
514	3,32	2,64	2,62	388	4,22	3,36	3,33	265	5,12	4,08	4,04
511	3,34	2,65	2,63	385	4,24	3,37	3,35	263	5,14	4,09	4,06
509	3,36	2,67	2,65	383	4,26	3,39	3,36	260	5,16	4,11	4,07
506	3,38	2,68	2,66	380	4,28	3,40	3,38	258	5,18	4,12	4,08
0,995 03	3,40	2,70	2,68	0,993 77	4,30	3,42	3,39	0,992 55	5,20	4,14	4,10
500	3,42	2,72	2,70	374	4,32	3,44	3,41	252	5,22	4,16	4,12
497	3,44	2,73	2,71	371	4,34	3,45	3,42	249	5,24	4,17	4,13
495	3,46	2,75	2,73	369	4,36	3,47	3,44	247	5,26	4,19	4,15
492	3,48	2,76	2,74	366	4,38	3,48	3,45	244	5,28	4,20	4,16
0,994 89	3,50	2,78	2,76	0,993 63	4,40	3,50	3,47	0,992 41	5,30	4,22	4,18
486	3,52	2,80	2,78	360	4,42	3,52	3,49	238	5,32	4,24	4,20
483	3,54	2,81	2,79	357	4,44	3,53	3,50	236	5,34	4,25	4,21
481	3,56	2,83	2,81	355	4,46	3,55	3,52	233	5,36	4,27	4,23
478	3,58	2,84	2,82	352	4,48	3,56	3,53	231	5,38	4,28	4,24
0,992 28	5,40	4,30	4,26	0,991 09	6,30	5,03	4,97	0,989 94	7,20	5,75	5,68
225	5,42	4,32	4,28	106	6,32	5,05	4,99	991	7,22	5,77	5,70
223	5,44	4,33	4,29	104	6,34	5,06	5,00	989	7,24	5,78	5,71
220	5,46	4,35	4,31	101	6,36	5,08	5,02	986	7,26	5,80	5,73
218	5,48	4,36	4,32	099	6,38	5,09	5,03	984	7,28	5,81	5,74
0,992 15	5,50	4,38	4,34	0,990 96	6,40	5,11	5,05	0,989 81	7,30	5,83	5,76
212	5,52	4,40	4,36	093	6,42	5,13	5,07	979	7,32	5,85	5,78
209	5,54	4,41	4,37	091	6,44	1,14	5,08	976	7,34	5,86	5,79
207	5,56	4,43	4,39	988	6,46	1,16	5,10	974	7,36	5,88	5,81
204	5,58	4,44	4,40	086	6,48	1,17	5,11	971	7,38	5,89	5,82
0,992 01	5,60	4,46	4,42	0,990 83	6,50	5,19	5,13	0,989 69	7,40	5,91	5,84
198	5,62	4,48	4,44	080	6,52	5,21	5,15	966	7,42	5,93	5,86
196	5,64	4,49	4,45	078	6,54	5,22	5,16	964	7,44	5,94	5,87
193	5,66	4,51	4,47	075	6,56	5,24	5,18	961	7,46	5,96	5,89
191	5,68	4,52	4,48	073	6,58	5,25	5,19	959	7,48	5,97	5,90
0,991 88	5,70	4,54	4,50	0,990 70	6,60	5,27	5,21	0,989 56	7,50	5,99	5,92
185	5,72	4,56	4,52	067	6,62	5,29	5,23	954	7,52	6,01	5,94
182	5,74	4,57	4,53	065	6,64	5,30	5,24	951	7,54	6,02	5,95
180	5,76	4,59	4,55	062	6,66	5,32	5,26	949	7,56	6,04	5,97
177	5,78	4,60	4,56	060	6,68	5,33	5,27	946	7,58	6,05	5,98
0,991 74	5,80	4,62	4,58	0,990 57	6,70	5,35	5,29	0,989 44	7,60	6,07	6,00
171	5,82	4,64	4,60	055	6,72	5,37	5,31	941	7,62	6,09	6,02
169	5,84	4,65	4,61	052	6,74	5,38	5,32	939	7,64	6,10	6,03
166	5,86	4,67	4,63	050	6,76	5,40	5,34	936	7,66	6,12	6,05
164	5,88	4,68	4,64	047	6,78	5,41	5,35	934	7,68	6,13	6,06
0,991 61	5,90	4,70	4,66	0,990 45	6,80	5,43	5,37	0,989 31	7,70	6,15	6,08
158	5,92	4,72	4,68	042	6,82	5,45	5,39	929	7,72	6,17	6,10
156	5,94	4,73	4,69	040	6,84	5,46	5,40	926	7,74	6,19	6,11
153	5,96	4,75	4,71	037	6,86	5,48	5,42	924	7,76	6,20	6,13
151	5,98	4,76	4,72	035	6,88	5,49	5,43	921	7,78	6,22	6,14

Gravedad específica 20°C/20°C	% v/v	% m/m	G/100 cm^3	Gravedad específica 20°C/20°C	% v/v	% m/m	G/100 cm^3	Gravedad específica 20°C/20°C	% v/v	% m/m	G/100 cm^3
0,991 48	6,00	4,78	4,74	0,990 32	6,90	5,51	5,45	0,989 19	7,80	6,24	6,16
145	6,02	4,80	4,76	030	6,92	5,53	5,47	916	7,82	6,26	6,18
143	6,04	4,82	4,77	027	6,94	5,54	5,48	914	7,84	6,27	6,19
140	6,06	4,83	4,79	025	6,96	5,56	5,50	911	7,86	6,29	6,21
138	6,08	4,85	4,80	022	6,98	5,57	5,51	909	7,88	6,30	6,22
0,991 35	6,10	4,87	4,82	0,990 20	7,00	5,59	5,53	0,989 06	7,90	6,32	6,24
132	6,12	4,89	4,83	017	7,02	5,61	5,54	903	7,92	6,34	6,26
130	6,14	4,90	4,85	015	7,04	5,62	5,56	901	7,94	6,35	6,27
127	6,16	4,92	4,86	012	7,06	5,64	5,57	898	7,96	6,37	6,29
125	6,18	4,93	4,88	010	7,08	5,65	5,59	896	7,98	6,38	6,30
0,991 22	6,20	4,95	4,89	0,990 07	7,10	5,67	5,60	0,988 93	8,00	6,40	6,32
119	6,22	4,97	4,91	004	7,12	5,69	5,62	891	8,02	6,42	6,33
117	6,24	4,98	4,92	002	7,14	5,79	5,63	888	8,04	6,43	6,35
114	6,26	5,00	4,94	0,989 99	7,16	5,72	5,65	886	8,06	6,45	6,36
112	6,28	5,01	4,95	997	7,18	5,73	5,66	883	8,08	6,46	6,38
0,988 81	8,10	6,48	6,39	0,987 94	8,80	7,04	6,95	0,987 10	9,50	7,61	7,50
879	8,12	6,50	6,41	792	8,82	7,06	6,97	708	9,52	7,63	7,52
876	8,14	6,51	6,42	789	8,84	7,07	6,98	705	9,54	7,64	7,53
874	8,16	6,53	6,44	787	8,86	7,09	7,00	703	9,56	7,66	7,55
871	8,18	6,54	6,45	784	8,88	7,10	7,01	700	9,58	7,67	7,56
0,988 69	8,20	6,56	6,47	0,987 82	8,90	7,12	7,03	0,986 98	9,60	7,69	7,58
867	8,22	6,58	6,49	780	8,92	7,14	7,04	696	9,62	7,71	7,60
864	8,24	6,59	6,50	777	8,94	7,15	7,06	693	9,64	7,72	7,61
862	8,26	6,61	6,52	775	8,96	7,17	7,07	691	9,66	7,74	7,63
859	8,28	6,62	6,53	772	8,98	7,18	7,09	688	9,68	7,75	7,64
0,988 57	8,30	6,64	6,55	0,987 70	9,00	7,20	7,10	0986 86	9,70	7,77	7,66
855	8,32	6,66	6,57	768	9,02	7,22	7,12	684	9,,72	7,79	7,67
852	8,34	6,67	6,58	765	9,04	7,24	7,13	681	9,,74	7,80	7,69
850	8,36	6,69	6,60	763	9,06	7,25	7,15	679	9,,76	8,72	7,70
847	8,38	6,70	6,61	760	9,08	7,27	7,16	676	9,,78	7,83	7,72
0,988 45	8,40	6,72	6,63	0,987 58	9,10	7,29	7,18	0,986 74	9,80	7,85	7,73
843	8,42	6,74	6,65	756	9,12	7,31	7,20	672	9,82	7,87	7,75
840	8,44	6,75	6,66	753	9,14	7,32	7,21	669	9,84	7,88	7,76
838	8,46	6,77	6,68	751	9,16	7,34	7,23	667	9,86	7,90	7,78
835	8,48	6,78	6,69	748	9,18	7,35	7,24	664	9,88	7,91	7,79
0,988 33	8,50	6,80	6,71	0,987 46	9,20	7,37	7,26	0,986 62	9,90	7,93	7,81
830	8,52	6,82	6,73	744	9,22	7,39	7,28	660	9,92	7,95	7,83
828	8,54	6,83	6,74	741	9,24	7,40	7,29	657	9,94	7,97	7,84
825	8,56	6,85	6,76	739	9,26	7,42	7,31	655	9,96	7,98	7,86
823	8,58	6,86	6,77	736	9,28	7,43	7,32	652	9,98	8,00	7,87
0,988 20	8,60	6,88	6,79	0,987 34	9,30	7,45	7,34	0,986 50	10,00	8,02	7,89
817	8,62	6,90	6,81	732	9,32	7,47	7,36				
815	8,64	6,91	6,82	729	9,34	7,48	7,37				
812	8,66	6,93	6,84	727	9,36	7,50	7,39				
810	8,68	6,94	6,85	724	9,38	7,51	7,40				
0,988 07	8,70	6,96	6,87	0,987 22	9,40	7,53	7,42				
804	8,72	6,98	6,89	720	9,42	7,55	7,44				
802	8,74	6,99	6,90	717	9,44	7,56	7,45				
799	8,76	7,01	6,92	715	9,46	7,58	7,47				
797	7,78	7,02	6,93	712	9,48	7,59	7,48				

Apéndice C

Resultados de la simulación en Aspen Plus

Material															
Stream Name	**Units**	**CERVEZA**	**PAN**	**CO2**	**ETANOL**	**GAS**	**MALTA**	**VAPOR**	**AGUA**	**AGUA01**	**AGUA02**	**MOSTO01**	**MOSTO02**	**MOSTO03**	**MOSTO04**
Description															
From		FERMENT		FERMENT	B9	B9		BREW	B9			MASH	WASHOUT	BREW	COOLING
To		B9	MASH				MASH			MASH	WASHOUT	WASHOUT	BREW	COOLING	FERMENT
Stream Class		CONVEN	CONVEN	CONVEN	CONVEN	CONVEN	CONVEN	CONVEN	CONVEN	CONVEN	CONVEN	CONVEN	CONVEN	CONVEN	CONVEN
Maximum Relative Error															
MIXED Substream															
Phase		Liquid Phase	Liquid Phase	Vapor Phase	Liquid Phase	Vapor Phase	Liquid Phase	Vapor Phase	Liquid Phase	Liquid Phase	Liquid Phase	Liquid Phase	Liquid Phase	Liquid Phase	Liquid Phase
Temperature	C	16	25	16	16	16	25	100.4011303	16	70	80	66.85876855	69.34034427	100.4011303	25
Pressure	bar	1.01325	1.01325	1.01325	1.01325	1.01325	1.01325	1.01325	1.01325	1.01325	1.01325	1.01325	1.01325	1.01325	1.01325
Molar Vapor Fraction		0	0	1	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0
Molar Liquid Fraction		1	1	0	1	0	1	0	1	1	1	1	1	1	1
Molar Solid Fraction		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Mass Vapor Fraction		0	0	1	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0
Mass Liquid Fraction		1	1	0	1	0	1	0	1	1	1	1	1	1	1
Mass Solid Fraction		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Molar Enthalpy	cal/mol	-69475.54952	-300427.898	-93392.20884	-66747.03749	-94070.10516	-300427.898	-57189.68969	-69007.68409	-67501.59785	-67319.32601	-70904.23907	-70201.79858	-69745.79055	-71158.69959
Mass Enthalpy	cal/gm	-3573.406621	-1667.583075	-2144.627774	-1448.848022	-2137.48086	-1667.583075	-3174.510169	-3745.959245	-3746.908061	-3736.790436	-3478.44432	-3524.225749	-3482.383698	-3552.929767
Molar Entropy	cal/mol-K	-39.92785056	-262.2376011	0.379313086	-83.81149953	0.434326883	-262.2376011	-8.774273402	-39.95834255	-36.45603786	-35.9346572	-39.57399182	-38.85293185	-37.29605603	-41.54025533
Mass Entropy	cal/gm-K	-2.05364976	-1.455600456	0.00871042	-1.81925865	0.009868867	-1.455600456	-0.487046184	-2.169067469	-2.02361761	-1.994676586	-1.941434375	-1.950470011	-1.862179444	-2.074090878
Molar Density	mol/cc	0.051899642	0.006515774	4.2147E-05	0.017216318	4.2147E-05	0.006515774	3.26242E-05	0.054879637	0.052652749	0.052085456	0.049042806	0.049602524	0.047730314	0.051761965
Mass Density	gm/cc	1.009052861	1.173866801	0.001835375	0.79313923	0.001854879	1.173866801	0.000587733	1.010987157	0.948554025	0.938334075	0.999683347	0.988071324	0.955951094	1.036697694
Enthalpy Flow	cal/sec	-999404.4085	-15633.59133	-352.6255858	-18524.40858	-25759.16794	-36478.37977	-45480.24836	-954626.026	-789809.9382	-194797.6554	-841921.9093	-1036719.565	-974519.852	-994261.6585
Average MW		19.44238562	180.15768	43.54704809	46.06904	44.0098	180.15768	18.01528004	18.42189933	18.01528	18.01528	20.38389365	19.91977915	20.02817513	20.02817513
Mole Flows	kmol/hr	51.78592894	0.187335894	0.013592698	0.999113569	0.985786126	0.437117085	2.862909293	49.80102925	42.12219959	10.41709121	42.74665257	53.16374379	50.30083449	50.30083449
WATER	kmol/hr	49.67613865	0	0.000242863	0	0	0	2.862909292	49.67613865	42.12219959	10.41709121	42.12219959	52.53929081	49.67638151	49.67638151
GLUCOSE	kmol/hr	0.124890596	0.187335894	3.32925E-19	0	0	0.437117085	6.91279E-10	0.124890596	0	0	0.624452979	0.624452979	0.624452978	0.624452978
SUCROSE	kmol/hr	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
ETHANOL	kmol/hr	0.999113569	0	1.11962E-05	0.999113569	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
CO2	kmol/hr	0.985786126	0	0.013338639	0	0.985786126	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Material															
Stream Name	**Units**	**CERVEZA**	**PAN**	**CO2**	**ETANOL**	**GAS**	**MALTA**	**VAPOR**	**AGUA**	**AGUA01**	**AGUA02**	**MOSTO01**	**MOSTO02**	**MOSTO03**	**MOSTO04**
Mole Fractions															
WATER		0.959259391	0	0.017867154	0	0	0	1	0.997492209	1	1	0.985391769	0.988254157	0.987585634	0.987585634
GLUCOSE		0.00241167	1	2.44929E-17	0	0	1	2.4146E-10	0.002507791	0	0	0.014608231	0.011745843	0.012414366	0.012414366
SUCROSE		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
ETHANOL		0.019293148	0	0.000823695	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
CO2		0.019035791	0	0.981309151	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Mass Flows	kg/hr	1006.842	33.75	0.591921882	46.02820299	43.38425027	78.75	51.57611264	917.4295471	758.8432199	187.666815	871.3432199	1059.010035	1007.433922	1007.433922
WATER	kg/hr	894.9295471	0	0.004375242	0	0	0	51.57611252	894.9295471	758.8432199	187.666815	758.8432199	946.5100349	894.9339224	894.9339224
GLUCOSE	kg/hr	22.49999998	33.75	5.99789E-17	0	0	78.75	1.24539E-07	22.49999998	0	0	112.5	112.5	112.4999999	112.4999999
SUCROSE	kg/hr	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
ETHANOL	kg/hr	46.02820299	0	0.0005158	46.02820299	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
CO2	kg/hr	43.38425027	0	0.58703084	0	43.38425027	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Mass Fractions															
WATER		0.888848048	0	0.007391587	0	0	0	0.999999998	0.975474956	1	1	0.870888994	0.893768712	0.888330145	0.888330145
GLUCOSE		0.022347101	1	1.01329E-16	0	0	1	2.41467E-09	0.024525044	0	0	0.129111006	0.106231288	0.111669855	0.111669855
SUCROSE		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
ETHANOL		0.045715418	0	0.000871399	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
CO2		0.043089432	0	0.991737015	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Volume Flow	l/hr	997.8089741	28.75113255	322.5072755	58.03294205	23389.26335	67.08597596	87754.27621	907.4591513	800	200	871.619221	1071.795131	1053.855085	971.7721265

Anexos

Figura 44

Lotes de cerveza

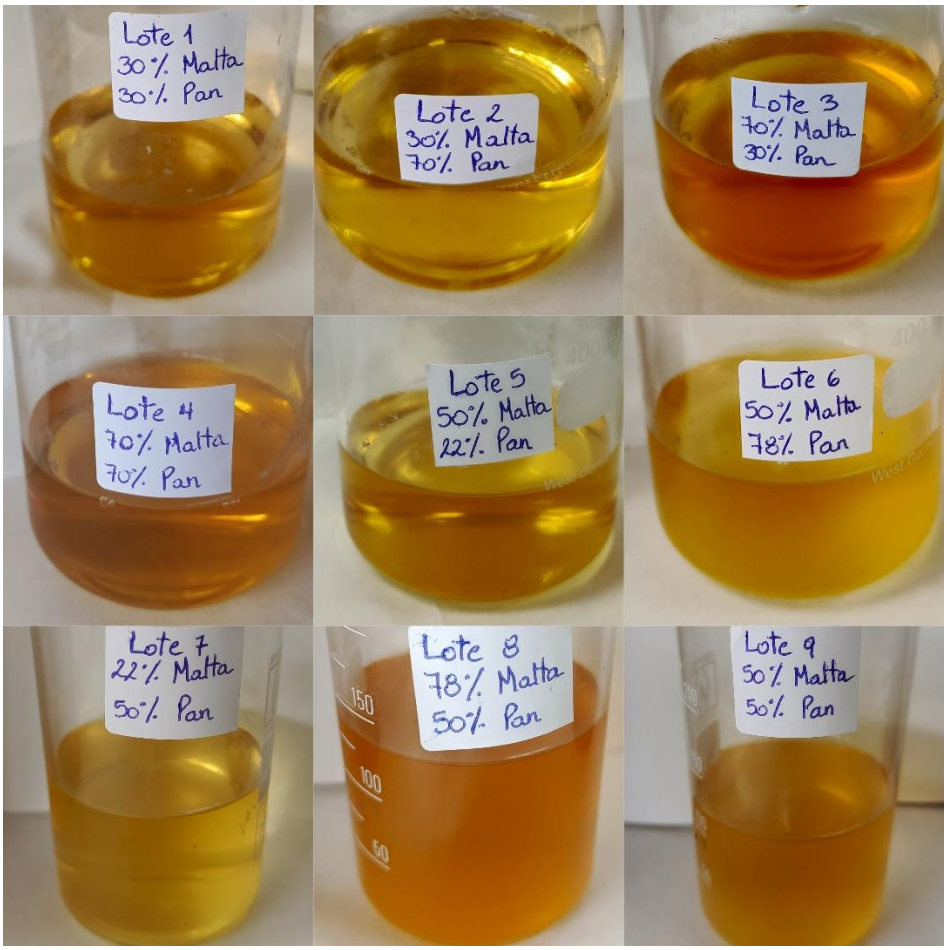


Figura 45

Desgasificación de muestras de cerveza

Figura 46

Equipos utilizados en los análisis fisicoquímicos

a)

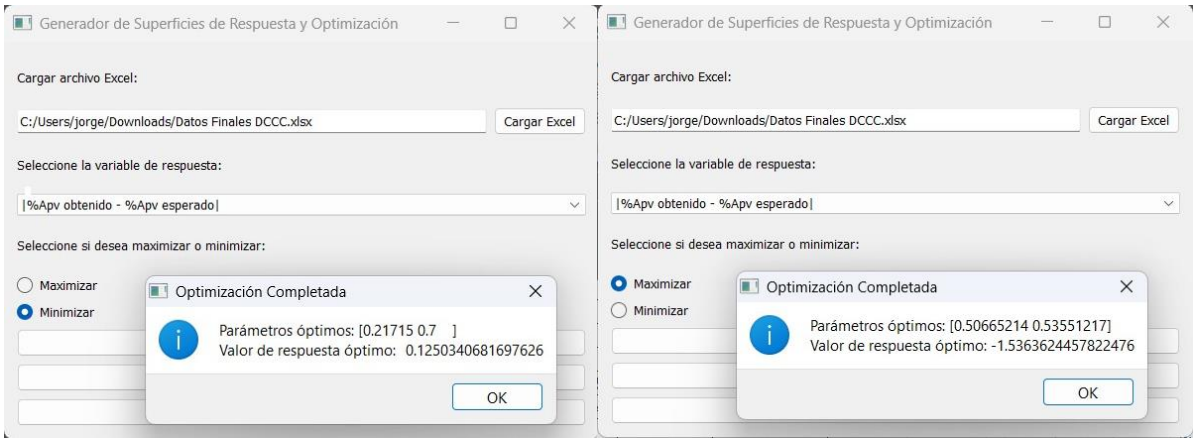
b)

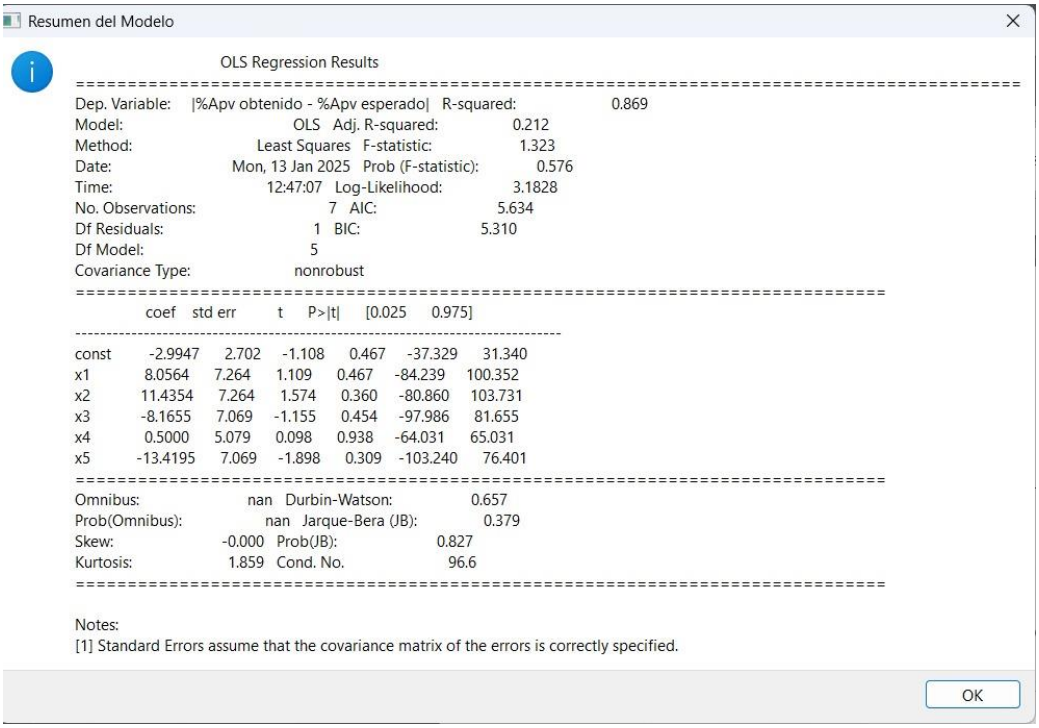
c)

Nota. Equipos ubicados en el Laboratorio consolidado de Síntesis y Caracterización Química a) Refractómetro marca ATAGO, utilizado para medir el IR del destilado de cerveza. b) Centrifugadora mara BIOBASE, empleada en la extración de polifenoles de las muestras de cerveza. c) Espectrofotómetro UV-Visible marca *Thermo Scientific*, usado para la lectura de las curvas de calibración en la determinación de antioxidantes y fenoles de la cerveza.

Figura 47

Resultados de optimización del sistema





Resumen del Modelo

OLS Regression Results

Dep. Variable:	|%Apv obtenido - %Apv esperado|	R-squared:	0.869
Model:	OLS	Adj. R-squared:	0.212
Method:	Least Squares	F-statistic:	1.323
Date:	Mon, 13 Jan 2025	Prob (F-statistic):	0.576
Time:	12:47:07	Log-Likelihood:	3.1828
No. Observations:	7	AIC:	5.634
Df Residuals:	1	BIC:	5.310
Df Model:	5		
Covariance Type:	nonrobust		

	coef	std err	t	P>|t|	[0.025	0.975]
const	-2.9947	2.702	-1.108	0.467	-37.329	31.340
x1	8.0564	7.264	1.109	0.467	-84.239	100.352
x2	11.4354	7.264	1.574	0.360	-80.860	103.731
x3	-8.1655	7.069	-1.155	0.454	-97.986	81.655
x4	0.5000	5.079	0.098	0.938	-64.031	65.031
x5	-13.4195	7.069	-1.898	0.309	-103.240	76.401

Omnibus:	nan	Durbin-Watson:	0.657
Prob(Omnibus):	nan	Jarque-Bera (JB):	0.379
Skew:	-0.000	Prob(JB):	0.827
Kurtosis:	1.859	Cond. No.	96.6

Notes:
[1] Standard Errors assume that the covariance matrix of the errors is correctly specified.

OK