

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA ESTATAL DEL CARCHI



FACULTAD DE INDUSTRIAS AGROPECUARIAS Y CIENCIAS AMBIENTALES

CARRERA DE ALIMENTOS

Tema: **“Sustitución parcial de harina de trigo por harina obtenida del bagazo de cerveza para desarrollar un pan de masa madre alto en fibra”.**

Trabajo de Integración Curricular previo a la obtención del
título de Ingenieras en Alimentos

AUTORAS: Bazantes Quitama Maranshely Belén
Guacas Cuaspud Yoselin Mishell

TUTOR: Ing. Rivas Rosero Carlos Alberto MSc.

Tulcán, 2026.

CERTIFICADO DEL TUTOR

Certifico que las estudiantes Bazantes Quitama Maranshely Belén y Guacas Cuaspud Yoselin Mishell con el número de cédula 1004792956 y 0402074686 respectivamente han desarrollado el Trabajo de Integración Curricular: "Sustitución parcial de harina de trigo por harina obtenida del bagazo de cerveza para desarrollar un pan de masa madre alto en fibra"

Este trabajo se sujeta a las normas y metodología dispuesta en la Codificación del Reglamento de Régimen Académico y de Estudiantes de la UPEC, por lo tanto, autorizo la presentación de la sustentación para la calificación respectiva.

Ing. Rivas Rosero Carlos Alberto MSc.

TUTOR

Tulcán, agosto de 2026

AUTORÍA DE TRABAJO

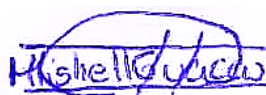
El presente Trabajo de Integración Curricular constituye un requisito previo para la obtención del título de Ingeniera en la Carrera de Alimentos de la Facultad de Industrias Agropecuarias y Ciencias Ambientales

Nosotras, Bazantes Quitama Maranshely Belén y Guacas Cuaspud Yoselin Mishell con cédula de identidad número 1004792956 y 0402074686 respectivamente declaramos que la investigación es absolutamente original, auténtica, personal y los resultados y conclusiones a los que hemos llegado son de nuestra absoluta responsabilidad.



Bazantes Quitama Maranshely Belén

AUTORA



Guacas Cuaspud Yoselin Mishell

AUTORA

Tulcán, agosto de 2026

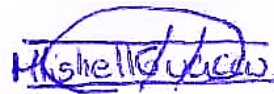
ACTA DE CESIÓN DE DERECHOS DEL TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR

Nosotras Bazantes Quitama Maranshely Belén y Guacas Cuaspud Yoselin Mishell declaramos ser autoras de los criterios emitidos en el Trabajo de Integración Curricular: "Sustitución parcial de harina de trigo por harina obtenida del bagazo de cerveza para desarrollar un pan de masa madre alto en fibra" y se exime expresamente a la Universidad Politécnica Estatal del Carchi y a sus representantes de posibles reclamos o acciones legales.



Bazantes Quitama Maranshely Belén

AUTORA



Guacas Cuaspud Yoselin Mishell

AUTORA

Tulcán, agosto de 2026

AGRADECIMIENTO

A Dios, por darnos la fortaleza para superar cada desafío en este camino académico.

Queremos expresar nuestro más profundo agradecimiento a la Universidad Politécnica Estatal del Carchi (UPEC) y a la carrera de alimentos, por acogernos en sus aulas y brindarnos herramientas para nuestra formación profesional.

Al MSc. Carlos Rivas, nuestro tutor, por su paciencia, guía y tiempo, los cuales fueron muy fundamentales para el desarrollo y éxito de esta investigación. De igual manera, agradecemos a los docentes PhD. Miguel Anchundia y PhD. Francisco Domínguez, por creer en nosotros desde un inicio, por su acompañamiento y por brindarnos las bases necesarias para nuestro crecimiento profesional.

Finalmente, agradecemos a nuestras familias por su apoyo constante y por creer en nuestras capacidades; ellos nos enseñaron que con perseverancia todo es posible. y nos impulsaron a alcanzar esta meta profesional. A nuestros padres, hermanos, por su amor y sacrificio; este logro es tan suyo como nuestro. Por último, a nuestros amigos por compartir este recorrido, por su compañía, sus ánimos y por hacer más ligeros los momentos difíciles.

Maranshely Bazantes.

Mishell Guacas.

DEDICATORIA

A Dios y a mi Virgencita de la Caridad, porque antes que cualquier otra cosa ellos fueron mi calma en mis momentos de angustia, la fuerza cuando sentía que no podía más.

Dedico este trabajo, con todo mi cariño y gratitud, a mis padres, Rolando Bazantes y Marisol Quitama por ser mi pilar fundamental, quienes con su esfuerzo, sacrificio y amor incondicional me han dado las herramientas y la fuerza para cumplir mis sueños. Este triunfo es el fruto de su guía. A mis hermanos, Anderson, Jhoan, Paulina y mi querido sobrino Zael, por ser mi alegría diaria, por su cariño y por motivarme a dar siempre lo mejor de mí.

De manera muy especial, a mis abuelitos, María y Manuel fuente de sabiduría, ejemplo de humildad y fortaleza que con esfuerzo y fe todo es posible; gracias por sus consejos y por creer en mí desde siempre. A mi mamita Zoilita, que ya está en el cielo. Su amor fue inspiración y su recuerdo mi fortaleza. Mis tíos maternos, por su apoyo incondicional, sus palabras de aliento y por estar presentes en cada etapa de mi camino. A mis primos quienes han sido parte importante de mi crecimiento siempre le pido a Dios que les abra muchas puertas y los bendiga en cada paso que den en su vida.

Con todo mi cariño y gratitud, les dedico este trabajo.

Bazantes Maranshely.

DEDICATORIA

Dedico este trabajo principalmente a Dios, por haberme dado la fortaleza, paciencia y sabiduría necesarias para culminar esta etapa de mi vida. A mis padres, por ser mi motor y pilar fundamental de mi educación; sus sacrificios y amor incondicional son los que hoy me permiten alcanzar este título de Ingeniería en Alimentos.

De manera muy especial, a mis hijos, quienes son mi mayor inspiración y la razón de cada uno de mis esfuerzos; este logro es por, y para ustedes para demostrarles que con perseverancia los sueños se cumplen y para dejarles un ejemplo de superación constante. A mis hermanos y amigos(as), por ser mi compañía constante y brindarme las palabras de aliento necesarias, cuya confianza y apoyo incondicional fueron perfectos para culminar con éxito este camino hacia mi meta personal y profesional.

Guacas Mishell.

ÍNDICE

RESUMEN	15
ABSTRACT	16
INTRODUCCIÓN	17
I. EL PROBLEMA	19
1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	19
1.2. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA	20
1.3. JUSTIFICACIÓN	20
1.4. OBJETIVOS Y PREGUNTAS DE INVESTIGACIÓN	21
1.4.1. Objetivo General.....	21
1.4.2. Objetivos Específicos	22
1.4.3. Preguntas de Investigación.....	22
II. FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA	23
2.1. ANTECEDENTES DE LA INVESTIGACIÓN	23
2.2. MARCO TEÓRICO	27
2.2.1. Cereales y Harinas.....	27
2.2.1.1. Harina.....	27
2.2.1.2. Clasificación de la fuerza de harina	28
2.2.1.3. Clasificación según el porcentaje de extracción	29
2.2.2. Gluten	29
2.2.3. Industria cervecera	30
2.2.3.1. Bagazo de Cerveza	30
2.2.3.2. Potencial Nutricional	31
2.2.3.3. Caracterización del bagazo de malta.....	31
2.2.3.3.1. Composición	32
2.2.3.3.2. Beneficios de incorporar bagazo de cervecero a los panificados	32

2.2.4. Fibra dietética.....	32
2.2.4.1. Clasificación de la fibra dietética	33
2.2.4.1.1. Fibra soluble	33
2.2.4.1.2. Fibra insoluble	33
2.2.5. Pan	33
2.2.5.1. Tipos de pan.....	34
2.2.5.2. Composición nutricional del pan común.....	34
2.2.6. Masa Madre.....	34
2.2.6.1. Pan de masa madre	35
2.2.6.2. Formulación base de pan de masa madre	35
III. METODOLOGÍA	36
3.1. ENFOQUE METODOLÓGICO	36
3.1.1. Enfoque	36
3.1.2. Tipo de Investigación	36
3.2. HIPÓTESIS	36
3.3. DEFINICIÓN Y OPERACIONALIZACIÓN DE LAS VARIABLES	37
3.3.1. Definición de las variables.....	37
3.3.2. Operacionalización de las variables	37
3.4. MÉTODOS UTILIZADOS	39
3.4.1. Diagrama de flujo de la obtención de harina de bagazo de cerveza Pale Ale	39
3.4.2. Diagrama de flujo de la elaboración del pan masa madre de harina del bagazo de cerveza estilo Pale Ale	41
3.4.3. Técnicas.....	42
3.4.3.1. Análisis Físicoquímico	42
3.4.3.1.1. Determinación de humedad	42
3.4.3.1.2. Proteína	43

3.4.3.1.3. Cenizas	45
3.4.3.1.4. Fibra cruda	45
3.4.3.1.5. Determinación de carbohidratos totales	47
3.4.3.1.6. Acidez	47
3.4.3.2. Determinación de análisis reológico	48
3.5. ANÁLISIS ESTADÍSTICO	50
3.5.1. Formulaciones.....	50
IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	51
4.1. RESULTADOS	51
4.1.1. Análisis fisicoquímicos de la materia prima (harina de bagazo).....	51
4.1.2. Análisis de las propiedades reológicas de las mezclas de harinas.....	51
4.1.3. Análisis fisicoquímicos del pan de masa madre.....	56
4.1.4. Análisis texturales del pan	59
4.1.5. Análisis microbiológico del pan.....	60
4.1.6. Análisis sensorial del pan	61
4.2. DISCUSIÓN	63
4.2.1. Análisis fisicoquímicos de la materia prima.....	63
4.2.2. Análisis de las propiedades reológicas de las mezclas de harinas.....	64
4.2.3. Análisis fisicoquímicos del pan de masa madre.....	65
4.2.3.1. Fibra.....	65
4.2.3.2. Humedad	66
4.2.3.3. Grasa	66
4.2.3.4. pH y acidez	67
4.2.3.5. Proteína	68
4.2.3.6. Gluten	68
4.2.3.7. Ceniza.....	69

4.2.3.8. Carbohidratos.....	69
4.2.4. Análisis texturales del pan	70
4.2.4.1. Dureza.....	70
4.2.4.2. Cohesividad	71
4.2.4.3. Elasticidad	72
4.2.4.4. Masticabilidad	73
4.2.5. Análisis microbiológico del pan.....	73
4.2.6. Análisis sensorial del pan	75
V. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	78
5.1. CONCLUSIONES	78
5.2. RECOMENDACIONES	80
VI. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	81
VII. ANEXOS.....	85

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Composición Nutricional por 100 gramos.....	28
Tabla 2. Propiedades de absorción y elasticidad de la masa madre.	30
Tabla 3. Composición nutricional de bagazo de cerveza.....	32
Tabla 4. Contenido nutricional de pan común.....	34
Tabla 5. Información nutricional de pan de masa madre por cada 100 gramos.	35
Tabla 6. Formulación base de la elaboración de pan de masa madre.....	35
Tabla 7. Operacionalización de variables	38
Tabla 8. Factor de conversión para la obtención de proteína	44
Tabla 9. Formulación de masa madre y sus porcentajes parciales.....	50
Tabla 10. Concentraciones de Harina de Bagazo de Cerveza (HBC) y Harina de Trigo (HT) en formulaciones parciales	50
Tabla 11. Resultados fisicoquímicos de la harina de bagazo de cerveza Pale Ale....	51
Tabla 12. Verificación de supuestos para las propiedades reológicas de las mezclas y ANOVA	52
Tabla 13. Resumen de los resultados reológicos Mixolab en las mezclas de harinas .	53
Tabla 14. Resultados gráficos Mixolab en tela de araña	53
Tabla 15. Verificación de supuestos para las propiedades fisicoquímicas del pan y ANOVA	57
Tabla 16. Resumen global de los parámetros fisicoquímicos del pan de masa madre	57
Tabla 17. Verificación de supuestos para las propiedades texturales del pan y ANOVA	59
Tabla 18. Resumen global de los parámetros texturales del pan de masa madre	59
Tabla 19. Resultados microbiológicos del pan de masa madre	61
Tabla 20. Resultados sensoriales del pan de masa madre	62

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Diagrama de flujo de la harina del bagazo de cerveza.....	39
Figura 2. Diagrama de flujo de obtención del pan masa madre.....	41
Figura 3. Deshidratación de e bagazo de cerveza tipo Pale Ale	87
Figura 4. Pesaje de bagazo seco antes de la molienda.....	87
Figura 5. Molino de martillos.....	87
Figura 6. Harina de bagazo de cerveza	87
Figura 7. Crecimiento de la masa madre	87
Figura 8. Pesaje para las mezclas de harinas	87
Figura 9. Reposo de la masa	87
Figura 10. Análisis de cenizas	87
Figura 11. Análisis de fibra cruda.....	87
Figura 12. Fibra de harina.....	88
Figura 13. Análisis de proteína	88
Figura 14. Análisis de humedad.....	88
Figura 15. Análisis de grasas	88
Figura 16. Análisis de pH	88
Figura 17. Pesaje para las mezclas de harinas	88
Figura 18. Análisis microbiológico.....	88

ÍNDICE DE ANEXOS

Anexo 1. Certificado del abstract por parte de idiomas.....	85
Anexo 2. Análisis realizados durante la investigación.....	87

RESUMEN

La presente investigación evaluó el efecto de la sustitución parcial de harina de trigo por harina de bagazo de cerveza (HBC) estilo Pale Ale sobre las propiedades fisicoquímicas, reológicas, texturales y sensoriales de un pan de masa madre. El bagazo de cerveza, principal subproducto en la industria cervecera fue caracterizado nutricionalmente, destacando un contenido de 20.07% de proteína y 19.9% de fibra cruda. Se empleó un Diseño Completamente al Azar (DCA) con cinco tratamientos (0%, 10%, 15%, 20% y 25% de HBC) y tres repeticiones. Los análisis fisicoquímicos en el producto final demostraron que el contenido de fibra aumento significativamente hasta un 16.31% en el tratamiento T4 (25%), mientras que la proteína alcanzo un 21.69%, permitiendo categorizar al pan como un alimento "alto en fibra" según normativa vigente. Reológicamente, la incorporación de harina de bagazo de cerveza (HBC) mitigó la retrogradación del almidón (Par C4), lo que sugiere una menor tendencia al endurecimiento y una vida útil sensorial potencialmente más prolongada. En cuanto a la calidad sensorial, los 60 jueces otorgaron una calificación máxima (5.0/5.0) en la mayoría de los atributos, resaltando que los niveles de sustitución del 20% al 25% (T3 y T4) mejoraron significativamente el sabor respecto al control (T0), debido a las notas tostadas aportadas por el bagazo. Los análisis microbiológicos confirmaron la inocuidad total del producto no presentar crecimiento de mohos ni levaduras (<10 UFC/g). Se concluye que el nivel de sustitución del tratamiento T4 (25%) es la alternativa más optima, logrando un producto con características nutricionales superiores y excelente aceptación, promoviendo la economía circular mediante a revalorización e residuos agroindustriales.

Palabras Claves: Harina de bagazo de cerveza, masa madre, fibra dietética, panificación funcional, economía circular.

ABSTRACT

This research evaluated the effect of the partial substitution of wheat flour with Pale Ale beer bagasse flour (BBF) on the physicochemical, rheological, textural, and sensory properties of sourdough bread. Beer bagasse, the main by-product of the brewing industry, was nutritionally characterized, showing a protein content of 20.07% and crude fiber content of 19.9%. A Completely Randomized Design (CRD) was applied with five treatments: 0%, 10%, 15%, 20%, and 25% of BBF, with three repetitions. The physicochemical analyses of the final product showed that the fiber content increased significantly up to 16.31% in treatment T4 (25%), while protein reached 21.69%, allowing the bread to be categorized as a "high fiber" food according to current regulations. Rheologically, the incorporation of beer bagasse flour (BBF) reduced starch retrogradation (C4 parameter), suggesting a lower tendency toward hardening and a potentially longer sensory shelf life. Regarding sensory quality, the 60 judges awarded the maximum score of 5.0 out of 5.0 in most attributes, highlighting that substitution levels from 20% to 25% (T3 and T4) significantly improved flavor compared to the control treatment (T0), due to the toasted notes provided by the bagasse. Microbiological analyses confirmed the complete safety of the product, as no mold or yeast growth was observed (<10 CFU/g). It is concluded that the substitution level used in treatment T4 (25%) is the most optimal alternative, achieving a product with superior nutritional characteristics and excellent acceptance, while promoting the circular economy through the revaluation of agroindustrial waste.

Keywords: Beer bagasse flour, sourdough, dietary fiber, functional baking, circular economy.

INTRODUCCIÓN

La industria cervecera ecuatoriana ha experimentado un crecimiento sostenido en los últimos años, impulsada por el auge de la producción artesanal y el consumo de cervezas especiales. Este dinamismo productivo, sin embargo, conlleva a la generación de grandes volúmenes de residuos, entre los que destaca el bagazo de malta de cebada, que representa aproximadamente el 85 % del total de los desechos generados durante el proceso de elaboración de la cerveza (Jurado, 2018). Según Pérez (2021), en Ecuador se producen alrededor de 120 000 toneladas anuales de bagazo cervecero, un subproducto que tradicionalmente es dispuesto en vertederos o utilizado de manera limitada para alimentación animal, sin que se aproveche plenamente su potencial nutricional. Esta práctica genera impactos ambientales negativos, como la contaminación de fuentes hídricas por lixiviados y la emisión de gases de efecto invernadero derivados de su descomposición anaeróbica.

Paralelamente, el sector de la panificación enfrenta desafíos significativos derivados de los cambios en los hábitos de consumo de la población. Existe una creciente demanda de productos con perfiles nutricionales mejorados, particularmente aquellos con alto contenido de fibra dietética y proteína, así como con menor contenido de gluten (Arcia et al., 2018). Esta tendencia responde tanto al aumento de la prevalencia de enfermedades crónicas no transmisibles (obesidad, diabetes, enfermedades cardiovasculares) como a una mayor conciencia sobre la relación entre la alimentación y la salud. En este contexto, la incorporación de subproductos agroindustriales ricos en compuestos bioactivos en la formulación de alimentos de consumo masivo, como el pan, se presenta como una estrategia prometedora para la valorización de residuos y la mejora de la calidad nutricional de la dieta.

El bagazo de cerveza destaca por su composición química, caracterizada por un alto contenido de proteínas (15-26 %) y fibra dietética (hasta 70 %), principalmente de tipo insoluble (celulosa, hemicelulosa y lignina), así como por la presencia de compuestos fenólicos con actividad antioxidante (Morquecho, 2020). Estudios previos han demostrado la viabilidad de utilizar harina de bagazo de cerveza en la elaboración

de productos de panificación como galletas (Castillo y Rojas, 2025; Rivera, 2023) y panes (Arcia et al., 2018; Ktenioudaki et al., 2015). Sin embargo, la mayoría de estas investigaciones se han centrado en niveles de sustitución moderados (menores al 20 %) y en procesos de panificación con levadura comercial, existiendo un vacío de conocimiento respecto al uso de bagazo en panes elaborados con masa madre, un sistema de fermentación natural que confiere características sensoriales y nutricionales únicas al producto final.

La masa madre, un cultivo simbiótico de bacterias lácticas y levaduras, ha sido utilizada tradicionalmente en la panificación artesanal y ha recuperado popularidad en los últimos años debido a sus beneficios para la salud, entre los que se incluyen una mayor digestibilidad, un menor índice glucémico y una mayor biodisponibilidad de minerales (Delgadillo et al., 2023). La fermentación prolongada característica de la masa madre podría contribuir a atenuar los efectos negativos de la fibra sobre la textura y el volumen del pan, así como a potenciar los perfiles de sabor y aroma. Por lo tanto, la combinación de bagazo de cerveza y masa madre representa una oportunidad única para el desarrollo de un pan funcional de alta calidad.

En la provincia del Carchi, una zona de alta vocación agropecuaria donde confluyen las industrias cervecera y panificadora, no se han reportado investigaciones que aborden el aprovechamiento del bagazo de cerveza para la elaboración de pan de masa madre enriquecido. Esta brecha de conocimiento constituye una oportunidad de innovación tecnológica con potencial impacto económico, ambiental y social. Por lo tanto, la presente investigación tuvo como objetivo general evaluar el efecto de la sustitución parcial de harina de trigo por harina obtenida del residuo de cerveza estilo Pale Ale sobre las propiedades fisicoquímicas, sensoriales y de textura de un pan elaborado con masa madre, estableciendo así las bases para la valorización de este subproducto en la industria alimentaria regional.

I. EL PROBLEMA

1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

En la industria alimentaria el sector de la producción de cerveza se encuentra en constante crecimiento, lo que conlleva la generación de cantidades significativas de residuos durante su proceso. Según Pérez (2021) en Ecuador se producen aproximadamente 120 000 toneladas anuales de bagazo cervecero. Este escenario plantea retos importantes para los fabricantes de cerveza industrial y artesanal, quienes según Jurado (2018) enfrentan el desafío de mantener los costos bajos para optimizar el valor en sus procesos.

Dentro de la industria cervecera artesanal, el bagazo de Malta de cebada representa cerca del 85% del total de residuos generados. Este subproducto destaca por su composición rica en proteína y fibra lo que lo convierte en un recurso valioso que actualmente se emplea principalmente para el consumo animal, sin embargo, su aprovechamiento en la industria alimentaria sigue siendo limitado. Como señalan Rachwał et al. (2020) el bagazo cervecero puede tener un impacto ambiental significativo si no se utiliza adecuadamente. Aunque se ha investigado su uso como alimento para animales, su empleo en la alimentación humana podría ser una oportunidad para agregar valor y conservar nutrientes esenciales.

Por otro lado, la creciente intolerancia al gluten derivada del consumo de esta proteína presente en cereales como el trigo y la cebada ha impulsado la demanda de productos alimenticios con menor contenido de gluten. Esta tendencia es particularmente evidente en el ámbito de la panificación, donde la harina de trigo, ingrediente principal en los productos tradicionales, se enfrenta a nuevas exigencias del mercado.

Según Jurado (2018), las alternativas que atienden las necesidades de los consumidores sensibles al gluten siguen siendo poco exploradas. Por último, la panificación enfrenta retos derivados de las tendencias actuales hacia una alimentación sin gluten. Esta situación responde tanto al crecimiento de la

población con intolerancia al gluten como a la preferencia por opciones consideradas más saludables, lo que genera una demanda creciente de alternativas innovadoras.

En este contexto, la explotación de nuevas aplicaciones para subproductos como el bagazo cervecero en la industria de la panificación podría contribuir no solo a la diversificación del mercado, sino también a la sostenibilidad ambiental y alimentaria (Arcia et al., 2018).

1.2. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA

¿En qué medida la sustitución parcial de harina de trigo por harina derivada del bagazo de cerveza estilo Pale Ale influye en las propiedades fisicoquímicas, sensoriales y texturales de un pan elaborado mediante fermentación con masa madre?

1.3. JUSTIFICACIÓN

En la industria alimentaria el sector de la producción de cerveza se encuentra en constante crecimiento, lo que conlleva a la generación de cantidades significativas de residuos durante su proceso. Según Pérez (2021) en Ecuador se producen aproximadamente 120 000 toneladas anuales de bagazo cervecero. Este escenario plantea retos importantes para los fabricantes de cerveza industrial y artesanal, quienes según Jurado (2018) enfrentan el desafío de mantener los costos bajos para optimizar el valor en sus procesos.

Dentro de la industria cervecera artesanal, el bagazo de Malta de cebada representa cerca del 85% del total de residuos generados. Este subproducto destaca por su composición rica en proteína y, especialmente, en fibra dietética, lo que lo convierte en un recurso valioso que actualmente se emplea principalmente para el consumo animal, sin embargo, su aprovechamiento en la industria alimentaria sigue siendo limitado. Como señalan Rachwał et al. (2020) el bagazo cervecero puede tener un impacto ambiental significativo si no se utiliza adecuadamente. Aunque se ha investigado su uso como alimento para animales, su empleo en la alimentación humana podría ser una oportunidad para agregar valor y conservar nutrientes esenciales.

La fibra presente en el bagazo de cerveza es de particular interés debido a sus beneficios para la salud. Estudios han demostrado que este subproducto contiene

una proporción elevada de fibra insoluble (principalmente celulosa y hemicelulosa) y fibra soluble (beta-glucanos), las cuales contribuyen a regular el tránsito intestinal, aumentar la saciedad, controlar los niveles de glucosa y colesterol en sangre, y promover un microbiota saludable. En un contexto donde el consumo de fibra en la dieta occidental suele ser deficiente, la incorporación de harina de bagazo de cerveza en productos de panificación se presenta como una estrategia eficaz para desarrollar alimentos altos en fibra, atendiendo así a las recomendaciones nutricionales actuales.

Por otro lado, la creciente intolerancia al gluten derivada del consumo de esta proteína presente en cereales como el trigo y la cebada ha impulsado la demanda de productos alimenticios con menor contenido de gluten y altos en fibra. Esta tendencia es particularmente evidente en el ámbito de la panificación, donde la harina de trigo, ingrediente principal en los productos tradicionales, se enfrenta a nuevas exigencias del mercado (Jurado, 2018).

Por último, la panificación enfrenta retos derivados de las tendencias actuales hacia una alimentación más saludable y, en algunos casos, sin gluten. Esta situación responde tanto al crecimiento de la población con intolerancia al gluten como a la preferencia por opciones consideradas más saludables, lo que genera una demanda creciente de alternativas innovadoras. En este contexto, la explotación de nuevas aplicaciones para subproductos como el bagazo cervecero en la industria de la panificación, particularmente mediante la sustitución parcial de harina de trigo por harina de bagazo en un pan de masa madre, que además favorece la fermentación y disponibilidad de nutrientes, podría contribuir no solo a la diversificación del mercado, ofreciendo un producto alto en fibra, sino también a la sostenibilidad ambiental y alimentaria (Arcia et al., 2018)

1.4. OBJETIVOS Y PREGUNTAS DE INVESTIGACIÓN

1.4.1. Objetivo General

Evaluar el efecto de la sustitución parcial de harina de trigo por harina obtenida del residuo de cerveza estilo Pale Ale sobre las propiedades fisicoquímicas, sensoriales y de textura de un pan elaborado con masa madre.

1.4.2. Objetivos Específicos

- Caracterizar las propiedades fisicoquímicas de la harina de bagazo de cerveza.
- Evaluar las propiedades reológicas de la masa elaborada con los diferentes porcentajes de sustitución de harina de trigo por harina de residuo de cerveza estilo Pale Ale.
- Determinar las características fisicoquímicas y microbiológicas del pan de masa madre.
- Analizar las características de perfil de textura del pan de masa madre.
- Valorar las propiedades sensoriales (apariencia, sabor, textura) del pan elaborado.

1.4.3. Preguntas de Investigación

- ¿Cuál es la composición química de la harina obtenida del bagazo cervecero estilo Pale Ale?
- ¿Cómo afectan diferentes porcentajes de sustitución de harina de trigo por harina de residuo de cerveza estilo Pale Ale a las propiedades fisicoquímicas y reológicas de la masa madre?
- ¿Cómo impacta fisicoquímica y nutricionalmente la sustitución parcial de harina de trigo por harina de bagazo de cerveza en el pan de masa madre?
- ¿Cómo influyen en las características reológicas en la calidad de pan de masa madre?
- ¿Cómo influye sensorialmente la incorporación de harina de cerveza en el contenido de fibra del pan?

II. FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA

2.1. ANTECEDENTES DE LA INVESTIGACIÓN

Arcia et al. (2018) desarrollaron una investigación cuyo objetivo fue revalorizar el bagazo de cervecería como ingrediente funcional rico en fibra y proteínas en la elaboración de panes, evaluando además el efecto del etiquetado nutricional frontal en la aceptabilidad e intención de compra. La metodología incluyó la elaboración de diferentes formulaciones de pan: un pan de referencia, panes con incorporación de bagazo en distintos niveles (7.8 % y 15.6 % de sustitución de harina de trigo) y variantes con y sin contenido de sal, para analizar la influencia del pan "fuente de fibra" y la advertencia "exceso de sodio". Se realizaron análisis de composición proximal del bagazo, obteniendo valores destacados de fibra dietaria (44.61 %) y proteína (23.81 %), y evaluaciones sensoriales con consumidores (77 y 81 participantes) mediante escalas hedónicas e intención de compra. Los resultados evidenciaron que el pan con menor sustitución de bagazo (7.8 %) presentó una aceptabilidad similar al pan de referencia (6.5 vs 6.8), mientras que el pan "fuente de fibra" obtuvo menor aceptación (5.5); asimismo, la intención de compra fue mayor en el pan sin sal y con pan de fibra (5.4), mientras que la presencia de la advertencia "exceso de sodio" disminuyó significativamente este indicador (hasta 3.8). Se concluyó que el bagazo de cervecería es un ingrediente viable para el desarrollo de productos funcionales, aunque su nivel de incorporación debe optimizarse para mantener la aceptabilidad sensorial, y que el etiquetado nutricional influye de manera directa en la decisión de compra, representando una oportunidad para la reformulación de alimentos más saludables.

Castillo y Rojas (2025) desarrollaron una investigación cuyo objetivo fue evaluar la influencia de la sustitución parcial de la harina de trigo por harina de bagazo cervicero en la elaboración de galletas enriquecidas. La metodología se enmarcó en un enfoque aplicado, de nivel explicativo, empleando un diseño de bloques completamente al azar (DBCA), en el cual se analizaron tres niveles de sustitución (10, 20 y 30 %), considerando evaluaciones fisicoquímicas, microbiológicas y

sensoriales en una muestra de 720 galletas. Los resultados evidenciaron que la harina de bagazo cervecero presentó un alto contenido de carbohidratos (61.34 %), fibra dietaria (51 %) y proteínas (17.99 %), con baja humedad (7.92 %) y adecuada calidad microbiológica (ausencia de mohos y menos de 10 UFC/g de *E. coli*). En las galletas enriquecidas, la formulación con 20 % de sustitución mostró mejoras significativas en apariencia, dureza, masticabilidad, sabor y aceptabilidad general ($p < 0.05$). Asimismo, estas galletas presentaron valores de acidez de 0.31 g/100 g, humedad de 3.49 %, cenizas de 3.36 % y fibra dietaria de 4.70 %. En conclusión, la harina de bagazo cervecero constituye un ingrediente viable y nutritivo para la elaboración de productos de panificación, destacándose especialmente el nivel de sustitución del 20% por su adecuada aceptación sensorial y aporte nutricional.

Ktenioudaki et al. (2015) realizaron una investigación con el objetivo de evaluar el potencial de técnicas de bioprocesamiento, específicamente la fermentación con masa madre y el uso de ayudas tecnológicas, para mejorar las propiedades tecnológicas, sensoriales y nutricionales de panes elaborados con bagazo de cerveza (BSG). La metodología consistió en la preparación de seis formulaciones de pan con un 15 % de BSG, utilizando xilanasa y acondicionador de masa tanto en mezclas convencionales como en fermentaciones con masa madre (*L. brevis*, *L. plantarum* y *S. cerevisiae*), analizando variables como el volumen específico, perfil de textura, capacidad antioxidante in vitro y cinética de endurecimiento mediante el modelo de Avrami. Los resultados demostraron que la adición de xilanasa y acondicionador mejoró significativamente el volumen específico (alcanzando hasta 2.7 mL/g) y redujo la firmeza de la miga en un 42.3 % en los panes de BSG y un 35.8 % en los de masa madre. Asimismo, la fermentación con masa madre incrementó la acidez total (TTA de 7.4 frente a 4.5), mejoró el perfil aromático mediante la liberación de aldehídos como el 3-metil-butanal y redujo el contenido de ácido fítico en un 30 %, aumentando potencialmente la biodisponibilidad mineral. Además, el uso de masa madre y enzimas elevó la capacidad antioxidante, registrando el valor más alto de fenoles totales en el pan con masa madre y acondicionador (\$61.3 mgGAE/100g). Los autores concluyeron que el bagazo de cerveza es un ingrediente funcional viable para productos de panificación con alto contenido de fibra (7.2 %), y que el bioprocesamiento optimiza su calidad tecnológica y nutricional, permitiendo su inclusión en mayores porcentajes sin comprometer la aceptabilidad sensorial.

Olvera (2024) desarrolló una investigación cuyo objetivo fue elaborar y caracterizar un pan libre de gluten a base de harina de quinua y residuo de malta cervecera, evaluando el efecto de sustitutos de gluten sobre la microestructura, propiedades físicas y aceptabilidad del producto. La metodología se basó en un diseño experimental de mezclas para determinar las proporciones óptimas de harinas y sustitutos de gluten, complementado con análisis fisicoquímicos, reológicos, de textura, volumen, análisis de imagen, pruebas microbiológicas y evaluación sensorial. Los resultados del análisis proximal de la harina de residuo de malta cervecera mostraron valores de 3.50 ± 0.20 % de humedad, 16.91 ± 0.02 % de proteína, 2.83 ± 0.05 % de ceniza y 4.61 ± 0.28 % de grasa, evidenciando un alto valor nutricional. La mejor formulación correspondió a 90 % de harina de quinua y 10 % de residuo de malta cervecera, mientras que para los sustitutos de gluten se determinó una mezcla óptima de 86 % de goma xantana y 6.5 % de mucílago de nopal, lo que permitió mejorar significativamente las propiedades viscoelásticas, el volumen y la estructura de la miga, observándose la formación de alveolos y una red más estable. En cuanto a los análisis microbiológicos, los productos cumplieron con los límites permisibles establecidos en la normativa, presentando ausencia de microorganismos patógenos como Salmonella y recuentos dentro de los rangos aceptables para mesófilos, mohos y levaduras, garantizando su inocuidad. Por su parte, la evaluación sensorial realizada con 50 panelistas mediante una escala hedónica de 1 a 5 mostró una aceptabilidad promedio cercana a 4 ("me gusta") en atributos como sabor, textura, olor y apariencia, siendo superior en los tratamientos con sustitutos de gluten. En conclusión, el estudio demostró que la incorporación de sustitutos de gluten permite obtener un pan libre de gluten con características fisicoquímicas, microbiológicas y sensoriales adecuadas, constituyendo una alternativa viable, nutritiva y segura para personas con enfermedad celíaca.

Pantoja (2020) desarrolló una investigación cuyo objetivo fue determinar el mejor tratamiento de la mezcla de harina de bagazo de cebada de malta con harina de trigo para su aplicación en productos panificados; la metodología incluyó la obtención del bagazo cervecero, su prensado, secado, molienda y tamizado para producir harina, seguido de un diseño completamente al azar unifactorial con seis tratamientos (0, 10, 15, 20, 25 y 30 % de sustitución), evaluados mediante análisis fisicoquímicos (humedad, cenizas, fibra, grasa y proteína), reológicos (absorción, estabilidad, tiempo de desarrollo, gluten húmedo y falling number) y pruebas

sensoriales con 30 panelistas, además de análisis microbiológicos; los resultados evidenciaron que la harina de bagazo presentó 9.54 % de humedad, 2.2 % de cenizas, 7.8 % de fibra, 2.6 % de grasa y 14.2 % de proteína, mientras que el tratamiento T3 (20 % de sustitución) mostró valores reológicos adecuados y menor contenido de gluten (22.12 %), junto con mejor aceptación sensorial en textura, olor, sabor y color, así como un producto final con alto contenido de fibra y características microbiológicas inocuas; en conclusión, se determinó que la incorporación del 20 % de harina de bagazo de cebada de malta constituye la mejor alternativa para la elaboración de productos panificados, permitiendo obtener un alimento nutritivo, funcional y apto para el consumo, además de valorizar un residuo agroindustrial.

Rivera (2023) desarrolló una investigación cuyo objetivo fue evaluar el uso de residuos de malta de cerveza tipo Pilsen, Red Ale y Stout como sustituto parcial de harina de trigo en la elaboración de galletas depositadas. La metodología consistió en un diseño completamente aleatorizado con tres niveles de sustitución (25, 50 y 75 %) para cada tipo de residuo, comparados con un control (100 % harina), evaluando propiedades fisicoquímicas como extensión y expansión/contracción de masa, colorimetría, pH, humedad y friabilidad; posteriormente se seleccionaron las mejores formulaciones para análisis sensorial mediante escala hedónica con 84 jueces no entrenados y análisis proximal. Los resultados evidenciaron cambios significativos en las propiedades físicas, destacando contracción de la masa en todas las sustituciones frente al control, así como variaciones en color y pH dentro de rangos adecuados (≈ 6.06 – 6.49); se seleccionaron las formulaciones con 75 % (Pilsen), 50 % (Red Ale) y 25 % (Stout), siendo la galleta con 75 % de residuo Pilsen la mejor valorada sensorialmente con una aceptación global de 4.45 ("me gusta-me gusta mucho"). El análisis proximal mostró contenidos aproximados de 26.6–26.7 % de grasa, 57.5–58.8 % de carbohidratos, 7.1–7.7 % de proteína y 5.3–7.4 % de humedad. Se concluyó que los residuos de malta son sustitutos viables en panificación, aportando valor nutricional y funcional, además de representar una alternativa sostenible que promueve la innovación en la industria alimentaria.

Vriesekoop et al. (2021) desarrollaron una investigación cuyo objetivo fue evaluar la incorporación de bagazo de cerveza fermentado (BSG) en la producción de pan de masa madre, utilizando fermentación en estado sólido para obtener un cultivo tipo 3 y valorizar este subproducto, reconocido por su alto contenido de fibra dietética,

proteínas, lípidos, minerales y compuestos antioxidantes. La metodología consistió en fermentar el BSG durante 96 horas a 30 °C, secarlo e incorporarlo en formulaciones de pan en niveles de 0 a 20 %, evaluando propiedades fisicoquímicas, microbiológicas, sensoriales y el contenido de ácidos orgánicos mediante HPLC. Los resultados evidenciaron que el tratamiento óptimo correspondió a la adición del 10 % de BSG, el cual presentó mejor aceptabilidad sensorial y un perfil de fermentación adecuado, alcanzando valores de 62.44 ± 4.44 mmol/kg de ácido láctico y 28.49 ± 3.83 mmol/kg de ácido acético. Asimismo, el BSG fermentado mostró una alta carga microbiana de aproximadamente 2×10^9 UFC/g y contribuyó a mejorar el valor nutricional del pan debido a su aporte de fibra, proteínas y grasas, aunque incrementó moderadamente la firmeza del producto. Se concluyó que la incorporación del 10 % de BSG fermentado permite obtener pan de masa madre con adecuada calidad sensorial, perfil de ácidos orgánicos comparable a productos comerciales y mayor valor nutricional, constituyendo una alternativa sostenible para la valorización de subproductos de la industria cervecera.

2.2. MARCO TEÓRICO

2.2.1. Cereales y Harinas

Los cereales pertenecen a la familia de las gramíneas y representan una fuente importante de carbohidratos, además de aportar proteínas en proporción moderada y pequeñas cantidades de grasa. Entre los más comunes se encuentran el trigo, arroz, maíz y centeno, los cuales se diferencian por la estructura de sus tres partes principales: salvado, germen y endospermo (Prieto et al., 2005).

Por otro lado, los productos de cereales incluyen plantas de hoja ancha que, aunque pertenecen a las gramíneas, se utilizan de manera similar en la alimentación entre los que se encuentran son pseudocereales como: amaranto y trigo sarraceno (Espinoza y Quispe, 2011).

2.2.1.1. Harina

La harina es un polvo fino que se obtiene principalmente a partir de cereales como el trigo, la avena, la cebada, el centeno, el maíz y el arroz, aunque también puede elaborarse a partir de alimentos ricos en almidón como los garbanzos, trigo (Arriaga et al. 2024). Dentro de las harinas de trigo es la más común y fundamental en la

elaboración del pan, aun otras harinas pueden ser combinadas para mejorar el valor nutricional del producto (Jiménez y Landa, 2018).

En la Tabla 1, se presenta la composición nutricional de la harina de trigo por 100 gramos:

Tabla 1. Composición Nutricional por 100 gramos.

Nutrientes	Cantidad
Carbohidratos (almidón)	72 g
Fibra	11 g
Proteína	13 g
Grasa total	1 g
Sodio	2 mg
Vitaminas y minerales (B1, B3, B9)	

Fuente: (Jiménez y Landa, 2018)

La calidad de la harina varía según el tipo de molino utilizado en su producción, y debe pasar por tamices que eliminan impurezas. Además, las harinas no contienen colesterol, lo que las convierte en una opción saludable. Su consumo moderado, especialmente en forma integral, contribuye a mantener niveles normales de colesterol y glucosa, favoreciendo el tránsito intestinal y previniendo el estreñimiento. También son recomendadas para personas con altos niveles de ácido úrico, ya que carecen de purinas, ayudando a reducir riesgos de ataques de gota (Jiménez y Landa, 2018).

2.2.1.2. Clasificación de la fuerza de harina

La distribución de las harinas se basa principalmente en su contenido de proteínas y proporción de gluten, ya que estos componentes influyen directamente en su comportamiento durante la preparación de alimentos. Según Espinoza y Quispe (2011) se distingue tres tipos fundamentales: harina extrafuerte, harina fuerte, harina débil.

- Harina extrafuerte: este tipo de harina es destacado por su elevado contenido proteico, superior al 13 % lo que le hace una estructura firme y elástica.
- Harina fuerte: tiene un contenido proteico que es de 10 y 12 % resulta especialmente adecuada para la panificación, ya que proporciona la elasticidad y fuerza necesaria para obtener masas con buen volumen y textura.
- Harina débil: este tipo de harina contiene proteico que oscila entre el 7 y 9 % que se emplean principalmente en la preparación de productos de repostería

y galletas, ya que su bajo nivel de gluten favorece masas más tiernas y delicadas. Sin embargo, no resultan adecuadas para la panificación, por lo que carecen de la firmeza necesaria para mantener la estructura del pan durante el horneado.

2.2.1.3. Clasificación según el porcentaje de extracción

La clasificación de las harinas se relaciona con el rendimiento que se obtiene después de la molienda del grano. En este sentido, Chaglla (2024) expone los diferentes tipos de harinas que se distinguen bajo este criterio, señalando las particularidades de cada una según el grado de extracción alcanzado en el proceso.

- Harina flor: presenta un rendimiento de extracción cercano al 40 %, lo que significa que cada 100 kg de trigo se obtiene aproximadamente 40 kg de harina. Se caracteriza además por tener granulometría fina, lo que la hace más adecuada para preparaciones que requieren texturas más delicadas.
- Harina blanca: en esta harina alcanza un rendimiento de extracción que puede llegar entre el 60 y 70 %, lo que le implica una mayor recuperación de producto durante la molienda, esto se distingue por presentar una granulometría más gruesa, con características que influye en su textura y en los usos específicos dentro de la elaboración de alimentos.
- Harina integral: en este tipo de harina se alcanza un nivel de extracción cercano al 85 %, resultado de la molienda completa del grano, aunque sin incluir la cascarilla. Esta característica le otorga un mayor rendimiento y un perfil más integral en comparación con otras harinas de menor extracción.

2.2.2. Gluten

Una proteína que se forma cuando la harina de trigo se mezcla con agua. Es fundamental en la panificación porque proporciona estructura y elasticidad a la masa. El gluten se compone de 2 proteínas principales: glutenina y gliadina. La glutenina es responsable de la elasticidad, mientras que la gliadina contribuye a la extensión real de la masa. Esta combinación permite que la masa se expanda y retenga el gas producida durante la fermentación, lo que resulta en un pan esponjoso y ligero (Parada y Araya, 2010).

En la Tabla 2, se representa la propiedad de capacidad de absorción y elasticidad.

Tabla 2. Propiedades de absorción y elasticidad de la masa madre.

Propiedad	Descripción
Capacidad de Absorción	La harina con alta absorción de agua mejora la hidratación de la masa, lo que favorece su textura y sabor. Durante el amasado, el agua activa el gluten, permitiendo un adecuado desarrollo de la masa (Paucar et al., 2016).
Elasticidad	El gluten permite que la masa se expanda durante la fermentación y cocción, resultando en un pan con una miga aireada y ligera (Parada & Araya, 2010).

2.2.3. Industria cervecera

La industria cervecera es conocida por generar grandes volúmenes de residuos durante su proceso de producción, siendo uno de los subproductos más destacados el bagazo de Malta. Este residuo es particularmente valioso, ya que es rico en fibra, proteínas y compuestos fenólicos, lo que le otorga un gran poder. Especial para ser aprovechado en la elaboración de productos de valor agregado. Esto no sólo apoya una economía circular, sino que también ayuda a reducir el impacto ambiental. Ha sido asociado con la producción de cerveza (Santacruz et al., 2023).

Numerosos estudios han demostrado que el bagazo de cerveza puede ser utilizado eficazmente en la industria alimentaria, sirviendo como ingrediente en la panificación en la elaboración de snacks, suplementos y subproductos funcionales. La inclusión de bagazo en estos productos no sólo mejora su perfil nutricional, sino también. Promueve prácticas sostenibles y responsables con el medio ambiente (Pantoja, 2020).

En Ecuador, especialmente en la provincia de Imbabura, la industria de la cerveza artesanal ha experimentado un crecimiento significativo, lo que ha abierto nuevas oportunidades para la innovación en la reutilización de sus residuos. La parroquia de San Antonio de Ibarra se presenta. Como un espacio ideal para implementar este tipo de iniciativas gracias a su carácter productivo y artesanal, lo que podría transformar los residuos de cerveza en valiosos recursos para la Comunidad (Jurado, 2018).

2.2.3.1. Bagazo de Cerveza

El bagazo de cerveza es el residuo sólido que queda después de la extracción de azúcares durante el proceso de elaboración de la cerveza. Este subproducto, que representa aproximadamente el 85% de los desechos generados en la producción cervecera, está compuesto principalmente por residuos de Malta y otros cereales

que se utilizan en la fermentación. Su origen se encuentra en la fase de prensado y filtrado del mosto cervecero, donde se separan los sólidos de los líquidos (Pacheco, 2022).

El bagazo cervecero es considerado una biomasa lignocelulósica el cual está conformado por una cáscara de grano, pericarpio y fragmentos de endospermo. La composición química predomina en los carbohidratos de celulosa y hemicelulosa (17-25 %) y no celulósicos (25-35 %), proteína (10-30 %), lignina (8-28 %); y en menores cantidades los lípidos (<11%) y cenizas (5%). Las macromoléculas antes mencionadas se aplican en casi todos los campos industriales (Arias y López, 2015).

2.2.3.2. Potencial Nutricional

El bagazo de cerveza tiene un potencial nutricional considerable. Es rico en fibra, lo que puede contribuir a la salud digestiva. Además, contiene proteínas que son esenciales para el crecimiento y la reparación de tejidos. También se ha encontrado que el bagazo es una fuente de compuestos fenólicos y antioxidante que pueden ofrecer beneficios para la salud al combatir el estrés oxidativo en el organismo (Pantoja, 2020).

2.2.3.3. Caracterización del bagazo de malta

El bagazo de Malta es un subproducto sólido general Durante. La producción de cerveza, específicamente en la fase de maceración, donde los granos de Malta se muelen y se mezclan con agua para extraer azúcares. Este residuo está compuesto principalmente por cáscaras de grano salvado y otros componentes de la banda que no se disuelven en el proceso de elaboración de cerveza.

La composición química varía de acuerdo a las variedades de cebada utilizada, condiciones de cosecha, malteado y maceración de acuerdo al proceso. Diversos autores coinciden que el bagazo debe ser tratado como lignocelulósico rico en proteínas y fibras.

El bagazo cervecero depende de la uniformidad del malteado ya que esto permite que puedan quedar en mayor o menor cantidad restos de almidón en el endospermo y restos de pared celular. El contenido de almidón es insignificante comparado con otros compuestos como es la cascara, pericarpio, cubiertas de semilla, las mismas que son abundantes en polisacáridos de celulosa, no celulosa, lignina, algunas

proteínas, lípidos y algunos residuos lúpulo introducidos durante la trituración (Mello y Mali, 2014).

2.2.3.3.1. Composición

El bagazo de la malta, rico en polisacáridos celulósicos y lignina y otros compuestos no celular. Los chicos, lo que lo confiere en un alto contenido de fibra y proteínas. Estos componentes son valiosos no sólo para la alimentación animal, sino también para su potencial uso en la industria alimentaria y no alimentaria. Además, el bagazo puede ser utilizado en la producción de biogás. Mediante digestión anaerobia, lo que representa una forma sostenible para aprovechar este residuo.

En la Tabla 3 se muestra su composición en porcentajes (Morquecho, 2020).

Tabla 3. Composición nutricional de bagazo de cerveza.

Compuesto	Porcentaje %
Proteínas	15 – 26
Fibras	70
Celulosa	15.5 – 25
Hemicelulosa	28 – 35
Lignina	28
Lípidos	3.9 – 18
Cenizas	2.5 - 4.5
Vitaminas, aminoácidos	-

Fuente: (Ministerio de Agricultura, Ganadería y Pesca, 2020)

2.2.3.3.2. Beneficios de incorporar bagazo de cervecero a los panificados

Al sustituir harina de trigo común en una pieza de pan por granos de cebada agotada, aportan un elevado valor nutricional (Alvis et al., 2011).

- Duplica el contenido de fibra
- Eleva el contenido de proteínas
- Eleva el contenido de aminoácido esencial
- Menora el contenido de calorías en relación a otras harinas

2.2.4. Fibra dietética

En la actualidad se ha desarrollado una tendencia hacia la producción de productos altos en fibra destinados al consumo humano, aumentando el valor agregado de la fibra, la cual estaba anteriormente destinada a la elaboración alimento balanceado (Badui, 2006).

2.2.4.1. Clasificación de la fibra dietética

La clasificación de la fibra dietética es de acuerdo a su solubilidad en agua los cuales pueden ser solubles o insolubles (Cabrera y Cárdenas, 2006).

2.2.4.1.1. Fibra soluble

La fibra soluble genera una dispersión en agua; dando lugar a la formación de geles viscosos en el tracto gastrointestinal, su propiedad es retardar la evacuación gástrica, en algunos casos puede ser soluble, permitiendo eficiencia a la digestión y absorción de los alimentos generando mayor saciedad. La fibra soluble tiene una alta capacidad de fermentación y está vinculada al procesamiento de carbohidratos y lípidos en el organismo. Principalmente, la fibra soluble está compuesta por polisacáridos no celulósicos, como la pectina, las gomas y ciertas hemicelulosas (Córdoba, 2005).

2.2.4.1.2. Fibra insoluble

La fibra insoluble tiene la capacidad de aumentar significativamente el volumen de las heces, hasta 20 veces su peso, gracias a su habilidad para retener agua. Este tipo de fibra contribuye a la prevención y alivio de problemas digestivos como el estreñimiento y la constipación. A diferencia de la fibra soluble, no se disuelve en agua y está compuesta por celulosa, hemicelulosa como (arabinoxilanos y arabinogalactanos) y ligninas. Sus principales fuentes incluyen verduras, cereales, leguminosas y frutas (Córdoba, 2005).

2.2.5. Pan

El pan es un alimento que es consumido a nivel mundial y a lo largo de la historia, ha desarrollado un papel fundamental dentro de la dieta de muchas civilizaciones. Su elaboración inicia con la mezcla de ingredientes básicos como harina, sal y levadura, dando paso al proceso de amasado. Durante esta etapa, se forma una red de gluten que cumple una función esencial: retención del gas generado en la fermentación.

En la fase de fermentación, las levaduras transforman los azúcares disponibles en dióxido de carbono (CO_2) y alcohol. El gas producido queda atrapado en la matriz de gluten, provocando el aumento de volumen de la masa y el desarrollo de una estructura porosa. Finalmente, durante la cocción en horno, ocurre una segunda expansión de la masa y se consolidan las estructuras internas del pan mediante procesos fisicoquímicos como la gelatinización de almidón, desnaturalización de las

proteínas y el secado. Estos fenómenos son determinantes para la textura final de la miga y la formación de la corteza del pan (Mesas y Alegre, 2002).

2.2.5.1. Tipos de pan

Según Mesas y Alegre (2002) mencionan que este pan es elaborado a base de harina de trigo, sal, levadura y agua, también se le puede añadir otros aditivos, este alimento es de consumo diario y dentro de estos se clasifican en los siguientes tipos de panes, entre los más conocidos son los siguientes:

- Pan integral: su elaboración tiene harina como su mismo nombre lo menciona integral, la cual es obtenida de la trituration del grano completo, de este modo no se separa ninguna de estas partes conservando su esencia.
- Pan de molde: También conocido como pan americano, este tipo de pan tiene su corteza blanda y también este tiene su particularidad de que su moldeado es en recipientes de forma lo que le da su nombre.

2.2.5.2. Composición nutricional del pan común

En la Tabla 4 se muestra el porcentaje de cada contenido nutricional que tiene el pan común:

Tabla 4. Contenido nutricional de pan común.

Compuesto	Cantidad en %
Hidratos de carbono	47.8
Proteína	7.6
Grasas	1.3
Fibra	3.5
Agua	35

Fuente: (Cusangúa y Burbano, 2019)

2.2.6. Masa Madre

La masa madre se define según el Real Decreto 308/2019 es un cultivo simbiótico que consiste en una mezcla de harina y agua que se deja fermentar de manera natural. Este proceso involucra levaduras y bacterias presentes en el ambiente que se desarrollan y multiplican, creando un fermento que se utiliza para leudar el pan. A diferencia de las levaduras comerciales, la masa madre se basa en la fermentación espontánea, lo que le confiere características únicas al pan (Santacruz et al., 2023).

2.2.6.1. Pan de masa madre

Delgadillo et al. (2023), mencionan que el pan de masa madre ha ganado popularidad debido a sus beneficios nutricionales y funcionales. Según estudios recientes, este tipo de pan se elabora mediante una fermentación natural con harina y agua, lo que permite la activación de bacterias ácido lácticas y levadura.

Las bacterias cumplen un papel fundamental en la fermentación natural pero también ayudan a mejorar la digestibilidad del pan al degradar compuestos anti nutricionales, sino que también aumenta la biodisponibilidad de minerales esenciales como el calcio, hierro y magnesio (Delgadillo et al., 2023).

En la Tabla 5 se muestra la composición nutricional del pan de masa madre.

Tabla 5. Información nutricional de pan de masa madre por cada 100 gramos.

Nutriente	Cantidad
Calorías	174 kcal
Grasas totales	1.5 g
Grasas saturadas	0.3 g
Carbohidratos	33 g
Fibra dietética	1.4 g
Azúcares	3 g
Proteínas	6.9 g
Calcio	33 mg
Hierro	2.5 mg
Potasio	74.9 mg

Fuente: (Delgadillo et al., 2023)

Además, la fermentación con masa madre influye en la textura y el sabor del pan, proporcionando una miga más esponjosa y un perfil aromático más complejo. También se ha observado que este tipo de fermentación puede reducir el índice glucémico del pan, lo que lo hace más adecuado para personas que buscan opciones con menor impacto en los niveles de azúcar en sangre (González y Morales, 2024).

2.2.6.2. Formulación base de pan de masa madre

En la Tabla 6 se muestra la formulación base para la elaboración de pan de masa madre para 1000g:

Tabla 6. Formulación base de la elaboración de pan de masa madre.

Materia prima	Cantidad (g)	Cantidad (%)
Harina panificable	439.55	49.38
Harina integral	54.9	6.17
Agua	274.75	30.87
Masa madre	109.9	12.35
Sal	11.0	1.24

III. METODOLOGÍA

3.1. ENFOQUE METODOLÓGICO

3.1.1. Enfoque

La investigación se desarrolló bajo un enfoque mixto (cuali-cuantitativo), el cual permitió una comprensión integral del fenómeno mediante la articulación de dos componentes críticos: el cuantitativo, empleado para la recolección y análisis de datos numéricos a través de métodos analíticos estandarizados que midieron variables objetivas como el porcentaje de fibra cruda, niveles de acidez titulable y pH; y el cualitativo, aplicado mediante una evaluación sensorial para recopilar las percepciones y juicios de valor de los jueces sobre atributos como color, olor y textura.

3.1.2. Tipo de Investigación

Investigación Experimental: Fue el eje central del trabajo, dado que se realizó una manipulación deliberada de la variable independiente (sustitución parcial de harina de trigo por harina de bagazo de cerveza en porcentajes de 10, 15, 20 y 25 %). Se establecieron condiciones controladas de laboratorio para observar el efecto de estos cambios sobre la estructura, composición y aceptabilidad del pan de masa madre.

Investigación Descriptiva: Se utilizó para caracterizar detalladamente las propiedades de la materia prima (harina de bagazo) y del producto final. A través de este tipo de investigación, se describieron de forma precisa los perfiles sensoriales y nutricionales, permitiendo identificar las particularidades de cada tratamiento evaluado.

3.2. HIPÓTESIS

Ho: La sustitución parcial de harina de trigo por harina de bagazo de cerveza no influye en las características fisicoquímicas, reológicas, perfil de textura y sensoriales en el producto final del pan masa madre.

Hi: La sustitución parcial de harina de trigo por harina bagazo de cerveza influye en las características fisicoquímicas, reológicas, perfil de textura y sensoriales en el producto final del pan masa madre.

3.3. DEFINICIÓN Y OPERACIONALIZACIÓN DE LAS VARIABLES

3.3.1. Definición de las variables

Variable independiente

VI: Porcentaje de sustitución de harina de trigo por harina de bagazo de cerveza de tipo Pale ALE.

Variable dependiente

VD: Calidad de la harina (parámetros fisicoquímicos) y calidad del pan de masa madre (parámetros fisicoquímicos reológicos, microbiológicos y sensoriales)

3.3.2. Operacionalización de las variables

En la Tabla 7 se muestra el desglose de las variables utilizadas de la investigación.

Tabla 7. Operacionalización de variables

Variable	Dimensión	Indicadores	Técnicas	Instrumentos/ Normas
V. Independiente		T0		
Porcentaje de sustitución de harina de trigo por harina de bagazo de cerveza de tipo Pale ALE.	Tratamientos	T1: 10% T2: 15% T3: 20% T4: 25%	Gravimetría	Hojas de registro de datos
V. Dependiente		Proteína	Método de Kjeldahl	AOAC 979.09
Calidad de la harina de bagazo de cerveza Pale Ale	Análisis fisicoquímicos	Cenizas	Calcinación por mufla	AOAC 923.03
		Fibra cruda	Gravimetría	AOAC 962.09
		Humedad	Gravimetría	AOAC 925.10
		pH	Potenciometría	NTE INEN 526:2012
Calidad de la masa	Análisis reológicos	Absorción de agua Capacidad de retención de agua	Reometría	
		Amilasa		
		Elasticidad		
		Contenido de gluten		
	Análisis fisicoquímicos	Acidez	Acidez titulable	NTE INEN 521:2013
		Proteína	Método de Kjeldahl	AOAC 979.09
		Cenizas	Calcinación por mufla	AOAC 923.03
		Fibra cruda	Gravimetría	AOAC 962.09
		Humedad	Gravimetría	AOAC 925.10
		pH	Potenciometría	NTE INEN 526:2012
Calidad de pan masa madre	Análisis microbiológico	Recuento de mohos y levaduras	Recuento por placas	NTE INEN 1529-10
	Análisis de perfil de textura	Dureza Adhesividad Cohesividad Elasticidad Masticabilidad	Texturómetro Brookfield	Texturómetro Brookfield
	Análisis sensorial	Apariencia Sabor Textura	Prueba de aceptación con escala hedónica de 5 niveles	NTC 3925

3.4. MÉTODOS UTILIZADOS

3.4.1. Diagrama de flujo de la obtención de harina de bagazo de cerveza Pale Ale

En la Figura 1 se observa el diagrama flujo elaborado para la obtención de harina de bagazo de cerveza Pale Ale.

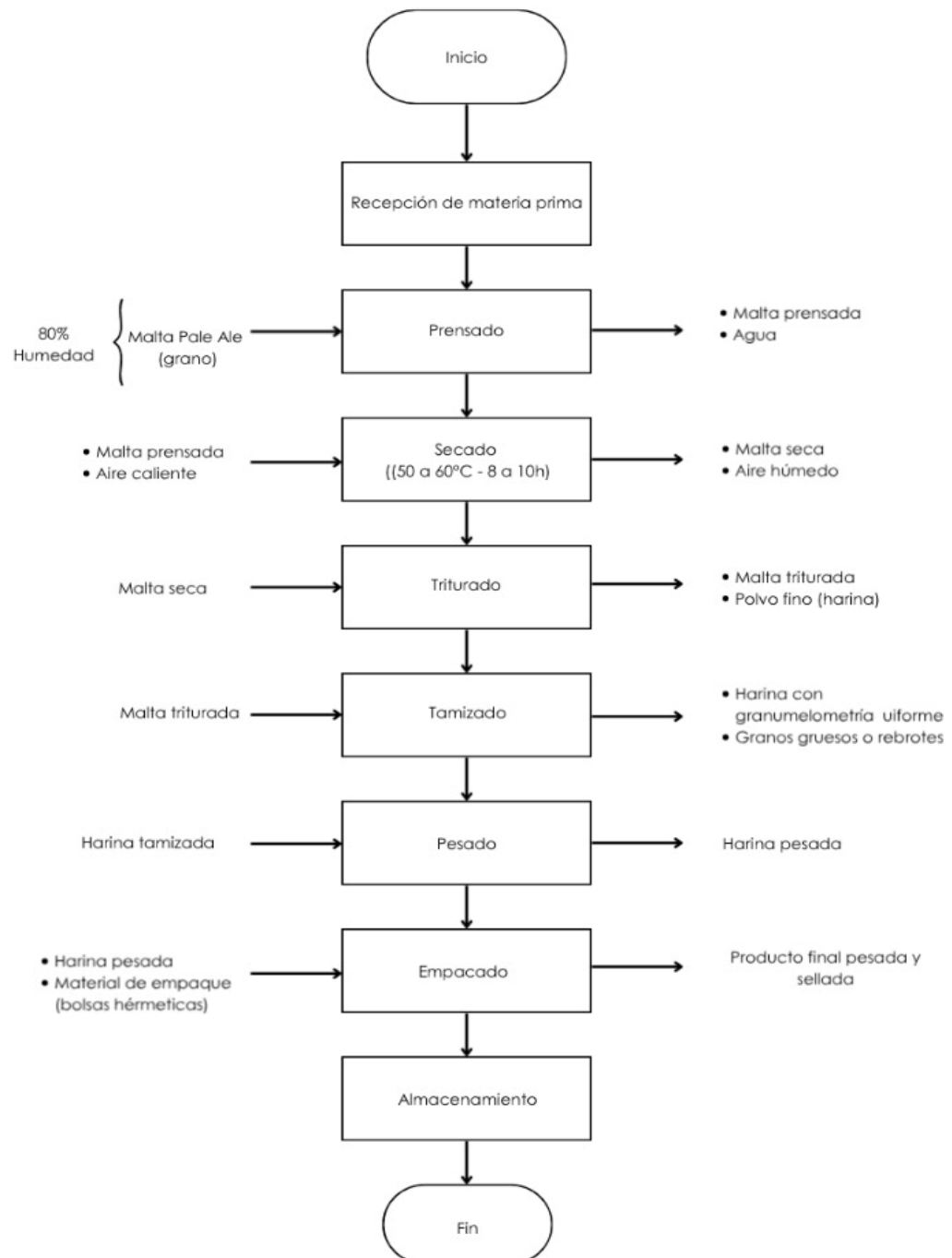


Figura 1. Diagrama de flujo de la harina del bagazo de cerveza.

Fuente: (Muñoz et al., 2024)

Descripción del diagrama de flujo

Recepción de materia prima (bagazo): recolectar después del proceso de maceración para así evitar fermentaciones no deseadas. Debe ser a una temperatura refrigerada de 4°C por no más de 24 horas.

Prensado: Eliminación de líquido excedente mediante telas filtrantes o tamices o su vez prensado manual.

Secado de bandejas (deshidratador de alimentos): es fundamental para poder reducir el contenido de húmedas y evitar la proliferación microbiana. Su temperatura debe ser de $50 - 60^{\circ}\text{C}$ con un tiempo de 8-10 horas.

Triturado: su tamaño de partícula debe ser $< 0.5\text{mm}$ para el uso de panificación.

Tamizado: el uso de malla es 60-80 para uniformizar el tamaño de partícula.

Pesado: es donde se determina la cantidad de bagazo de cerveza húmedo antes de procesarlo.

Empacado: colocar la harina del bagazo de cerveza tipo Pale Ale en fundas ziploc de 26 por 27 centímetros, para evitar absorción de humedad o contaminación.

3.4.2. Diagrama de flujo de la elaboración del pan masa madre de harina del bagazo de cerveza estilo Pale Ale

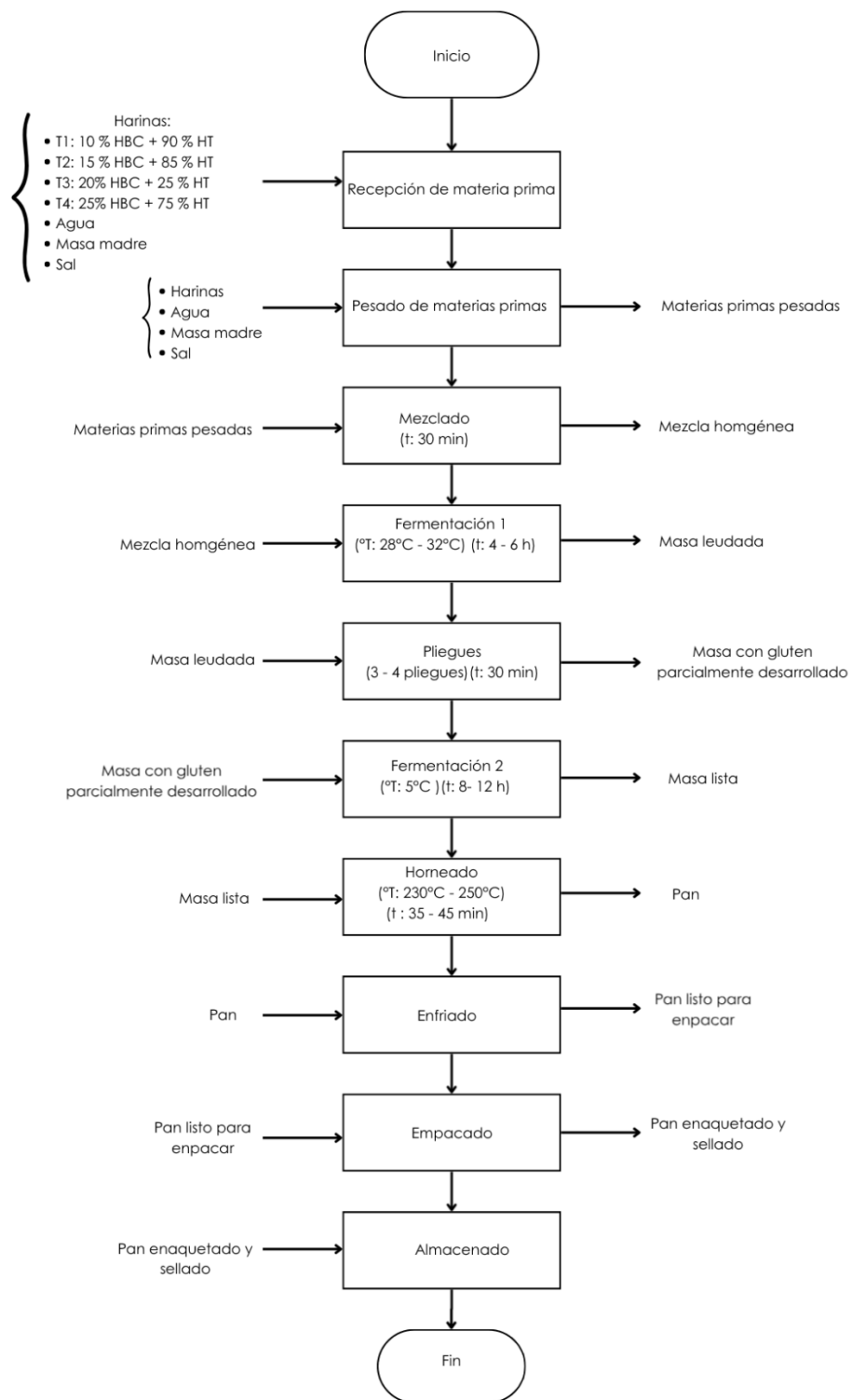


Figura 2. Diagrama de flujo de obtención del pan masa madre.

Descripción del diagrama de flujo

Recepción de la materia prima: Recepción de la harina del bagazo de cerveza estilo Pale Ale, previamente secada y molida se usará entre 10% y 30% de la mezcla total de harinas para mantener una buena textura y volumen, se usará el cultivo natural de levaduras y bacterias lácticas.

Pesado: se pesará la materia prima para la elaboración del pan masa madre.

Mezclado de la masa: mezclar las harinas con el agua y dejar reposar 30 minutos, se incorpora sal y amasar hasta obtener una masa suave y homogénea.

Fermentación en bloque (1 fermentación): se dejará por 4-5 horas a temperatura ambiente y se realizará 3-4 pliegues cada 30 minutos para desarrollar el gluten.

Fermentación final (2 fermentación): se dejará 2 horas a temperatura ambiente.

Horneado: a 230-250 °C se les añade vapor a los primeros 10 minutos por un tiempo de 35-45 minutos.

Enfriado: sobre una rejilla durante al menos 2 horas antes de cortar.

3.4.3. Técnicas

3.4.3.1. Análisis Físicoquímico

Las harinas obtenidas a partir del bagazo de cerveza Pale Ale se someterán a los siguientes análisis físicoquímicos tales como: Humedad, proteína fibra cruda cenizas, extracto etéreo, carbohidratos, almidón y acidez; parámetros que constituyen los requisitos básicos de la calidad para este tipo de harinas.

3.4.3.1.1. Determinación de humedad

La humedad de un alimento se mide observando cuanto peso pierde la muestra cuando se calienta en una estufa, a una temperatura y por un tiempo previamente establecidos. Para esta determinación se aplicó el método descrito en la norma AOAC 925.10, siguiendo el procedimiento indicado a continuación:

1. Preparación de cápsulas

Las cápsulas se colocaron en la estufa a 105 °C durante 60 minutos (1 hora), hasta que alcanzaron un peso constante, es decir, sin variaciones.

2. Pesado de la muestra

En una balanza analítica se tomó entre 3 y 5 gramos de muestra y se colocó en las cápsulas previamente identificadas según cada tratamiento.

3. Secado de la muestra

Las capsulas con la muestra se llevaron a la estufa a 103°C durante 3 horas para eliminar la humedad.

4. Enfriado y pesado final

Después del secado, las cápsulas se retiraron de la estufa y se colocaron en un desecador para enfriar entre 10 y 15 minutos. Una vez frías, se pesaron nuevamente para obtener el peso final.

5. Cálculo de humedad

El contenido de humedad se determinó aplicando la ecuación correspondiente, que relaciona la pérdida de peso con el porcentaje de agua presente en la muestra.

$$\%H = \frac{w_1 - w_2}{w_M} \times 100$$

Donde:

w_1 : Peso cápsula con muestra seca (g).

w_2 : Peso cápsula con muestra seca (g).

w_M : Peso de la muestra (g).

3.4.3.1.2. Proteína

Para determinar el contenido de proteína en las muestras alimentarias se utilizó el método Kjeldahl, siguiendo la norma AOAC 960.52 y el procedimiento 2001.11. Este método, se divide en tres etapas principales:

1. Digestión

Se pesó 1 gramo de muestra en papel previamente tarado y se transfirió un tubo Kjeldahl. Luego se añadió 12 mL de ácido sulfúrico concentrado (H_2SO_4) y dos pastillas catalizadoras. La mezcla se calentó hasta que adquirió un color verde claro, lo que indica que la digestión esta completa.

2. Destilación

Después de la digestión, los tubos se dejaron enfriar entre 10 y 20 minutos en una campana de flujo laminar, hasta que dejaron de emitir vapores. Se agrego

agua desionizada para enjuagar y completar en un volumen total de 80 mL en cada tubo. Luego se añadió 50 mL de hidróxido de sodio (*NaOH al 40%*) para liberar el amoníaco (*NH₃*), que fue capturado en un matraz Erlenmeyer con solución de ácido bórico (*H₃BO₃*).

3. Titulación

La solución que contenía el amoníaco se valoró con ácido clorhídrico (*HCl*) 0,1 N, utilizando rojo de metileno como indicador. A partir del volumen de ácido consumido, se calculó el porcentaje de nitrógeno con la siguiente fórmula:

$$\%Nitrógeno = \frac{1,4 \cdot (V_1 - V_0) \cdot N}{P}$$

Luego, el porcentaje de nitrógeno se convirtió en porcentaje de proteína usando el factor de conversión específico para el alimento analizado:

$$\%Proteína = \%Nitrógeno \cdot F$$

Donde:

P: peso de la muestra en gramos

V1: volumen de HCl usando en la muestra (mL)

V0: volumen de HCl usando en el blanco

N: normalidad del ácido clorhídrico

F: Factor de conversión

Este procedimiento permitió conocer con precisión el contenido de proteínas en las muestras evaluadas.

Tabla 8. Factor de conversión para la obtención de proteína

Alimentos	Factor (k)
Arroz integral	6.25
Harina de trigo integral	5.7
Macarrones, espaguetis	5.7
Alubias rojas	6.25
Soja y derivados	5.71
Almendras	5.18
Cacahuetes	5.46
Nueces	5.3
Semillas	5.3
Leche entera	6.38
Queso	6.38
Mantequilla	6.38
Yogur	6.38

Carne de vacuno	6.25
Pechuga de pollo	6.25
Jamón	6.25
Huevo entero	6.25
Pescado	6.25

Fuente: (ITW Reagents, 2025).

3.4.3.1.3. Cenizas

Para medir el contenido de cenizas en la muestra se aplicó el método de incineración descrito en la norma AOAC 923.03. El procedimiento se realizó de la siguiente forma:

1. Se colocó un crisol limpio en una estufa a 100 °C durante una hora para eliminar cualquier humedad.
2. Luego se enfrió en un desecador y se pesó, manipulándolo siempre con pinzas o guantes para evitar contaminación.
3. Se pesaron 1.5 y 2 gramos de la muestra y se colocaron dentro del crisol de porcelana.
4. El crisol con la muestra se introdujo en la mufla y se incineró a 550 °C durante 3 a 5 horas, hasta obtener cenizas de color claro.
5. Después de la incineración, el crisol se dejó enfriar primero dentro de la mufla hasta 100 °C y luego en el desecador.
6. Finalmente, se pesó nuevamente el crisol, ahora con las cenizas obtenidas.

El resultado se expresa como porcentaje de cenizas, calculado con la fórmula correspondiente que relaciona el peso inicial y final del crisol con la cantidad de muestra utilizada.

$$\% \text{Cenizas} = \frac{(W_1 - W_2)}{W_M} \times 100$$

Donde

W_1 : peso de crisol más muestra (g)

W_2 : peso crisol (g)

W_M : peso de la muestra (g)

3.4.3.1.4. Fibra cruda

El contenido de fibra cruda se obtiene mediante digestiones químicas que eliminan los componentes solubles, dejando únicamente la fracción insoluble. El procedimiento se desarrolla así:

1. Los crisoles limpios se colocan en la estufa a 105 °C durante una hora, hasta lograr un peso constante.
2. Se pesa entre 1 y 2 gramos de muestra seca y desengrasada en una balanza analítica.
3. La muestra se transfiere a un matraz de 1 litro y se le añaden 200 mL de ácido sulfúrico al 1.25 %, previamente calentado hasta ebullición.
4. Se agrega un agente antiespumante para evitar la formación de espuma.
5. La mezcla se hierve bajo reflujo durante 30 minutos, rotando el matraz periódicamente para evitar que las partículas se adhieran a las paredes.
6. Se filtra la muestra usando un embudo de Buchner o Hartley con papel de filtro humedecido.
7. El residuo se lava con agua caliente y luego se somete a una segunda digestión con 200 mL de hidróxido de sodio al 1.25 %, también hervido por 30 minutos. Después se realiza otra filtración.
8. El material insoluble se transfiere a un crisol y se lava sucesivamente con agua hirviendo, ácido clorhídrico al 1 % y agua destilada, asegurando que no queden restos de ácido.
9. Se realizan dos lavados con etanol y tres con acetona para purificar la fibra.
10. El crisol con la fibra se seca en estufa a 100 °C hasta alcanzar peso constante.
11. Posteriormente, se incinera en una mufla a 550 °C durante una hora.
12. El crisol se enfría en un desecador y se pesa nuevamente.
13. El porcentaje de fibra cruda se calcula con la fórmula correspondiente, relacionando el peso inicial de la muestra con el peso final del residuo insoluble.

$$\%FC = \frac{(W_2 - W_3) - (B_2 - B_3)}{W_1} \times 100$$

Donde:

$\%FC$: porcentaje de fibra cruda en la muestra

W_1 : peso de la muestra original (g) utilizada para el análisis

W_2 : peso del crisol con el residuo después del secado

W_3 : peso del crisol con la ceniza (materia orgánica) después de la incineración

B_2 y B_3 : peso promedio de todos los blancos después del horno y la incineración

3.4.3.1.5. Determinación de carbohidratos totales

El contenido de carbohidratos en un alimento se obtiene de forma indirecta, aplicando el método por diferencia descrito en la norma AOAC 985.25 (2014).

1. Medición de otros componentes

Primero se determina el porcentaje de humedad

2. Cálculo de carbohidratos

Una vez obtenidos esos valores, el porcentaje de carbohidratos se calcula restando la suma de dichos componentes al 100%.

La fórmula aplicada es:

$$\%C = 100 - (\%H - \%P - \%G + \%F)$$

Donde:

%H: porcentaje de humedad

%P: porcentaje de proteína

%Grasa: porcentaje de grasa

%F: porcentaje de fibra

%C: porcentaje de carbohidratos

3.4.3.1.6. Acidez

Para medir la acidez titulable en harinas de origen vegetal se aplicó el método descrito en la norma NTE INEN 521:2013. El procedimiento se desarrolló de la siguiente forma:

1. Se pesaron 5 gramos de muestra y se colocaron en un matraz Erlenmeyer de 100 mL.
2. Se añadieron 50 mL de alcohol al 90 % previamente neutralizado, se tapó el matraz y se agitó enérgicamente.
3. La mezcla se dejó reposar durante 24 horas, agitando ocasionalmente.
4. Se tomaron 10 mL del líquido sobrenadante y se transfirieron a un matraz Erlenmeyer de 50 mL.
5. Se agregaron 2 mL de fenolftaleína como indicador y se tituló con hidróxido de sodio 0.02 N.

6. La titulación se realizó añadiendo lentamente la solución de NaOH hasta que apareciera un color rosado tenue que permaneciera por al menos 30 segundos.
7. Con el volumen de NaOH consumido se calcularon los resultados aplicando la fórmula correspondiente para expresar el porcentaje de acidez titulable.

$$A = \frac{490 \cdot N \cdot V}{m(100 - H)} \times \frac{V_1}{V_2}$$

Donde:

A: contenido de acidez en porcentaje de masa de ácido sulfúrico

N: normalidad de la solución de NaOH

V: volumen consumido de NaOH en la titulación en cm

V1: volumen de alcohol empleado (cm^3)

V2: volumen de la muestra tomada (cm^3)

m: peso de la muestra (g)

H: contenido de humedad (%)

3.4.3.2. Determinación de análisis reológico

El análisis reológico de la masa fue realizado en el equipo Mixolab 2, utilizando el protocolo Chopin+, con el siguiente procedimiento:

- Se prepararon las muestras correspondientes a cada tratamiento experimental.
- Se realizó un análisis mediante un analizador de humedad con infrarrojo.
- Se ajustó la hidratación al 60% considerando el contenido de humedad de cada tratamiento.
- Luego se colocó la cantidad requerida de harina en la cubeta del equipo.
- Durante el análisis, el equipo mostro los cambios reológicos relacionados con la absorción de agua, estabilidad de la masa, debilitamiento proteico y comportamiento del almidón.
- Se obtuvieron las curvas y parámetros reológicos generados automáticamente por el software del equipo Mixolab 2 Chopin+.

Se determina los siguientes parámetros clave:

1. Desarrollo de la masa (C1) amasado inicial.

En esta fase ocurre una temperatura constante (generalmente 30°) y mide la calidad de las proteínas antes de que el calor las afecte.

- **Par C1:** es el punto máximo de la fuerza o resistencia que ofrece la masa durante el mezclado inicial. Se utiliza para determinar la capacidad de absorción de agua.
- **Tiempo C1:** es el tiempo que tarda la masa en alcanzar su desarrollo máximo, indica que tan rápido se hidrata la harina.
- **Temperatura C1:** es la temperatura de la masa en este punto máximo, mantenida usualmente a 30°C para simular el inicio de la panificación.
- **Estabilidad:** el tiempo durante el cual la curva del torque se mantiene en su nivel máximo (C1) y representa la resistencia de la masa al sobreamasado; si la estabilidad es baja, la masa se "rompe" fácilmente.

2. Debilitamiento de la proteína (C2).

En esta fase, comienza a subir la temperatura, lo que provoca que las proteínas del gluten empiecen a desnaturalizarse.

- **Par C2:** es el torque mínimo que alcanza la masa donde representa el punto donde la estructura proteica se debilita debido al calor y al estrés mecánico.
- **Temperatura C2:** es la temperatura exacta en la que ocurre este debilitamiento mínimo.
- **Tiempo C2:** es el tiempo transcurrido desde el inicio hasta este punto de caída de fuerza.

3. Estabilidad del gel de almidón.

Después de que el almidón se gelatiniza (punto C3, que es el pico máximo de viscosidad), la masa entra en la fase C4.

- **Par C4:** es el torque mínimo después del pico de gelatinización mientras la masa sigue a alta temperatura. Mide la estabilidad del gel formado y la resistencia de la masa frente a la actividad de las amilasas (enzimas que degradan el almidón).
- **Temperatura C4:** es la temperatura a la que el gel de almidón se estabiliza.
- **Tiempo C4:** es el tiempo necesario para llegar a este estado de equilibrio antes del enfriamiento final.

3.5. ANÁLISIS ESTADÍSTICO

Se estableció un Diseño Completamente al Azar (DCA) con 5 tratamientos (T0 como control y T1, T2, T3 y T4 con sustitución progresiva). Cada tratamiento se ejecutó por triplicado para un total de 15 unidades experimentales. Los resultados se procesaron mediante el software estadístico InfoStat, aplicando un Análisis de Varianza (ANOVA). Para determinar las diferencias significativas entre las medias de los tratamientos, se empleó la prueba de Tukey con un nivel de confianza del 95 % ($\alpha = 0.05$).

3.5.1. Formulaciones

Para la elaboración de pan de masa madre se establecieron diferentes formulaciones como se muestra en la Tabla 9:

Tabla 9. Formulación de masa madre y sus porcentajes parciales.

Tratamientos	H. Panificable (%)	H. Bagazo de cerveza (%)	H. Integral (%)	Agua (%)	Masa madre (%)	Sal (%)
T0	49.38	0	6,17	30,87	12,35	1,24
T1	46.92	2.78	6,17	30,87	12,35	1,24
T2	44.49	5.56	6,17	30,87	12,35	1,24
T3	42.06	8.33	6,17	30,87	12,35	1,24
T4	39.63	11.11	6,17	30,87	12,35	1,24

En la Tabla 10 se muestra los sustitutos parciales de harina de trigo por harina de bagazo de cerveza.

Tabla 10. Concentraciones de Harina de Bagazo de Cerveza (HBC) y Harina de Trigo (HT) en formulaciones parciales

Tratamientos	Concentración HT (%)	Concentración HBC (%)
T0	100	0
T1	90	10
T2	85	15
T3	80	20
T4	75	25

IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. RESULTADOS

4.1.1. Análisis fisicoquímicos de la materia prima (harina de bagazo)

La Tabla 11 presenta los resultados de los análisis fisicoquímicos realizados a la harina obtenida a partir del bagazo de cerveza estilo Pale Ale. Los valores se expresan como media $\pm$ desviación estándar.

Tabla 11. Resultados fisicoquímicos de la harina de bagazo de cerveza Pale Ale

Parámetros					
Cenizas (%)	Fibra cruda (%)	Humedad (%)	Proteína (%)	pH	Carbohidratos (%)
2.13 $\pm$ 0.01	19.69 $\pm$ 0.60	8.28 $\pm$ 0.09	20.07 $\pm$ 1.30	5.36 $\pm$ 0.02	47.26 $\pm$ 1.38

La harina de bagazo de cerveza presentó un contenido mayoritario de carbohidratos (47.26 %), seguido de un nivel considerable de proteína (20.07 %) y fibra cruda (19.69 %). El contenido de humedad (8.28 %) fue bajo, lo cual es favorable para la estabilidad del producto durante el almacenamiento, ya que reduce el riesgo de proliferación microbiana. El porcentaje de cenizas (2.13 %) refleja el contenido mineral del subproducto. El pH ligeramente ácido (5.36) es característico de este tipo de residuos debido a los procesos de maceración y fermentación previos. En conjunto, estos resultados indican que la harina de bagazo de cerveza es un ingrediente con alto valor nutricional, especialmente en proteína y fibra, apto para ser utilizado en productos de panificación.

4.1.2. Análisis de las propiedades reológicas de las mezclas de harinas

La Tabla 12 presenta la verificación de supuestos para las propiedades reológicas de las mezclas, incluyendo los resultados de la prueba de normalidad de Shapiro-Wilks para cada variable, además, se indica el valor p de normalidad, si se cumple o no el supuesto, la prueba estadística aplicada (ANOVA o Kruskal-Wallis), el p-valor de dicha prueba y el coeficiente de variación (CV) expresado en porcentaje.

Tabla 12. Verificación de supuestos para las propiedades reológicas de las mezclas y ANOVA

Variable	Supuesto	Valor p	Cumple	Prueba	P-valor	CV
Temperatura C1 (°C)	Normalidad Shapiro-Wilks	0.6771	Si	ANOVA	0.0832	1.71 %
Tiempo C1 (min)		0.3604	Si	ANOVA	0.0029	37.05 %
Par C1 (Nm)		0.1477	Si	ANOVA	0.0385	2.31 %
Estabilidad (min)		0.9402	Si	ANOVA	0.0001	2.32 %
Amplitud Nm		0.1799	Si	ANOVA	0.0860	15.99 %
Temperatura C2 (°C)		0.6702	Si	ANOVA	<0.0001	0.96 %
Tiempo C2 (min)		0.5636	Si	ANOVA	0.0006	1.15 %
Par C2 (Nm)		0.6647	Si	ANOVA	<0.0001	2.20 %
Temperatura C4 (°C)		<0.0001	No	Kruskal Wallis	0.2557	0.99 %
Tiempo C4 (min)		<0.0001	No	Kruskal Wallis	0.6109	0.61 %
Par C4 (Nm)		0.565	Si	ANOVA	<0.0001	7.65 %

La prueba de normalidad de Shapiro-Wilks mostró que la mayoría de las variables reológicas presentaron valores p superiores a 0.05, lo que indica que cumplen con el supuesto de normalidad. En consecuencia, para estas variables se aplicó un ANOVA paramétrico. Por el contrario, las variables Temperatura C4 y Tiempo C4 mostraron valores p inferiores a 0.0001, incumpliendo la normalidad, por lo que se utilizó la prueba no paramétrica de Kruskal-Wallis. En cuanto a los resultados de las pruebas de hipótesis, el ANOVA detectó diferencias significativas ($p < 0,05$) para Tiempo C1 ($p = 0.0029$), Par C1 ($p = 0.0385$), Estabilidad ($p = 0.0001$), Temperatura C2 ($p < 0.0001$), Tiempo C2 ($p = 0.0006$), Par C2 ($p < 0.0001$) y Par C4 ($p < 0.0001$). Las variables Temperatura C1 ($p = 0.0832$) y Amplitud ($p = 0.0860$) no presentaron diferencias significativas según el ANOVA. Por su parte, la prueba de Kruskal-Wallis para Temperatura C4 ($p = 0.2557$) y Tiempo C4 ($p = 0.6109$) indicó que no existen diferencias significativas entre tratamientos.

El comportamiento reológico de las masas elaboradas con diferentes niveles de sustitución (T0: 0 %, T1: 10 %, T2: 15 %, T3: 20 %, T4: 25 %) se evaluó mediante un Mixolab. La Tabla 13 resume los parámetros obtenidos.

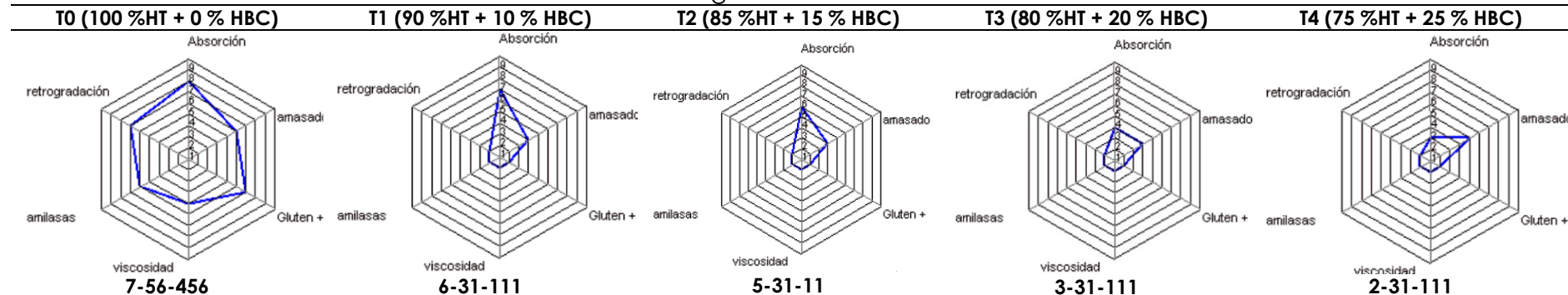
Tabla 13. Resumen de los resultados reológicos Mixolab en las mezclas de harinas

Tratamiento	Absorción de agua (%)	Temperatura C1 (°C)	Tiempo C1 (min)	Par C1 (Nm)	Estabilidad (min)	Amplitud Nm	Temperatura C2 (°C)	Tiempo C2 (min)	Par C2 (Nm)	Temperatura C4 (°C)	Tiempo C4 (min)	Par C4 (Nm)
T0	60	31.67 ^A	7.87 ^A	1.110 ^A	10.17 ^A	0.07 ^A	57.30 ^A	16.38 ^A	0.570 ^A	86.83 ^A	28.27 ^A	1.540 ^A
T1	59	31.10 ^A	4.58 ^{AB}	1.110 ^A	8.87 ^B	0.08 ^A	57.67 ^{AB}	17.19 ^{BC}	0.360 ^B	85.87 ^A	30.00 ^A	0.240 ^B
T2	58	30.97 ^A	4.34 ^{AB}	1.110 ^A	8.87 ^B	0.09 ^A	59.17 ^B	16.81 ^{AB}	0.330 ^C	86.73 ^A	30.00 ^A	0.150 ^{BC}
T3	57	30.73 ^A	2.54 ^B	1.110 ^A	9.53 ^C	0.06 ^A	60.87 ^C	17.16 ^{BC}	0.320 ^C	86.67 ^A	30.00 ^A	0.130 ^C
T4	56	30.27 ^A	1.09 ^B	1.040 ^A	9.47 ^C	0.06 ^A	61.53 ^C	17.41 ^C	0.310 ^C	75.80 ^A	35.01 ^A	0.120 ^C

Nota. Letras diferentes en la misma columna indican diferencias estadísticamente significativas ($p < 0.05$).

El gráfico de araña o perfil radial generado por el Mixolab (Tabla 14) sintetiza en cinco dimensiones el comportamiento reológico y funcional de las mezclas de harina.

Tabla 14. Resultados gráficos Mixolab en tela de araña



Con respecto a la absorción de agua, se observa una tendencia decreciente a medida que aumenta el nivel de sustitución, pasando de 60 % en T0 a 56 % en T4. Esta reducción puede atribuirse a la menor capacidad de hidratación de la harina de bagazo de cerveza en comparación con la harina de trigo, así como a la dilución de la red de gluten, que es fundamental para retener agua. Una menor absorción en los tratamientos con mayor sustitución (T3 y T4) sugiere que la masa requeriría menos agua durante el amasado, lo que podría resultar en una masa más firme y menos extensible, característica que debe ser considerada en la elaboración de pan de masa madre para evitar una textura excesivamente densa.

En el comportamiento durante el amasado (fase C1), el par C1, relacionado con la consistencia inicial y la fuerza de la masa, se mantuvo constante en 1,110 Nm para T0, T1, T2 y T3, disminuyendo ligeramente a 1,040 Nm en T4. Esto indica que la resistencia mecánica de la masa no se ve afectada significativamente hasta niveles de sustitución del 25 %. El tiempo para alcanzar este pico (tiempo C1) se redujo progresivamente desde 7,87 min en T0 hasta 1,09 min en T4, lo que sugiere una menor tolerancia al amasado y una formación de la estructura más rápida pero potencialmente más débil a medida que se incorpora harina de bagazo. La temperatura en C1 se mantuvo estable alrededor de 30-31 °C sin diferencias significativas, confirmando que los cambios observados se deben principalmente a la composición de la masa y no a variaciones en la temperatura de amasado.

En cuanto a la estabilidad de la masa, este parámetro mide la resistencia al sobre-amasado. Los valores más altos se registraron en T0 (10.17 min) y en T3 y T4 (9.53 y 9.47 min, respectivamente), mientras que T1 y T2 presentaron una estabilidad menor (8.87 min). Esta respuesta no sigue una tendencia lineal, ya que las sustituciones intermedias (10-15 %) muestran una menor resistencia al amasado prolongado, mientras que las sustituciones más altas (20-25 %) recuperan parcialmente la estabilidad. Este comportamiento podría deberse a que, en niveles bajos de bagazo, la fibra interfiere con la hidratación homogénea del gluten sin alcanzar una nueva organización estructural, mientras que en niveles altos la matriz dominada por la fibra logra una estabilidad diferente. La amplitud, relacionada con la elasticidad de la masa, no presentó diferencias significativas entre tratamientos, lo que indica que la capacidad elástica a corto plazo no es un parámetro discriminatorio en este rango de sustitución.

Durante la fase de calentamiento (C2), que evalúa el debilitamiento de la masa por efecto de la temperatura, se observa un aumento progresivo de la temperatura C2 desde 57.30 °C en T0 hasta 61.53 °C en T4. Esto indica que las masas con mayor contenido de bagazo requieren más calor para iniciar el debilitamiento de su estructura, posiblemente debido a la presencia de fibra que actúa como refuerzo térmico y retrasa la pérdida de consistencia. El par C2, que representa el torque mínimo tras el debilitamiento, disminuyó de 0.570 Nm en T0 a valores entre 0.360 y 0.310 Nm en T1 a T4, evidenciando una pérdida progresiva de la resistencia al calor conforme aumenta la sustitución. Esta reducción indica que, una vez superada la temperatura umbral, las masas con mayor proporción de bagazo se debilitan más intensamente, lo que puede influir negativamente en la retención de gases durante el horneado y en la estructura final de la miga.

Finalmente, en la fase de enfriamiento (C4), que mide la retrogradación del almidón (es decir, la tendencia del almidón a reasociarse y endurecerse tras la cocción), el parámetro más relevante es el par C4. El tratamiento T0 presentó un valor de 1.540 Nm, mientras que T1 a T4 mostraron valores drásticamente más bajos, entre 0.240 y 0.120 Nm, con una tendencia decreciente clara. Esta reducción indica que la sustitución parcial de harina de trigo por harina de bagazo de cerveza disminuye notablemente la retrogradación. En términos prácticos para el pan de masa madre, una menor retrogradación se asocia con una menor dureza del producto durante el almacenamiento, lo que podría traducirse en una vida útil sensorial más prolongada al mantenerse la miga más blanda por más tiempo. La temperatura C4 y el tiempo C4 no presentaron diferencias significativas entre la mayoría de los tratamientos, excepto en T4 donde la temperatura C4 descendió a 75.80 °C, posiblemente debido a un menor contenido de almidón disponible para gelatinizar como consecuencia de la mayor dilución por la harina de bagazo.

Los resultados gráficos obtenidos mediante el análisis reológico evidenciaron que la sustitución parcial de harina de trigo (HT) por harina de bagazo de cerveza (HBC) produjo modificaciones progresivas en el comportamiento reológico de las masas destinadas a la elaboración de pan de masa madre. El tratamiento control T0 presentó los valores más elevados en los índices de absorción de agua, estabilidad al amasado, fuerza del gluten, viscosidad y retrogradación, reflejando un comportamiento típico de masas elaboradas exclusivamente con harina de trigo y

una adecuada formación de la red glutínica. Sin embargo, conforme se incrementó el porcentaje de sustitución con HBC en los tratamientos T1, T2, T3 y T4, se observó una reducción gradual de los índices reológico, especialmente en los parámetros relacionados con gluten+, viscosidad y retrogradación, lo que evidenció un debilitamiento estructural de la masa. La disminución del índice de absorción de agua indicó una menor capacidad de hidratación del sistema farináceo debido al efecto de dilución del gluten y a la elevada presencia de fibra proveniente del bagazo de cerveza, mientras que la reducción del índice de amasado reflejó una menor estabilidad mecánica y menor tolerancia al trabajo durante el mezclado. De igual manera, el descenso progresivo del índice de gluten+ confirmó la pérdida de elasticidad y cohesividad de la masa como consecuencia de la sustitución parcial de proteínas formadoras de gluten. En cuanto al índice de viscosidad, los tratamientos con mayores niveles de HBC presentaron menor capacidad de gelatinización y desarrollo viscoso durante el calentamiento, atribuible a la reducción del contenido de almidón disponible y a la interferencia de la fibra en la formación de la matriz viscoelástica. Por otro lado, el índice de retrogradación mostró una disminución en los tratamientos con mayor incorporación de HBC, evidenciando una menor reorganización de las moléculas de almidón durante el enfriamiento. La actividad amilásica presentó variaciones mínimas entre tratamientos, indicando que la sustitución no alteró significativamente el comportamiento enzimático de la masa. En conjunto, los resultados demostraron que el incremento de harina de bagazo de cerveza modificó significativamente las propiedades reológicas de la masa madre, observándose un comportamiento más equilibrado en los tratamientos con menores porcentajes de sustitución.

4.1.3. Análisis fisicoquímicos del pan de masa madre

La Tabla 15 presenta la verificación de supuestos para las propiedades fisicoquímicas del pan, incluyendo los resultados de la prueba de normalidad de Shapiro-Wilks para cada variable, además, se indica el valor p de normalidad, si se cumple o no el supuesto, la prueba estadística aplicada (ANOVA o Kruskal-Wallis), el p-valor de dicha prueba y el coeficiente de variación (CV) expresado en porcentaje.

Tabla 15. Verificación de supuestos para las propiedades fisicoquímicas del pan y ANOVA

Variable	Supuesto	Valor p	Cumple	Prueba	P-valor	CV
Fibra	Normalidad Shapiro-Wilks	0.1888	Si	ANOVA	<0.0001	1.13 %
Humedad		0.9213	Si	ANOVA	<0.0001	0.35 %
Grasa		0.9121	Si	ANOVA	<0.0001	0.59 %
Ph		0.6436	Si	ANOVA	<0.0001	9.30 %
Proteína		0.7753	Si	ANOVA	<0.0001	2.24 %
Acidez		0.0040	No	Kruskal Wallis	0.0106	0.98 %
Gluten (%)		0.3545	Si	ANOVA	<0.0001	5.00 %
Ceniza (%)		0.7063	Si	ANOVA	<0.0001	1.37 %
Carbohidratos		0.6296	Si	ANOVA	<0.0001	1.32 %

La prueba de normalidad de Shapiro-Wilks mostró que la mayoría de las variables (fibra, humedad, grasa, pH, proteína, gluten, ceniza y carbohidratos) presentaron valores p superiores a 0.05, lo que indica que cumplen con el supuesto de normalidad y, por lo tanto, se aplicó un ANOVA paramétrico. La única variable que incumplió la normalidad fue la acidez ($p = 0.0040$), para la cual se utilizó la prueba no paramétrica de Kruskal-Wallis.

La Tabla 16 consolida todos los resultados fisicoquímicos obtenidos para cada tratamiento, incluyendo medias, desviaciones estándar y los grupos de significancia estadística.

Tabla 16. Resumen global de los parámetros fisicoquímicos del pan de masa madre

Tratamientos	T0	T1	T2	T3	T4
Fibra (%)	3.23 ± 0.11^E	6.1 ± 0.09^D	9.22 ± 0.08^C	12.57 ± 0.13^B	16.31 ± 0.12^A
Humedad (%)	35.90 ± 0.10^{CB}	35.40 ± 0.22^D	37.43 ± 0.03^B	38.28 ± 0.06^A	38.60 ± 0.15^A
Grasa (%)	$0.16 \pm 2.9E-03^C$	0.33 ± 0.02^A	0.11 ± 0.01^C	0.14 ± 0.01^{AB}	0.11 ± 0.01^B
Ph	5.30 ± 0.02^B	5.43 ± 0.04^B	5.19 ± 0.05^{AB}	5.22 ± 0.02^A	$5.20 \pm 4.4E-03^A$
Proteína (%)	14.54 ± 0.52^C	18.92 ± 0.55^B	18.50 ± 0.07^B	19.35 ± 0.26^B	21.69 ± 0.46^A
Acidez (%)	0.34 ± 2.00^A	0.39 ± 8.00^A	0.42 ± 10.67^A	0.38 ± 5.33^A	0.56 ± 14.00^A
Gluten (%)	9.53 ± 0.28^C	7.65 ± 0.38^B	7.22 ± 0.57^{AB}	6.80 ± 0.23^{AB}	6.38 ± 0.32^A
Ceniza (%)	0.97 ± 0.01^E	1.24 ± 0.01^D	1.62 ± 0.04^C	2.16 ± 0.03^B	2.32 ± 0.01^A
Carbohidratos (%)	45.25 ± 0.47^E	38.01 ± 0.46^D	33.07 ± 0.12^C	27.52 ± 0.31^B	20.90 ± 0.64^A

Nota. Letras diferentes en la misma columna indican diferencia significativa.

El contenido de fibra aumenta progresiva y significativamente con el nivel de sustitución, desde 3.23 % en T0 hasta 16.31 % en T4, con diferencias entre todos los tratamientos (letras E, D, C, B, A). Esta tendencia confirma que la incorporación de harina de bagazo de cerveza incrementa directamente el aporte de fibra dietética, siendo T4 el tratamiento que alcanza el valor más alto, lo cual es relevante para el desarrollo de un pan alto en fibra. La humedad también se incrementa con la sustitución: T1 presenta el valor más bajo (35.40 %, letra D), seguido por T0 (35.90 %, letra CB), T2 (37.43 %, letra B), mientras que T3 y T4 son estadísticamente iguales entre

sí (letra A) con 38.28 % y 38.60 %, respectivamente. Este comportamiento se atribuye a la capacidad de retención de agua de la fibra presente en el bagazo, lo que podría influir positivamente en la jugosidad y textura del pan. En cuanto a la grasa, el tratamiento T1 muestra el valor más alto (0.33 %, letra A), seguido por T3 (0.14 %, letra AB), mientras que T0, T2 y T4 presentan los valores más bajos (0.16 %, 0.11 % y 0.11 %, letras C, C y B respectivamente). Esta respuesta no es lineal y podría deberse a la composición lipídica variable del bagazo o a interacciones durante el procesamiento. El pH disminuye ligeramente respecto al control T0 (5.30, letra B) en los tratamientos con mayor sustitución: T2 (5.19, letra AB), T3 (5.22, letra A) y T4 (5.20, letra A), mientras que T1 (5.43, letra B) es estadísticamente igual a T0, indicando que sustituciones altas tienden a reducir el pH, posiblemente por la liberación de ácidos orgánicos durante la fermentación de los compuestos del bagazo. El contenido de proteína aumenta claramente con la sustitución, desde 14.54 % en T0 (letra C) hasta 21.69 % en T4 (letra A), con T1, T2 y T3 agrupados en un nivel intermedio (letra B). Este incremento es nutricionalmente relevante, ya que el bagazo de cerveza es rico en proteínas. La acidez no presenta diferencias significativas entre los tratamientos (todas las letras A), aunque T4 muestra el valor numéricamente más alto (0.56 %), lo que sugiere que, a pesar de las variaciones, estadísticamente no hay diferencias. El gluten disminuye progresivamente a medida que aumenta la sustitución, desde 9.53 % en T0 (letra C) hasta 6.38 % en T4 (letra A), con T1, T2 y T3 en posiciones intermedias (letras B, AB, AB). Esta reducción es esperable debido a la dilución de la harina de trigo (fuente principal de gluten) por la harina de bagazo, que no contiene gluten. La ceniza se incrementa de forma continua desde 0.97 % (T0, letra E) hasta 2.32 % (T4, letra A), con diferencias significativas entre todos los tratamientos, lo que refleja un mayor contenido mineral proveniente del bagazo de cerveza. Finalmente, los carbohidratos disminuyen drásticamente con la sustitución, desde 45.25 % en T0 (letra E) hasta 20.90 % en T4 (letra A), debido a que la harina de trigo es rica en almidón, mientras que el bagazo aporta principalmente fibra y proteína en lugar de carbohidratos disponibles. En conjunto, estos resultados demuestran que la sustitución parcial de harina de trigo por harina de bagazo de cerveza Pale Ale modifica significativamente el perfil fisicoquímico del pan de masa madre, aumentando el contenido de fibra, proteína, ceniza y humedad, reduciendo el gluten y los carbohidratos, y afectando ligeramente el pH y la grasa, sin cambios significativos en la acidez. El tratamiento T4 (25 % de sustitución) destaca por el mayor contenido de

fibra (16.31 %) y proteína (21.69 %), aunque con el menor contenido de gluten (6.38 %), lo que debe considerarse en el balance tecnológico y sensorial del producto final.

4.1.4. Análisis texturales del pan

La Tabla 17 presenta la verificación de supuestos para las propiedades texturales del pan, incluyendo los resultados de la prueba de normalidad de Shapiro-Wilks para cada variable, además, se indica el valor p de normalidad, si se cumple o no el supuesto, la prueba estadística aplicada (ANOVA o Kruskal-Wallis), el p-valor de dicha prueba y el coeficiente de variación (CV) expresado en porcentaje.

Tabla 17. Verificación de supuestos para las propiedades texturales del pan y ANOVA

Variable	Supuesto	Valor p	Cumple	Prueba	P-valor	CV
Dureza (g)	Normalidad Shapiro-Wilks	0.6567	Si	ANOVA	<0.0001	5.70 %
Cohesividad	Normalidad Shapiro-Wilks	0.4469	Si	ANOVA	0.0184	9.09 %
Elasticidad (mm)	Normalidad Shapiro-Wilks	0.9221	Si	ANOVA	0.2227	6.27 %
Masticabilidad (mJ)	Normalidad Shapiro-Wilks	<0.0001	No	Kruskal Wallis	0.0111	1.00 %

La prueba de normalidad de Shapiro-Wilks mostró que las variables dureza, cohesividad y elasticidad presentaron valores p superiores a 0.05, cumpliendo con el supuesto de normalidad, por lo que se aplicó un ANOVA paramétrico para estas variables. En contraste, la masticabilidad ($p < 0.0001$) incumplió la normalidad, por lo que se utilizó la prueba no paramétrica de Kruskal-Wallis.

La Tabla 18 consolida todos los resultados del perfil de textura para los cinco tratamientos, incluyendo medias, desviaciones estándar y grupos de significancia.

Tabla 18. Resumen global de los parámetros texturales del pan de masa madre

Tratamientos	Dureza (g)	Cohesividad	Elasticidad (mm)	Masticabilidad (mJ)
T0	3214.33 ± 265.01 ^B	0.55 ± 0.09 ^B	8.02 ± 0.27 ^A	146.20 ± 2.15 ^{AB}
T1	1851.33 ± 41.06 ^A	0.75 ± 0.03 ^A	9.04 ± 0.90 ^A	117.67 ± 1.75 ^A
T2	4065.00 ± 182.00 ^C	0.63 ± 0.06 ^{AB}	8.87 ± 0.19 ^A	204.9 ± 2.67 ^C
T3	3924.33 ± 217.89 ^C	0.64 ± 0.06 ^{AB}	8.40 ± 0.57 ^A	202.43 ± 4.38 ^{BC}
T4	2733.67 ± 98.19 ^B	0.71 ± 0.04 ^{AB}	8.78 ± 0.47 ^A	173.57 ± 11.59 ^{ABC}

Nota. Letras diferentes en la misma columna indican diferencia significativa (p -valor < 0.05).

La dureza del pan presentó variaciones significativas entre tratamientos. T1 (10 % de sustitución) mostró el valor más bajo (1851.33 g, letra A), mientras que T2 (4065.00 g) y T3 (3924.33 g) presentaron los valores más altos (letra C), siendo estadísticamente iguales entre sí. T0 (3214.3 g) y T4 (2733.67 g) ocuparon un nivel intermedio (letra B), sin diferencias significativas entre ellos. Este comportamiento indica que una sustitución baja (10 %) reduce la dureza, obteniendo un pan más blando, mientras

que sustituciones medias (15 % y 20 %) la incrementan notablemente, y una sustitución alta (25 %) la reduce nuevamente, acercándose al control. En cuanto a la cohesividad, que mide la capacidad del pan para mantener su estructura antes de romperse, T1 presentó el valor más alto (0.75, letra A), mientras que T0 (0.55, letra B) fue el más bajo; T2, T3 y T4 mostraron valores intermedios sin diferencias significativas entre sí (letra AB). Esto sugiere que una sustitución del 10 % mejora la cohesividad, mientras que sustituciones superiores no generan cambios estadísticamente distintos respecto al control. La elasticidad no presentó diferencias significativas entre tratamientos (todas las letras A), con valores que oscilaron entre 8.02 mm (T0) y 9.04 mm (T1), lo que indica que la sustitución de harina de trigo por bagazo de cerveza no afecta la capacidad del pan para recuperar su forma tras una deformación. Finalmente, la masticabilidad, que representa la energía necesaria para masticar el pan hasta su deglución, mostró diferencias significativas: T2 (204.9 mJ, letra C) y T3 (202.43 mJ, letra BC) presentaron los valores más altos, T0 (146.20 mJ, letra AB) y T4 (173.57 mJ, letra ABC) valores intermedios, y T1 (117.67 mJ, letra A) el valor más bajo. Esta tendencia se correlaciona parcialmente con la dureza, indicando que las sustituciones del 15 % y 20 % requieren mayor esfuerzo de masticación, mientras que el 10 % produce un pan más fácil de masticar. En conjunto, los resultados texturales muestran que el nivel de sustitución influye de manera diferencial sobre las propiedades mecánicas del pan de masa madre: el tratamiento T1 (10 %) destaca por ser el más blando, con mayor cohesividad y menor masticabilidad, mientras que T2 y T3 resultan más duros y requieren mayor masticación, y T4 se sitúa en valores intermedios. La elasticidad no se ve afectada por la sustitución en ningún nivel evaluado.

4.1.5. Análisis microbiológico del pan

En la Tabla 19 se presentan los resultados del recuento de mohos y levaduras (expresado en UFC/g) para los panes de masa madre elaborados con los diferentes tratamientos (T0 a T4).

Tabla 19. Resultados microbiológicos del pan de masa madre

Requisito	Tratamientos				
	T0	T1	T2	T3	T4
Mohos y levaduras (UFC/g)	< 10 UFC/g	< 10 UFC/g	< 10 UFC/g	< 10 UFC/g	< 10 UFC/g

Nota. Valores expresados como <10 UFC/g corresponden al límite de cuantificación estimado para la dilución 10^{-1} ante la ausencia de crecimiento colonial, siguiendo las directrices de la norma ISO 7218:2024.

Los análisis microbiológicos revelaron ausencia total de mohos y levaduras en todos los tratamientos evaluados, incluyendo el pan control (T0) y aquellos con sustitución parcial de harina de trigo por harina de bagazo de cerveza (T1 a T4). Este resultado es fundamental desde el punto de vista de la inocuidad alimentaria, ya que la presencia de estos microorganismos se asocia con alteraciones sensoriales (sabores y olores extraños, producción de micotoxinas) y reducción de la vida útil del producto. La ausencia de mohos y levaduras indica que el proceso de horneado fue efectivo para inactivar estas formas microbianas y que las condiciones de manejo posterior (enfriamiento, envasado y almacenamiento) fueron adecuadas para prevenir una contaminación cruzada. Cabe destacar que todos los tratamientos cumplieron con los límites microbiológicos establecidos en la normativa ecuatoriana para productos de panificación. No se observaron diferencias entre los tratamientos, lo que sugiere que la incorporación de harina de bagazo de cerveza, en los niveles evaluados, no introdujo contaminación adicional ni afectó la estabilidad microbiológica del producto final. Este hallazgo respalda la viabilidad de utilizar este subproducto como ingrediente funcional en panificación, garantizando un producto inocuo para el consumo humano.

4.1.6. Análisis sensorial del pan

En la Tabla 20 se presentan los resultados de la evaluación sensorial realizada a los panes de masa madre elaborados con diferentes niveles de sustitución (T0 a T4). Participaron 60 jueces no entrenados, quienes calificaron los atributos de color, olor, sabor, textura y aceptabilidad global mediante una escala hedónica de 5 puntos (1 = "me disgusta mucho", 5 = "me gusta mucho"). Los valores se expresan como mediana $\pm$ desviación estándar. Los valores se expresan como media ($\bar{X}$) $\pm$ desviación estándar, permitiendo identificar las variaciones estadísticas entre tratamientos evaluados.

Tabla 20. Resultados sensoriales del pan de masa madre

Parámetros	T0	T1	T2	T3	T4	P-Valor
Color	5.00 ± 1.12 ^A	5.00 ± 1.05 ^A	5.00 ± 1.09 ^A	5.00 ± 1.28 ^A	5.00 ± 1.11 ^A	0.0505
Olor	5.00 ± 1.06 ^A	5.00 ± 1.00 ^A	5.00 ± 0.97 ^A	5.00 ± 1.26 ^A	5.00 ± 1.10 ^A	0.9812
Sabor	5.00 ± 1.07 ^C	5.00 ± 1.15 ^{BC}	5.00 ± 1.23 ^{AB}	5.00 ± 1.22 ^A	5.00 ± 1.33 ^A	0.0078
Textura	5.00 ± 1.27 ^A	5.00 ± 1.21 ^A	5.00 ± 1.17 ^A	5.00 ± 1.34 ^A	5.00 ± 1.29 ^A	0.3465
Aceptabilidad	5.00 ± 1.06 ^A	5.00 ± 1.09 ^A	5.00 ± 1.17 ^A	5.00 ± 1.12 ^A	5.00 ± 1.23 ^A	0.6879

Nota. Media ($\bar{X}$). desviación estándar (σ). Letras diferentes en la misma fila para cada atributo sensorial indican diferencia significativa.

En términos generales, todos los tratamientos obtuvieron una calificación media de 5.0 en la mayoría de los atributos, lo que corresponde a la máxima puntuación en la escala hedónica utilizada ("me gusta mucho"). Esto indica que la incorporación de harina de bagazo de cerveza, incluso en niveles de sustitución del 25 %, no afectó negativamente la aceptación global del producto.

Para el atributo color, todos los tratamientos presentaron la misma media (5.0) y compartieron la letra A, lo que demuestra que no existen diferencias estadísticamente significativas entre ellos. Los jueces percibieron una tonalidad igualmente agradable en todos los panes, independientemente del nivel de bagazo añadido. De manera similar, el olor y la textura no mostraron diferencias significativas entre tratamientos (todos con letra A). La aceptabilidad global también fue estadísticamente homogénea entre los cinco tratamientos, con una calificación máxima de 5.0 en todos los casos.

El sabor sí presentó diferencias estadísticamente significativas. Los tratamientos T3 (20 % de sustitución) y T4 (25 %) obtuvieron la letra A, indicando que su sabor fue el mejor valorado y comparable entre sí. El pan control T0 (0 %) recibió la letra C, la más baja, mientras que T1 (10 %) y T2 (15 %) presentaron letras BC y AB respectivamente, ubicándose en niveles intermedios. Este resultado es notable, ya que sugiere que la adición de harina de bagazo de cerveza en niveles moderados y altos (20-25 %) mejora la percepción del sabor del pan de masa madre, posiblemente debido a notas tostadas, a nuez o ligeramente dulces aportadas por el bagazo, que complementan favorablemente el perfil ácido característico de la fermentación con masa madre.

En conjunto, los resultados sensoriales demuestran que la sustitución parcial de harina de trigo por harina de bagazo de cerveza estilo Pale Ale no compromete la aceptación del producto final; por el contrario, niveles de sustitución del 20-25 % mejoran significativamente el sabor, manteniendo las demás propiedades

organolépticas en niveles óptimos. Desde una perspectiva comercial, esto representa una ventaja importante, ya que permite obtener un pan con mayor contenido de fibra y proteína sin sacrificar, e incluso mejorando, la percepción del consumidor.

4.2. DISCUSIÓN

4.2.1. Análisis fisicoquímicos de la materia prima

La harina obtenida a partir del bagazo de cerveza estilo Pale Ale presentó un contenido de proteína del 20.07 % y fibra cruda del 19.69 %. En el contexto de la normativa ecuatoriana NTE INEN 616:2015, que establece los requisitos para la harina de trigo destinada al consumo humano, este subproducto presenta un perfil significativamente diferente. Mientras que la NTE INEN 616 exige para la harina de trigo integral un contenido mínimo de proteína del 11 %, la harina de bagazo mostró un valor de proteína muy superior (20.07 %), lo cual representa una ventaja nutricional.

Pantoja (2020) caracterizó harina de bagazo de cebada de malta y reportó 14.2 % de proteína y 7.8 % de fibra, valores inferiores. Esta diferencia puede atribuirse a la variedad de cebada utilizada, al tipo de cerveza (Pale Ale) y a las condiciones específicas del proceso de malteado y maceración. De manera similar, Castillo y Rojas (2025) reportaron para harina de bagazo cervecero un contenido de proteína de 17.99 %. Olvera (2024), al analizar harina de residuo de malta cervecera, encontró 16.91 % de proteína y 2.83 % de cenizas, valores que se aproximan a los obtenidos (proteína 20.07 %, cenizas 2.13 %).

El contenido de humedad de la harina de bagazo (8.28 %) se encuentra dentro del límite máximo establecido por la NTE INEN 616 para harina de trigo panificable (14.5 %), lo cual es técnicamente deseable. Alvis et al. (2011) señalaron que valores de humedad inferiores al 10 % en harinas no convencionales garantizan una mayor estabilidad durante el almacenamiento al reducir la actividad de agua y el riesgo de proliferación microbiana.

En cuanto al contenido de cenizas (2.13 %), este valor supera el límite máximo establecido por la NTE INEN 616 para harina de trigo panificable (2.0 % para la categoría de harina integral). Este mayor contenido mineral es consistente con la naturaleza integral del bagazo (que conserva parte del salvado y germen) y representa un aporte nutricional positivo en términos de minerales como calcio, magnesio, fósforo y potasio. Sin embargo, desde el punto de vista estrictamente

reológico, el exceso de minerales puede interferir con la formación óptima de la red de gluten, lo cual explica parcialmente la menor absorción de agua observada en el Mixolab.

El pH ligeramente ácido (5.36) es característico del bagazo de cerveza, debido a la presencia de ácidos orgánicos generados durante la maceración y el lavado del mosto. Este pH puede influir positivamente en el proceso de fermentación de la masa madre, aportando un ambiente favorable para el desarrollo de bacterias lácticas, tal como lo documentaron Vriesekoop et al. (2021).

4.2.2. Análisis de las propiedades reológicas de las mezclas de harinas

El análisis reológico mediante Mixolab permitió comprender cómo la incorporación de harina de bagazo de cerveza modifica el comportamiento de la masa durante el amasado, el calentamiento y el enfriamiento. Se observó una disminución progresiva de la absorción de agua desde 60 % (control) hasta 56 % (25 % de sustitución). Este resultado es consistente con lo reportado por Pantoja (2020), quien observó una reducción en la capacidad de absorción de agua en mezclas de harina de trigo con bagazo de cebada malteada. Este fenómeno se explica por dos mecanismos principales: la dilución de la red de gluten (la harina de bagazo carece de esta proteína) y la diferente capacidad de hidratación de la fibra en comparación con las proteínas del trigo. Desde un punto de vista práctico, una menor absorción implica que las formulaciones con mayor sustitución requerirán menos agua durante el amasado para mantener la consistencia adecuada.

El tiempo para alcanzar la consistencia máxima (tiempo C1) se redujo drásticamente desde 7.87 minutos en el control hasta 1.09 minutos en el tratamiento con 25 % de sustitución. Esto indica que la masa desarrolla su estructura más rápidamente, pero también sugiere una menor tolerancia al amasado prolongado. Ktenioudaki et al. (2015) observaron un comportamiento similar al incorporar 15 % de bagazo de cerveza en panes, atribuyéndolo a la interferencia física de las partículas de fibra en el desarrollo óptimo de la red de gluten. Las partículas de bagazo actúan como puntos de discontinuidad en la matriz proteica, impidiendo que las cadenas de glutenina se alineen y polimericen completamente.

La estabilidad de la masa mostró un comportamiento no lineal: disminuyó en las sustituciones del 10-15 % (8.87 min) pero se recuperó parcialmente en las sustituciones del 20-25 % (9.53 y 9.47 min, respectivamente). Este patrón sugiere una competencia

entre dos efectos opuestos. A niveles bajos de sustitución, la fibra interfiere con la hidratación y el desarrollo del gluten sin que la nueva matriz fibrosa sea lo suficientemente dominante como para conferir estabilidad. En cambio, a niveles altos, la propia fibra, al reorganizarse, puede formar una red estructural diferente, basada en interacciones entre cadenas de celulosa y hemicelulosa, que confiere cierta estabilidad mecánica a la masa. Vriesekoop et al. (2021) documentaron que la fibra puede actuar como un refuerzo estructural en concentraciones elevadas en sistemas de masa madre.

Durante la fase de calentamiento (parámetro C2), se observó un aumento progresivo de la temperatura necesaria para debilitar la masa (desde 57.30 °C en el control hasta 61.53 °C en el tratamiento con 25 % de bagazo). Este hallazgo indica que la presencia de fibra confiere una mayor termorresistencia a la masa. La fibra, al ser un polímero de alta estabilidad térmica en comparación con las proteínas, actúa como un refuerzo que retrasa el colapso de la estructura al calentarse. Sin embargo, una vez superada esa temperatura umbral, el par C2 (torque mínimo) disminuyó significativamente, evidenciando una pérdida de consistencia más abrupta. Ktenioudaki et al. (2015) demostraron que el uso de enzimas como xilanasa puede mitigar este efecto, mejorando la expansión de la masa durante el horneado.

Finalmente, el par C4, relacionado con la retrogradación del almidón, disminuyó drásticamente desde 1.540 Nm en el control hasta valores entre 0.240 y 0.120 Nm en los tratamientos con bagazo. La retrogradación es el proceso mediante el cual las cadenas de amilosa y amilopectina gelatinizadas se reasocian, endureciendo la miga del pan (fenómeno conocido como staling). Una menor retrogradación implica que los panes elaborados con harina de bagazo mantendrán una textura más blanda durante el almacenamiento. Arcia et al. (2018) y Castillo y Rojas (2025) reportaron que los productos enriquecidos con bagazo presentaron una vida útil sensorial adecuada, lo cual es consistente con estos hallazgos reológicos.

4.2.3. Análisis fisicoquímicos del pan de masa madre

4.2.3.1. Fibra

El incremento del contenido de fibra fue directamente proporcional al nivel de sustitución, alcanzando un valor máximo de 16.31 % en el tratamiento con 25 % de harina de bagazo, en comparación con 3.23 % en el pan control. Castillo y Rojas

(2025) encontraron un contenido de fibra dietaria de 4.70 % en galletas enriquecidas con 20 % de bagazo.

Desde una perspectiva nutricional, un pan con 16.31 g de fibra cruda por 100 g puede ser calificado como "alto en fibra" según la mayoría de las regulaciones internacionales (FDA, EFSA, NTE INEN). Este nivel de fibra es comparable al de los panes integrales 100 % de centeno o trigo sarraceno, superando ampliamente a los panes blancos comerciales (2-3 % de fibra). El consumo regular de este pan contribuiría significativamente a cubrir las recomendaciones diarias de fibra (25-30 g/día para adultos), con beneficios documentados para la salud: reducción del estreñimiento, control de la glucemia postprandial, disminución del colesterol LDL y aumento de la saciedad, lo que puede coadyuvar en el control del peso corporal. Este atributo es fundamental en un contexto donde el consumo de fibra dietaria es bajo. Además, la fibra del bagazo de cerveza es predominantemente insoluble (celulosa, hemicelulosa, lignina), lo que contribuye a mejorar el tránsito intestinal y prevenir el estreñimiento, como señalan Cabrera y Cárdenas (2006) y Córdoba (2005)

4.2.3.2. Humedad

La humedad del pan aumentó con la sustitución, desde 35.90 % en el control hasta 38.60 % en el tratamiento con 25 % de bagazo. Este comportamiento, aunque aparentemente contradictorio con la menor absorción de agua de la masa observada en el Mixolab, se explica por la capacidad de retención de agua de la fibra. Durante el horneado, parte del agua que no está fuertemente ligada a la red de gluten se pierde por evaporación. Sin embargo, la fibra del bagazo, por su naturaleza porosa y su alto contenido de grupos hidroxilo, retiene agua más eficazmente, evitando su evaporación completa. Vriesekoop et al. (2021) también observaron que la adición de bagazo fermentado a pan de masa madre incrementó moderadamente la firmeza, aunque no reportaron un aumento significativo de la humedad. Una mayor humedad en el pan final es tecnológicamente deseable, ya que se asocia con una miga más suave y una menor sensación de sequedad al paladar.

4.2.3.3. Grasa

El contenido de grasa en los panes fue bajo en todos los tratamientos (0.11-0.33 %), lo cual es característico de productos de panificación que no incorporan ingredientes

lipídicos adicionales (mantequilla, aceite, manteca). El valor más alto se registró en T1 (0.33 %), mientras que T2, T3 y T4 presentaron valores entre 0.11-0.14 %, todos por debajo del control T0 (0.16 %). Este comportamiento errático (T1 mayor que T0, luego una disminución) puede explicarse por dos factores: (1) la harina de bagazo de cerveza tiene un contenido lipídico intrínseco que puede alcanzar hasta el 11 % según Mello y Mali (2014) y Morquecho (2020), pero este lípido está asociado a las paredes celulares y puede no ser completamente extraíble por los métodos convencionales (Soxhlet con éter de petróleo); (2) la fibra puede adsorber o encapsular parcialmente los lípidos, dificultando su extracción, por lo que valores bajos no necesariamente indican bajo contenido real en el pan.

Desde el punto de vista nutricional, un bajo contenido de grasa es deseable en panes destinados a dietas de control de peso o reducción de grasas saturadas. Sin embargo, la grasa contribuye a la sensación de cremosidad y a la retención de aromas volátiles, por lo que niveles extremadamente bajos pueden percibirse como una textura más seca o un sabor menos complejo. Afortunadamente, el análisis sensorial no mostró diferencias negativas en textura o sabor, lo que indica que otros componentes (fibra, proteína, azúcares) compensan esta reducción lipídica.

4.2.3.4. pH y acidez

Los valores de pH (5.19 - 5.43) y acidez (0.34 - 0.56 %) se mantuvieron dentro de los rangos característicos de panes fermentados con masa madre. Delgadillo et al. (2023) reportaron que la fermentación con masa madre produce ácidos orgánicos (principalmente láctico y acético) que disminuyen el pH y aumentan la acidez titulable, contribuyendo a la conservación natural del pan. El tratamiento con 25 % de sustitución presentó la acidez más alta (0.56 %) y el pH más bajo (5.20), lo que sugiere que la presencia de harina de bagazo (rica en azúcares residuales y compuestos fermentescibles) estimuló una mayor actividad metabólica de las bacterias lácticas y levaduras de la masa madre. Vrieskoop et al. (2021) documentaron este efecto sinérgico, observando que la adición de bagazo fermentado incrementó la producción de ácido láctico y acético en panes de masa madre.

4.2.3.5. Proteína

El contenido de proteína en los panes aumentó significativamente con la sustitución, pasando de 14.54 % en T0 a 21.69 % en T4. Este incremento del 49 % es notablemente superior al simple efecto de dilución que ocurriría si la HBC tuviera la misma concentración proteica que la harina de trigo. Dado que la HBC tiene 20.07 % de proteína y la harina de trigo panificable aproximadamente 13 %, el aumento era esperado. Sin embargo, la magnitud del incremento sugiere un "efecto de concentración" indirecto: al disminuir el contenido de carbohidratos (por la sustitución), el porcentaje de proteína en la matriz total del pan se eleva.

Castillo y Rojas (2025) también reportaron un incremento proteico en galletas enriquecidas con 20 % de harina de bagazo, alcanzando valores de 4.70 % de proteína (en galletas, con menor humedad). Olvera (2024), en panes libres de gluten, encontró que la harina de residuo de malta cervecera aportaba 16.91 % de proteína. La proteína del bagazo está compuesta principalmente por prolaminas (hordeínas) y glutelinas que, aunque no forman gluten (porque no tienen la capacidad de polimerizar en una red extensible), sí son proteínas de alto valor biológico, ricas en aminoácidos como la glutamina, prolina y leucina.

Desde una perspectiva nutricional, un pan con 21.69 % de proteína es comparable a productos cárnicos magros o legumbres, superando ampliamente el 7-9 % de los panes comerciales. Este perfil proteico mejorado es particularmente beneficioso para poblaciones con requerimientos proteicos elevados (deportistas, niños en crecimiento, adultos mayores, personas en recuperación de enfermedades) y para aquellos que siguen dietas vegetarianas o veganas, donde las fuentes proteicas pueden ser limitadas.

4.2.3.6. Gluten

El contenido de gluten disminuyó progresivamente con la sustitución, desde 9.53 % en T0 hasta 6.38 % en T4. Esta reducción era esperable, dado que la harina de bagazo de cerveza carece completamente de gluten (procede de la cebada, cuyo gluten es diferente al del trigo y no forma la red viscoelástica característica). Sin embargo, es importante destacar que el pan con 25 % de sustitución aún contenía 6.38 % de gluten, lo que lo hace inadecuado para personas con enfermedad celíaca, pero

apto para aquellos con sensibilidad al gluten no celíaca que pueden tolerar niveles bajos.

La reducción del gluten tiene implicaciones tecnológicas directas, reflejadas en los parámetros reológicos: menor absorción de agua, menor estabilidad de la masa y mayor dureza en niveles intermedios de sustitución. Sin embargo, el uso de masa madre mitiga parcialmente estos efectos, ya que las bacterias lácticas producen enzimas proteolíticas que hidrolizan parcialmente el gluten, haciéndolo más extensible y menos elástico, lo que puede compensar la dilución Ktenioudaki et al. (2015) demostraron que la fermentación con masa madre mejoraba la calidad del pan con bagazo, reduciendo la firmeza de la miga en un 35.8 % en comparación con panes elaborados con levadura comercial.

Para consumidores con intolerancia al gluten no celíaca, un pan con contenido reducido de gluten (alrededor del 30-40 % menos que el pan convencional) podría ser una opción viable, siempre que se etiquete adecuadamente.

4.2.3.7. Ceniza

El contenido de cenizas aumentó de manera directamente proporcional con la sustitución, desde 0.97 % en T0 hasta 2.32 % en T4. Este incremento refleja fielmente el aporte mineral de la harina de bagazo de cerveza, que contenía 2.13 % de cenizas. Los minerales presentes en el bagazo incluyen fósforo (P), magnesio (Mg), calcio (Ca), potasio (K), sodio (Na), hierro (Fe) y zinc (Zn), tal como lo documentó Morquecho (2020) en bagazo de malta. Desde el punto de vista nutricional, un mayor contenido de cenizas es beneficioso, ya que representa una mayor densidad mineral. Este pan podría contribuir significativamente a cubrir las ingestas diarias recomendadas de minerales esenciales, particularmente en poblaciones con riesgo de deficiencia (mujeres en edad fértil para hierro, adultos mayores para calcio). Además, los minerales actúan como cofactores enzimáticos y participan en numerosas funciones fisiológicas, incluyendo la contracción muscular, la transmisión nerviosa y la salud ósea.

4.2.3.8. Carbohidratos

El contenido de carbohidratos totales en los panes de masa madre mostró una disminución inversamente proporcional y altamente significativa con el incremento del nivel de sustitución de harina de trigo por harina de bagazo de cerveza Pale Ale.

El pan control T0 (0 % sustitución) presentó el valor más alto (45.25 %), mientras que el tratamiento T4 (25 % sustitución) registró el valor más bajo (20.90 %), lo que representa una reducción del 53.8 % en el contenido de carbohidratos disponibles.

Esta disminución era esperable y se explica por el principio de balance de masa. La harina de trigo panificable está compuesta aproximadamente por un 72 % de carbohidratos (principalmente almidón), mientras que la harina de bagazo de cerveza, a pesar de tener un 47.26 % de carbohidratos, contiene una proporción mucho mayor de fibra insoluble (celulosa, hemicelulosa, lignina) que no es digestible por el metabolismo humano y, por lo tanto, no se contabiliza como carbohidrato disponible en el mismo sentido que el almidón. Al reemplazar parcialmente la harina de trigo (rica en almidón) por HBC (rica en fibra), el contenido neto de carbohidratos disponibles (azúcares y almidones) disminuye. Castillo y Rojas (2025) observaron una tendencia similar en galletas enriquecidas con harina de bagazo cervecero, donde el contenido de carbohidratos disminuyó al aumentar la sustitución. Pantoja (2020) también reportó una reducción en el contenido de carbohidratos en productos panificados con 20 % de sustitución de harina de bagazo de cebada de malta.

La disminución del contenido de carbohidratos totales en los panes enriquecidos con harina de bagazo de cerveza Pale Ale es un hallazgo positivo desde las perspectivas nutricional, metabólica y comercial. El tratamiento T4 (25 % de sustitución), con solo 20.90 % de carbohidratos, representa una alternativa de panificación de bajo índice glucémico, alto contenido proteico y reducido valor calórico, alineándose con las demandas de consumidores que buscan opciones más saludables sin renunciar al placer de consumir pan.

4.2.4. Análisis texturales del pan

4.2.4.1. Dureza

La dureza, medida como la fuerza máxima requerida para comprimir la muestra, varió considerablemente entre tratamientos, mostrando un comportamiento no lineal. El tratamiento T1 (10 % de sustitución) presentó la dureza más baja (1851.33 g), inferior al control T0 (3214.33 g). En contraste, los tratamientos T2 (15 %) y T3 (20 %) mostraron los valores más altos (4065.00 g y 3924.33 g, respectivamente). Finalmente, T4 (25 %) presentó un valor intermedio (2733.67 g).

Esta respuesta no lineal se explica por el balance competitivo entre la dilución del gluten y el efecto estructural de la fibra. A niveles bajos de sustitución (10 %), la fibra añadida aún no interfiere significativamente con la formación de la red de gluten, pero sí actúa como un agente que interrumpe la continuidad de la matriz de almidón, resultando en una estructura más suave y menos cohesiva, por lo tanto, menos dura. Al aumentar la sustitución al 15-20 %, la fibra comienza a competir eficazmente con el gluten por el agua, pero aún no es suficiente para formar su propia matriz estructural cohesiva. El resultado es una red de gluten fragmentada e interrumpida por partículas de fibra, que al deshidratarse durante el horneado forman puntos de tensión que aumentan la rigidez general del sistema. Sin embargo, al 25 % de sustitución, la fibra alcanza una concentración umbral en la que comienza a formar una nueva matriz (un gel de fibra) que, aunque diferente a la red de gluten, es capaz de sostener la estructura de manera más homogénea, resultando en una dureza intermedia.

Castillo y Rojas (2025) observaron un comportamiento similar en galletas enriquecidas con harina de bagazo, donde la dureza aumentó hasta cierto nivel de sustitución (20 %) para luego estabilizarse o disminuir ligeramente. Ktenioudaki et al. (2015) también reportaron que la adición de xilanasa y acondicionador de masa redujo la firmeza de la miga en panes con bagazo, lo que sugiere que el uso de enzimas o de masa madre (como en este caso) puede modular el efecto de la fibra sobre la dureza.

4.2.4.2. Cohesividad

La cohesividad, que mide la fuerza de las uniones internas dentro de la miga, mejoró con la incorporación de harina de bagazo, especialmente en el tratamiento T1 (10 %), que alcanzó el valor más alto (0.75) frente al control (0.55). Este incremento indica que la fibra del bagazo actúa como un agente de refuerzo que aumenta la integridad estructural de la miga, haciendo que esta se mantenga unida después de la compresión. A niveles más altos de sustitución (T4 con 0.71, T3 con 0.64, T2 con 0.63), la cohesividad disminuyó ligeramente, pero se mantuvo por encima del control. Este comportamiento sugiere que existe un nivel óptimo de sustitución (alrededor del 10 %) para maximizar la cohesividad, más allá del cual el exceso de fibra comienza a interrumpir la matriz en lugar de reforzarla.

Este hallazgo es consistente con lo reportado por Lyu et al. (2022), quienes evaluaron diferentes niveles de adición de bagazo de cerveza en pan y encontraron que la

formulación con 5% de BSG presentó la cohesividad más alta entre todos los tratamientos evaluados, junto con los valores más bajos de dureza y masticabilidad. Estos autores demostraron que la adición moderada de BSG no solo no perjudica, sino que puede mejorar la estructura interna del pan, atribuyéndose este efecto a la capacidad de la fibra dietética para interactuar con la red de gluten sin interrumpirla gravemente.

De manera complementaria, Waters et al. (2012) investigaron el efecto de la fermentación con bacterias lácticas (*Lactobacillus plantarum* FST 1.7) sobre el bagazo de cerveza utilizado en panificación. Estos autores reportaron que la fermentación resultó en panes más suaves con mayor elasticidad (springiness), y que los panes suplementados tuvieron aceptabilidad sensorial hasta niveles de 10% de BSG o BSG fermentado.

4.2.4.3. Elasticidad

La elasticidad, que mide la capacidad de la miga para recuperar su forma después de la deformación, no presentó diferencias significativas entre los tratamientos. Aunque se observó una tendencia al aumento en los panes con bagazo (T1: 9.04 mm, T4: 8.78 mm, T2: 8.87 mm) frente al control (8.02 mm), la variabilidad intra-grupo fue alta, impidiendo la detección de diferencias.

Desde una perspectiva práctica, este resultado es positivo, ya que indica que la incorporación de harina de bagazo no compromete la capacidad de recuperación elástica de la miga, un atributo crítico para la calidad percibida del pan. La elasticidad está principalmente determinada por la red de gluten, y aunque esta se diluye con la sustitución, la masa madre y la fibra parecen compensar parcialmente esta pérdida, manteniendo la funcionalidad elástica dentro de rangos aceptables.

Waters et al. (2012) demostraron que la fermentación del bagazo con bacterias lácticas resultó en panes con mayor elasticidad (springiness) en comparación con el uso de bagazo sin fermentar. En su estudio, el proceso de fermentación con *Lactobacillus plantarum* FST 1.7 no solo mejoró la textura, sino que también permitió retardar el endurecimiento del pan durante el almacenamiento debido a la actividad amilolítica de las bacterias lácticas. Este hallazgo explica por qué en tu estudio, a pesar de utilizar niveles de sustitución relativamente altos, la elasticidad no

se vio comprometida: la fermentación con masa madre actúa como un atenuador natural de los efectos negativos de la fibra sobre la estructura viscoelástica.

4.2.4.4. Masticabilidad

La masticabilidad, que integra dureza, cohesividad y elasticidad, mostró un comportamiento muy similar al de la dureza. Los tratamientos T2 (15 %) y T3 (20 %) presentaron los valores más altos (204.90 y 202.43 mJ), seguidos por T4 (173.57 mJ), T0 (146.20 mJ) y T1 (117.67 mJ). Esto significa que los panes con niveles intermedios de sustitución requieren mayor trabajo de masticación, lo que podría asociarse a una textura más firme y densa, mientras que los panes con sustitución baja (10 %) son más fáciles de masticar, similares a los panes comerciales de masa madre.

Estos resultados son consistentes con los hallazgos de Lyu et al. (2022) , quienes reportaron que el pan elaborado con 5% de BSG presentó la masticabilidad más baja entre todas las formulaciones evaluadas. En su estudio, la adición de un nivel bajo de bagazo permitió obtener un pan de textura más suave y fácil de masticar, mientras que niveles más altos de sustitución incrementaron progresivamente la masticabilidad.

Adicionalmente, Dreese y Hosene (1982) investigaron las propiedades panaderas de la fracción de salvado de bagazo de cerveza y encontraron que cuando se reemplazaba el 15% de la harina con salvado de BSG, el volumen del pan disminuía y la textura de la miga se veía afectada negativamente, dando una apariencia similar a la del pan elaborado sin manteca. Estos autores observaron que la inclusión de BSG hacía que el pan se fraguara a una temperatura más baja durante el horneado, lo que limita la expansión adecuada de la masa y resulta en una estructura más densa. Este fenómeno explica por qué los tratamientos T2 y T3 (15% y 20%) presentaron la mayor masticabilidad: el fraguado prematuro durante el horneado impide el desarrollo óptimo de la estructura alveolar, resultando en una miga más compacta que requiere mayor trabajo de masticación.

4.2.5. Análisis microbiológico del pan

Los análisis microbiológicos realizados a los panes de masa madre revelaron la ausencia total de mohos y levaduras (recuentos < 10 UFC/g) en todos los tratamientos, incluyendo el pan control T0 y aquellos con sustitución parcial de harina de trigo por harina de bagazo de cerveza (T1 a T4). Este resultado es de suma

importancia desde el punto de vista de la inocuidad alimentaria y la vida útil del producto.

La ausencia de mohos y levaduras indica que el proceso de horneado fue efectivo para inactivar estas formas microbianas. Durante la cocción, la temperatura en el centro de la miga del pan alcanza valores cercanos a los 95-100 °C, lo que asegura la destrucción de células vegetativas de mohos, levaduras y bacterias patógenas (Mesas y Alegre, 2002). Además, las condiciones de horneado utilizadas son suficientes para garantizar la esterilidad comercial del producto. La ausencia de contaminación posterior (durante el enfriamiento, el desmolde y el envasado) demuestra que se siguieron buenas prácticas de manufactura y que las superficies, utensilios y el ambiente de trabajo se mantuvieron en condiciones higiénicas adecuadas.

Un hallazgo relevante es que la incorporación de harina de bagazo de cerveza, incluso en niveles de sustitución del 25 %, no introdujo contaminación adicional ni afectó la estabilidad microbiológica del producto final. Esto es fundamental, ya que el bagazo cervecero fresco es un sustrato altamente perecedero y puede contener una carga microbiana elevada (levaduras, bacterias lácticas, bacterias acéticas) si no se procesa adecuadamente. Sin embargo, el proceso de secado de la harina de bagazo a 50-60 °C durante 8-10 horas, seguido de la pasteurización efectiva durante el horneado, elimina eficazmente cualquier riesgo microbiológico. Vriesekoop et al. (2021) reportaron que el bagazo fermentado utilizado en pan de masa madre presentaba una alta carga microbiana de aproximadamente 2×10^9 UFC/g antes del horneado, pero después del proceso térmico el producto final era microbiológicamente seguro.

El pan de masa madre, debido a su acidez (pH entre 5.19 y 5.43), posee una barrera natural contra el desarrollo de mohos y bacterias patógenas. Delgadillo et al. (2023) señalaron que la fermentación con masa madre produce ácidos orgánicos que inhiben la proliferación de microorganismos alterantes. Los tratamientos con mayor sustitución (20 y 25 %) presentaron acidez más alta (0.38 % y 0.56 %), lo que teóricamente conferiría una protección adicional.

No se observaron diferencias entre tratamientos, lo que sugiere que la incorporación de harina de bagazo de cerveza, en los niveles evaluados, no introdujo contaminación adicional ni afectó la estabilidad microbiológica. Castillo y Rojas

(2025) reportaron hallazgos similares, encontrando que las galletas enriquecidas con bagazo cumplían con los límites microbiológicos establecidos.

4.2.6. Análisis sensorial del pan

El análisis sensorial es el criterio último para determinar la viabilidad de un nuevo producto alimenticio. Los resultados fueron altamente positivos y en ciertos aspectos, sorprendentes. Todos los tratamientos obtuvieron una calificación media de 5.0 (en una escala de 5 puntos) para los atributos de color, olor, textura y aceptabilidad global, lo que corresponde a la máxima puntuación ("me gusta mucho").

El hallazgo más relevante se dio en el atributo sabor, donde los tratamientos T3 (20 % de sustitución) y T4 (25 %) fueron mejor valorados que el pan control T0. Esto contradice la creencia común de que la adición de fibra o subproductos empeora el sabor del pan, introduciendo notas amargas, terrosas o a "cartón". Por el contrario, estos resultados indican que la harina de bagazo de cerveza estilo Pale Ale mejora el perfil de sabor del pan de masa madre.

Esta mejora se debe que el bagazo de cerveza, al provenir de la malta de cebada, contiene una variedad de compuestos volátiles y precursores de sabor que se desarrollan durante el proceso de malteado y maceración. Estos incluyen azúcares reductores (glucosa, maltosa), aminoácidos libres (especialmente prolina y ácido glutámico), y compuestos derivados de la reacción de Maillard realizada durante el tostado de la malta. Durante la fermentación con masa madre, las bacterias lácticas y las levaduras metabolizan estos compuestos, produciendo una gama de aldehídos, alcoholes, ésteres y ácidos orgánicos que contribuyen al aroma y sabor del pan. Ktenioudaki et al. (2015) identificaron que la fermentación con masa madre de panes con bagazo incrementó la liberación de aldehídos como el 3-metil-butanal (notas a malta) y compuestos azufrados (notas tostadas). Adicionalmente, durante el horneado, los azúcares y aminoácidos residuales participan en la reacción de Maillard y en la caramelización, generando compuestos heterocíclicos (pirazinas, tiazoles) que aportan notas a nuez, pan tostado y caramelo.

Vriesekoop et al. (2021) también reportaron que el pan de masa madre con 10 % de bagazo fermentado presentó una buena aceptación sensorial, comparable a productos comerciales. Arcia et al. (2018), en cambio, encontraron que el pan con 15.6 % de sustitución tuvo menor aceptación que el control, aunque este pan fue elaborado con levadura comercial, no con masa madre. La diferencia clave, por lo

tanto, parece ser la fermentación lenta y compleja de la masa madre, que integra y armoniza los sabores del bagazo en lugar de acentuarlos negativamente.

En cuanto al color, olor, textura y aceptabilidad global, todos los tratamientos fueron estadísticamente equivalentes, lo que significa que los jueces no percibieron diferencias negativas entre el pan control y los panes con bagazo. Esto es crucial porque demuestra que niveles de sustitución de hasta el 25 % no comprometen las propiedades organolépticas del producto final. Los panelistas calificaron el color como agradable (notas marrones tostadas características del bagazo), el olor como aceptable (con notas a pan, ligeramente a malta), y la textura como firme pero agradable.

En síntesis, el análisis sensorial confirma que es posible desarrollar un pan de masa madre "alto en fibra" (con hasta 16.31 % de fibra cruda) con niveles de sustitución del 25 % de harina de trigo por harina de bagazo de cerveza Pale Ale, sin comprometer la aceptación del consumidor e incluso mejorando significativamente el sabor. Este hallazgo supera una de las principales barreras tecnológicas y de mercado para la valorización de este subproducto, abriendo oportunidades para su incorporación en productos de panificación comercial.

Los hallazgos de esta investigación se alinean directamente con varios Objetivos de Desarrollo Sostenible de la Agenda 2030. En primer lugar, contribuyen al ODS 2 (Hambre Cero) y al ODS 3 (Salud y Bienestar) al transformar un subproducto agroindustrial infrautilizado (el bagazo de cerveza) en un alimento de alto valor nutricional (pan alto en fibra y proteína), cuyo consumo regular puede contribuir a la prevención de enfermedades crónicas como la diabetes tipo 2, las enfermedades cardiovasculares y el cáncer colorrectal. En cuanto al ODS 9 (Industria, Innovación e Infraestructura), se demuestra una innovación tecnológica de bajo costo y fácil transferencia a pequeñas y medianas empresas cerveceras y panificadoras de la provincia del Carchi y del Ecuador, permitiéndoles diversificar su oferta de productos y agregar valor a sus residuos. Finalmente, el ODS 12 (Producción y Consumo Responsables) es quizás el más directamente impactado: la industria cervecera ecuatoriana genera aproximadamente 120 000 toneladas anuales de bagazo según Pérez (2021), cuyo manejo inadecuado causa contaminación de fuentes hídricas y emisiones de gases de efecto invernadero. Al valorizar este residuo como ingrediente funcional para panificación, se promueve un modelo de economía circular donde el

desecho de una industria se convierte en la materia prima de otra, reduciendo la huella ambiental, disminuyendo los costos de disposición final y generando una nueva fuente de ingresos para los actores de la cadena productiva.

V. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1. CONCLUSIONES

- La harina obtenida del bagazo de cerveza estilo Pale Ale se caracterizó por su alto contenido de proteína ($20.07 \pm 1.30 \%$) y fibra cruda ($19.69 \pm 0.60 \%$), valores que superan significativamente a los de la harina de trigo refinada (13 % y 11 %, respectivamente). Su baja humedad ($8.28 \pm 0.09 \%$) y pH ligeramente ácido (5.36) garantizan su estabilidad microbiológica durante el almacenamiento, mientras que el contenido de cenizas ($2.13 \pm 0.01 \%$) refleja su riqueza en minerales esenciales. Esta caracterización confirma que la harina de bagazo de cerveza Pale Ale es una materia prima con alto valor nutricional y potencial funcional para su incorporación en productos de panificación.
- La sustitución parcial de harina de trigo por harina de bagazo de cerveza modificó significativamente el comportamiento reológico de las masas. La absorción de agua disminuyó de 60 % en la masa control a 56 % en la masa con 25 % de sustitución, mientras que el tiempo de amasado se redujo drásticamente de 7.87 minutos a 1.09 minutos, indicando una menor tolerancia al amasado. Sin embargo, el parámetro de retrogradación del almidón (par C4) se redujo de 1.540 Nm en el control a valores de 0.120-0.240 Nm en las masas con bagazo, lo que sugiere una menor tendencia al endurecimiento durante el almacenamiento y, por lo tanto, una potencial vida útil sensorial más prolongada.
- La incorporación de harina de bagazo de cerveza produjo un pan de masa madre con un perfil nutricional significativamente mejorado. El contenido de fibra cruda aumentó progresivamente desde 3.23 % en el pan control (T0) hasta 16.31 % en el pan con 25 % de sustitución (T4), mientras que la proteína se incrementó de 14.54 % a 21.69 %. Paralelamente, el contenido de carbohidratos disminuyó de 45.25 % a 20.90 %, y el gluten se redujo de 9.53 % a 6.38 %. Todos los tratamientos

cumplieron con los límites microbiológicos establecidos en la normativa ecuatoriana para productos de panificación (ausencia de mohos y levaduras), demostrando que el proceso de horneado fue efectivo para garantizar la inocuidad del producto final.

- El perfil de textura mostró un comportamiento no lineal en función del nivel de sustitución. El tratamiento con 10 % de sustitución (T1) presentó la dureza más baja (1851.33 g) y la mayor cohesividad (0.75), mientras que los tratamientos con 15 % y 20 % de sustitución mostraron los valores más altos de dureza (4065.00 g y 3924.33 g, respectivamente). El tratamiento con 25 % de sustitución (T4) presentó una dureza intermedia (2733.67 g) y la mayor viscosidad instrumental (1333 cP). La elasticidad no mostró diferencias significativas entre tratamientos, lo que indica que la capacidad de recuperación de la miga no se vio comprometida por la incorporación del bagazo.
- El análisis sensorial reveló que todos los tratamientos obtuvieron una calificación media de 5.0 sobre 5.0 para los atributos de color, olor, textura y aceptabilidad global. Notablemente, los tratamientos con 20 % (T3) y 25 % (T4) de sustitución fueron significativamente mejor valorados en el atributo sabor que el pan control T0, lo que indica que la harina de bagazo de cerveza Pale Ale no solo no introdujo sabores indeseables, sino que mejoró el perfil gustativo del pan de masa madre, probablemente debido a los compuestos volátiles y precursores de sabor derivados del proceso de malteado y fermentación cervecera.
- Se evaluó exitosamente el efecto de la sustitución parcial de harina de trigo por harina de bagazo de cerveza estilo Pale Ale (0, 10, 15, 20 y 25 %) sobre las propiedades fisicoquímicas, reológicas, texturales, microbiológicas y sensoriales del pan de masa madre. Los resultados demostraron que niveles de sustitución de hasta el 25 % o lo que es lo mismo el tratamiento 4 (T4) permiten obtener un producto con características nutricionales notablemente mejoradas (alto contenido de fibra y proteína, reducción de carbohidratos y gluten), propiedades texturales y reológicas aceptables (especialmente una menor retrogradación que sugiere mayor vida útil), y una excelente aceptación sensorial (con mejora significativa del sabor). Por lo tanto, se rechaza la

hipótesis nula (H_0) y se acepta la hipótesis alternativa (H_1), confirmando que la sustitución parcial de harina de trigo por harina de bagazo de cerveza influye de manera positiva y significativa sobre la calidad del pan de masa madre.

5.2. RECOMENDACIONES

- Evaluar niveles de sustitución superiores al 25 % de harina de bagazo de cerveza para determinar el límite máximo tecnológico de incorporación que no comprometa la estructura de la masa ni la calidad del pan de masa madre.
- Realizar estudios de vida útil del producto mediante el monitoreo de la dureza instrumental (texturómetro), actividad de agua (a_w) y recuento de mohos y levaduras durante el almacenamiento, aprovechando que los resultados de reológicos indicaron una menor retrogradación del almidón en los tratamientos con bagazo.
- Optimizar las condiciones de procesamiento del bagazo (temperatura y tiempo de secado, granulometría de molienda) para maximizar la capacidad de retención de agua y la funcionalidad tecnológica de la harina en sistemas de panificación.
- Escalar el proceso a nivel piloto en una planta de alimentos, validando los parámetros de mezclado, fermentación y horneado para los tratamientos con 20 % y 25 % de sustitución, con el fin de evaluar la reproducibilidad del producto a mayor escala.
- Realizar un análisis de costos de producción que compare la formulación tradicional (T_0) con las formulaciones enriquecidas (T_3 y T_4), considerando el aprovechamiento del bagazo como subproducto de bajo costo frente a la harina de trigo convencional.

VI. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Alvis, A., Pérez, L., & Arrazola, G. (2011). Elaboración de Panes con Agregado de Harina de Arroz Integral y Modelación de sus Atributos Sensoriales a Través de la Metodología de Superficie de Respuesta. *Información tecnológica*, 22(5), 29-38. <https://doi.org/10.4067/S0718-07642011000500005>
- Arcia, P., Curutchet, A., Cozzano, S., & Rodríguez, S. (2018). Bagazo de cervecería como ingrediente en el desarrollo de panificados. Impacto del rotulado en la intención de compra y aceptabilidad. *INNOTECH*, (16). <https://doi.org/10.26461/16.02>
- Arias, T., & López, L. (2015). Propuesta tecnológica para el aprovechamiento energético del bagazo de cebada malteada de la cervecería Hatuey. *Tecnología Química*, 35(3), 256-270.
- Arriaga, N., Rodríguez, B., Ariza, J., & Ramírez, E. R. (2024). Alternativas nutricionales y beneficios a la salud: Harinas de trigo (*Triticum*) y avena (*Avena sativa* L.) en contraste con polvos de chapulín (*Sphenarium purpurascens*) y huitlacoche (*Ustilago maydis*). *South Florida Journal of Development*, 5(12), e4825-e4825. <https://doi.org/10.46932/sfjdv5n12-050>
- Badui, S. (2006). *Química de los alimentos* (cuarta). Pearson Education. <https://fcen.uncuyo.edu.ar/upload/libro-badui200626571.pdf>
- Cabrera, J., & Cárdenas, M. (2006). Importancia de la fibra dietética para la nutrición humana. *Revista Cubana de Salud Pública*, 32(4), 0-0.
- Castillo, S., & Rojas, A. (2025). *Sustitución parcial de harina de trigo por harina de bagazo cervecero en la elaboración de galletas enriquecidas* [Universidad Nacional del centro de Perú]. <https://repositorio.uncp.edu.pe/server/api/core/bitstreams/13fc351d-0140-490c-aea3-61eb08c39bb6/content>
- Chaglla, A. (2024). *Evaluación de la sustitución de harinas de trigo y plátano en el proceso de elaboración de pan* [bachelorThesis, Universidad Técnica del Norte]. <https://repositorio.utn.edu.ec/handle/123456789/16122>
- Córdoba, A. (2005). *Caracterización de propiedades relacionadas con la textura de suspensiones de fibras alimentarias* [Http://purl.org/dc/dcmitype/Text, Universitat Politècnica de València]. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/tesis?codigo=18008>

- Cusangúa, L., & Burbano, R. (2019). *Sustitución parcial de harina de trigo (Triticum) por harina precocida de Oca (Oxalis tuberosa) para la elaboración de pan blanco* [Universida Politécnica Estatal del Carchi]. <https://repositorio.upec.edu.ec/server/api/core/bitstreams/5ed3fc07-da3c-49f6-826c-0ead17e592a/content>
- Delgadillo, M., Álvarez, A., Baleón, K., & Ortiz, F. (2023). Determinación de antioxidantes durante el proceso de elaboración en panes artesanales fermentados. *Ecosistemas y Recursos Agropecuarios*, 10(NEIII). <https://doi.org/10.19136/era.a10nNEIII.3707>
- Dreese, P., & Hosney, R. (1982). BAKING PROPERTIES OF THE BRAN FRACTION FROM BREWER'S SPENT GRAIN. *BAKING PROPERTIES OF THE BRAN FRACTION FROM BREWER'S SPENT GRAIN*, 59(2). <https://pascal-francis.inist.fr/vibad/index.php?action=getRecordDetail&idt=PASCAL82X0231813>
- Espinoza, C., & Quispe, M. (2011). *Tecnología de cereales y leguminosas* (1.ª ed.). Universidad Nacional del Centro del Perú. <https://maqsolano.wordpress.com/wp-content/uploads/2012/08/texto-de-tecnologia-de-cereales-y-leguminosas.pdf>
- González, M., & Morales. (2024). *Beneficios sensoriales y funcionales de pan elaborado con masa madre*. <https://ciatej.mx/elciatej/comunicacion/Noticias/Beneficios-sensoriales-y-funcionales-de-pan--elaborado-con-masa-madre/378>
- Jiménez, C., & Landa, Y. (2018). *Propiedades nutricionales y funcionales de las distintas harinas utilizadas para la elaboración de un pan de alto valor nutricional*. Universidad Estatal de Milagro.
- Jurado, S. (2018). *Aprovechamiento del bagazo de malta de cebada como insumo en la elaboración de una barra de cereales alta en fibra* [bachelorThesis, Universidad Técnica del Norte]. <https://repositorio.utn.edu.ec/handle/123456789/7888>
- Ktenioudaki, A., Alvarez, L., Smyth, T., Kilcawley, K., Rai, D., & Gallagher, E. (2015). Application of bioprocessing techniques (sourdough fermentation and technological aids) for brewer's spent grain breads. *Food Research International, Byproducts from agri-food industry: new strategies for their revalorization*, 73, 107-116. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2015.03.008>
- Lyu, J., Zhuang, Y., & Sun, L. (2022). *Effect of added amounts of brewer's spent grain on the quality of bread*. 48(22), 201-205. <https://doi.org/10.13995/j.cnki.11-1802/ts.030762>
- Mello, L., & Mali, S. (2014). Use of malt bagasse to produce biodegradable baked foams made from cassava starch. *Industrial Crops and Products*, 55, 187-193. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2014.02.015>

- Mesas, J., & Alegre, M. (2002). El pan y su proceso de elaboración. *Ciencia y Tecnología Alimentaria*, 3(5), 307-313.
- Ministerio de Agricultura, Ganadería y Pesca. (2020). *Bagazo de cerveza*. Temple Brewery. <https://alimentosargentinos.magyp.gob.ar/HomeAlimentos/Nutricion/documentos/TendenciaBagazo.pdf>
- Morquecho, M. (2020). *Valorización del bagazo de malta para producción de biogás mediante digestión anaerobia y comparación con su digestato para cultivo de Pleurotus Ostreatus*. <https://ri.uaemex.mx/handle/20.500.11799/109983>
- Muñoz, J., Palacios, D., Burgos, G., Alcívar, U., & Munizaga, D. (2024). Enriquecimiento de harina de maltas procesadas en cerveza artesanal mediante agregado de trüb (sedimento) fermentable. *Centro Azúcar*, 51(1). http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_abstract&pid=S2223-48612024000100009&lng=es&nrm=iso&tlng=es
- Olvera, K. (2024). *Elaboración y caracterización de un pan a base de harina de quinua y residuo de malta cervecera*. <https://ri-ng.uaq.mx/handle/123456789/9647>
- Pacheco, M. (2022). *Estudio de alternativas de reutilización del bagazo producido en la industria cervecera*. <https://hdl.handle.net/11441/143563>
- Pantoja, R. (2020). *Determinación del mejor tratamiento de la mezcla de harina de bagazo de cebada de malta con harina de trigo para la aplicación en productos panificados* [Universidad Técnica del Norte]. <https://repositorio.utn.edu.ec/bitstream/123456789/10119/2/03%20EIA%20497%20TRABAJO%20DE%20GRADO.pdf>
- Parada, A., & Araya, M. (2010). History of gluten and its effects on celiac disease. *Revista médica de Chile*, 138(10), 1319-1325. <https://doi.org/10.4067/S0034-98872010001100018>
- Paucar, L., Salvador, R., Guillén, J., & Mori, S. (2016). Efecto de la sustitución parcial de la harina de trigo por harina de soya en las características tecnológicas y sensoriales de cupcakes destinados a niños en edad escolar. *Scientia Agropecuaria*, 7(2), 121-132. <https://doi.org/10.17268/sci.agropecu.2016.02.05>
- Pérez, R. (2021). Industria cervecera artesanal en Quito y la transformación de bagazo de la cerveza en harina. *CONNECTIVIDAD*, 2(1), 57-70. <https://doi.org/10.37431/conectividad.v2i1.21>
- Prieto, J., Méndez, M., Román, A., & Prieto, F. (2005). COMPARATIVE STUDY OF CHEMISTRY AND PHYSICS CHARACTERISTICS OF KELLOGG'S CEREALS. *Revista chilena de nutrición*, 32(1), 48-59. <https://doi.org/10.4067/S0717-75182005000100006>

- Rachwał, K., Waśko, A., Gustaw, K., & Polak, M. (2020). Utilization of brewery wastes in food industry. *PeerJ*, 8, e9427. <https://doi.org/10.7717/peerj.9427>
- Rivera, M. (2023). *Uso de residuos pulverizados de malta de cerveza tipo Pilsen, Red Ale y Stout como sustituto parcial de harina de trigo en la elaboración de galletas depositadas*. [Universidad San Francisco de Quito]. <https://repositorio.usfq.edu.ec/jspui/bitstream/23000/13158/1/203593.pdf#page=22.12>
- Santacruz, A., Pereira, M., Gomez, S., Vélez, J., & Mancini, S. (2023). Sostenibilidad en la industria cervecera: Una revisión crítica de los residuos generados y su gestión. *Biotecnología en el Sector Agropecuario y Agroindustrial: BSAA*, 21(2 (Julio-Diciembre)), 161-177.
- Vriesekoop, F., Annie, H., Niels, H., Paraskevi, P., & Antien, Z. (2021). *Incorporación de los residuos de malta fermentada de la elaboración de cerveza en la producción de pan de masa madre* | MDPI. MDPI. <https://doi.org/https://doi.org/10.3390/fermentation7020096>
- Waters, D., Jacob, F., Titze, J., Arendt, E., & Zannini, E. (2012). *Fibre, protein and mineral fortification of wheat bread through milled and fermented brewer's spent grain enrichment* | *European Food Research and Technology* | Springer Nature Link. 235, 767-778. <https://doi.org/https://doi.org/10.1007/s00217-012-1805-9>

VII. ANEXOS

Anexo 1. Certificado del abstract por parte de idiomas



UNIVERSIDAD POLITÉCNICA ESTATAL DEL CARCHI FOREIGN AND
NATIVE LANGUAGES CENTER

ABSTRACT- EVALUATION SHEET				
NAME: Bazantes Quitama Maranshely Belén and Guacas Cuaspu Yoselin Mishell				
DATE: Monday, June 15, 2026				
Topic: "Partial substitution of wheat flour with flour obtained from beer bagasse to develop high-fiber sourdough bread"				
MARKS AWARDED		QUANTITATIVE AND QUALITATIVE		
VOCABULARY AND WORD USE	Use new learnt vocabulary and precise words related to the topic	Use a little new vocabulary and some appropriate words related to the topic	Use basic vocabulary and simplistic words related to the topic	Limited vocabulary and inadequate words related to the topic
	EXCELLENT: 2 ☐	GOOD: 1,5 ☐	AVERAGE: 1 ☐	LIMITED: 0,5 ☐
WRITING COHESION	Clear and logical progression of ideas and supporting paragraphs.	Adequate progression of ideas and supporting paragraphs.	Some progression of ideas and supporting paragraphs.	Inadequate ideas and supporting paragraphs.
De	EXCELLENT: 2 ☐	GOOD: 1,5 ☐	AVERAGE: 1 ☐	LIMITED: 0,5 ☐
ARGUMENT	The message has been communicated very well and identified the type of text	The message has been communicated appropriately and identified the type of text	Some of the messages have been communicated and the type of text is little confusing	The message hasn't been communicated, and the type of text is inadequate
	EXCELLENT: 2 ☐	GOOD: 1,5 ☐	AVERAGE: 1 ☐	LIMITED: 0,5 ☐
CREATIVITY	Outstanding flow of ideas and events	Good flow of ideas and events	Average flow of ideas and events	Poor flow of ideas and events
	EXCELLENT: 2 ☐	GOOD: 1,5 ☐	AVERAGE: 1 ☐	LIMITED: 0,5 ☐
SCIENTIFIC SUSTAINABILITY	Reasonable, specific and supportable opinion or thesis statement	Minor errors when supporting the thesis statement	Some errors when supporting the thesis statement	Lots of errors when supporting the thesis statement
	EXCELLENT: 2 ☐	GOOD: 1,5 ☐	AVERAGE: 1 ☐	LIMITED: 0,5 ☐
TOTAL/AVERAGE	9 - 10: EXCELLENT 7 - 8,9: GOOD 5 - 6,9: AVERAGE 0 - 4,9: LIMITED		TOTAL 9	



**UNIVERSIDAD POLITÉCNICA ESTATAL DEL
CARCHI- FOREIGN AND NATIVE LANGUAGES
CENTER**

**Informe sobre el Abstract de Artículo Científico
o Investigación.**

Autor: Bazantes Quitama Maranshely Belén and Guacas Cuaspud Yoselin Mishell

Fecha de recepción del abstract: Lunes, 8 de junio de 2026

Fecha de entrega del informe: Lunes, 15 de junio de 2026

El presente informe validará la traducción del idioma español al inglés si alcanza un porcentaje de: 9 – 10 Excelente.

Si la traducción no está dentro de los parámetros de 9 – 10, el autor deberá realizar las observaciones presentadas en el ABSTRACT, para su posterior presentación y aprobación.

Observaciones:

Después de realizar la revisión del presente abstract, éste presenta una apropiada traducción sobre el tema planteado en el idioma inglés. Según la rúbrica de evaluación de la traducción en inglés, ésta alcanza un valor de 9; por lo cual se valida dicho trabajo.

Atentamente



MA. Martha Viveros
RESPONSABLE CIDEN

Anexo 2. Análisis realizados durante la investigación



Figura 3.
Deshidratación de e
bagazo de cerveza
tipo Pale Ale



Figura 4. Pesaje de
bagazo seco antes de la
molienda



Figura 5. Molino de
martillos



Figura 6. Harina de
bagazo de cerveza



Figura 7. Crecimiento de
la masa madre



Figura 8. Pesaje para
las mezclas de harinas



Figura 9. Reposo de la
masa



Figura 10. Análisis de
cenizas



Figura 11. Análisis de
fibra cruda



Figura 12. Fibra de harina



Figura 13. Análisis de proteína



Figura 14. Análisis de humedad



Figura 15. Análisis de grasas

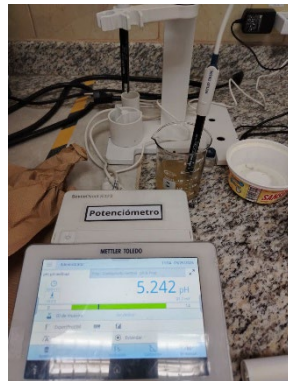


Figura 16. Análisis de pH



Figura 17. Pesaje para las mezclas de harinas



Figura 18. Análisis microbiológico