Universidad Nacional Mayor de San Marcos
Universidad del Perú. Decana de América
Facultad de Química e Ingeniería Química
Escuela Profesional de Ingeniería Química

Evaluación de la temperatura y pH en el proceso de fermentación alcohólica del mosto de papa Yungay (*Solanum tuberosum*) para obtener un alto rendimiento de etanol

TESIS

Para optar el Título Profesional de Ingeniera Química

AUTOR

Sandra Felisa VELASQUEZ FLORES

ASESOR

Mg. Roberto ROBLES CALDERÓN

Lima, Perú

2026



Reconocimiento − No Comercial − Compartir Igual − Sin restricciones adicionales

https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/

Usted puede distribuir, remezclar, retocar, y crear a partir del documento original de modo no comercial, siempre y cuando se dé crédito al autor del documento y se licencien las nuevas creaciones bajo las mismas condiciones. No se permite aplicar términos legales o medidas tecnológicas que restrinjan legalmente a otros a hacer cualquier cosa que permita esta licencia.

Referencia bibliográfica

Velasquez, S. (2026). *Evaluación de la temperatura y pH en el proceso de fermentación alcohólica del mosto de papa Yungay (Solanum tuberosum) para obtener un alto rendimiento de etanol*. [Tesis de pregrado, Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Facultad de Química e Ingeniería Química, Escuela Profesional de Ingeniería Química]. Repositorio institucional Cybertesis UNMSM.

Metadatos complementarios

Datos de autor	
Nombres y apellidos	Sandra Felisa Velasquez Flores
Tipo de documento de identidad	DNI
Número de documento de identidad	75986082
URL de ORCID	No Aplica
Datos de asesor	
Nombres y apellidos	Roberto Robles Calderón
Tipo de documento de identidad	DNI
Número de documento de identidad	06078749
URL de ORCID	https://orcid.org/0000-0002-7077-5085
Datos del jurado	
Presidente del jurado	
Nombres y apellidos	Pedro José Romero y Otiniano
Tipo de documento	DNI
Número de documento de identidad	15612279
Miembro del jurado 1	
Nombres y apellidos	Ruben Alfredo Palomino Infante
Tipo de documento	DNI
Número de documento de identidad	08326506
Datos de investigación	
Línea de investigación	A.1.2. Biotecnología

Grupo de investigación	No aplica
Agencia de financiamiento	Sin financiamiento
Ubicación geográfica de la investigación	Edificio: Facultad de Química e Ingeniería Química País: Perú Departamento: Lima Provincia: Lima Distrito: Lima Latitud: -12.0603733 Longitud: -77.0836999
Año o rango de años en que se realizó la investigación	Marzo 2025 – Febrero 2026
URL de disciplinas OCDE	Ingeniería Química https://purl.org/pe-repo/ocde/ford#2.04.00 Ingeniería de Procesos https://purl.org/pe-repo/ocde/ford#2.04.02

UNIVERSIDAD NACIONAL MAYOR DE SAN MARCOS
(Universidad del Perú, Decana de América)
FACULTAD DE QUÍMICA E INGENIERÍA QUÍMICA

ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA QUÍMICA

ACTA DE SUSTENTACIÓN DE TESIS

Los suscritos Miembros del Jurado Evaluador de Sustentación de Tesis, nombrados por la Dirección de la Escuela Profesional de Ingeniería Química, bajo la Presidencia del **Ing. Pedro José Romero Y Otiniano,** el **Dr. Ruben Alfredo Palomino Infante** (Miembro Revisor) y el **Mg. Roberto Robles Calderón** (Asesor), habiendo presentado para el efecto la Tesis titulada:**"Evaluación de la temperatura y pH en el proceso de fermentación alcohólica del mosto de papa Yungay (*Solanum tuberosum*) para obtener un alto rendimiento de etanol"**, después de sustentar de manera presencial y **habiendo aprobado la Tesis** elaborada por la Bachiller en Ingeniería Química **SANDRA FELISA VELASQUEZ FLORES,** para optar el Título Profesional de **INGENIERA QUÍMICA,** el Jurado Evaluador acuerda calificarla con la **NOTA** de:

Diecinueve 19

(LETRAS) (NÚMEROS)

Lima, 18 de marzo del 2026

Ing. PEDRO JOSÉ ROMERO Y OTINIANO
Presidente

Dr. RUBEN ALFREDO PALOMINO INFANTE
Miembro

Mg. ROBERTO ROBLES CALDERÓN
Asesor

Dr. EDER CLIDIO VICUÑA GALINDO
Director de la E.P. de Ingeniería Química

UNIVERSIDAD NACIONAL MAYOR DE SAN MARCOS • ESCUELA ACADÉMICA PROFESIONAL DE INGENIERÍA QUÍMICA • Facultad de Química e Ingeniería Química

UNIVERSIDAD NACIONAL MAYOR DE
SAN MARCOS
Universidad del Perú, Decana de América

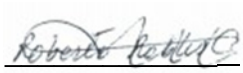
CERTIFICADO DE SIMILITUD

Yo, **ROBERTO ROBLES CALDERÓN** en mi condición de asesor acreditado con el Dictamen de la EP N°000003-2025-EPIQ-FQIQ/UNMSM de la Tesis cuyo título es: **Evaluación de la temperatura y pH en el proceso de fermentación alcohólica del mosto de papa Yungay (*Solanum tuberosum*) para obtener un alto rendimiento de etanol,** presentado por la bachiller: **Sandra Felisa Velasquez Flores,** para optar el título Profesional de Ingeniera Química.

CERTIFICO que se ha cumplido con lo establecido en la Directiva de Originalidad y de Similitud de Trabajos Académicos, de Investigación y Producción Intelectual. Según la revisión, análisis y evaluación mediante la plataforma PIDS, el documento evaluado cuenta con el 13% de similitud, nivel **PERMITIDO** para continuar con los trámites correspondientes y para su **publicación en el repositorio institucional.**

Se emite el presente certificado en cumplimiento de lo establecido en las normas vigentes, como uno de los requisitos para la obtención del título Profesional de Ingeniera Química.

Lima, 13 de febrero del 2026

Firma del Asesor 

Nombres y Apellidos del asesor ROBERTO ROBLES CALDERÓN

DNI: 06078749

DEDICATORIA

Dedico la presente investigación a Dios por permitirme culminar satisfactoriamente este trabajo de tesis, por darme la fuerza en los momentos difíciles y concederme la bendición de llegar hasta aquí.

A mi madre, por su amor incondicional, sacrificio y ejemplo de lucha que me inspiraron a no rendirme nunca, a mis hermanas Ericka, Dayeli y Yareli, por ser mi apoyo y fuerza en cada etapa de este camino.

A mis profesores de la universidad, por compartir su conocimiento, motivarme a superarme y contribuir a mi formación profesional y personal.

AGRADECIMIENTOS

A mi madre, Gladys y hermanas Dayeli, Yareli y Ericka, por ser los pilares de mi vida, por su apoyo constante, paciencia y amor incondicional que me dieron la fuerza necesaria para culminar esta etapa.

A mi alma mater, la Universidad Nacional Mayor de San Marcos, por brindarme la oportunidad de formarme profesionalmente, por los valores inculcados y por ser el espacio donde pude crecer académica y personalmente.

Al Mg. Roberto Robles Calderón, por su tiempo, orientación, paciencia y valiosas enseñanzas como mi asesor de tesis, que fueron fundamentales para la realización de este trabajo.

A los doctores Nino Castro y Edgar Nagles por su colaboración al brindarme equipos necesarios y tiempo para el desarrollo de mi tesis.

INDICE GENERAL

RESUMEN 13
ABSTRACT 14
INTRODUCCIÓN 15
I. PLANTEAMIENTO DEL ESTUDIO 16
1.1. Planteamiento y formulación del problema 16
1.1.1. Determinación del problema 16
1.1.2. Formulación del problema 17
1.2. Objetivos de la investigación 18
1.2.1. Objetivo general 18
1.2.2. Objetivos específicos 18
1.3. Justificación e importancia de la investigación 18
1.4. Limitaciones de la investigación 20
II: MARCO REFERENCIAL 21
2.1. Antecedentes de la investigación 21
2.1.1. Antecedentes internacionales 21
2.1.2. Antecedentes nacionales 23
2.2. Bases teóricas 26
2.2.1. Papa Yungay 26
2.2.2. Almidón 28
2.2.3. Hidrólisis del almidón 29
2.2.4. Enzimas 30
2.2.5. Fermentación alcohólica 32
2.2.6. Levaduras 34
2.2.7. Fases del crecimiento de la levadura 34
2.2.7.1. Fase de latencia 34
2.2.7.2. Fase exponencial o logarítmica 34
2.2.7.3. Fase cuasi-estacionaria 35
2.2.7.4. Fase de muerte 35
2.2.8. *Saccharomyces cerevisiae* 35
2.2.9. Factores que afectan el proceso fermentativo 36
2.2.9.1. Factor Temperatura 36

2.2.9.2. Factor pH 37
2.2.9.3. Factor nutrientes 37
2.2.9.4. Factor concentración de azúcares reductores 38
2.2.9.5. Factor oxigeno 38
2.2.9.6. Factor Tasa de inoculación de la levadura 38
2.2.8. Destilación 39
2.2.9. Fracciones de destilación 39
III: HIPÓTESIS Y VARIABLES 41
3.1. Formulación de hipótesis principal y derivadas 41
3.1.1. Hipótesis general 41
3.1.2. Hipótesis especificas 41
3.2. Variables 41
3.2.1. Variables independientes 41
3.2.2. Variable dependiente 41
3.3. Operacionalización de variables 42
IV: METODOLOGIA 43
4.1. Diseño metodológico 43
4.1.1. Enfoque de investigación 43
4.1.2. Alcance de la investigación 43
4.1.3. Diseño 43
4.2. Diseño muestral 43
4.2.1. Unidad y población 45
4.2.2. Muestra 45
4.3. Procedimiento experimental 45
4.3.1. Obtención de la materia prima 45
4.3.1.1. Caracterización física de la materia prima 46
4.3.1.2 Obtención del almidón de papa Yungay 46
4.3.1.3. Caracterización química de la materia prima 46
4.3.2. Proceso de hidrólisis del almidón 47
4.3.2.1. Análisis de azúcares reductores 48
4.3.3. Preparación de los biorreactores 49
4.3.4. Activación de la levadura 49

4.3.5. Proceso fermentativo 49
4.3.5.1 Medición del pH 50
4.3.5.2. Determinación de la concentración de biomasa producida 50
4.3.5.3. Determinación de la concentración de azúcares reductores 50
4.3.5.4. Determinación de la concentración de etanol. 52
4.3.6. Proceso de destilación 54
4.3.6.1. Determinación del grado alcohólico 54
4.3.7. Diagramas de flujo del proceso 55
V: RESULTADOS Y DISCUSIÓN 57
5.1. Resultados de la caracterización química de la materia prima 57
5.2. Resultados del proceso de hidrólisis del almidón 57
5.3. Resultados del proceso de fermentación alcohólica 58
5.4. Resultados de las pruebas experimentales y determinación del rendimiento de etanol y biomasa 58
5.4.1. Prueba 1 (temperatura de 28°C y pH de 3,5) 58
5.4.2. Prueba 2 (temperatura de 28°C y pH de 4) 59
5.4.3. Prueba 3 (temperatura de 28°C y pH de 4,5) 60
5.4.4. Prueba 4 (temperatura de 30°C y pH de 3,5) 62
5.4.5. Prueba 5 (temperatura de 30°C y pH de 4) 63
5.4.6. Prueba 6 (temperatura de 30°C y pH de 4,5) 64
5.4.7. Prueba 7 (temperatura de 32°C y pH de 3,5) 66
5.4.8. Prueba 8 (temperatura de 32°C y pH de 4) 67
5.4.9. Prueba 9 (temperatura de 32°C y pH de 4,5) 68
5.5. Eficiencia de la fermentación 76
5.6. Productividad de la fermentación 77
5.7. Balance de materia y energía 78
5.8. Técnicas estadísticas para el procesamiento de la información 82
5.8.1. Tratamiento estadístico de la producción de etanol 82
5.9. Análisis y discusión de resultados 90
VI. CONCLUSIONES 93
VII. RECOMENDACIONES 94
VIII. REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS 95
IX. ANEXOS 102

ANEXO 1 102
ANEXO 2 103
ANEXO 3 108
1. Análisis estadístico del consumo de azúcares reductores en el proceso de fermentación alcohólica 108
1. Análisis estadístico de la producción de biomasa en el proceso de fermentación alcohólica 114

INDICE DE TABLAS

Tabla 1. Resultados del proceso de fermentación alcohólica 21
Tabla 2. Rendimientos en la obtención de alcohol 23
Tabla 3. Contenido de materia seca, humedad y almidón para cinco variedades de papa 24
Tabla 4. Características físicas y organolépticas de la papa Yungay 27
Tabla 5. Características de medida y peso de la papa Yungay 27
Tabla 6. Características de almidones usados en la industria de los alimentos 28
Tabla 7. Características funcionales del almidón en sistemas alimentarios 29
Tabla 8. Enzimas usadas en la hidrólisis del almidón 31
Tabla 9. Operacionalización de variables 42
Tabla 10. Diseño experimental para la fermentación alcohólica del mosto de papa Yungay 44
Tabla 11. Intervalos de muestreo en cada prueba experimental 45
Tabla 12. Valores para la concentración de glucosa y absorbancia para la curva patrón 51
Tabla 13. Valores de absorbancia y concentración de etanol para graficar la curva patrón 53
Tabla 14. Características fisicoquímicas de la papa Yungay 57
Tabla 15. Condiciones de operación del proceso de hidrolisis de almidón de papa Yungay 57
Tabla 16. Resultados del proceso de hidrólisis enzimática de almidón de papa Yungay 57
Tabla 17. Prueba 1 (Temperatura 28°C y pH 3,5) 58
Tabla 18. Prueba 2 (Temperatura 28°C y pH 4) 59
Tabla 19. Prueba 3 (Temperatura 28°C y pH 4,5) 61
Tabla 20. Prueba 4 (Temperatura 30°C y pH 3,5) 62
Tabla 21. Prueba 5 (Temperatura 30°C y pH 4) 63
Tabla 22. Prueba 6 (Temperatura 30°C y pH 4,5) 65
Tabla 23. Prueba 7 (Temperatura 32°C y pH 3,5) 66
Tabla 24. Prueba 8 (Temperatura 32°C y pH 4) 67
Tabla 25. Prueba 9 (Temperatura 32°C y pH 4,5) 69
Tabla 26. *Concentración de biomasa en g/L y rendimiento para las 9 pruebas experimentales*.70
Tabla 27. Concentración de azúcares reductores para las 9 pruebas experimentales 72
Tabla 28. Concentración de etanol en g/L y rendimiento para las 9 pruebas experimentales 74
Tabla 29. Eficiencia de la fermentación para las 9 pruebas experimentales 76
Tabla 30. Productividad de la fermentación para las 9 pruebas experimentales 77

Tabla 31. Resultados del proceso de destilación del mosto de papa Yungay 77
Tabla 32. Balance de materia para el proceso de licuado de la papa Yungay.....78
Tabla 33. Balance de materia para el proceso de hidrólisis enzimática de almidón de papa Yungay 78
Tabla 34. Balance de materia para el proceso de filtración.....79
Tabla 35. Balance de materia en el proceso de fermentación 79
Tabla 36. Balance de materia para el proceso de destilación 80
Tabla 37. Balance de energía para el proceso de hidrólisis enzimática de almidón de papa Yungay 80
Tabla 38. Balance de energía del proceso de fermentación alcohólica.....81
Tabla 39. Balance de energía del proceso de destilación 82
Tabla 40. Pruebas de normalidad para la concentración de etanol.....83
Tabla 41. Prueba Kolmogorov-Smirnov para normalidad 83
Tabla 42. Prueba de correlación en función del tiempo, prueba y etanol 86
Tabla 43. Correlación de Spearman para la concentración de etanol 86
Tabla 44. Prueba de efectos inter-sujetos.....87
Tabla 45. Pruebas de normalidad para azúcares reductores 108
Tabla 46. Prueba Kolmogorov-Smirnov para normalidad 109
Tabla 47. Prueba de correlación en función del tiempo, prueba y concentración de azúcares ..111
Tabla 48. Correlación de Spearman para la concentración de azúcares 111
Tabla 49. Prueba de efectos inter-sujetos.....112
Tabla 50. Pruebas de normalidad para la biomasa.....115
Tabla 51. Prueba *Kolmogorov-Smirnov para normalidad*.....115
Tabla 52. Prueba de correlación en función del tiempo, prueba y concentración de biomasa...117
Tabla 53. Correlación de Spearman para la concentración de biomasa.....118
Tabla 54. Prueba de efectos inter-sujetos.....119

INDICE DE FIGURAS

Figura 1. Hidrólisis del almidón 30
Figura 2. Proceso de fermentación alcohólica 33
Figura 3. Crecimiento celular de levaduras 35
Figura 4. Esquema general del proceso de destilación 39
Figura 5. Método Miller para cuantificación de azúcares reductores 51
Figura 6. Curva patrón de glucosa 52
Figura 7. Curva patrón del etanol 53
Figura 8. Diagrama de flujo de proceso para la obtención de etanol a partir de papa 56
Figura 9. Concentración de biomasa, etanol y azúcares reductores para la fermentación alcohólica en la prueba 1 59
Figura 10. Concentración de biomasa, etanol y azúcares reductores para la fermentación alcohólica en la prueba 2 60
Figura 11. Concentración de biomasa, etanol y azúcares reductores para la fermentación alcohólica en la prueba 3 61
Figura 12. Concentración de biomasa. etanol y azúcares reductores para la fermentación alcohólica en la prueba 4 63
Figura 13. Concentración de biomasa, etanol y azúcares reductores para la fermentación alcohólica en la prueba 5 64
Figura 14. Concentración de biomasa, etanol y azúcares reductores para la fermentación alcohólica en la prueba 6 65
Figura 15. Concentración de biomasa, etanol y azúcares reductores para la fermentación alcohólica en la prueba 7 67
Figura 16. Concentración de biomasa, etanol y azúcares reductores para la fermentación alcohólica en la prueba 8 68
Figura 17. Concentración de biomasa, etanol y azúcares reductores para la fermentación alcohólica em la prueba 9 69
Figura 18. Producción de biomasa para las 9 pruebas experimentales de fermentación alcohólica 71
Figura 19. Consumo de azucares reductores para las 9 pruebas de fermentación alcohólica 73
Figura 20. Producción de etanol para las 9 pruebas experimentales de fermentación alcohólica .75

Figura 21. Gráfico de normalidad en función del tiempo 84
Figura 22. Gráfico de normalidad en función de la prueba experimental.....84
Figura 23. Gráfico de normalidad en función de la concentración de etanol.....85
Figura 24. Concentración de etanol en función del tiempo para cada prueba experimental.....88
Figura 25. Concentración de etanol en función de cada prueba experimental para cada tiempo..89
Figura 26. Recepción de la papa Yungay.....103
Figura 27. Proceso de obtención del almidón de la papa Yungay 103
Figura 28. Proceso de obtención de la materia seca de la papa Yunga.....103
Figura 29. Proceso de hidrólisis de almidón de papa Yungay.....104
Figura 30. Enzimas utilizadas en la hidrólisis del almidón 104
Figura 31. Cuantificación de glucosa por espectrofotometría UV-Vis para la construcción de la curva de calibración 104
Figura 32. Proceso de fermentación alcohólica del mosto de papa Yungay 105
Figura 33. Nutriente y levadura utilizados en la fermentación alcohólica.....105
Figura 34. Medición del pH.....105
Figura 35. Determinación de la producción de biomasa.....106
Figura 36. Cuantificación de azucares reductores y etanol por espectrofotometría UV-Vis 106
Figura 37. Proceso de destilación del mosto fermentado de papa Yungay.....107
Figura 38. Medición de la graduación alcohólica del etanol obtenido 107
Figura 39. Fermentador marca Blichmann de 27 L de capacidad 107
Figura 40. Gráfico de normalidad en función del tiempo 109
Figura 41. Gráfico de normalidad en función de la prueba experimental.....110
Figura 42. Gráfico de normalidad en función de la concentración de azúcares 110
Figura 43. Concentración de azúcares en función del tiempo para cada prueba experimental...113
Figura 44. Concentración de azúcares en función de cada prueba experimental para cada tiempo 114
Figura 45. Gráfico de normalidad en función del tiempo 116
Figura 46. Gráfico de normalidad en función de la prueba experimental.....116
Figura 47. Gráfico de normalidad en función de la concentración de biomasa 117
Figura 48. Concentración de biomasa en función del tiempo para cada prueba experimental ...120

Figura 49. Concentración de biomasa en función de cada prueba experimental para cada tiempo 120

RESUMEN

La papa (*Solanum tuberosum*) es considerada uno de los principales cultivos del Perú, siendo la variedad Yungay la más cultivada debido a su alta calidad y rendimiento de cultivo, sin embargo, su industrialización es muy escasa ya que no se cuenta con la tecnología adecuada ni la investigación suficiente para su aprovechamiento como materia prima, dicha problemática lleva a la sociedad a la creciente preocupación por la búsqueda de nuevas alternativas de industrialización como la elaboración de una bebida alcohólica tipo vodka. El presente trabajo de tesis tiene como finalidad la evaluación de la temperatura y pH durante el proceso de fermentación alcohólica del mosto de papa Yungay (*Solanum tuberosum*), para obtener un alto rendimiento de etanol; la materia prima fue adquirida en la provincia de Chupaca, departamento de Junín. Los experimentos fueron realizados en los laboratorios e instalaciones de la Facultad de Química e Ingeniería Química de la universidad Nacional Mayor de San Marcos. La presente investigación se llevó a cabo en dos etapas: durante la primera etapa se hidrolizó el almidón de la papa (15,8% de almidón) con enzimas alfa amilasa (0,4 g/L, temperatura 72°C, pH 6,5; durante 1 hora) y glucoamilasa (0,4 g/L, temperatura 60°C, pH 4,2 y tiempo de 2 horas), obteniendo un rendimiento máximo de azúcares reductores del 94,89%; en lo que concierne a la segunda etapa se realizó la fermentación alcohólica a condiciones de temperatura 28°C, 30°C, 32°C y pH 3,5; 4 y 4,5; a concentración de 1,2 g/L de levadura *Saccharomyces cerevisiae* y nutriente fosfato diamónico a la concentración de 1,2 g/L, obteniendo como resultado una concentración máxima de etanol de 27,31 g/L, con un rendimiento del 47,44 % durante 84 horas de proceso; así mismo, se realizó el proceso de destilación del mosto fermentado de papa Yungay en un destilador de torre rellena con anillos de Raschig, obteniéndose 340 ml de etanol con una graduación alcohólica de 64°GL a partir de 3,5 kg de papa Yungay.

Palabras clave: Azúcares reductores, fermentación alcohólica, etanol, efecto de temperatura, efecto del pH

ABSTRACT

The potato (Solanum tuberosum) is considered one of Peru's main crops, with the Yungay variety being the most widely cultivated due to its high quality and yield. However, its industrialization is very limited because there is a lack of adequate technology and sufficient research for its use as a raw material. This problem has led to a growing concern within society regarding the search for new industrialization alternatives, such as the production of a vodka-like alcoholic beverage. This thesis aims to evaluate the temperature and pH during the alcoholic fermentation process of Yungay potato (*Solanum tuberosum*) must to obtain a high ethanol yield. The raw material was acquired in the province of Chupaca, department of Junín. The experiments were carried out in the laboratories and facilities of the Faculty of Chemistry and Chemical Engineering at San Marcos university. The present investigation was carried out in two stages: during the first stage the potato starch (15,8% starch) was hydrolyzed with alpha amylase enzymes (0,4 g/L, temperature 72°C, pH 6,5; for 1 hour) and glucoamylase (0,4 g/L, temperature 60°C, pH 4,2 and time of 2 hours), obtaining a maximum yield of reducing sugars of 94,89%; as regards the second stage alcoholic fermentation was carried out under temperature conditions of 28°C, 30°C, 32°C and pH 3,5; 4 and 4,5; at a concentration of 1,2 g/L of *Saccharomyces cerevisiae* yeast and diammonium phosphate, a maximum ethanol concentration of 27,31 g/L was obtained, with a yield of 47,44% during an 84 hour process. The fermented Yungay potato must was then distilled in a packed tower still with Raschig rings, yielding 340 ml of ethanol with an alcoholic strength of 64°GL from 3,5 kg of Yungay potatoes.

Keywords: Reducing sugars, alcoholic fermentation, ethanol, temperature effect, pH effect

INTRODUCCIÓN

La obtención de etanol a partir de la fermentación alcohólica es un procedimiento que data de hace miles de años y a lo largo del tiempo ha sido estudiada con la finalidad de generar mejoras en el proceso y obtener productos como las bebidas alcohólicas, las cuales incluso pueden ser destiladas como el vodka, el cual se produce a partir de fuentes ricas en almidón como el trigo o papas (Alcívar et al., 2019).

La finalidad del presente trabajo de tesis fue evaluar la temperatura y pH durante el proceso de fermentación alcohólica del mosto de papa Yungay para la obtención de un alto rendimiento de etanol; cuyo almidón se hidrolizó previamente con enzimas alfa amilasa y glucoamilasa. Se propone utilizar la papa variedad Yungay como materia prima debido al alto contenido de almidón y por las propiedades que posee como son su larga vida útil y alto rendimiento de cultivo. El presente trabajo de tesis está centrado en determinar los parámetros adecuados de pH y temperatura en el proceso de fermentación alcohólica, debido a que constituyen factores importantes que influyen directamente en la obtención de etanol con alto rendimiento y por ende una bebida alcohólica tipo vodka de buena calidad.

Evaluar las mejores condiciones de operación para la fermentación alcohólica del mosto de papa Yungay permitirá generar aportes científicos para futuras investigaciones relacionadas al estudio de factores que influyen durante el proceso de obtención de alcohol etílico usando como materia prima fuentes ricas en almidón, generando de esta manera el desarrollo de proyectos novedosos que busquen generar un impacto, no solo científico, sino también, tecnológico, social y económico, es por ello que el presente trabajo de tesis se basa en determinar de manera experimental las condiciones adecuadas de pH y temperatura mediante nueve procesos de fermentación alcohólica que permitirán determinar aquella prueba que genere el mayor rendimiento de etanol.

I. PLANTEAMIENTO DEL ESTUDIO

1.1. Planteamiento y formulación del problema

1.1.1. Determinación del problema

En Perú existen alrededor de 3500 variedades de papas, lo cual manifiesta un recurso energético valioso para el futuro y se estima que este número sólo representa una parte de la diversidad que existe en nuestro país (MIDAGRI,2017), siendo su producción en promedio de 5 millones de toneladas anuales (INEI, 2024). Las variedades de papa en el Perú están clasificadas en variedades nativas, las cuales se siembran especialmente en la sierra sobre los 3000 msnm y variedades modernas que poseen una mayor capacidad productiva respecto a las variedades nativas. Dentro de esta última clasificación destaca la variedad Yungay la cual es producto de un cruce entre papas nativas y exóticas y que gracias a su elevado contenido de almidón (se puede llegar a obtener incluso el 18%) la convierte en una excelente alternativa para ser industrializada (Leyva L. 2019).

La papa Yungay viene a ser la variedad con mayor producción a nivel nacional cubriendo el 22% de la producción total en el país que equivale a 60 000 hectáreas, su alta productividad en condiciones de sierra, así como su capacidad de conservación en almacenamiento la convierte en favorita para muchos agricultores (Contreras, 2017); así mismo, Rolando Egúsquiza Bayona estimó una producción anual de 900 000 toneladas, de las cuales 300 000 son usadas para el consumo propio del agricultor mientras que 600 000 son destinadas a la venta (ANDINA, 2024). Sin embargo, durante varios años se viene presentando el problema de la sobreproducción de papa, principalmente de la variedad Yungay ya que es la de mayor producción, desencadenando descensos bastante significativos en su precio debido a la falta de mercados e industrias que transformen la papa en productos industrializados como las bebidas alcohólicas.

En múltiples ocasiones debido al bajo precio que reporta esta variedad a pesar de tener muchos atributos, acompañado de la falta de industrialización como por ejemplo en la producción de bebidas alcohólicas, los agricultores se ven afectados económicamente al existir mínimos canales de comercialización para su posterior industrialización, así mismo la poca formación intelectual es considerada una barrera para la innovación tecnológica ya que el 25% de los productores no cuenta con nivel educativo y el 70% no tiene educación primaria (Segura, 2014).

Al no contar con un buen nivel educativo ni capacitaciones sobre estrategias de producción, los pequeños agricultores afrontan problemas como la saturación del mercado (Rodríguez et al., 2021).

La no industrialización de la papa en Perú se debe a la ausencia de tecnologías adecuadas para implementar plantas de procesamiento que den valor agregado y rentabilidad a esta materia prima, la falta de centros de investigación y capacitación técnica en torno a los avances de la ciencia y tecnología limitan la elaboración de productos novedosos como bebidas alcohólicas.

De igual manera, se evidencia una limitada cantidad de investigaciones científicas enfocadas en el análisis del proceso de obtención de etanol para bebidas alcohólicas y en la influencia de distintas variables que intervienen, especialmente en la fase de la fermentación alcohólica de mostos de diferentes materias primas. Entre estos factores se encuentran el pH, las condiciones de temperatura, la concentración y tipo de nutrientes y azúcares fermentables, así como el uso de diferentes cepas de levaduras, los cuales influyen directamente en la cinética del proceso y en la cantidad de etanol producido.

Por otro lado, se tiene el escenario de que la producción empírica de bebidas alcohólicas en el Perú se realiza sin la aplicación de tecnologías apropiadas, produciendo licores de baja calidad con contaminantes que no cumplen con las normas técnicas, afectando la salud de los consumidores.

1.1.2. Formulación del problema

- **Problema general**

¿En qué medida influye la temperatura y pH en el proceso de fermentación alcohólica de mosto de papa Yungay (*Solanum tuberosum*) para obtener un alto rendimiento de etanol, utilizando cepas de levadura *Saccharomyces cerevisiae* Lalvin D47?

- **Problemas específicos**

¿En qué medida influye la temperatura en el proceso de fermentación alcohólica de mosto de papa Yungay (*Solanum tuberosum*) para obtener un alto rendimiento de etanol, utilizando cepas de levadura *Saccharomyces cerevisiae* Lalvin D47?

¿En qué medida influye el pH en el proceso de fermentación alcohólica de mosto de papa Yungay (*Solanum tuberosum*) para obtener un alto rendimiento de etanol, utilizando cepas de levadura *Saccharomyces cerevisiae* Lalvin D47?

1.2. Objetivos de la investigación

1.2.1. Objetivo general

- Determinar el rendimiento de etanol en el proceso de fermentación alcohólica del mosto de papa Yungay (*Solanum tuberosum*) a diferentes temperaturas y pH utilizando cepas de levadura *Saccharomyces cerevisiae* Lalvin D47.

1.2.2. Objetivos específicos

- Determinar la temperatura adecuada en el proceso de fermentación alcohólica del mosto de papa Yungay (*Solanum tuberosum*) para obtener un alto rendimiento de etanol, utilizando cepas de levadura *Saccharomyces cerevisiae* Lalvin D47.
- Determinar el pH adecuado en el proceso de fermentación alcohólica del mosto de papa Yungay (*Solanum tuberosum*) para obtener un alto rendimiento de etanol, utilizando cepas de levadura *Saccharomyces cerevisiae* Lalvin D47.

1.3. Justificación e importancia de la investigación

Perú es catalogado como el principal productor agrícola de papa en el continente latinoamericano debido a que cuenta con la mayor variedad de papas (cuenta con más de 3500 variedades). De estas variedades, la papa Yungay es una de las que tiene un alto contenido de almidón (entre 15% a 18%) y puede ser cultivada tanto en la costa como en la sierra gracias a la fácil adaptación de su cultivo en las alturas y su resistencia a plagas, además posee una vida útil mayor a otras variedades lo que le permite ser almacenada por periodos largos de tiempo sin perder el sabor. Considerando estas ventajas y dada la importancia de un cultivo intensivo para obtener el mayor rendimiento posible de las tierras, la papa Yungay se convertiría en una excelente alternativa de materia prima para obtener productos industrializados, incluyendo dentro de estos productos una bebida alcohólica clasificada como vodka.

Tomando en consideración que en nuestro país no hay suficientes investigaciones científicas sobre el proceso de fermentación alcohólica, etapa clave para la obtención de bebidas alcohólicas clasificadas como vodka a partir de papa Yungay (*Solanum tuberosum*), esta

investigación constituye un proceso innovador ya que propone contribuir con base científica mediante el estudio del pH y la temperatura durante la fermentación alcohólica del mosto de papa Yungay, para obtener etanol con el máximo rendimiento.

Así mismo, mediante los resultados obtenidos se darán las bases para futuras investigaciones de otras variables que también tengan una influencia significativa en el proceso de elaboración de una bebida alcohólica tipo vodka a partir del mosto de papa, como el estudio de otras variedades de papa que contengan alta concentración de almidón, así como las condiciones que influyan en los procesos de hidrólisis de almidón, fermentación alcohólica y destilación, permitiendo de esta forma contribuir con conocimientos científicos y tecnológicos para el uso industrial que se le puede otorgar a esta materia prima, la cual es escasamente desarrollada en nuestro país.

La industrialización de la papa en el Perú significaría una oportunidad de negocio no solo para incrementar su oferta sino también generar mayores divisas e ingresos a los pequeños productores mejorando las prácticas tradicionales mediante la incorporación de avances tecnológicos en eficiencia productiva, así como mediante la ampliación de la frontera agrícola, beneficiando a aquellas regiones que producen la mayor cantidad de papa en el Perú, las mismas que según el Instituto Nacional de Estadística e Informática (INEI) también registran altos índices de pobreza; de esta manera la generación de esta industria en el Perú favorecería el crecimiento económico de los agricultores y también contribuiría con el ODS 8 referido a trabajo decente y crecimiento económico.

Tomando como base los aportes científicos y estudios sobre la elaboración de una bebida alcohólica clasificada como vodka a partir de papa se podrían implementar plantas a nivel piloto, a pequeña escala e incluso más adelante plantas industriales que podrán ser financiadas por la inversión pública o privada, creando así mayor mano de obra al brindar mejores oportunidades de trabajo a los pequeños productores de papa de zonas rurales, ya que serán los principales proveedores de la materia prima, mejorando de esta manera su calidad de vida, además de que se podría aspirar más adelante a ser exportadores potenciales en países consumidores como Rusia, Estados Unidos, Reino Unido, entre otros.

1.4. Limitaciones de la investigación

Las limitaciones de la presente investigación se centran fundamentalmente en la adquisición de algunos reactivos que pueden resultar costosos como es el caso del ácido 3,5-dinitrosalicílico (DNS), utilizado en el análisis de azúcares reductores; así mismo, se presenta como limitación la falta de equipos para los análisis en las diferentes etapas del proceso y producto final, como la cromatografía liquida de alta eficiencia de siglas HPLC (usado para medir aldehídos, cetonas, metanol), etc.

Otra de las limitaciones es la falta de disponibilidad de biorreactores automatizados para llevar a la cabo el proceso de fermentación alcohólica, que nos permitan tener un control automático de la producción de dióxido de carbono, consumo de oxígeno, control de temperatura, pH, tiempo de fermentación, velocidad de agitación, entre otros.

II: MARCO REFERENCIAL

2.1. Antecedentes de la investigación

2.1.1. Antecedentes internacionales

López (2014) estudió la mejora en la obtención de vodka a partir de la sacarificación del almidón comercial de papa. Durante la gelatinización del almidón, utilizó una concentración de 250 g/L de almidón a 70°C. Durante la sacarificación, empleó 6000 U de enzimas (amilasa y glucosidasa) durante 2 horas, alcanzando un grado de 14,4°Brix y un rendimiento del 83,5%. Durante el proceso de fermentación, comenzó con una densidad del mosto a ser fermentado de 1,18 g/ml y una concentración de 3,4 x 10^6 ufc/ml, con una viabilidad del 92%. Al finalizar, casi todos los azúcares fueron consumidos por las levaduras, quedando solo 0,24 g/L de glucosa no fermentada y el rendimiento del proceso produjo un 47,54% v/v de etanol absoluto, tal como se muestra en la siguiente tabla:

Tabla 1.

Resultados del proceso de fermentación alcohólica

Parámetros	**Fracción 86°C - 90°C**	**Etanol total**
Rendimiento de etanol (etanol absoluto/almidón seco)	4,92 $\pm$ 0,72	47,54 $\pm$ 7,35

Fuente: López (2014)

Dicho resultado equivale a la obtención de 47,54 kg de etanol absoluto por 100 kg de almidón, cuyo valor es cercano al valor teórico que equivale a 56,79 kg de etanol por 100 kg de almidón.

Leal et al. (2014) estudiaron el impacto que tienen en la fermentación de mosto de *Agave cocui*, el pH y temperatura debido a que son factores que pueden influir ya sea de manera positiva o negativa en la calidad del producto y en el rendimiento del proceso. La influencia de estos factores se vio reflejada en el seguimiento del consumo de azúcares, así como en la obtención de etanol. Para determinar las condiciones adecuadas de temperatura trabajaron a las temperaturas de 27°C, 31°C, 33°C,35°C y 37°C y pH constante de 4, obteniendo el mayor rendimiento (81,5%) a

una temperatura de trabajo de 33°C. De manera adicional evaluaron 3 valores de pH (3;4 y 5) con una temperatura constante de 33°C, obteniendo el mayor rendimiento de etanol (81,5%) para un pH de 4 durante 75 horas de fermentación.

Castillo et al. (2018) diseñaron a escala piloto un equipo para llevar a cabo la hidrólisis enzimática del almidón obtenido de la papa con el objetivo de desarrollar un equipo destinado a la elaboración de jarabes ricos en glucosa de almidón de papa. Se llevó a cabo la construcción de un tanque con agitación mecánica, hecho de acero inoxidable y por medio de un PLC que controló la agitación y la temperatura, hicieron las pruebas de operación del equipo. Así mismo, realizaron la hidrólisis enzimática usando suspensiones de almidón de alta concentración en dos etapas importantes, la primera fue la etapa de dextrinización en la cual consideraron una temperatura de 90°, pH 6 y una concentración de 0,1% de alfa amilasa, dosis requerida de enzima que dextriniza 1 mg de almidón; la segunda etapa fue la sacarificación, la cual la llevaron a cabo a las condiciones de pH 4, temperatura de 60°C y concentración de 0,1% de la enzima glucoamilasa, cuya concentración fue necesaria para catalizar la producción de 1 g de glucosa en 1 hora; de esta forma llevaron a cabo la conversión de las dextrinas en glucosa, llegando a obtener finalmente jarabes con más de 500 g/L de concentración de azúcar.

Arce G. (2023) realizó un estudio utilizando como materia prima la papa amarga, variedad Pinku para la producción de etanol, con el objetivo de establecer los parámetros óptimos en la obtención del etanol y darle un uso alternativo a esta materia prima. El proceso de obtención de etanol fue caracterizado mediante las etapas de extracción de almidón, hidrólisis en la cual evaluó tres procedimientos (enzimática, ácida y por probióticos) y obtuvo mejores resultados por el método de hidrolisis ácida (temperatura de 56°C; 0,67 horas y 224 ml de solución ácida) consiguiendo una concentración de 11°Brix; durante la fermentación alcohólica evaluó las variables tiempo de fermentación, pH y masa de la levadura y obtuvo los mejores resultados a las condiciones de 20 g de masa de levadura, pH de 4,3 y 14 días de fermentación. Finalmente, en el proceso de destilación obtuvo un volumen final de etanol de 146 ml a una graduación alcohólica de 53°GL por kg de papa.

Ordoñez L. (2022) desarrolló a partir de dos variedades de tubérculos, oca (*Oxalis tuberosa*) y papa china (*Cocalasia esculenta*), una bebida clasificada como vodka, consideró como variables las concentraciones de enzimas (glucoamilasa y alfa amilasa) durante el proceso de

hidrólisis del almidón y el tiempo en el que culminó la fermentación. Las condiciones aplicadas en el diseño para el tiempo de fermentación fueron de 3;5 y 7 días y la concentración de enzimas glucoamilasa y alfa amilasa utilizadas fue aplicada en 3 cantidades descritas como mínimo (3,5 g y 1,08 g) , óptimo (3,9 g y 1,2 g) y máximo (4,2 g y 1,32 g) respectivamente, finalmente sometió el producto a una prueba sensorial y concluyó que el mejor producto fue el que obtuvo utilizando como materia prima la papa china cuyas condiciones óptimas para las variables estudiadas fueron para la glucoamilasa (3,5 g) y para la alfa amilasa (1,08 g), asi como 7 días de fermentación, utilizando 2% de levaduras y una temperatura de 30°C.

2.1.2. Antecedentes nacionales

Odar M. & Parraguez D. (2018) analizaron el desempeño del proceso de fermentación alcohólica empleando almidón extraído de distintos tubérculos, entre ellos camote (*Ipomoea batata*), papa (*Solanum tuberosum*) y olluco (*Ullucus tuberosus*), con la finalidad de producir etanol. Como resultado del proceso de extracción, el camote presentó el rendimiento más alto de almidón (18,84 %), seguido por la papa y el olluco (10,53% y 5,26 % respectivamente). La obtención de etanol se desarrolló en tres etapas principales: inicialmente, la extracción del almidón de los tubérculos; posteriormente, la hidrólisis enzimática del almidón, en la cual desarrollaron la gelatinización, licuefacción y sacarificación mediante el uso de las enzimas glucoamilasa y alfa amilasa; y finalmente, las etapas de fermentación alcohólica y destilación. Para el proceso fermentativo, el mosto hidrolizado fue ajustado a 23 °Brix y suplementado con nutrientes, tales como sulfato de magnesio, fosfato diamónico (DAP) y fosfato de potasio, en concentraciones de 2 g/L, 6 g/L y 3 g/L respectivamente. La fermentación culminó en un periodo de 36 horas y a las condiciones de pH 4 y temperatura de 30°C, tras lo cual se procedió a la destilación para la obtención de los siguientes rendimientos de etanol.

Tabla 2.

Rendimientos en la obtención de alcohol

Materia prima	Cantidad de etanol por kg de muestra
Camote	71,9 ml
Papa	41,3 ml
Olluco	19,6 ml

Fuente: Odar & Parraguez (2018)

De acuerdo a los resultados presentados en la tabla 2 se puede determinar que, de los tres tratamientos, el camote presentó el mayor rendimiento de etanol a partir de un kilogramo de muestra, seguido de la papa y por último el olluco.

Contreras (2017) determinó a partir del contenido de almidón de cinco variedades de papa (Yungay, Canchan, Peruanita, Perricholi y Hauyro) la relación que existe con la materia seca y la gravedad especifica El proceso consistió en determinar la cantidad de materia seca, humedad, almidón, asi como gravedad específica y luego estableció modelos matemáticos en base a ecuaciones de correlación las cuales posteriormente fueron comparadas a los modelos establecidos por otros autores. Los resultados se observan en la tabla 3, donde obtuvo el porcentaje de materia seca, humedad y contenido de almidón para las 5 variedades de papa:

Tabla 3.

Contenido de materia seca, humedad y almidón para cinco variedades de papa

Variedad de papa	**Humedad (%)**	**Materia seca (%)**	**Contenido de almidón (%)**
	Media	Media	Media
Yungay	77,627	22,373	16,35
Perricholi	77,516	22,483	12,97
Canchan	78,542	21,458	13,54
Huayro	73,732	26,268	18,21
Peruanita	72,930	27,070	19,05

Fuente: Contreras (2017)

Las variedades que arrojaron los mejores resultados corresponden a las variedades Huayro, Peruanita y Yungay al contener el mayor porcentaje de almidón, del mismo modo, al establecer una relación matemática entre estos parámetros y la gravedad especifica el autor concluyó que son muy cercanas a los valores teóricos reportados.

Carrión y Huamán (2008) establecieron las mejores condiciones para producir etanol mediante la fermentación alcohólica del almidón de papa Yungay, originaria en la región Amazonas, provincia de Chachapoyas, localidad de Levanto. El estudio se desarrolló mediante dos

procedimientos experimentales diferenciados. En primer lugar, se llevó a cabo la hidrólisis del almidón, etapa en la que se analizó la influencia de la concentración de enzimas que contiene la malta sobre la obtención de azúcares reductores a partir del almidón. Para ello, se empleó una dosificación de 2,8 g de malta por cada 10 g de sustrato, manteniendo una proporción de 1:4 entre la materia prima y el agua durante un periodo de 24 horas. Como resultado de este proceso, a partir de 176,4 g de malta y 630 g de papa se obtuvieron 330 g de azúcares reductores, alcanzándose un rendimiento del 41 %. Posteriormente, se efectuó la fermentación alcohólica, en la cual se evaluó el efecto de las levaduras sobre la generación de etanol. El sustrato hidrolizado fue inoculado con *Saccharomyces cerevisiae* a una concentración de $6,4 \times 10^7$ células por ml de sustrato hidrolizado. Bajo condiciones óptimas de fermentación, caracterizadas por un contenido de 20 % de azúcares reductores, la adición de 180 mg de sulfato de amonio como nutriente y un tiempo de proceso de 72 horas de fermentación, finalmente obtuvieron un rendimiento máximo de 94,67 g/L de etanol, equivalente a 17,43 % v/v.

Herrera (2019) estudió la obtención de vodka llevando a cabo la hidrólisis enzimática utilizando las variedades de papa Huagalina y Tumbay. En primer lugar, determinó el contenido de almidón presente en cada variedad, obtuvo 13,26% de almidón para la variedad Huagalina y 15,50% de almidón para la variedad Tumbay. Durante el proceso de hidrólisis del almidón, empleó 0,38 g de la enzima alfa-amilasa por cada 200 g de almidón utilizados para ambas muestras y determinó la presencia de almidón al final del proceso por medio de la técnica del yodo. En el proceso de fermentación alcohólica utilizó 24 g de levadura para cada prueba y monitoreó el pH y los °Brix para ambas variedades, obteniendo al cabo de 16 días de fermentación para la variedad Tumbay un pH de 3,7 y 5,3°Brix y un pH de 3,5 y 4,9°Brix para la variedad Huagalina. Finalmente, en el destilado obtuvo un grado alcohólico de 42,58°GL y 4,28 L de destilado final para la variedad Tumbay y 45,58°GL y 3,78 L para la variedad Huagalina.

Robles (2021) analizó las condiciones adecuadas de los procesos de hidrólisis enzimática y fermentación alcohólica empleando cepas de levadura *Saccharomyces cerevisiae*, teniendo como materia prima el jugo de cabuya azul (*Agave americana*), la investigación fue realizada siguiendo dos etapas, durante la primera analizó las condiciones de pH, temperatura y tiempo en el proceso de hidrólisis para la obtención del mayor rendimiento de azúcares reductores producidos, los valores de trabajo que generaron el mayor rendimiento fueron 110°C para la temperatura, un pH

de 2,5 y tiempo de 10 horas. El autor obtuvo un porcentaje de 91,06% como rendimiento máximo de azúcares. Durante la segunda etapa donde se produjo la fermentación, el autor evaluó parámetros como pH, temperatura, concentración de fosfato diamónico como nutriente y concentración de sustrato, la determinación de la concentración de etanol lo calculó por espectrofotometría UV/Vis y obtuvo un rendimiento de etanol del 47,96% considerando un pH de 3,5; temperatura de 28°C, 2 g/L de concentración de nutriente y concentración de sustrato de 90 g/L para un proceso fermentativo de 26 horas.

2.2. Bases teóricas

2.2.1. Papa Yungay

A lo largo del tiempo, expertos han desarrollado cientos de variedades, pero muchas de ellas han quedado en el olvido debido a la aparición de otras con mejores rendimientos y mayor adaptabilidad. Como consecuencia, en la actualidad solo se emplea un número reducido de variedades. Estas pueden distinguirse entre sí por diversos atributos relevantes para la producción, tales como la tonalidad de la cáscara y la pulpa, la tolerancia a plagas, la duración del ciclo vegetativo y sus exigencias nutricionales, entre otros factores (Benavides & Pozo, 2008).

Originaria de las zonas altoandinas, la papa Yungay es un cultivo destinado al consumo alimentario y corresponde a una variedad de papa de tipo mejorada o híbrida. Su calidad está influenciada por diversos factores ambientales, entre los que destacan las condiciones microclimáticas, los niveles de luminosidad del ecosistema de cultivo y la radiación solar presente en la zona (Carrión & Huaman, 2008).

Entre las características más representativas de la papa Yungay tenemos las siguientes:

- La papa Yungay se distingue por presentar una morfología ovalada y ligeramente aplanada, con una cáscara de tonalidad amarilla y presencia de pigmentación rojiza en los ojos superficiales. Su pulpa es de color amarillo y posee un ciclo vegetativo tardío, que oscila entre seis y siete meses. A pesar de ello, esta variedad se caracteriza por su elevada productividad y alta aceptación comercial, lo que la convierte en una de las papas de mayor cultivo en el territorio peruano (Contreras, 2017).
- La papa Yungay tiene una planta que se distingue por ser robusta, con hojas de gran tamaño

y una constante floración, su cultivo además de poseer un alto rendimiento es resistente a las plagas y el tiempo de almacenamiento puede ser largo sin que esta pierda el sabor (Leyva, 2019)

- En su estado fresco, la papa presenta una composición promedio caracterizada por un alto contenido de agua, aproximadamente 78 %, seguida de un 18 % de almidón, con un 2,2 % de proteínas, 1 % de cenizas y 0,1 % de lípidos. Considerando la materia seca, cerca del 75 % de esta corresponde a carbohidratos, lo que resalta su valor energético (Carrión & Huaman, 2008).

Las características físicas y organolépticas de la papa Yungay se pueden observar en las tablas 4 y 5:

Tabla 4.

Características físicas y organolépticas de la papa Yungay

Variedad	Forma	Piel	Pulpa	Características
Yungay	Se presenta en tamaños grandes y compactas y forma chata	La piel es amarillenta con jaspes rojizos y presenta limitados ojos superficiales	Amarilla y cremosa	Materia seca del 26% 1,091 de gravedad especifica

Fuente: Contreras (2017)

Tabla 5.

Características de medida y peso de la papa Yungay

Diámetro (D) y peso (g)	Calibres		
	Papa extra	Papa primera	Papa segunda
Mayor diámetro (mm)	150-105	104-74	78-46
Menor diámetro (mm)	102-62	61-46	45-33
Peso (g)	711-322	321-133	132-21

Fuente: Norma Técnica Peruana 011.119:2010 papa y sus derivados.

2.2.2. Almidón

El almidón es el segundo polisacárido más abundante e importante desde una perspectiva comercial. Se encuentra en cereales, tubérculos y algunas frutas, donde actúa como reserva energética. Químicamente, el almidón está compuesto por una mezcla de dos polisacáridos muy similares: la amilosa y la amilopectina. Generalmente, los almidones contienen un 73% de amilopectina, mientras que el resto está formado por amilosa (Badui, 2006).

La amilosa y la amilopectina son componentes fundamentales que influyen de manera significativa en el comportamiento reológico y en las características sensoriales de los alimentos, debido a su incidencia en los procesos de gelatinización e hidratación. En la Tabla 6 se presentan las características más resaltantes de los almidones de mayor uso en la industria alimentaria, mientras que en la Tabla 7 se describen las propiedades funcionales asociadas al almidón.

Tabla 6.

Características de almidones usados en la industria de los alimentos

Tipo	Porcentaje de amilosa (%)	Porcentaje de amilopectina (%)	Temperatura de gelatinización (°C)	Tamaño de gránulo (micras)
Maíz	25-30	68-75	63-73	5-24
Maíz céreo	0-1	99-100	63-72	5-25
Papa	18-27	73-77	58-67	5-100
Sorgo céreo	0-1	99-100	67-74	5-25
Arroz	17	83	62-78	2-5
Maíz rico en amilosa	56-81	20-44	65-81	4-24
Trigo	25	75	59-65	10-40

Fuente: Badui (2006)

Tabla 7.

Características funcionales del almidón en sistemas alimentarios

Temperatura (°C)	Pasos	Fenómenos observados	Estructura
20-50/60	Cocción	Absorción del agua	Cristalina
50/60-80	Gelatinización	Ocurre la pérdida de la birrefringencia durante la gelatinización, el grado de hinchamiento de los gránulos y su capacidad de dispersarse y solubilizarse en el medio.	Coloidal
100-60	Gelitificación	Reorganización de las moléculas	Gel
60-20	Retrogradación	Recristalización del almidón	Cristalina de la estructura inicial

Fuente: Odar & Parraguez (2018)

2.2.3. Hidrólisis del almidón

El proceso de hidrólisis del almidón genera azúcares, los cuales pueden ser utilizados por los seres vivos. Durante el proceso de hidrólisis enzimática, generalmente se emplean dos tipos de enzimas: alfa-amilasa y glucoamilasa las cuales atacan en zonas específicas de la cadena de almidón tal como se muestra en la figura 1. Con la finalidad de lograr una hidrólisis enzimática eficiente del almidón, es necesario que este haya sido previamente gelatinizado, lo que se consigue mediante una cocción antes de ser tratado por las enzimas (Odar y Parraguez, 2018).

La reacción que se produce durante la hidrólisis del almidón es la siguiente:

$$(C_6H_{10}O_5)_n + nH_2O \rightarrow nC_6H_{12}O_6$$

Generalmente, la hidrólisis del almidón se clasifica en tres etapas:

- **Gelatinización**: Este proceso ocurre cuando el almidón es sometido a temperaturas cercanas a 65°C en exceso de agua. Durante esta etapa, el gránulo de almidón aumenta su volumen y comienza una transición relacionada con la difusión del agua hacia el interior del gránulo, así como hacia las zonas intermicelares amorfas. Durante este proceso también ocurre la absorción de agua, el incremento radial del volumen de los gránulos, la

desorganización de la estructura cristalina y la ruptura parcial de las moléculas de amilopectina y amilosa (Odar y Parraguez, 2018).

- **Licuefacción o dextrinización**: Esta etapa se distingue por una reducción rápida de la viscosidad del sistema, consecuencia de la hidrólisis incompleta del almidón previamente gelatinizado. En el transcurso de este proceso se generan polisacáridos de tamaño intermedio, principalmente maltodextrinas, las cuales están conformadas por cadenas de entre cinco y diez unidades de glucosa. Asimismo, se forman compuestos de diferente peso molecular, tanto simples como complejos, entre los que destacan la glucosa y la maltosa (Odar y Parraguez, 2018).
- **Sacarificación**: En esta etapa, las maltodextrinas formadas durante la etapa anterior continúan su proceso de hidrólisis, alcanzándose la conversión total del almidón en glucosa. Para un aprovechamiento adecuado del almidón en la obtención de otros productos, intervienen diversos factores determinantes, entre los cuales se encuentran la proporción entre amilosa y amilopectina, el grado de interacción molecular entre los componentes del almidón y la longitud de las cadenas de amilosa, entre otros aspectos que resultan fundamentales en dicho fenómeno. (Odar y Parraguez, 2018).

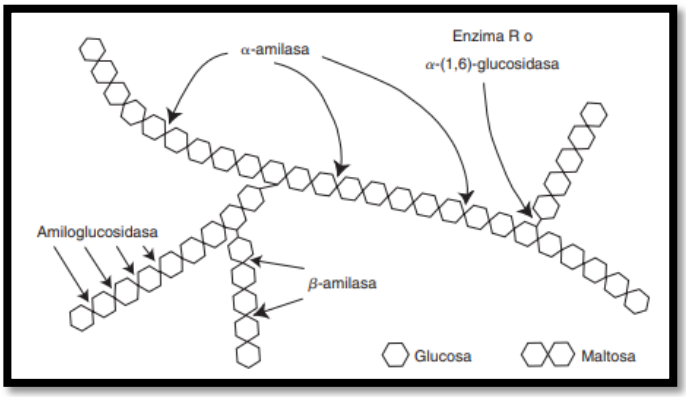


Figura 1. **Hidrólisis del almidón. (Badui 2006)**

2.2.4. Enzimas

Vienen a ser proteínas que poseen actividad catalítica, gracias a su capacidad de activación específica, lo que le permite convertir sustratos en productos (Badui, 2006).

$$sustrato(s) \xrightarrow{enzima} producto(s)$$

Todas las células, incluidos los microorganismos, así como algunos organismos superiores, producen enzimas. La acción de las enzimas está estrechamente vinculada a las reacciones metabólicas y al aumento de la velocidad de las transformaciones químicas. Su papel en el ámbito de los alimentos es fundamental, ya que son responsables de algunos cambios químicos que experimentan los alimentos, los cuales pueden ser tanto beneficiosos como perjudiciales (Badui, 2006).

Durante la hidrólisis del almidón existen enzimas que juegan un rol importante en este proceso las cuales son:

- **Alfa-amilasa**: Esta enzima se clasifica como una endohidrolasa que cataliza de forma no específica la ruptura de los enlaces α-(1-4) presentes tanto en la amilosa como en la amilopectina, dando lugar a la formación de dextrinas compuestas por cadenas de entre 10 y 20 unidades de glucosa. Asimismo, posee la capacidad de escindir los enlaces glucosídicos adyacentes a las ramificaciones α-(1-6) de la amilopectina, sin embargo, no actúa directamente sobre este tipo de enlace (Badui, 2006).
- **Glucoamilasa**: Estas enzimas catalizan la ruptura de los enlaces α-(1-4) y α-(1-6) presentes en las estructuras de la amilosa y la amilopectina, así como de algunos enlaces α-(1-3) de los alfa-glucanos. Las glucoamilasas desempeñan un papel fundamental en la hidrólisis del almidón y resultan esenciales en los procesos industriales destinados a la obtención de jarabes de glucosa y fructosa, así como en la producción de etanol (Odar & Parraguez, 2018).

En la tabla 8 se puede observar algunas características y parámetros a tener en cuenta cuando se utilizan las enzimas alfa amilasa y glucoamilasa.

Tabla 8.

Enzimas usadas en la hidrólisis del almidón

Enzima	**Fuente**	**Condiciones**	
		pH	**Temperatura (°C)**
Alfa amilasa	*Aspergillus orysae*	4-5	50-70

	Bacillus subtilis	6-7	80-90
	Bacillus licheniformis	6-7	95-105
Glucoamilasas	*Aspergillus niger*	3,5-5	50-60

Fuente: Arce (2023)

2.2.5. Fermentación alcohólica

En condiciones anaeróbicas, ciertos microorganismos unicelulares, como las levaduras, obtienen energía a través de un proceso metabólico denominado fermentación alcohólica. Durante este mecanismo biológico, los carbohidratos, principalmente azúcares como la glucosa, son degradados para generar etanol, dióxido de carbono y ATP, este último utilizado en las funciones metabólicas celulares. De esta manera, la fermentación alcohólica cumple la función de suministrar energía a los microorganismos sin la presencia de oxígeno, a la vez que permite la formación de alcohol y CO_2 como productos finales (Agudo, 2014).

La conversión de azúcares en etanol y dióxido de carbono se representa con la siguiente reacción:

$$C_6H_{12}O_6 \rightarrow 2C_2H_5OH + 2CO_2$$

Partiendo del valor teórico, la conversión de la glucosa en productos como el etanol, asi como el dióxido de carbono presenta un rendimiento de 0,489 g de CO_2 y 0,511 g de etanol por cada gramo de glucosa consumida. No obstante, en condiciones experimentales resulta complejo alcanzar dichos valores, ya que una fracción de la glucosa es desviada por la levadura hacia la síntesis de otros metabolitos, por lo que un rendimiento experimental puede variar entre el 90% y 95% del valor teórico, mientras que los rendimientos a escala industrial pueden llegar a variar entre el 87% y 93% del valor teórico (Vazquez & Dacosta, 2007).

El proceso de degradación de la glucosa en dos moleculas de etanol y dos moleculas de dióxido de carbono implica una conversión compleja ya que de manera simultánea la levadura emplea la glucosa asi como los nutrientes extras para multiplicarse y reproducirse, por lo que se evaluan dos tipos de rendimiento:

- Rendimiento biomasa/sustrato (Yx/s): indica la proporción de biomasa generada en relación con la cantidad de sustrato utilizado durante el proceso.
- Rendimiento sustrato/producto (Yp/s): expresa la cantidad de producto formado por unidad de sustrato consumido.

El proceso de fermentación alcohólica tal como se distingue en la figura 2 ocurre cuando hay una alta concentración de azúcares como la glucosa en el medio, en ausencia de oxígeno. Esto favorece una mayor producción de piruvato y NADH. El piruvato en exceso se transforma en etanal o acetaldehído gracias a la acción de la enzima descarboxilasa, y luego, el acetaldehído es reducido a etanol mediante la acción del alcohol deshidrogenasa, proceso en el cual el NADH se convierte en NAD^+ (Alcázar, 2016).

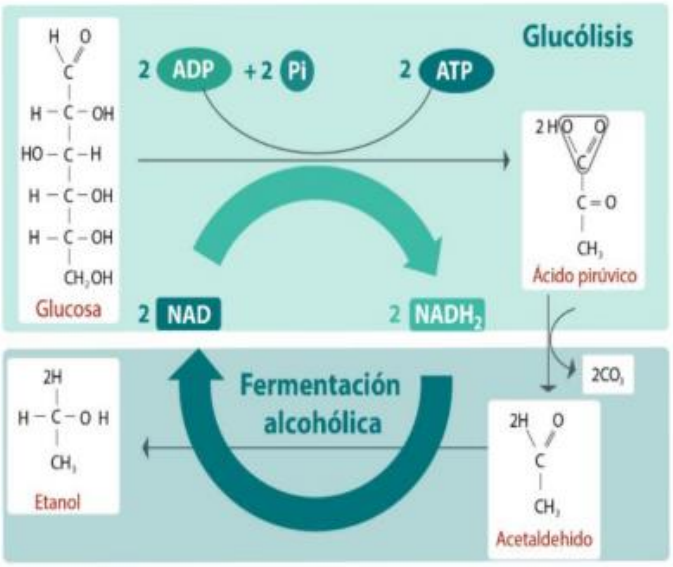


Figura 2. **Proceso de fermentación alcohólica. (Chamorro 2021)**

Durante la fermentación alcohólica no únicamente se generan etanol, dióxido de carbono y energía metabólica, sino que también se forman diversos compuestos secundarios. Entre estos subproductos destacan los alcoholes fusel y son aquellos que corresponden a una mezcla de ácidos orgánicos, aldehídos, ésteres y alcoholes superiores, tales como el propílico, amílico y butílico, comúnmente asociados al efecto conocido como “guayabo” (Chamorro, 2021).

En la industria de la fermentación alcohólica, se emplean casi exclusivamente levaduras, las cuales se seleccionan según el tipo de carbohidrato que se utilizará como materia prima en el

proceso. Por ejemplo, en los procesos fermentativos se utilizan distintas cepas microbianas según el tipo de sustrato disponible; *Saccharomyces cerevisiae* se emplea en la fermentación de hexosas, *Candida pseudotropicalis* para la conversión de lactosa mientras que *Candida utilis* para la fermentación de pentosas. En términos generales, los procesos de producción de etanol suelen alcanzar rendimientos superiores al 90 % del azúcar consumido durante la fermentación. (Carbonero, 1957).

2.2.6. Levaduras

El término levadura se utiliza de manera general para designar a un conjunto de hongos ascomicetos pertenecientes al orden *Endomicetales*. Estos microorganismos corresponden a microhongos formados principalmente por células unicelulares y se distinguen por su capacidad de desarrollarse como organismos anaerobios facultativos (Benavides & Pozo, 2008).

Las levaduras son organismos quimiotróficos, es decir, obtienen su energía a través de la oxidación de compuestos químicos, además, son heterótrofos, ya que se encargan de oxidar moléculas orgánicas, como los azúcares. Estas levaduras son las principales responsables de la fermentación de sustratos en la producción de bebidas alcohólicas, generando etanol, dióxido de carbono y compuestos volátiles (Alcázar, 2016).

2.2.7. Fases del crecimiento de la levadura

Las fermentaciones se desarrollan siguiendo cuatro fases tal como se muestra en la figura 3 y se describe a continuación:

2.2.7.1. Fase de latencia

Durante esta fase las levaduras deben adaptarse a las condiciones del entorno. Cuando las células se transfieren de un medio a otro, inicialmente no se da un aumento de la población de levaduras, ya que en esta etapa las células se están adaptando a su nuevo ambiente, se producen cambios en distintos parámetros debido al inóculo añadido, el valor del pH, el suministro de nutrientes, entre otros (Castro & Suarez, 2004).

2.2.7.2. Fase exponencial o logarítmica

Durante esta etapa el crecimiento de la masa celular se puede describir de manera cuantitativa la cual se ve influenciada por factores como la concentración de nitrógeno que contiene grupos amonio, los nutrientes, la temperatura y la presencia de oxígeno lo cual favorece

la multiplicación de la biomasa o concentración de levaduras por unidad de tiempo (Castro & Suarez, 2004).

En esta fase la actividad metabólica de la levadura se intensifica y la división celular aumenta de manera exponencial. El tiempo de duración de esta fase se ve influenciada principalmente por la levadura, así como por las condiciones de operación, sin embargo, se ve afectada o incluso puede llegar a detenerse por el agotamiento de nutrientes disponibles o también por la acumulación de sustancias tóxicas que se formaron durante el metabolismo de la levadura (Yáñez, 2019)

2.2.7.3. Fase cuasi-estacionaria

Durante esta fase el crecimiento desciende o incluso llega a detenerse, mientras que la biomasa puede aumentar de manera gradual o permanecer constante (Castro & Suarez, 2004).

2.2.7.4. Fase de muerte

Durante esta fase ya no existen reservas de energía. El intervalo de tiempo existente entre la fase estacionaria y esta fase puede verse afectado por el organismo y el proceso utilizado, así mismo en fermentaciones comerciales muchas veces la fermentación se ve interrumpida al final de la fase logarítmica o antes de que se dé la fase de muerte (Castro & Suarez, 2004).

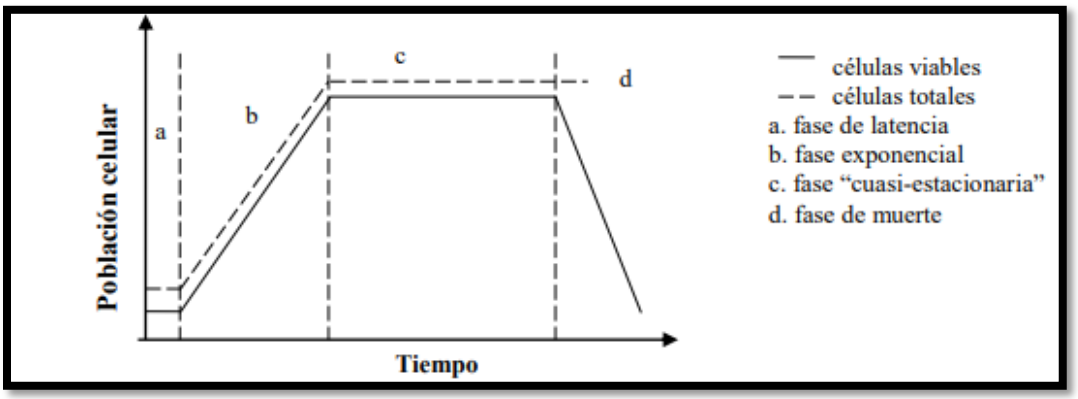


Figura 3. **Crecimiento celular de levaduras. (Alcázar 2016)**

2.2.8. *Saccharomyces cerevisiae*

Saccharomyces cerevisiae es un microorganismo perteneciente al grupo de los hongos ascomicetos, el cual ha sido objeto de extensas investigaciones debido a su relevancia en procesos industriales como la elaboración de pan y bebidas fermentadas, además de su destacada capacidad

para la síntesis de etanol. Esta levadura presenta la facultad de utilizar azúcares simples, entre ellas la fructosa y glucosa, mediante rutas metabólicas tanto respiratorias como fermentativas, lo que le permite desarrollarse eficientemente en ambientes con presencia o ausencia de oxígeno (Agudo,2014).

La levadura de cerveza está constituida por células no viables y desecadas, provenientes principalmente de *Saccharomyces cerevisiae* y, en determinadas ocasiones, de *Saccharomyces ovarum*. Desde épocas remotas, este microorganismo ha sido empleado en la obtención de etanol, demostrando una elevada eficiencia en dicho proceso. La generación de alcohol se lleva a cabo mediante la vía fermentativa, en la cual los azúcares de tipo hexosa son transformados metabólicamente en etanol (Suarez et al., 2016).

Dicho proceso de producción se puede evidenciar en la siguiente reacción:

$$hexosas + levadura \rightarrow etanol + CO_2 + levadura + \Delta$$

La levadura no solo viene a ser un componente que cataliza la reacción, sino que también constituye un producto ya que no se puede eliminar por completo durante la reacción (Suarez et al., 2016).

2.2.9. Factores que afectan el proceso fermentativo

En el proceso fermentativo intervienen factores que afectan directamente la composición de los productos, estos factores son:

2.2.9.1. Factor Temperatura

La fermentación constituye un proceso de naturaleza exotérmica, por lo que las levaduras requieren condiciones térmicas controladas para un desempeño adecuado. Debido a que estos microorganismos se clasifican como mesófilos, su viabilidad se ve comprometida cuando son sometidos a temperaturas cercanas o superiores a los 55 °C, lo que conlleva a su inactivación celular. Asimismo, la temperatura a la que se desarrolla la fermentación incide no solo en el tiempo de duración del proceso y en el rendimiento de etanol obtenido, sino también en las características sensoriales del producto final, incluyendo el aroma, el sabor y la coloración. (Leal et al., 2014).

La temperatura tiene una influencia significativa en el desarrollo de la fermentación alcohólica, debido a que teniendo en cuenta un aumento o disminución de los valores óptimos

puede afectar las actividades enzimáticas. Es recomendable comenzar la fermentación con una temperatura de 20°C ya que impulsa el crecimiento de las levaduras hasta llegar a un máximo de 40°C donde se evidencia una caída de la viabilidad de la levadura (Agudo, 2014).

Del mismo modo como lo mencionan otros autores, la temperatura de fermentación debe ser la que favorezca el desarrollo adecuado de las sustancias volátiles, garantizando así el buen manejo del proceso fermentativo y la posterior obtención del producto deseado. La temperatura ideal para el crecimiento de las levaduras se encuentra entre 25°C y 35°C, y valores inferiores a este rango podrían provocar una ralentización en el proceso fermentativo (Santamaría et al., 1995).

2.2.9.2. Factor pH

Durante el proceso fermentativo el pH debe ser ligeramente ácido para que de esta manera las levaduras puedan realizar su función de manera óptima. Los cambios en el pH afectan principalmente la desnaturalización de las enzimas y pueden generar problemas en el intercambio de iones a través de la membrana celular. El valor óptimo de pH para la fermentación alcohólica con levaduras se encuentra entre 3 y 6 ya que estas condiciones favorecen tanto el crecimiento de las levaduras como su capacidad fermentativa (Agudo, 2014). Sin embargo, para que la fermentación se realice de manera satisfactoria el rango del pH debe estar específicamente entre los valores de 4 a 4,5 (Alcivar, 2017).

2.2.9.3. Factor nutrientes

Las levaduras empleadas en la fermentación necesitan azúcares para llevar a cabo sus funciones vitales, pero también requieren otros nutrientes como nitrógeno, fósforo, carbono, azufre, potasio, magnesio, calcio y vitaminas para su metabolismo. Esto garantiza que el medio disponga de los nutrientes necesarios y permita una fermentación efectiva (Agudo, 2014).

Los aminoácidos, que son la base para la formación de proteínas y, por ende, de células, contienen nitrógeno, un elemento esencial para la construcción de estructuras y para el funcionamiento adecuado de las levaduras. Existen diversas fuentes de nitrógeno que pueden ser utilizadas como nutrientes para las levaduras, tales como:

- **Nitrógeno inorgánico o amoniacal ($NH4^+$):** esta fuente está compuesta principalmente por sales de amonio, como el sulfato amónico y el fosfato diamónico. El amonio es utilizado rápidamente, generalmente en pocas horas después de ser añadido (Agudo, 2014).

- **Nitrógeno orgánico, como los aminoácidos**: estas fuentes de nitrógeno se absorben más lentamente, pero no generan deficiencias, lo que permite procesos de fermentación más eficientes y óptimos (Agudo, 2014).

2.2.9.4. Factor concentración de azúcares reductores

Cuando un medio es rico en azúcares, la transformación de estos compuestos en etanol puede comprometer la viabilidad de las levaduras, debido a que concentraciones osmóticamente elevadas alteran el equilibrio de las membranas celulares. No obstante, existen cepas capaces de soportar altos niveles tanto de azúcares como de alcohol, estableciéndose generalmente un umbral de tolerancia alcohólica cercano a los 14 °GL. Los azúcares comúnmente empleados como sustratos fermentables incluyen la dextrosa, la maltosa, la sacarosa y la lactosa. (Alcívar, 2017).

Generalmente, la concentración de azúcar debe estar entre el 10% y el 22% para que la fermentación sea efectiva. Si se utilizan concentraciones demasiado altas, podrían tener un efecto negativo en las levaduras, ya que el etanol generado podría ralentizar su actividad (Alcívar, 2017).

2.2.9.5. Factor oxigeno

Aunque la producción de etanol se desarrolla en ausencia de oxígeno, la carencia de este elemento durante la etapa inicial de la fermentación puede ocasionar una cinética fermentativa lenta y un crecimiento celular insuficiente de la levadura. Por ello, resulta necesario un aporte controlado de oxígeno al inicio del proceso, ya que este permite sintetizar ácidos grasos insaturados y esteroles, compuestos esenciales para la integridad de la membrana celular. En este contexto, *Saccharomyces cerevisiae* es capaz de desarrollarse en condiciones anaerobias, siempre que previamente haya contado con una fuente exógena de dichos lípidos estructurales. (Robles, 2021).

2.2.9.6. Factor Tasa de inoculación de la levadura

En los procesos fermentativos se sugiere emplear una concentración inicial de levadura cercana a 5×10^6 células por mililitro, lo que corresponde aproximadamente a un intervalo de 1,5 a 6,0 g/L de biomasa en estado húmedo y de 0,3 a 1,2 g/L en base seca. La cantidad de inóculo utilizada debe ajustarse de acuerdo con la densidad del mosto, con el propósito de favorecer una fermentación eficiente sin afectar negativamente la calidad del producto. En este sentido, la concentración de inoculación desempeña un papel determinante en la cinética del proceso fermentativo y en la tasa de crecimiento de la levadura (Robles, 2021).

2.2.8. Destilación

La principal función de la industria destilera es obtener alcohol a partir de mostos fermentados, y las bebidas destiladas se conocen principalmente como aguardientes o licores. No obstante, la destilación se aplica a bebidas alcohólicas cuya concentración de alcohol supere los 20°GL (Benavides & Pozo, 2008).

El principio fundamental de la destilación radica en la distinta volatilidad de los componentes presentes en una mezcla de etanol y agua cuyo esquema general se puede observar en la figura 4. Considerando una presión de 540 mmHg, si el alcohol se somete a calor hasta alcanzar una temperatura que supere su punto de ebullición (78°C), pero sin llegar a alcanzar el de ebullición del agua (100°C), en este momento el alcohol comienza a vaporizarse y separarse del líquido original. De este modo, las bebidas destiladas están compuestas principalmente por alcohol etílico y agua, que se generan en la etapa de fermentación previa (Alcivar, 2017).

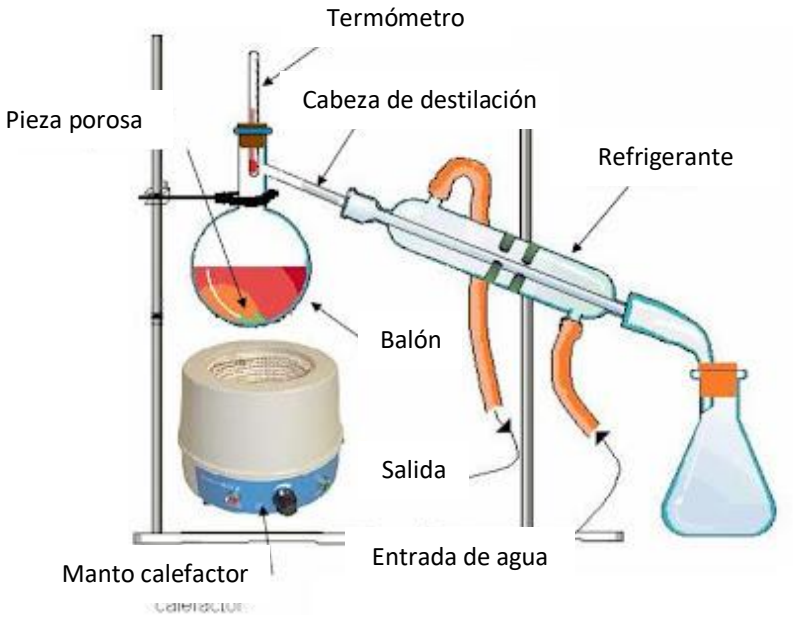


Figura 4. **Esquema general del proceso de destilación. (Carrera 2011)**

2.2.9. Fracciones de destilación

Las fracciones de la destilación lo conforman los componentes de una mezcla, que en este caso viene a ser el mosto, los cuales se pueden separar durante la transición de fases. Algunos de los compuestos presentes en el mosto incluyen acetona, metanol, acetato de etilo, etanol, isopropanol y agua (Chamorro, 2021).

Durante el inicio del proceso de destilación se obtiene una fracción caracterizada por una mayor concentración del componente con mayor volatilidad, correspondiente al etanol. Conforme avanza la operación, la proporción de este compuesto disminuye progresivamente en el destilado, como consecuencia de las diferencias en la volatilidad relativa de los componentes de la mezcla. En razón de ello, el producto destilado se recolecta de manera secuencial en distintos cortes o fracciones, las cuales presentan composiciones y niveles de pureza diferenciados. (Alcivar, 2017).

Durante la destilación de alcohol ocurren cuatro fracciones principales:

- **Primeros cortes:** estos son los primeros componentes obtenidos en la destilación. Esta fracción contiene en su mayoría acetona y debe ser desechada, ya que representa un peligro si se consume (Chamorro, 2021).
- **Las cabezas:** vienen a ser una combinación de acetato de etilo, acetona, etanol y metanol. A menudo, las cabezas se separan para ser sometidas a una posterior destilación, ya que contienen etanol en grandes cantidades (Chamorro, 2021).
- **El corazón:** es la fracción que contiene la mayor concentración de etanol, ya que se obtiene en el intervalo 78-82°C. Esta es la fracción más buscada en la destilación, ya que contiene el producto principal (Chamorro, 2021).
- **La cola:** es la fracción que contiene aceite de fusel en mayor proporción, los cuales pueden causar características no deseadas contenidas en las bebidas, así que generalmente se desechan. Estos compuestos se generan cuando se alcanzan temperaturas de 94 a 95°C (Chamorro, 2021).

Si se busca obtener un alcohol que cumpla con las especificaciones, resulta indispensable alcanzar una concentración próxima al punto azeotrópico y un elevado grado de pureza. Por otro lado, las impurezas deben contener la menor cantidad posible de alcohol (Benavides & Pozo, 2008).

III: HIPÓTESIS Y VARIABLES

3.1. Formulación de hipótesis principal y derivadas

3.1.1. Hipótesis general

El tratamiento del proceso de fermentación alcohólica del mosto de papa Yungay (*Solanum tuberosum*) a determinada temperatura y pH, utilizando cepas de levadura *Saccharomyces cerevisiae* Lalvin-D47 permitirá obtener un rendimiento de etanol mayor al 75% del valor teórico.

3.1.2. Hipótesis especificas

El proceso de fermentación alcohólica de mosto de papa Yungay (*Solanum tuberosum*) utilizando cepas de levadura *Saccharomyces cerevisiae* Lalvin-D47 a temperaturas de 28°C, 30°C y 32°C permitirá obtener etanol con un rendimiento mayor al 75% del valor teórico.

El proceso de fermentación alcohólica de mosto de papa Yungay (*Solanum tuberosum*) utilizando cepas de levadura *Saccharomyces cerevisiae* Lalvin-D47 a pH de 3,5;4 y 4,5 permitirá la obtención de un rendimiento de etanol mayor al 75% del valor teórico.

3.2. Variables

3.2.1. Variables independientes

- Temperatura de fermentación (°C)
- pH de fermentación

3.2.2. Variable dependiente

- Rendimiento de etanol (g/L)

3.3. Operacionalización de variables

Tabla 9.

Operacionalización de variables

N°	Variables	Símbolo	Unidad de medida	Instrumentos
Variables independientes				
1	Temperatura de fermentación	T	°C	Termostato digital
2	pH de fermentación	pH	-	Potenciómetro digital
Variable dependiente				
1	Rendimiento de etanol	Yp/s	g/L	Espectrofotómetro UV/Vis

Fuente: Elaboración propia

IV: METODOLOGIA

4.1. Diseño metodológico

4.1.1. Enfoque de investigación

El presente proyecto se desarrolla bajo un diseño metodológico propio de una investigación de tipo aplicada y con enfoque cuantitativo. De acuerdo con Tamayo (2007), este tipo de investigación se orienta a la verificación de teorías previamente formuladas mediante la determinación de hipótesis derivadas de estas, requiriendo para ello la selección de una muestra representativa del fenómeno o población de estudio, la cual puede obtenerse a través de procedimientos aleatorios o no probabilísticos.

4.1.2. Alcance de la investigación

El presente trabajo de tesis tiene un alcance explicativo, ya que busca establecer la causa-efecto existente entre las variables que hemos planteado, lo cual fue delimitado de acuerdo a lo mencionado por Hernández S. et al. (2017): "El interés de un estudio explicativo se enfoca en explicar la causa de un fenómeno", así mismo el estudio correlacional asocia conceptos y cuantifica la relación existente entre conceptos y variables.

4.1.3. Diseño

De acuerdo con Hernández (2008), los diseños experimentales se emplean cuando el investigador busca determinar el efecto que produce la manipulación de una causa específica, dado que este tipo de estudios se desarrollan bajo condiciones controladas en las que se modifican intencionalmente una o más variables independientes con el propósito de evaluar su impacto sobre variables dependientes. En concordancia con este planteamiento, esta investigación presenta un diseño experimental, ya que se controlan y varían deliberadamente las variables independientes, correspondientes a la temperatura y el pH, con el fin de analizar su influencia sobre la variable dependiente, definida como el rendimiento de etanol.

4.2. Diseño muestral

El diseño experimental es factorial (3^2)

Las pruebas experimentales fueron realizadas usando tres tratamientos

Factores: pH y temperatura

Niveles

- Valores de temperatura: 28°C, 30°C y 32°C
- Valores de pH: 3,5;4 y 4,5

Variables de respuesta: Concentración de etanol (g/L)

La Tabla 10 presenta el esquema del diseño experimental aplicado al proceso de fermentación alcohólica del mosto de papa variedad Yungay, el cual fue desarrollado bajo distintas condiciones pH y temperatura.

Tabla 10.

Diseño experimental para la fermentación alcohólica del mosto de papa Yungay

Prueba	Temperatura	pH
1	28°C	3,5
2	28°C	4,0
3	28°C	4,5
4	30°C	3,5
5	30°C	4,0
6	30°C	4,5
7	32°C	3,5
8	32°C	4,0
9	32°C	4,5

Fuente: Elaboración propia

Se realizaron nueve pruebas experimentales para el proceso de fermentación alcohólica de mosto de papa Yungay a diferentes valores de temperatura y pH tal como se muestra en la tabla 10 y se

midió concentración de azúcares reductores (g/L), concentración de biomasa (g/L) y concentración de etanol (g/L) a diferentes horas de iniciado el proceso de fermentación como distingue en la tabla 11:

Tabla 11.

Intervalos de muestreo en cada prueba experimental

Fase	Intervalo	Tiempos de muestreo (h)
Inicial	Cada 3 h	0,3,6,9,12,15,18,24
Intermedia	Cada 10 h	34,44,54,64,74,84

Fuente: Elaboración propia

4.2.1. Unidad y población

La población objeto de estudio está integrada por el conjunto de unidades experimentales consideradas en la investigación, siendo la unidad experimental las variedades de papa blanca. En este contexto, la población analizada se encuentra representada específicamente por la variedad de papa Yungay.

4.2.2. Muestra

El tamaño de la muestra empleada en el proceso de fermentación es de 10 kg de papa Yungay, cuya cantidad será sometida al proceso de fermentación alcohólica, previamente tratada en una hidrólisis enzimática para la obtención del mosto.

4.3. Procedimiento experimental

4.3.1. Obtención de la materia prima

Los 10 kg de papa Yungay fueron recepcionados directamente desde la provincia de Chupaca, departamento de Junín, previamente seleccionados y los trabajos experimentales fueron realizados en los laboratorios e instalaciones de la facultad de Química e Ingeniería Química de la UNMSM, en la figura 26 (Anexo 2) se evidencia la muestra recolectada de papa Yungay.

4.3.1.1. Caracterización física de la materia prima

Los análisis de tamaño, requisitos de sanidad, aspecto, forma, piel y pulpa de las papas variedad Yungay recolectadas se realizaron de acuerdo a las NTP 011.119 2016 papa y derivados.

4.3.1.2 Obtención del almidón de papa Yungay

La extracción del almidón a partir de la papa variedad Yungay se llevó a cabo mediante la aplicación de molienda húmeda. En primer lugar, la muestra previamente seleccionada fue lavada para la eliminación de la tierra y suciedad, posterior a ello se pelaron y cortaron en pedazos pequeños, para luego con la ayuda de un rayador reducir su tamaño, seguidamente con ayuda de un tamiz se procedió a filtrar la mezcla descartando el residuo, el resultado de la filtración se puso en reposo durante 24 horas con la finalidad de que los gránulos de almidón sean separados del agua y luego sedimentados, posterior a ello se realizó un lavado agregando agua destilada y se volvió a sedimentar por el mismo tiempo. Finalmente, ya sedimentado el almidón se retiró el exceso de agua y se llevó a secar en una estufa por 6 horas a 60°C.

La figura 27 (Anexo 2) evidencia el proceso de obtención del almidón de la papa Yungay, en la figura (a) se observa el proceso de filtración de la papa rayada, en la figura (b) se muestra el proceso de sedimentación del almidón y la figura (c) evidencia la obtención del almidón de la muestra de papa utilizada.

4.3.1.3. Caracterización química de la materia prima

- **% de materia seca**

Se realizó el cálculo de la materia seca siguiendo la metodología descrita por la AOAC 925.10/05, cuyo procedimiento consiste en pesar una pequeña cantidad de la muestra, la cual fue trasladada a una estufa de secado entre 70°C a 80°C hasta que se obtenga un peso constante, luego pasó a ser enfriada y finalmente pesada. La figura 28 (Anexo 2) muestra el proceso de obtención de materia seca del almidón, en la figura (a) se evidencia la muestra de papa antes de ser secada y en la figura (b) se muestra la papa después del proceso de secado para la obtención de materia seca.

En base al peso de la materia seca y muestra antes de ser secada se calculó la cantidad de materia seca en porcentaje mediante la siguiente ecuación:

$$\%\ materia\ seca = \frac{P_{ms}}{P_m} * 100 \quad (1)$$

Donde:

$P_{ms} = Peso\ de\ materia\ seca$

$P_m = Peso\ de\ materia\ antes\ de\ ser\ secada$

- **% de humedad**

Se halló el porcentaje de humedad de la muestra por diferencia a partir del dato obtenido del porcentaje de materia seca, como se evidencia en la siguiente ecuación:

$$\%\ humedad = \frac{P_m - P_{ms}}{P_m} * 100 \quad (2)$$

Donde:

$P_{ms} = Peso\ de\ materia\ seca$

$P_m = Peso\ de\ materia\ antes\ de\ ser\ secada$

- **Cálculo del porcentaje de almidón**

El cálculo del porcentaje de almidón se realizó en base a la cantidad de almidón obtenido por medio del método aplicado, para lo cual se pesó la cantidad de almidón obtenido y se calculó el % de almidón en base a la muestra usando la siguiente ecuación:

$$\%\ almidón = \frac{P_a}{P_{mu}} * 100 \quad (3)$$

Donde:

$P_a: Peso\ del\ almidón\ obtenido$

$P_{mu}: Peso\ de\ la\ muestra$

4.3.2. Proceso de hidrólisis del almidón

La papa previamente seleccionada, lavada y pelada fue licuada para la reducción del tamaño y la obtención de una mezcla, para lograr la hidrólisis del almidón, en primer lugar, se calentó la mezcla a 90°C generando que el almidón se gelatinice, posteriormente se dejó enfriar

hasta mantener una temperatura constante de 72°C y se ajustó el pH a 6,5 mediante el uso del potenciómetro digital utilizando ácido cítrico o bicarbonato de sodio (1 g/L), posterior a esto se agregó alfa-amilasa como enzima (0,4 g de alfa amilasa por cada litro de mezcla) se ajustó nuevamente la temperatura a 72°C y se dejó en un período de reposo de una hora bajo condiciones de agitación, con el propósito de permitir la acción enzimática sobre los enlaces glucosídicos α-1,4 presentes en la amilosa y la amilopectina. para que estas puedan ser transformadas en dextrinas solubles y oligosacáridos, después se calentó la solución a 85°C durante 5 minutos para permitir la desactivación de la enzima.

La solución resultante fue enfriada hasta alcanzar una temperatura de 60 °C, posteriormente se ajustó el pH a un valor de 4,2 mediante la adición de ácido cítrico en una concentración de 1 g/L. A continuación, se incorporó la enzima glucoamilasa en una proporción de 0,4 g por litro de mezcla, manteniéndose el sistema en reposo bajo agitación durante un período de dos horas, con el objetivo de promover la liberación de glucosa a partir de la estructura del almidón. Finalmente, la actividad enzimática fue detenida mediante el calentamiento de la solución a 80 °C durante cinco minutos.

La figura 29 del Anexo 2 evidencia la mezcla de papa durante el proceso de hidrólisis, mientras que en la figura 30 (Anexo 2) se evidencia las enzimas utilizadas, figuras (a): enzima alfa amilasa y (b): enzima glucoamilasa.

4.3.2.1. Análisis de azúcares reductores

El análisis de los azúcares reductores se realizó por la técnica del ácido 3,5-dinitrosalicílico, este método colorimétrico se centra en la reacción que ocurre entre los azúcares reductores y el DNS, para continuar con la determinación espectrofotométrica de los azúcares reductores a 540 nm de absorbancia.

El método consiste en reducir el DNS, inicialmente amarillo por acción de un azúcar reductor convirtiéndose posteriormente a rojo ladrillo cuya presencia puede ser detectada por la lectura de la absorbancia en una zona de 540 nm-600 nm (Miller, 1959).

Durante el proceso de hidrólisis enzimática de almidón de papa Yungay se realizaron de manera preliminar 3 pruebas para cuantificar la cantidad de enzimas a utilizar, así como el tiempo de hidrólisis. Para la determinación de la concentración de azúcares reductores durante la hidrólisis

se utilizó el método de Miller descrito en el párrafo precedente. La figura 31 (Anexo 2) contempla la preparación de las muestras que fueron analizadas en el espectrofotómetro UV-Vis, así como la medición de su absorbancia.

4.3.3. Preparación de los biorreactores

Se utilizaron 9 envases de plástico tipo balde con dispensador de líquidos en la parte inferior de 4000 ml de capacidad y fueron llamados más adelante biorreactores, los cuales fueron esenciales para contener y mezclar el medio de fermentación, con la ayuda de un tapón o sello de fermentación se tapó la boca del envase y se conectó a un airlock el cual debe contener agua destilada o alcohol hasta la mitad de su capacidad. En la figura 32 del Anexo 2, figura (a): se observan los envases que fueron utilizados en el proceso de fermentación alcohólica.

4.3.4. Activación de la levadura

Se dispusieron 100 ml de agua en un vaso de precipitado de 250 ml, el cual fue llevado a ebullición y luego se redujo la temperatura a 32°C, se agregó la levadura (1,2 g/L) y se mantuvo en reposo por 30 minutos, tiempo en el cual la levadura quedó disuelta y se formó espuma en la superficie, señal característica previa a la inoculación en el mosto. La figura 32 del Anexo 2, figura (b) muestra la levadura lista para ser inoculada.

4.3.5. Proceso fermentativo

En un biorreactor se adicionaron 3 L de mosto de papa Yungay, se le agregó fosfato diamónico (DAP) a una concentración de 1,2 g/L para cada prueba, posterior a este procedimiento, el mosto fue inoculado con levadura *Saccharomyces cerevisiae* con 1,2 g/L en base seca previa activación de la levadura, manteniendo valores de temperatura y pH de prueba de acuerdo a la tabla 10.

La figura 32 del Anexo 2, figura (c): muestra los biorreactores utilizados durante la fermentación alcohólica, así mismo, la figura 33 del Anexo 2, figura (a) muestra el nutriente que se empleó, mientras que la figura (b) evidencia la levadura *Saccharomyces cerevisiae* Lalvin D47 utilizada en la fermentación alcohólica.

4.3.5.1 Medición del pH

La medición del pH se realizó haciendo uso de un potenciómetro digital. Se tomaron muestras de 50 ml y se agregaron en vasos de 100 ml, luego se midió el pH utilizando el potenciómetro previamente calibrado.

Para la corrección de la acidez, se agregó ácido cítrico o carbonato de calcio dependiendo de las condiciones de acidez o pH del mosto que fueron fermentados. En la figura 34 (Anexo 2) se muestra la medición del pH el cual fue realizado con el potenciómetro marca Milwaukee.

4.3.5.2. Determinación de la concentración de biomasa producida

La evaluación del crecimiento de las levaduras durante la fermentación alcohólica del mosto de papa variedad Yungay se efectuó mediante el método de determinación de biomasa por secado hasta peso constante. Para ello, se tomó un volumen de 10 mL del caldo de fermentación, el cual fue sometido a centrifugación a 4000 rpm por 15 minutos. El precipitado obtenido fue transferido a un crisol, al que se le adicionaron 10 mL de una solución salina de cloruro de sodio al 0,85 % w/v. Posteriormente, la muestra fue sometida a deshidratación en estufa a 80 °C durante un periodo aproximado de seis horas, hasta alcanzar un peso que no presente variaciones. Finalmente, la biomasa producida se determinó a partir de la diferencia existente entre el peso del crisol con muestra y el peso del crisol sin la muestra. (Robles, 2021).

La figura 35 del Anexo 2 evidencia el proceso para determinar la concentración de biomasa, figura (a): muestras de biomasa siendo centrifugadas, la figura (b): secado de la biomasa para su posterior pesado, mientras que la figura (c): evidencia las muestras listas para ser pesadas.

4.3.5.3. Determinación de la concentración de azúcares reductores

La determinación de los azúcares reductores se llevó a cabo siguiendo el método Miller (1959), empleando el reactivo ácido 3,5-dinitrosalicílico. Este procedimiento se fundamenta en una reacción inducida por calentamiento, en la cual el DNS interactúa con los azúcares reductores del mosto fermentado, provocando la reducción del reactivo DNS. Como consecuencia de este proceso, la muestra experimenta un cambio cromático característico, manifestándose una coloración amarillo-café con tonalidades rojizas, cuya reacción química se ilustra en la Figura 5. (Burgos, 2020)

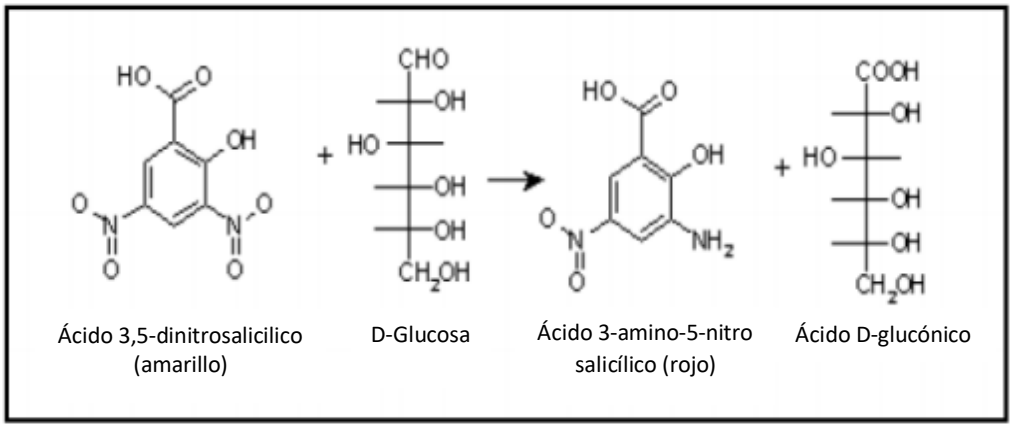


Figura 5. **Método Miller para cuantificación de azúcares reductores. (Robles 2021)**

Para la medición de la concentración de azúcares reductores se construyó una curva de calibración con diferentes concentraciones de glucosa cuya absorbancia fue medida en un espectrofotómetro UV-Vis a una longitud de onda de 540 nm de acuerdo al método de Miller, dichos valores los cuales se aprecian en la tabla 12 permitieron graficar una curva patrón para calcular la concentración de azúcares reductores que serán medidos a lo largo de diferentes tiempos en la fermentación alcohólica. En la figura 6 se observan los valores de absorbancia vs concentración de glucosa para la obtención de azúcares reductores.

Tabla 12.

Valores para la concentración de glucosa y absorbancia para la curva patrón

Concentración de glucosa (g/L)	**Absorbancia**
0,02	0,000
0,10	0,050
0,50	0,377
0,80	0,524
1,00	0,662
1,50	0,929
2,00	1,275

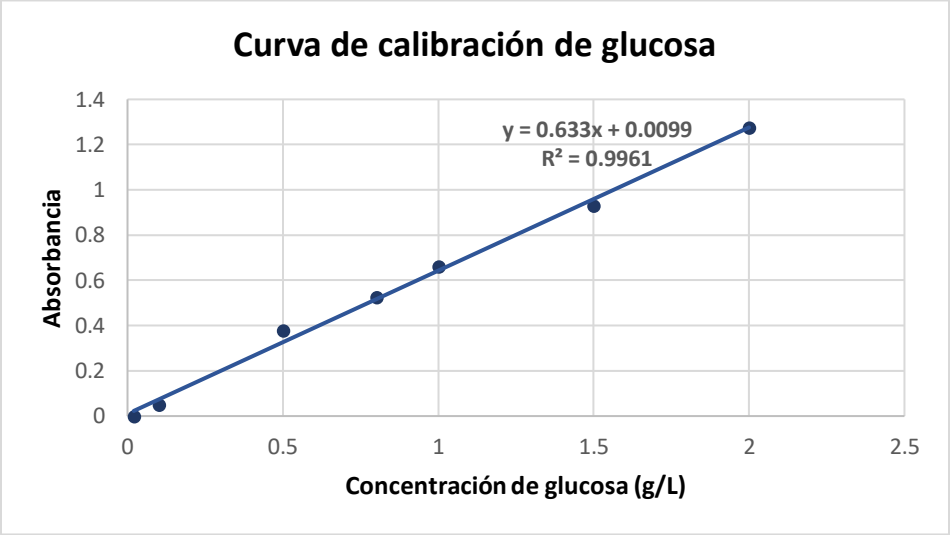


Figura 6. **Curva patrón de glucosa**

La figura 36 del Anexo 2 presenta el espectrofotómetro, así como las muestras con el reactivo DNS para la medición de los azúcares. En la figura (a) se muestra un espectrofotómetro UV-Vis, marca Thermo Modelo GENESYS™ 10S UV/Vis, cuyo instrumento se utilizó para cuantificar los azúcares reductores presentes en el mosto fermentado de papa Yungay considerando una longitud de onda de 540 nm. La figura (b) evidencia aquellas muestras que reaccionaron con DNS para su posterior lectura en el espectrofotómetro.

4.3.5.4. Determinación de la concentración de etanol.

La cuantificación de la concentración de etanol se realizó con el método de espectrofotometría utilizando el reactivo dicromato de potasio en solución ácida, el cual viene a ser un compuesto oxidante de color anaranjado que se reduce por acción del etanol, posteriormente es transformado a sulfato de cromo el cual se caracteriza por ser de color verde azulado. La concentración de etanol puede cuantificarse haciendo uso de un espectrofotómetro UV/Vis a una longitud de onda máxima de 580 nm. Por medio de la siguiente ecuación se puede visualizar la reacción que se produce entre el dicromato de potasio y el etanol en condiciones ácidas para obtener como producto el sulfato de cromo (Robles, 2021).

$$3CH_3CH_2OH + 2K_2Cr_2O_7 + 8H_2SO_{43} \rightarrow 3CH_3COOH + 2Cr_2(SO_4) + 2K_2SO_4 + 11H_2O$$

Anaranjado

Azul verdoso

Para calcular la concentración de etanol se construyó una curva de calibración con diferentes concentraciones de etanol cuya absorbancia fue medida en un espectrofotómetro UV/ Vis a una longitud de onda de 580 nm de acuerdo al método descrito en el párrafo precedente usando como reactivo el dicromato de potasio en solución ácida, dichos valores los cuales se aprecian en la tabla 13 nos permitieron graficar una curva patrón para obtener la concentración de etanol que se produjo en el proceso de fermentación alcohólica. La figura 7 muestra aquellos valores para absorbancia y concentración de etanol de la curva patrón.

Tabla 13.

Valores de absorbancia y concentración de etanol para graficar la curva patrón

Concentración de etanol (g/L)	absorbancia
0,5	0,062
0,8	0,100
0,9	0,112
1,0	0,125
1,5	0,187
2,0	0,249
2,2	0,274
2,5	0,311
3	0,374

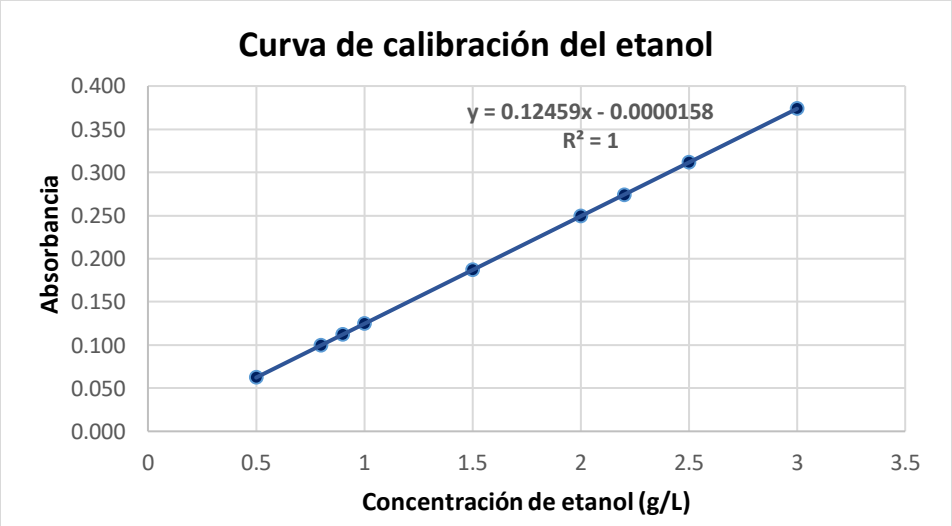


Figura 7. **Curva patrón del etanol**

En la figura 36 (Anexo 2) se evidencia el análisis para la cuantificación de etanol, en la figura (c) se evidencian las muestras reaccionantes con dicromato de potasio para la medición de etanol, dichas muestras fueron medidas en el espectrofotómetro UV-Vis a una longitud de onda de 580 nm.

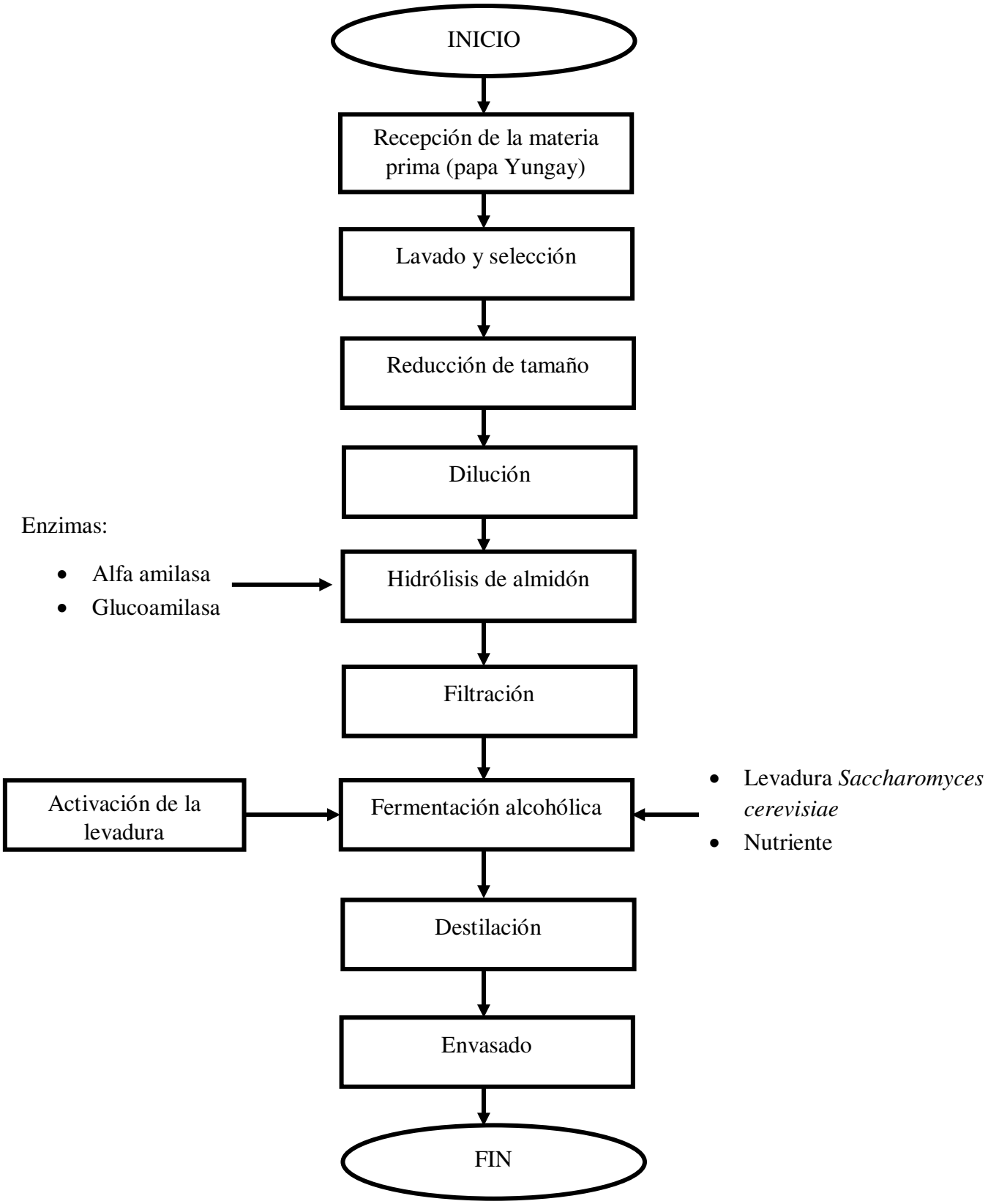
4.3.6. Proceso de destilación

El proceso de destilación de los mostos fermentados se realizó utilizando un destilador de torre rellena con anillos de Raschig de 5 L de capacidad considerando una temperatura de operación la cual fue entre 75°C a 90ºC. Para garantizar la pureza del producto se realizaron 3 procesos de destilación. En la figura 37 (Anexo 2) se muestran los procesos de destilación, figura (a): primera destilación, figura (b): segunda destilación y figura (c): tercera destilación.

4.3.6.1. Determinación del grado alcohólico

Para calcular el grado alcohólico del destilado se siguió el procedimiento haciendo uso de un alcoholímetro. En primer lugar se debe considerar la misma temperatura de la muestra con la temperatura local (generalmente es 20°C), luego se colocaron 100 ml de destilado en una probeta la cual fue previamente lavada y secada, luego se sumergió lentamente el alcoholímetro en el destilado de muestra hasta que este flote, es importante tener en cuenta que el hidrómetro no debe tener burbujas, posteriormente se procedió a realizar la lectura del grado alcohólico teniendo en cuenta que se hace a nivel de superficie del líquido tal como se muestra en la figura 38 (Anexo 2).

4.3.7. Diagramas de flujo del proceso



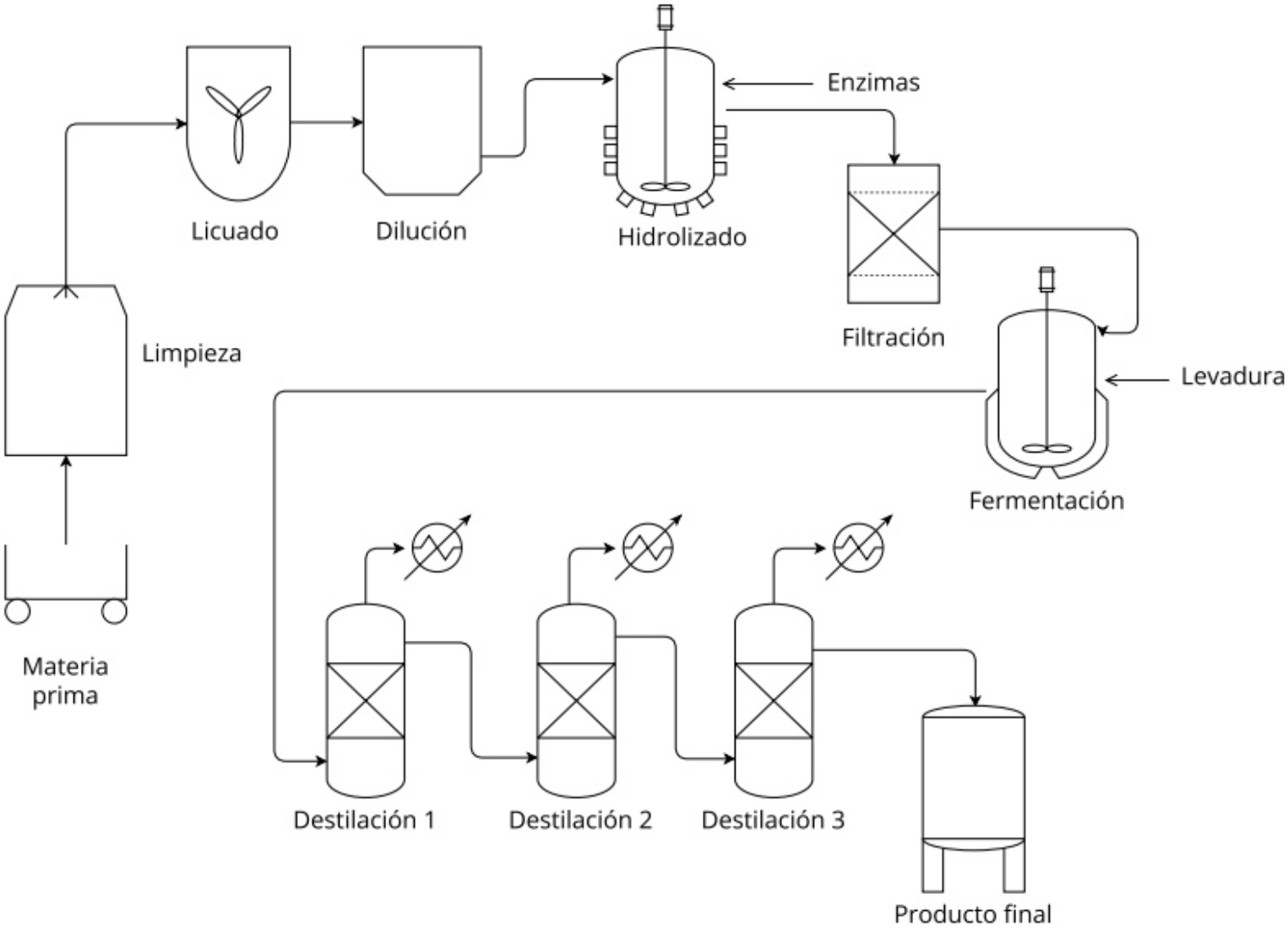


Figura 8. **Diagrama de flujo de proceso para la obtención de etanol a partir de papa**

V: RESULTADOS Y DISCUSIÓN

5.1. Resultados de la caracterización química de la materia prima

Tabla 14.

Características fisicoquímicas de la papa Yungay

Característica fisicoquímica	Porcentaje
Almidón	15,8%
Materia húmeda	76,53%
Materia seca	23,47%

5.2. Resultados del proceso de hidrólisis del almidón

Tabla 15.

Condiciones de operación del proceso de hidrolisis de almidón de papa Yungay

CONDICIONES DE OPERACIÓN		
	Alfa amilasa	Glucoamilasa
Concentración (g/L)	0,4	0,4
Tiempo (Horas)	1	2
pH	6,5	4,2
Temperatura	72°C	60°C

Tabla 16.

Resultados del proceso de hidrólisis enzimática de almidón de papa Yungay

Prueba	Concentración de azúcares reductores (g/L)	Rendimiento de azúcares reductores (%)
1	57,998	91,77
2	58,123	91,97
3	57,486	90,96
4	58,365	92,35
5	58,390	92,39
6	58,107	91,94
7	59,972	94,89
8	59,845	94,69
9	59,860	94,72

5.3. Resultados del proceso de fermentación alcohólica

Como resultado de las pruebas experimentales realizadas se determinó que la prueba 2, la cual se realizó a una temperatura de 28°C y pH 4, una concentración inicial de azúcares reductores igual a 58,123 g/L, concentración de biomasa de 1,2 g/L y concentración de nutriente 1,2 g/L proporcionó mayor concentración de etanol (27,313 g/L), así como el rendimiento más alto tanto de etanol (Yp/s = 0,4744) como de biomasa (Yx/s = 0,1603).

5.4. Resultados de las pruebas experimentales y determinación del rendimiento de etanol y biomasa

5.4.1. Prueba 1 (temperatura de 28°C y pH de 3,5)

Los resultados de las concentraciones de biomasa (g/L), azúcares (g/L) y etanol (g/L), a las condiciones de pH 3,5 y temperatura 28°C se muestran en la tabla 17; así mismo se consideró una concentración de fosfato diamónico como nutriente de 1,2 g/L y levadura 1,2 g/L. El resultado de los rendimientos totales de biomasa y etanol obtenidos para esta prueba fueron (Yx/s = 0,1182) y (Yp/s = 0,4279) respectivamente.

Tabla 17.

Prueba 1 (Temperatura 28°C y pH 3,5)

Prueba 1					
Horas	**Biomasa (g/L)**	**Azúcares (g/L)**	**Etanol (g/L)**	**Yx/s**	**Yp/s**
0	1,2	57,998	0,000	0,0480	0,5102
3	1,5226	51,271	3,432	0,1154	0,4275
6	4,1236	28,733	13,067	0,1158	0,4333
9	6,1314	11,396	20,578	0,1120	0,4257
12	6,7363	5,996	22,877	0,1137	0,4298
15	7,1765	2,123	24,542	0,1162	0,4312
18	7,2935	1,116	24,976	0,1218	0,4261
21	7,3058	1,015	25,019	0,1162	0,4265
24	7,3438	0,688	25,158	0,1194	0,4331
34	7,3684	0,482	25,247	0,1175	0,4355
44	7,3731	0,442	25,265	0,1174	0,4387
54	7,3758	0,419	25,275	0,1211	0,4237
64	7,3763	0,415	25,277	0,1245	0,4259
74	7,3773	0,407	25,280	0,1182	0,4279
84	7,3778	0,403	25,282		

En la figura 9 se observan el consumo de azúcares reductores (0,403 g/L), así como la producción de etanol (25,282 g/L) y biomasa (7,3778 g/L) en función del tiempo.

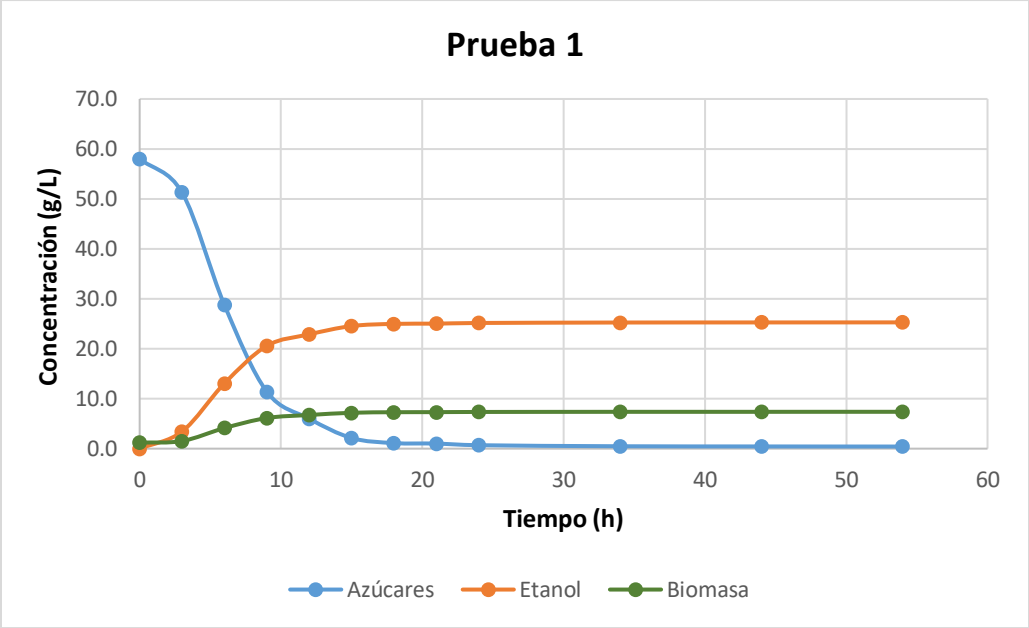


Figura 9. **Concentración de biomasa, etanol y azúcares reductores para la fermentación alcohólica en la prueba 1**

5.4.2. Prueba 2 (temperatura de 28°C y pH de 4)

Los resultados de las concentraciones biomasa (g/L), azúcares (g/L) y etanol (g/L), a las condiciones de pH 4 y temperatura 28°C se muestran en la tabla 18; así mismo se consideró una concentración de fosfato diamónico como nutriente de 1,2 g/L y levadura 1,2 g/L. El resultado de los rendimientos totales de biomasa y etanol obtenidos para esta prueba fueron (Yx/s = 0,1603) y (Yp/s = 0,4744) respectivamente.

Tabla 18.

Prueba 2 (Temperatura 28°C y pH 4)

Prueba 2					
Horas	**Biomasa (g/L)**	**Azúcares (g/L)**	**Etanol (g/L)**	**Yx/s**	**Yp/s**
0	1,2000	58,123	0,000	0,0718	0,4779
3	1,6934	51,251	3,284	0,1409	0,4732
6	4,8725	28,684	13,963	0,1446	0,4705
9	7,5224	10,356	22,588	0,1503	0,4758
12	8,1932	5,894	24,711	0,1510	0,4724
15	8,7657	2,103	26,501	0,1450	0,4754

18	8,9094	1,112	26,972	0,1535	0,4758
21	8,9246	1,013	27,020	0,1549	0,4628
24	8,9771	0,674	27,176	0,1546	0,4745
34	9,0074	0,478	27,269	0,1600	0,4775
44	9,0138	0,438	27,289	0,1594	0,4694
54	9,0174	0,415	27,299	0,1639	0,4918
64	9,0176	0,414	27,300	0,1538	0,4692
74	9,0196	0,401	27,306	0,1603	0,4744
84	9,0221	0,386	27,313		

En la figura 10 se observan el consumo de azúcares reductores (0,386 g/L), así como la producción de etanol (27,313 g/L) y biomasa (9,0221 g/L) en función del tiempo.

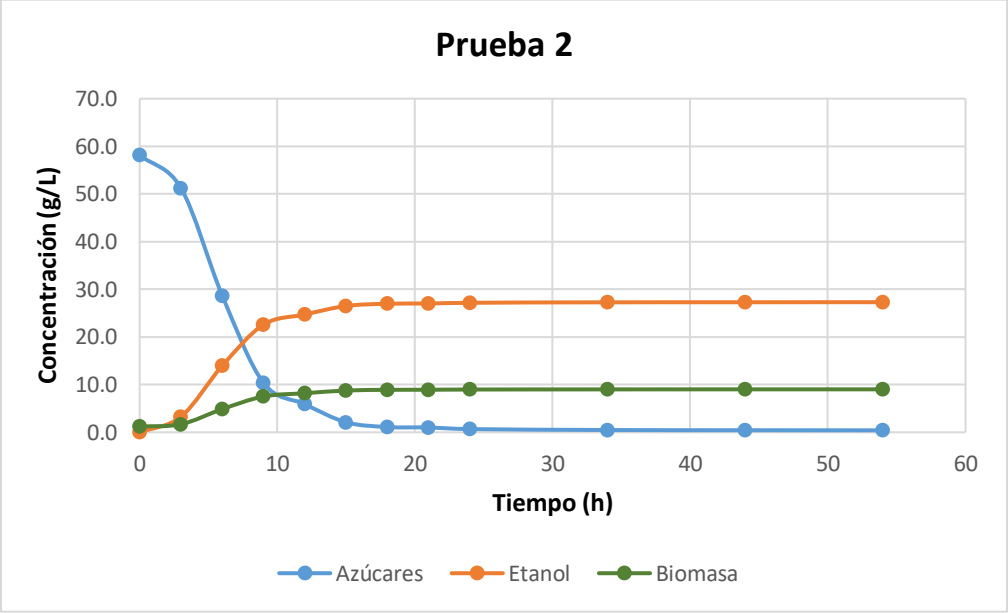


Figura 10. **Concentración de biomasa, etanol y azúcares reductores para la fermentación alcohólica en la prueba 2**

5.4.3. Prueba 3 (temperatura de 28°C y pH de 4,5)

Los resultados de las concentraciones de biomasa (g/L), azúcares (g/L) y etanol (g/L), a las condiciones de pH 4,5 y temperatura 28°C se muestran en la tabla 19; así mismo se consideró una concentración de fosfato diamónico como nutriente de 1,2 g/L y levadura 1,2 g/L. El resultado de los rendimientos totales de biomasa y etanol obtenidos para esta prueba fueron (Yx/s = 0,1087) y (Yp/s = 0,4128) respectivamente.

Tabla 19.

Prueba 3 (Temperatura 28°C y pH 4,5)

Prueba 3					
Horas	**Biomasa (g/L)**	**Azúcares (g/L)**	**Etanol (g/L)**	**Yx/s**	**Yp/s**
0	1,2000	57,486	0,000	0,0354	0,5607
3	1,3839	52,293	2,912	0,1064	0,3916
6	3,7758	29,817	11,713	0,0953	0,3933
9	5,4369	12,394	18,566	0,0966	0,4023
12	5,9842	6,726	20,846	0,0996	0,4169
15	6,3615	2,936	22,426	0,1013	0,3903
18	6,4982	1,587	22,952	0,1068	0,4117
21	6,5328	1,263	23,086	0,0983	0,4135
24	6,5737	0,847	23,258	0,0906	0,4086
34	6,5989	0,569	23,371	0,1065	0,4109
44	6,6038	0,523	23,390	0,0911	0,3978
54	6,6079	0,478	23,408	0,0992	0,4017
64	6,6100	0,457	23,417	0,0970	0,3987
74	6,6109	0,448	23,420	0,1087	0,4128
84	6,6115	0,443	23,422		

En la figura 11 se observan el consumo de azúcares reductores (0,443 g/L), así como la producción de etanol (23,422 g/L) y biomasa (6,6115 g/L) en función del tiempo.

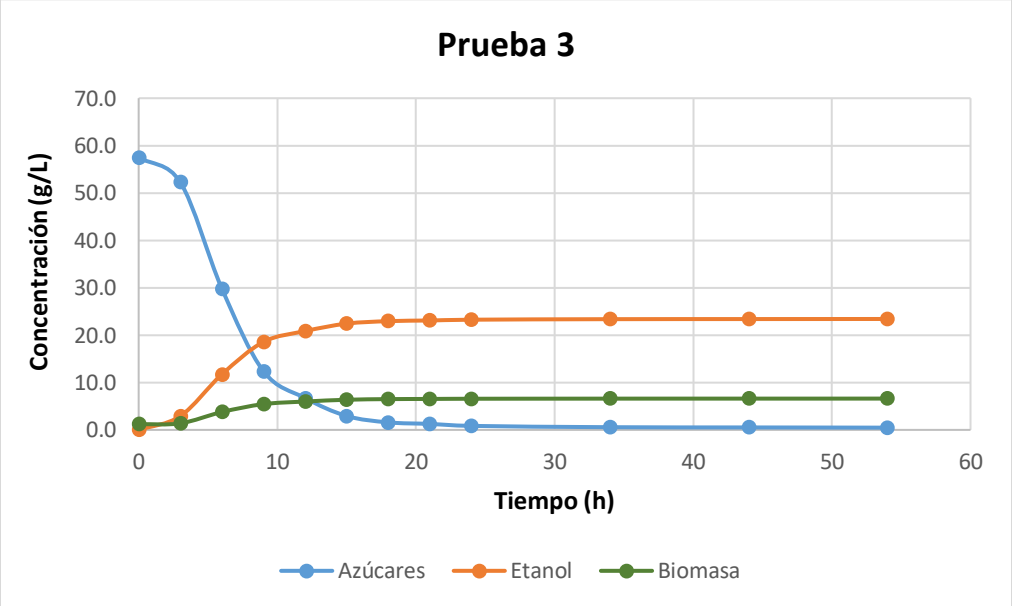


Figura 11. **Concentración de biomasa, etanol y azúcares reductores para la fermentación alcohólica en la prueba 3**

5.4.4. Prueba 4 (temperatura de 30°C y pH de 3,5)

Los resultados de las concentraciones de biomasa (g/L), azúcares (g/L) y etanol (g/L), a las condiciones de pH 3,5 y temperatura 30°C se muestran en la tabla 20; así mismo se consideró una concentración de fosfato diamónico como nutriente de 1,2 g/L y levadura 1,2 g/L. El resultado de los rendimientos totales de biomasa y etanol obtenidos para esta prueba fueron (Yx/s = 0,1020) y (Yp/s = 0,4209) respectivamente.

Tabla 20.

Prueba 4 (Temperatura 30°C y pH 3,5)

Prueba 4					
Horas	**Biomasa (g/L)**	**Azúcares (g/L)**	**Etanol (g/L)**	**Yx/s**	**Yp/s**
0	1,2000	58,365	0,000	0,0611	0,4884
3	1,4958	53,521	2,365	0,1116	0,4318
6	4,5829	25,863	14,309	0,1167	0,4379
9	6,3525	10,698	20,950	0,1025	0,4230
12	6,9145	5,215	23,269	0,1010	0,4222
15	7,1124	3,255	24,097	0,1003	0,4142
18	7,1364	3,015	24,196	0,1001	0,4204
21	7,1921	2,459	24,430	0,1039	0,4267
24	7,2015	2,368	24,469	0,1120	0,4385
34	7,3374	1,155	25,001	0,1078	0,4357
44	7,3467	1,068	25,038	0,1083	0,4392
54	7,3791	0,769	25,170	0,1066	0,4334
64	7,4101	0,479	25,296	0,1029	0,4252
74	7,4139	0,442	25,312	0,1020	0,4209
84	7,4155	0,426	25,318		

En la figura 12 se observan el consumo de azúcares reductores (0,426 g/L), así como la producción de etanol (25,318 g/L) y biomasa (7,4155 g/L) en función del tiempo.

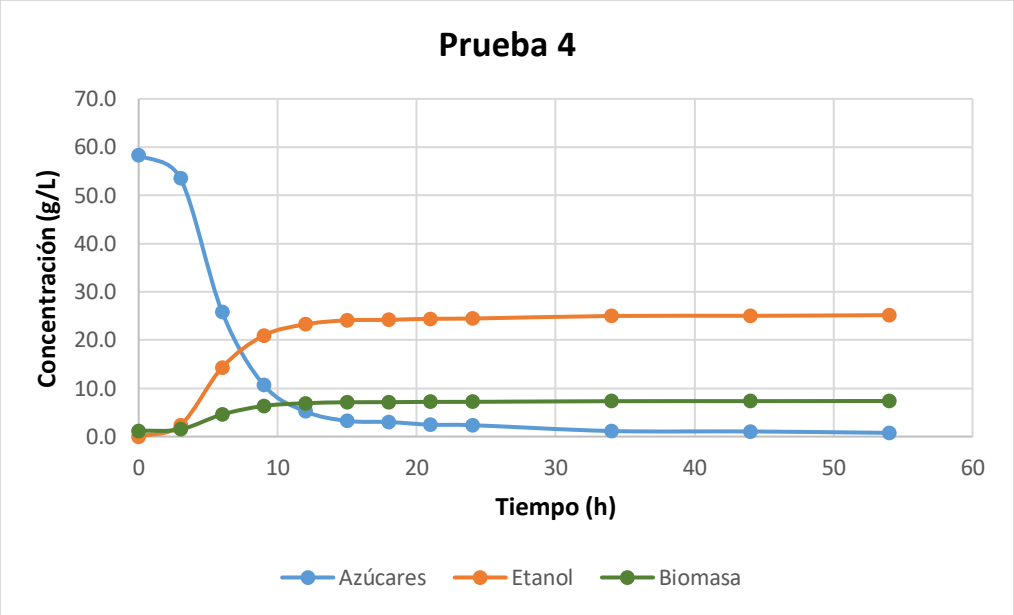


Figura 12. **Concentración de biomasa. etanol y azúcares reductores para la fermentación alcohólica en la prueba 4**

5.4.5. Prueba 5 (temperatura de 30°C y pH de 4)

Los resultados de las concentraciones de biomasa (g/L), azúcares (g/L) y etanol (g/L), a las condiciones de pH 4 y temperatura 30°C se muestran en la tabla 21; así mismo se consideró una concentración de fosfato diamónico como nutriente de 1,2 g/L y levadura 1,2 g/L. El resultado de los rendimientos totales de biomasa y etanol obtenidos para esta prueba fueron (Yx/s = 0,1148) y (Yp/s = 0,4426) respectivamente.

Tabla 21.

Prueba 5 (Temperatura 30°C y pH 4)

Prueba 5					
Horas	**Biomasa (g/L)**	**Azúcares (g/L)**	**Etanol (g/L)**	**Yx/s**	**Yp/s**
0	1,2000	58,390	0,000	0,0354	0,4248
3	1,4452	51,458	2,945	0,1191	0,4382
6	4,4118	26,539	13,865	0,1260	0,4570
9	6,4246	10,564	21,166	0,1142	0,4428
12	7,0509	5,079	23,595	0,1149	0,4499
15	7,2823	3,065	24,500	0,1213	0,4539
18	7,3379	2,606	24,709	0,1117	0,4429
21	7,3468	2,527	24,744	0,1105	0,4427
24	7,4315	1,760	25,083	0,1231	0,4527
34	7,4891	1,292	25,295	0,1219	0,4502

44	7,5549	0,752	25,538	0,1182	0,4493
54	7,5704	0,621	25,597	0,1120	0,4481
64	7,5731	0,597	25,608	0,1168	0,4530
74	7,5936	0,422	25,687	0,1148	0,4426
84	7,5943	0,416	25,690		

En la figura 13 se observan el consumo de azúcares reductores (0,416 g/L), así como la producción de etanol (25,690 g/L) y biomasa (7,5943 g/L) en función del tiempo.

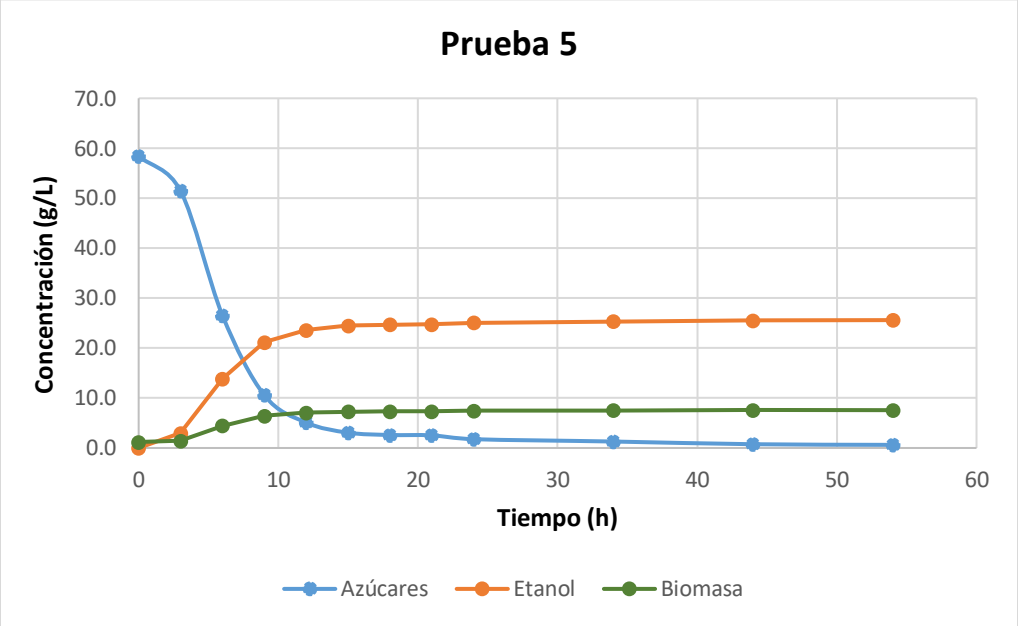


Figura 13. **Concentración de biomasa, etanol y azúcares reductores para la fermentación alcohólica en la prueba 5**

5.4.6. Prueba 6 (temperatura de 30°C y pH de 4,5)

Los resultados de las concentraciones de biomasa (g/L), azúcares (g/L) y etanol (g/L), a las condiciones de pH 4,5 y temperatura 30°C se muestran en la tabla 22; así mismo se consideró una concentración de fosfato diamónico como nutriente de 1,2 g/L y levadura 1,2 g/L. El resultado de los rendimientos totales de biomasa y etanol obtenidos para esta prueba fueron (Yx/s = 0,0971) y (Yp/s = 0,4142) respectivamente.

Tabla 22.

Prueba 6 (Temperatura 30°C y pH 4,5)

Prueba 6					
Horas	**Biomasa (g/L)**	**Azúcares (g/L)**	**Etanol (g/L)**	**Yx/s**	**Yp/s**
0	1,2000	58,107	0,000	0,0339	0,5293
3	1,3468	53,779	2,291	0,0998	0,4249
6	4,1344	25,855	14,156	0,0995	0,4268
9	5,2257	14,883	18,839	0,0973	0,4105
12	5,9159	7,788	21,752	0,1052	0,4160
15	6,2337	4,768	23,008	0,1054	0,4284
18	6,4215	2,986	23,771	0,0979	0,4119
21	6,4558	2,635	23,916	0,0998	0,4224
24	6,4652	2,541	23,955	0,0932	0,4198
34	6,5381	1,759	24,284	0,1034	0,4269
44	6,5788	1,365	24,452	0,1012	0,4258
54	6,6145	1,013	24,602	0,0926	0,4178
64	6,6281	0,866	24,663	0,1014	0,4232
74	6,6552	0,598	24,777	0,0971	0,4142
84	6,6712	0,434	24,845		

En la figura 14 se observan el consumo de azúcares reductores (0,434 g/L), así como la producción de etanol (24,845 g/L) y biomasa (6,6712 g/L) en función del tiempo.

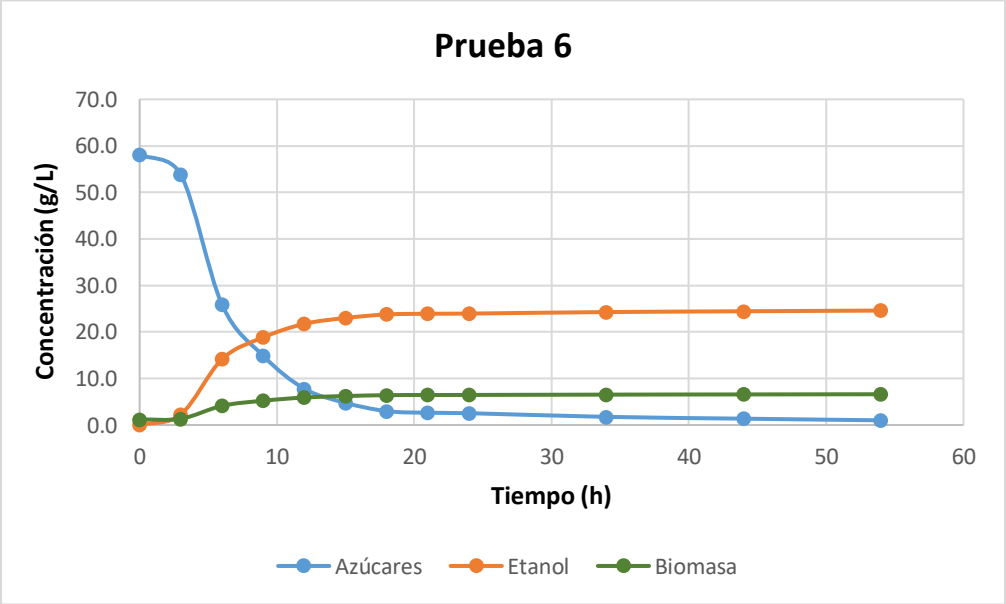


Figura 14. **Concentración de biomasa, etanol y azúcares reductores para la fermentación alcohólica en la prueba 6**

5.4.7. Prueba 7 (temperatura de 32°C y pH de 3,5)

Los resultados de las concentraciones de biomasa (g/L), azúcares (g/L) y etanol (g/L), a las condiciones de pH 3,5 y temperatura 32°C se muestran en la tabla 23; así mismo se consideró una concentración de fosfato diamónico como nutriente de 1,2 g/L y levadura 1,2 g/L. El resultado de los rendimientos totales de biomasa y etanol obtenidos para esta prueba fueron (Yx/s = 0,0961) y (Yp/s = 0,3939) respectivamente.

Tabla 23.

Prueba 7 (Temperatura 32°C y pH 3,5)

Prueba 7					
Horas	**Biomasa (g/L)**	**Azúcares (g/L)**	**Etanol (g/L)**	**Yx/s**	**Yp/s**
0	1,2000	59,972	0,000	0,0347	0,6124
3	1,3468	55,738	2,593	0,0947	0,3960
6	1,9784	49,069	5,234	0,0940	0,3953
9	4,1257	26,231	14,262	0,0871	0,3868
12	5,4159	11,424	19,989	0,0951	0,3941
15	5,9615	5,685	22,251	0,0883	0,3887
18	6,1874	3,125	23,246	0,0842	0,3825
21	6,2325	2,590	23,451	0,0856	0,3873
24	6,2819	2,013	23,674	0,0963	0,3927
34	6,3037	1,785	23,764	0,0888	0,3860
44	6,3525	1,236	23,975	0,0937	0,3944
54	6,3891	0,846	24,130	0,0910	0,3893
64	6,4085	0,633	24,213	0,0943	0,3903
74	6,4164	0,549	24,245	0,0961	0,3939
84	6,4183	0,529	24,253		

En la figura 15 se observan el consumo de azúcares reductores (0,529 g/L), así como la producción de etanol (24,253 g/L) y biomasa (6,4183 g/L) en función del tiempo.

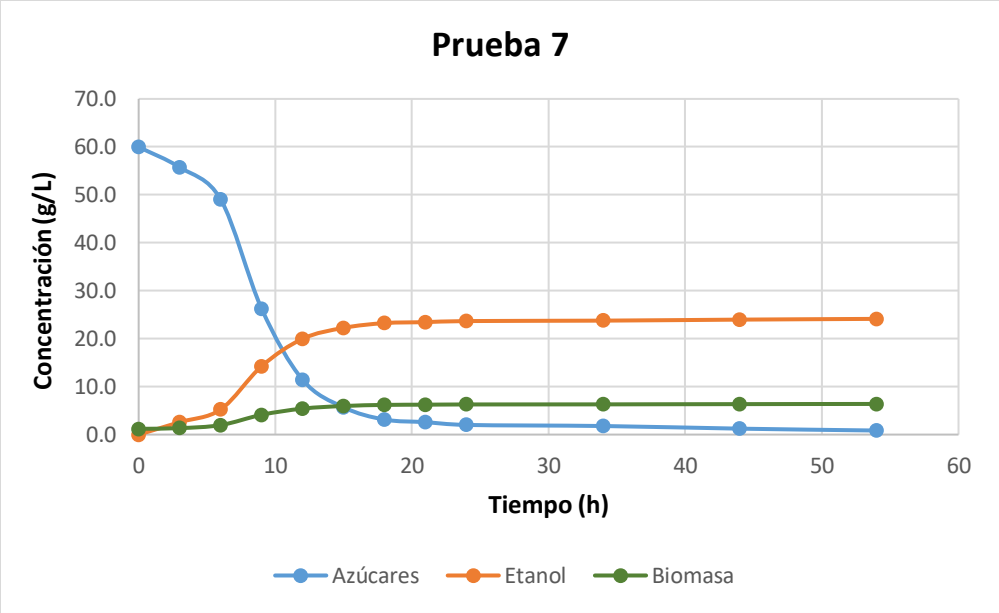


Figura 15. **Concentración de biomasa, etanol y azúcares reductores para la fermentación alcohólica en la prueba 7**

5.4.8. Prueba 8 (temperatura de 32°C y pH de 4)

Los resultados de las concentraciones de biomasa (g/L), azúcares (g/L) y etanol (g/L), a las condiciones de pH 4 y temperatura 32°C se muestran en la tabla 24; así mismo se consideró una concentración de fosfato diamónico como nutriente de 1,2 g/L y levadura 1,2 g/L. El resultado de los rendimientos totales de biomasa y etanol obtenidos para esta prueba fueron (Yx/s = 0,1055) y (Yp/s = 0,4079) respectivamente.

Tabla 24.

Prueba 8 (Temperatura 32°C y pH 4)

Prueba 8					
Horas	**Biomasa (g/L)**	**Azúcares (g/L)**	**Etanol (g/L)**	**Yx/s**	**Yp/s**
0	1,2000	59,845	0,000	0,0624	0,6285
3	1,4568	55,727	2,589	0,1046	0,4111
6	2,3024	47,644	5,911	0,1018	0,4015
9	4,5457	25,613	14,756	0,1057	0,4174
12	6,1159	10,760	20,956	0,0966	0,4005
15	6,6737	4,988	23,268	0,0925	0,3996
18	6,8485	3,099	24,023	0,0961	0,4018
21	6,9072	2,488	24,269	0,0956	0,3927
24	6,9552	1,986	24,466	0,0959	0,3964
34	6,9774	1,754	24,558	0,0921	0,3943

44	7,0283	1,201	24,775	0,1032	0,4067
54	7,0702	0,795	24,941	0,0931	0,3943
64	7,0882	0,602	25,017	0,0824	0,3926
74	7,0936	0,537	25,042	0,1055	0,4079
84	7,0964	0,510	25,053		

En la figura 16 se observan el consumo de azúcares reductores (0,510 g/L), así como la producción de etanol (25,053 g/L) y biomasa (7,0964 g/L) en función del tiempo.

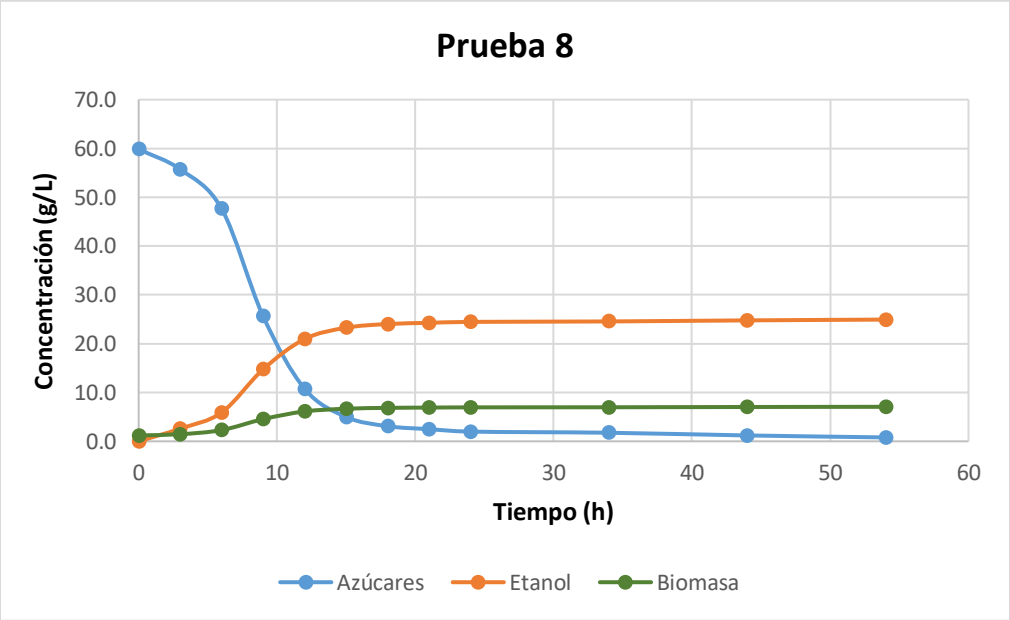


Figura 16. **Concentración de biomasa, etanol y azúcares reductores para la fermentación alcohólica en la prueba 8**

5.4.9. Prueba 9 (temperatura de 32°C y pH de 4,5)

Los resultados de las concentraciones de biomasa (g/L), azúcares (g/L) y etanol (g/L), a las condiciones de pH 4,5 y temperatura 32°C se muestran en la tabla 25; así mismo se consideró una concentración de fosfato diamónico como nutriente de 1,2 g/L y levadura 1,2 g/L. El resultado de los rendimientos totales de biomasa y etanol obtenidos para esta prueba fueron (Yx/s = 0,1187) y (Yp/s = 0,4168) respectivamente.

Tabla 25.

Prueba 9 (Temperatura 32°C y pH 4,5)

Prueba 9					
Horas	**Biomasa (g/L)**	**Azúcares (g/L)**	**Etanol (g/L)**	**Yx/s**	**Yp/s**
0	1,2000	59,860	0,000	0,0384	0,5431
3	1,3468	56,040	2,075	0,1091	0,4064
6	2,4344	46,069	6,128	0,1157	0,4155
9	4,2557	30,333	12,666	0,1122	0,4147
12	6,2459	12,590	20,025	0,1089	0,4099
15	7,0837	4,896	23,179	0,1139	0,4159
18	7,2656	3,299	23,843	0,1027	0,4017
21	7,3614	2,366	24,218	0,1041	0,4085
24	7,4144	1,857	24,425	0,1142	0,4102
34	7,4325	1,699	24,490	0,1166	0,4120
44	7,4949	1,163	24,711	0,1081	0,4046
54	7,5423	0,725	24,888	0,1151	0,4133
64	7,5568	0,599	24,941	0,1146	0,4132
74	7,5631	0,544	24,963	0,1187	0,4168
84	7,5680	0,502	24,980		

En la figura 17 se observan el consumo de azúcares reductores (0,502 g/L), así como la producción de etanol (24,980 g/L) y biomasa (7,5680 g/L) en función del tiempo.

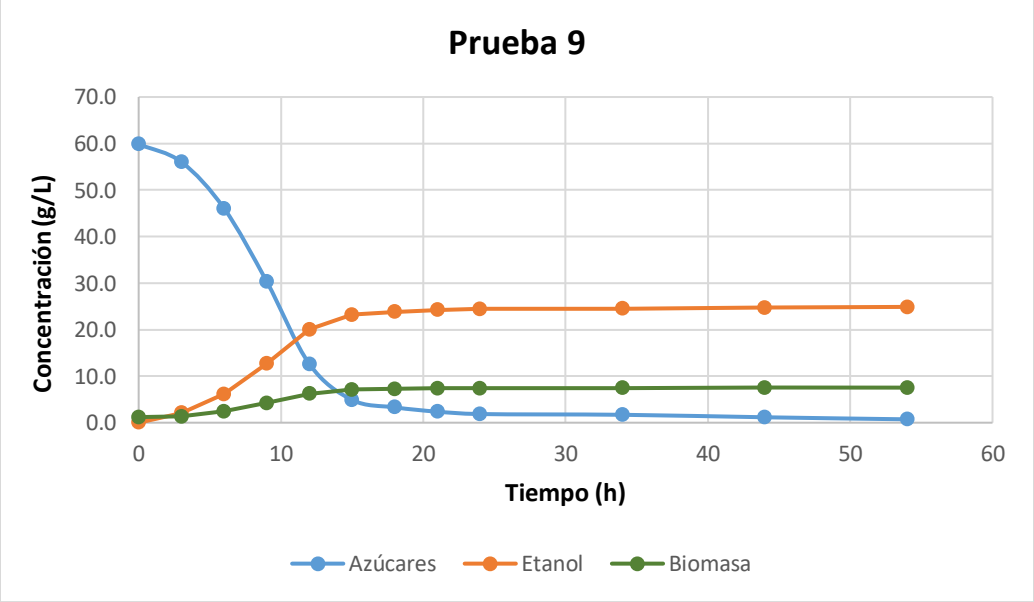


Figura 17. **Concentración de biomasa, etanol y azúcares reductores para la fermentación alcohólica en la prueba 9**

En la tabla 26 se puede evidenciar los valores registrados para la concentración de biomasa para las diferentes mediciones realizadas durante la fermentación alcohólica. De los resultados se puede observar que la prueba 2, cuyas condiciones de operación fueron temperatura 28°C y pH 4 arrojaron el rendimiento más alto de biomasa (Yx/s = 0,1603).

Tabla 26.

Concentración de biomasa en g/L y rendimiento para las 9 pruebas experimentales

Producción de biomasa									
Horas	**Pruebas**								
	1	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**7**	**8**	**9**
0	1,2000	1,2000	1,2000	1,2000	1,2000	1,2000	1,2000	1,2000	1,2000
3	1,5226	1,6934	1,3839	1,4958	1,4452	1,3468	1,3468	1,4568	1,3468
6	4,1236	4,8725	3,7758	4,5829	4,4118	4,1344	1,9784	2,3024	2,4344
9	6,1314	7,5224	5,4369	6,3525	6,4246	5,2257	4,1257	4,5457	4,2557
12	6,7363	8,1932	5,9842	6,9145	7,0509	5,9159	5,4159	6,1159	6,2459
15	7,1765	8,7657	6,3615	7,1124	7,2823	6,2337	5,9615	6,6737	7,0837
18	7,2935	8,9094	6,4982	7,1364	7,3379	6,4215	6,1874	6,8485	7,2656
21	7,3058	8,9246	6,5328	7,1921	7,3468	6,4558	6,2325	6,9072	7,3614
24	7,3438	8,9771	6,5737	7,2015	7,4315	6,4652	6,2819	6,9552	7,4144
34	7,3684	9,0074	6,5989	7,3374	7,4891	6,5381	6,3037	6,9774	7,4325
44	7,3731	9,0138	6,6038	7,3467	7,5549	6,5788	6,3525	7,0283	7,4949
54	7,3758	9,0174	6,6079	7,3791	7,5704	6,6145	6,3891	7,0702	7,5423
64	7,3763	9,0176	6,6100	7,4101	7,5731	6,6281	6,4085	7,0882	7,5568
74	7,3773	9,0196	6,6109	7,4139	7,5936	6,6552	6,4164	7,0936	7,5631
84	7,3778	9,0221	6,6115	7,4155	7,5943	6,6712	6,4183	7,0964	7,5680
Yx/s	0,1182	0,1603	0,1087	0,1020	0,1148	0,0971	0,0961	0,1055	0,1187

En la figura 18 se graficó la biomasa producida la cual refleja que para las condiciones trabajadas en la prueba 2 se alcanzó el rendimiento más alto de biomasa llegándose a obtener al finalizar el proceso de fermentación alcohólica 9,0221 g/L de biomasa.

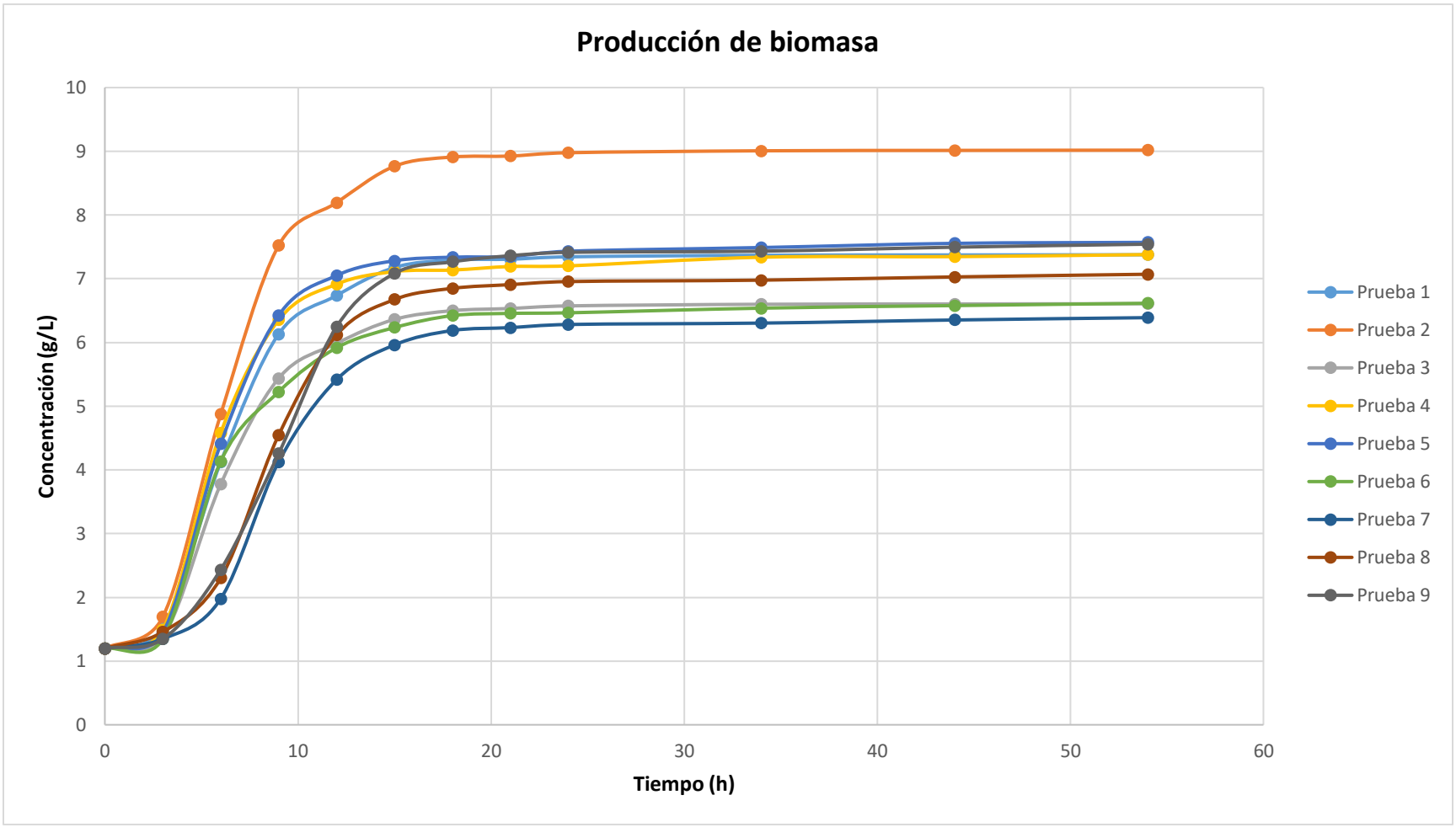


Figura 18. **Producción de biomasa para las 9 pruebas experimentales de fermentación alcohólica**

En la tabla 27 se puede evidenciar las concentraciones registradas de azúcares reductores de las diferentes pruebas realizadas durante la fermentación alcohólica. De los resultados se puede apreciar que la prueba 2, cuyas condiciones de operación fueron temperatura 28°C y pH 4 registra una mayor rapidez en el consumo de azúcares reductores.

Tabla 27.

Concentración de azúcares reductores para las 9 pruebas experimentales

Azúcares reductores									
Horas	**Pruebas**								
	1	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**7**	**8**	**9**
0	57,998	58,123	57,486	58,365	58,390	58,107	59,972	59,845	59,860
3	51,271	51,251	52,293	53,521	51,458	53,779	55,738	55,727	56,040
6	28,733	28,684	29,817	25,863	26,539	25,855	49,069	47,644	46,069
9	11,396	10,356	12,394	10,698	10,564	14,883	26,231	25,613	30,333
12	5,996	5,894	6,726	5,215	5,079	7,788	11,424	10,760	12,590
15	2,123	2,103	2,936	3,255	3,065	4,768	5,685	4,988	4,896
18	1,116	1,112	1,587	3,015	2,606	2,986	3,125	3,099	3,299
21	1,015	1,013	1,263	2,459	2,527	2,635	2,590	2,488	2,366
24	0,688	0,674	0,847	2,368	1,760	2,541	2,013	1,986	1,857
34	0,482	0,478	0,569	1,155	1,292	1,759	1,785	1,754	1,699
44	0,442	0,438	0,523	1,068	0,752	1,365	1,236	1,201	1,163
54	0,419	0,415	0,478	0,769	0,621	1,013	0,846	0,795	0,725
64	0,415	0,414	0,457	0,479	0,597	0,866	0,633	0,602	0,599
74	0,407	0,401	0,448	0,442	0,422	0,598	0,549	0,537	0,544
84	0,403	0,386	0,443	0,426	0,416	0,434	0,529	0,510	0,502

En la figura 19 se graficó el consumo de azúcares reductores el cual refleja que para las condiciones trabajadas en la prueba 2 se obtuvo una mayor rapidez de consumo llegándose a obtener al finalizar la fermentación alcohólica 0,386 g/L de azúcares reductores.

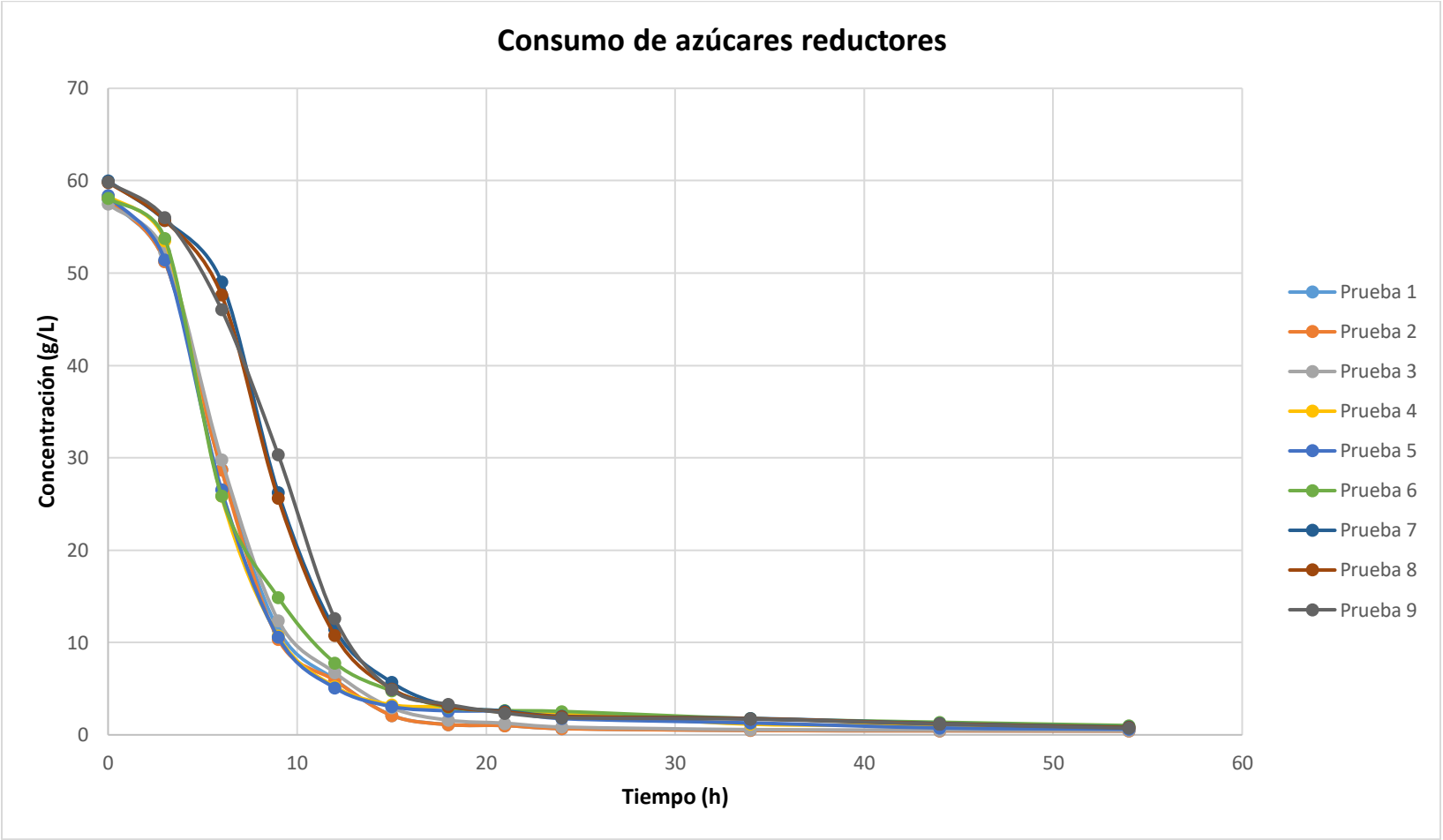


Figura 19. **Consumo de azucares reductores para las 9 pruebas de fermentación alcohólica**

En la tabla 28 se puede evidenciar los valores registrados para la concentración de etanol de las diferentes mediciones realizadas durante la fermentación alcohólica. A partir de los resultados se puede observar que la prueba 2, cuyas condiciones de operación fueron temperatura 28°C y pH 4 arrojaron el rendimiento más alto de etanol (Yp/s = 0,4744).

Tabla 28.

Concentración de etanol en g/L y rendimiento para las 9 pruebas experimentales

Producción de etanol									
Horas	**Pruebas**								
	1	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**7**	**8**	**9**
0	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
3	3,432	3,284	2,912	2,365	2,945	2,291	2,593	2,589	2,075
6	13,067	13,963	11,713	14,309	13,865	14,156	5,234	5,911	6,128
9	20,578	22,588	18,566	20,950	21,166	18,839	14,262	14,756	12,666
12	22,877	24,711	20,846	23,269	23,595	21,752	19,989	20,956	20,025
15	24,542	26,501	22,426	24,097	24,500	23,008	22,251	23,268	23,179
18	24,976	26,972	22,952	24,196	24,709	23,771	23,246	24,023	23,843
21	25,019	27,020	23,086	24,430	24,744	23,916	23,451	24,269	24,218
24	25,158	27,176	23,258	24,469	25,083	23,955	23,674	24,466	24,425
34	25,247	27,269	23,371	25,001	25,295	24,284	23,764	24,558	24,490
44	25,265	27,289	23,390	25,038	25,538	24,452	23,975	24,775	24,711
54	25,275	27,299	23,408	25,170	25,597	24,602	24,130	24,941	24,888
64	25,277	27,300	23,417	25,296	25,608	24,663	24,213	25,017	24,941
74	25,280	27,306	23,420	25,312	25,687	24,777	24,245	25,042	24,963
84	25,282	27,313	23,422	25,318	25,690	24,845	24,253	25,053	24,980
Yp/s	0,4279	0,4744	0,4128	0,4209	0,4426	0,4142	0,3939	0,4079	0,4168

En la figura 20 se graficó la producción de etanol el cual refleja que para las condiciones trabajadas en la prueba 2 se obtuvo una mayor concentración de etanol llegándose a obtener al finalizar la fermentación alcohólica 27,313 g/L de etanol.

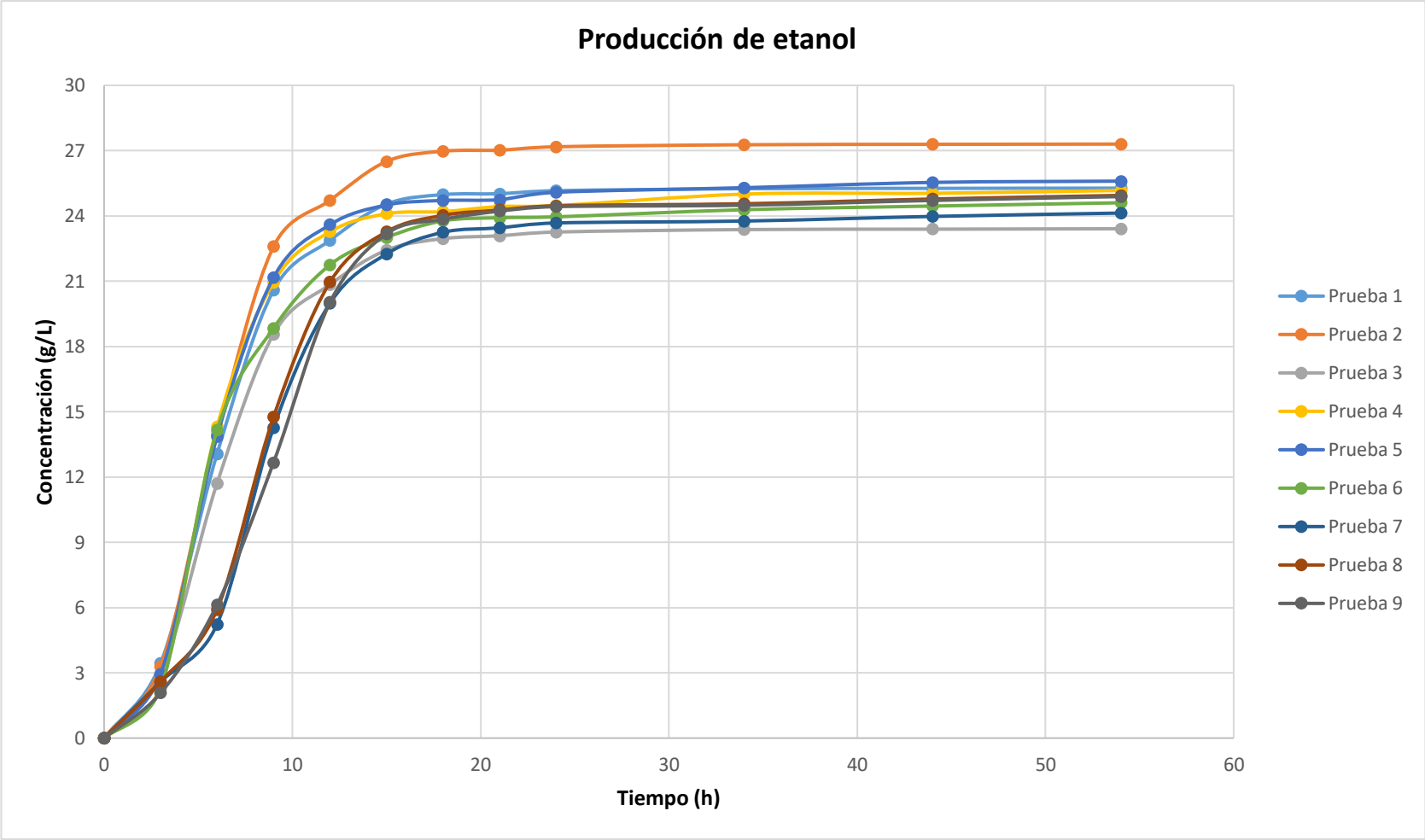


Figura 20. **Producción de etanol para las 9 pruebas experimentales de fermentación alcohólica**

5.5. Eficiencia de la fermentación

Durante el proceso de fermentación alcohólica la reacción de la conversión de azúcares en etanol y dióxido de carbono se evidencia mediante la siguiente reacción:

$$C_6H_{12}O_6 \rightarrow 2C_2H_5OH + 2CO_2$$

La conversión estequiométrica de la glucosa en etanol establece un valor máximo teórico de producción de 0,511 g de etanol. Tomando este parámetro como referencia, se analizó el desempeño del proceso fermentativo a partir de los valores experimentales de rendimiento de etanol obtenidos, con el fin de determinar la eficiencia real de la fermentación.

Tabla 29.

Eficiencia de la fermentación para las 9 pruebas experimentales

Prueba	Yp/s	Eficiencia (%)
1	0,4279	83,74
2	0,4744	92,83
3	0,4128	80,79
4	0,4209	82,37
5	0,4426	86,62
6	0,4142	81,06
7	0,3939	77,07
8	0,4079	79,82
9	0,4168	81,56

El cálculo de la eficiencia de la fermentación se realizó mediante la siguiente ecuación:

$$e = \frac{Y_{p/s}(experimental)}{Y_{p/s}(teórico)} * 100 \quad (4)$$

Se calculó la eficiencia para la prueba 2, en la cual se muestra el rendimiento de etanol exprimental mas alto:

$$e = \frac{0{,}4744}{0{,}511} * 100$$

$$e = 92{,}83\%$$

5.6. Productividad de la fermentación

Tabla 30.

Productividad de la fermentación para las 9 pruebas experimentales

Prueba	Producción total de etanol (g/L)	Productividad
1	25,28	0,30
2	27,31	0,33
3	23,42	0,28
4	25,32	0,30
5	25,69	0,31
6	24,84	0,30
7	24,25	0,29
8	25,05	0,30
9	24,98	0,30

El cálculo de la productividad de la fermentación se realizó mediante la siguiente ecuación:

$$Productividad = \frac{produccion\ de\ etanol\ (g/L)}{Tiempo\ (h)} \quad (5)$$

Se calculó la productividad de la prueba 2, la cual arrojó la mayor producción de etanol al finalizar el proceso de fermentación alcoholica:

$$Productividad = \frac{27{,}31\ g\ de\ etanol/L}{84\ h}$$

$$Productividad = 0{,}33\ g.L^{-1}.h^{-1}$$

5.6. Resultados del proceso de destilación

Tabla 31.

Resultados del proceso de destilación del mosto de papa Yungay

Peso de materia prima (Papa Yungay)	Volumen de etanol	Graduación alcohólica
3,5 kg	340 ml	64° GL

5.7. Balance de materia y energía

Considerando las condiciones que generó el mayor rendimiento de etanol obtenidos de las nueve pruebas experimentales se realizó un cambio de escala para 24 litros de mezcla (papa licuada y agua), cuyo proceso de fermentación alcohólica se realizó posteriormente en un fermentador de la marca Blichmann con capacidad de 27 litros, el cual incluye control de temperatura, tiempo y velocidad de agitación y se muestra en la figura 39 (Anexo 2), se realizó el balance de materia y energía de las diferentes etapas para la producción de una bebida alcohólica tipo vodka de acuerdo a lo plasmado en las siguientes tablas:

Tabla 32.

Balance de materia para el proceso de licuado de la papa Yungay

	Entrada (kg)	**Salida (kg)**
Componente	F1	F2
Papa pelada	7,00	-
Papa licuada	-	7,00
Total	**7,00**	**7,00**

Tabla 33.

Balance de materia para el proceso de hidrólisis enzimática de almidón de papa Yungay

		Entrada (kg)			**Salida (kg)**
Componente	F3	F4	F5	F6	F7
Papa licuada	7,00	-	-	-	7,00
Agua	-	17,00	-	-	17,00
Enzima *alfa amilasa*	-	-	0,01	-	0,01
Enzima *glucoamilasa*	-	-	-	0,01	0,01
Total	**7,00**	**17,00**	**0,01**	**0,01**	**24,02**

Tabla 34.

Balance de materia para el proceso de filtración

	Entrada (kg)	**Salida (kg)**	
Componentes	F8	F9	F10
Mosto	24,02	-	-
Mosto filtrado	-	20,02	-
Bagazo	-	-	4,00
Total	**24,02**	**20,02**	**4,00**

Tabla 35.

Balance de materia en el proceso de fermentación

	Entrada (kg)			**Salida (kg)**					
Componentes	F11	F12	F13	F14	F15	F16	F17	F18	F19
Azúcares presentes en el mosto	1,16	-	-	-	-	-	-		-
Agua presente en el mosto	-	18,84	-	-	-	-	-	-	-
Levadura	-	-	0,02	-	-	-	-	-	-
Etanol	-	-	-	0,55	-	-	-	-	-
Azúcar residual	-	-	-	-	0,01	-	-	-	-
CO_2	-	-	-	-	-	0,32	-	-	-
Biomasa	-	-	-	-	-	-	0,18	-	-
Otros componentes	-	-	-	-	-	-	-	0,12	-
Agua	-	-	-	-	-	-	-	-	18,85
Total	**1,16**	**18,84**	**0,02**	**0,55**	**0,01**	**0,32**	**0,18**	**0,12**	**18,85**

Tabla 36.

Balance de materia para el proceso de destilación

	Entrada (kg)		**Salida (kg)**	
Componentes	F20	F21	F22	F23
Etanol	0,55	-	0,35	-
Otros componentes de la fermentación	-	19,47	-	-
Residuos	-	-	-	19,67
Total	**0,55**	**19,47**	**0,35**	**19,67**

Tabla 37.

Balance de energía para el proceso de hidrólisis enzimática de almidón de papa Yungay

Calor total del proceso de hidrólisis enzimática			
Proceso de gelatinización del almidón			
	Símbolo	Unidades	Valor
Mezcla	F9	kg	20,02
Temperatura al inicio	Ti	°C	20,00
Temperatura al final	Tf	°C	90,00
Diferencia de Temperatura	ΔT	°C	70,00
Calor especifico	Cp	kJ/kg°C	3,98
Calor sensible	Q	kJ	5577,57
Proceso de dextrinización o licuefacción			
	Símbolo	Unidades	Valor
Mezcla	F9	kg	20,02
Temperatura al inicio	Ti	°C	90,00
Temperatura al final	Tf	°C	72,00
Diferencia de Temperatura	ΔT	°C	-18,00
Calor especifico	Cp	kJ/kg°C	3,98
Calor sensible	Q	kJ	-1434,23

Proceso de sacarificación			
	Símbolo	Unidades	Valor
Mezcla	F9	kg	20,02
Temperatura al inicio	Ti	°C	72,00
Temperatura al final	Tf	°C	60,00
Diferencia de Temperatura	ΔT	°C	-12,00
Calor especifico	Cp	kJ/kg°C	3,98
Calor sensible	Q	kJ	-956,16
Calor total	**Qt**	**kJ**	**3187,18**

Tabla 38.

Balance de energía del proceso de fermentación alcohólica

Calor desprendido de la reacción			
	Simbolo	Unidades	Valor
Glucosa	$C_6H_{12}O_6$	mol	6,44
Etanol	C_2H_5OH	mol	11,94
Dióxido de carbono	CO_2	mol	7,27
Entalpía de formación de la glucosa	$\Delta H°_f$	kJ/mol	-79,00
Entalpia de formación del etanol	$\Delta H°_f$	kJ/mol	-269,29
Entalpia de formación del CO_2	$\Delta H°_f$	kJ/mol	-393,50
Calor desprendido de la reacción	**Q**	**kJ**	**-5567,31**

Tabla 39.

Balance de energía del proceso de destilación

Calor sensible del proceso de destilación			
	Símbolo	Unidades	Valor
Mezcla fermentada	F20 + F21	kg	20,02
Temperatura al inicio	Ti	°C	20,00
Temperatura al final	Tf	°C	90,00
Diferencia de Temperatura	ΔT	°C	70,00
Calor especifico	Cp	kJ/kg°C	4,18
Calor sensible	Q	kJ	5857,85
Calor latente del proceso de destilación			
	Símbolo	Unidades	Valor
Etanol	F22	kg	0,35
Entalpía de vaporización del etanol	H	kJ/kg	841,00
Calor latente	Q	kJ	294,35
Calor total	**Qt**	**kJ**	**6152,20**

5.8. Técnicas estadísticas para el procesamiento de la información

El tratamiento estadístico del proceso de fermentación alcohólica se realizó mediante el software IBM SPSS Statistics Versión 27.

5.8.1. Tratamiento estadístico de la producción de etanol

Prueba paramétrica

Como etapa inicial del análisis estadístico, se evaluó la distribución de los datos mediante una prueba de normalidad, con el propósito de verificar el cumplimiento del supuesto de normalidad. En función de los resultados obtenidos, se procedió a definir el enfoque estadístico más adecuado, estableciendo si correspondía la aplicación de métodos paramétricos o no paramétricos.

Prueba de hipótesis

- (Ho) hipótesis nula: Los datos presentan una distribución normal
- (Ha) hipótesis alterna: Los datos presentan una distribución no normal

Nivel de significación

- Confianza del 95%
- Significancia del 5%

Pruebas de normalidad

Tabla 40.

Pruebas de normalidad para la concentración de etanol

	Kolmogorov-Smirnov			Shapiro-Wilk		
	Estadístico	**GL**	**p**	**Estadístico**	**GL**	**p**
Tiempo	0,090	135	0,010	0,946	135	0,000
Prueba	0,113	135	0,000	0,931	135	0,000
Etanol	0,312	135	0,000	0,688	135	0 ,000

La evaluación de la normalidad de los datos experimentales correspondientes a la concentración de etanol se llevó a cabo en el software IBM SPSS Statistics. Dado que el tamaño muestral es mayor que 50, se optó por la aplicación de la prueba de Kolmogorov-Smirnov como método estadístico para la verificación de la distribución de los datos.

Tabla 41.

Prueba Kolmogorov-Smirnov para normalidad

	Estadístico	**gl**	**p**
Tiempo	0,090	135	0,010
Prueba	0,113	135	0,000
Etanol	0,312	135	0,000

Criterio de decisión.

- Cuando el valor de p es $<$ a 0,05, entonces de acepta Ha y se rechaza Ho
- Cuando el valor de p es $\geq$ a 0,05, entonces se acepta Ho y se rechaza Ha

Conclusión y Decisión

Dado que el valor de p obtenido es < 0,05, se procedió a rechazar la hipótesis nula y aceptar la hipótesis alterna, lo que indica que los datos no presentan una distribución normal. En consecuencia, se determinó la aplicación de métodos estadísticos no paramétricos para el análisis de los resultados.

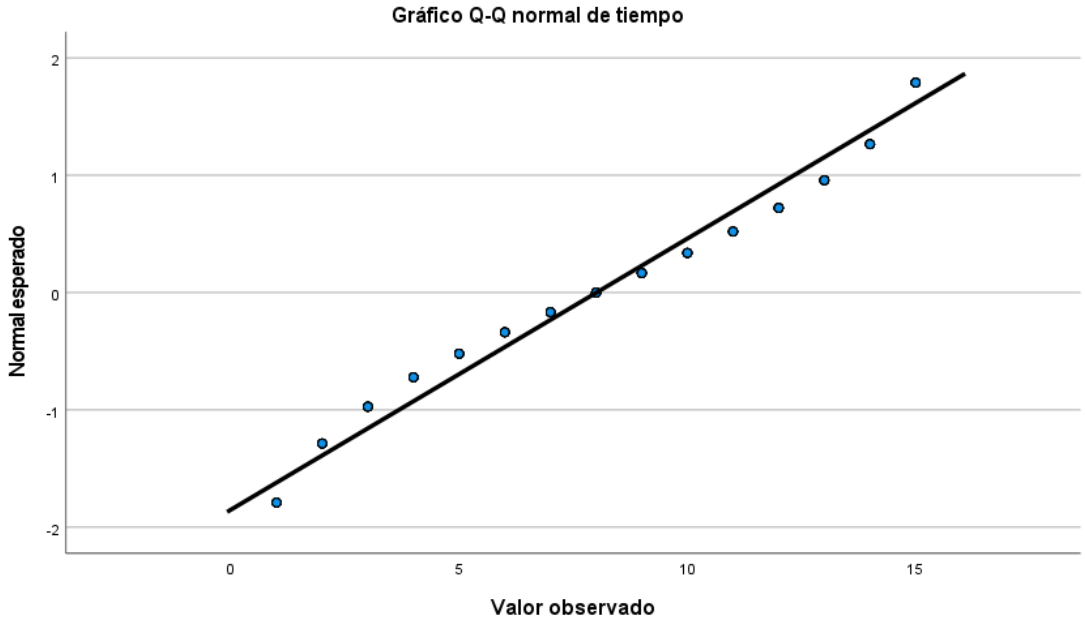


Figura 21. **Gráfico de normalidad en función del tiempo**

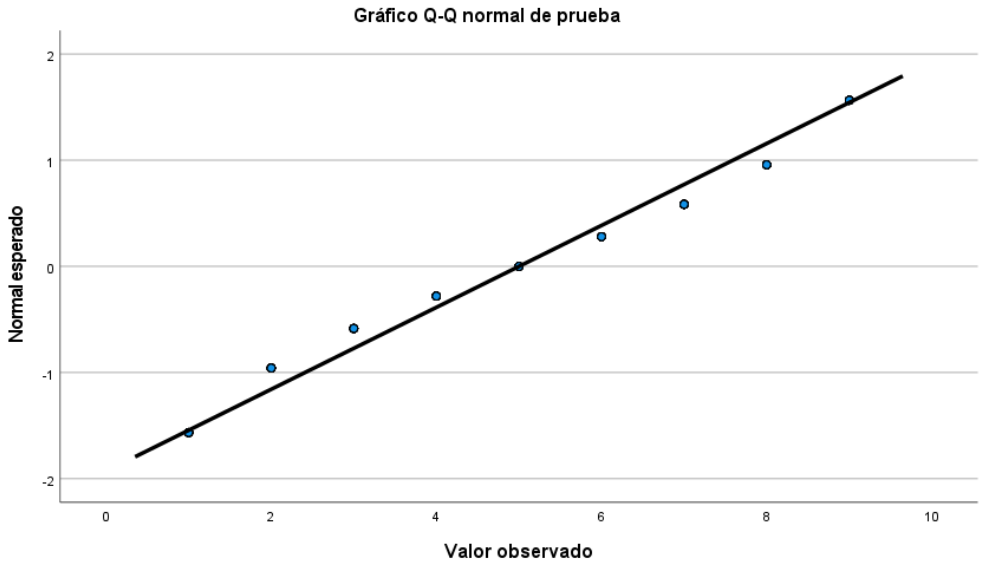


Figura 22. **Gráfico de normalidad en función de la prueba experimental**

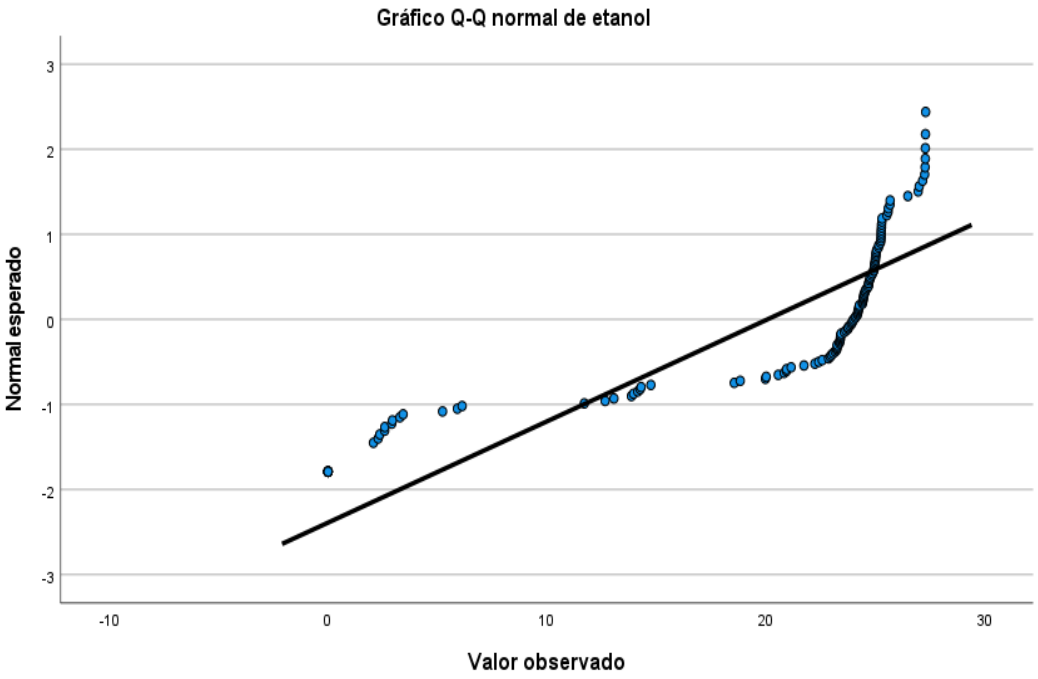


Figura 23. **Gráfico de normalidad en función de la concentración de etanol**

En la figura 23 se observa una gráfica típica de distribución no normal para el etanol lo cual comprueba el criterio de decisión al aceptar la hipótesis alternativa, en virtud de esta condición de no normalidad, se determinó la aplicación de un enfoque estadístico no paramétrico, empleándose específicamente la prueba de correlación de Spearman para el análisis de los datos.

Prueba de correlación de Spearman

El análisis de la relación entre el tiempo, las pruebas experimentales y la concentración de etanol se efectuó mediante la aplicación de la prueba de correlación de Spearman, utilizando el software IBM SPSS Statistics.

Tabla 42.

Prueba de correlación en función del tiempo, prueba y etanol

			Tiempo	Prueba	Etanol
Rho de Spearman	Tiempo	ρ	1,000	0,003	0,818
		Sig. (bilateral)	.	0,976	0,000
		N	135	135	135
	Prueba	ρ	0,003	1,000	-0,198
		Sig. (bilateral)	0,976	.	0,021
		N	135	135	135
	Etanol	ρ	0,818	-0,198	1,000
		Sig. (bilateral)	0,000	0,021	.
		N	135	135	135

Se aplica la prueba de correlación de Spearman debido a que se está empleando la estadistica no paramétrica.

Tabla 43.

Correlación de Spearman para la concentración de etanol

Correlación de Spearman				
		ρ	p	N
Tiempo -	Etanol	0,818	0,000	135
Prueba-	Etanol	-0,198	0,021	135

Planteamiento de hipótesis

- Ho: $\rho = 0$ (no existe correlación entre el tiempo y la concentración de etanol)
- Ha: $\rho \neq 0$ (si existe correlación entre el tiempo y la concentración de etanol)

Nivel de significancia

- Alfa es igual a 0,05

Regla de decisión

- Cuando el valor de p es < a 0,05, entonces de acepta Ha y se rechaza Ho
- Cuando el valor de p es ≥ a 0,05, entonces se acepta Ho y se rechaza Ha

Como $p < 0,05$, existe relación significativa entre tiempo y concentración de etanol; la relación es directa, es decir, a mayor tiempo mayor concentración de etanol.

Análisis univariado de varianza

El análisis de varianza univariado permite evaluar el comportamiento de una variable dependiente a través de procedimientos de regresión y análisis de varianza, considerando la influencia de uno o varios factores o variables independientes.

Prueba de hipótesis

- Ho: El tiempo no influye en la concentración de etanol
- Ha: El tiempo influye en la concentración de etanol

Tabla 44.

Prueba de efectos inter-sujetos

Variable dependiente: Concentración de etanol					
Origen	Tipo III de suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	F	Sig.
Modelo corregido	9239,518[a]	22	419,978	206,850	0,000
Intersección	54023,438	1	54023,438	26607,897	0,000
Tiempo	9064,214	14	647,444	318,882	0,000
Prueba	193,992	8	24,249	11,943	0,000
Error	227,400	112	2,030		
Total	63885,405	135			
Total corregido	9466,918	134			

a. R al cuadrado = 0,976 (R al cuadrado ajustada = 0,971)

Nivel de significancia

- Alfa es igual a 0,05

Regla de decisión

- Cuando el valor de p es < a 0,05, entonces de acepta Ha y se rechaza Ho
- Cuando el valor de p es ≥ a 0,05, entonces se acepta Ho y se rechaza Ha

Como $p < 0,05$ se puede inferir que el tiempo tiene influencia en la concentración de etanol.

Las medias marginales estimadas (MME) se definen como las medias de la variable de respuesta (concentración etanol) para diferentes niveles de un factor (tiempo y prueba).

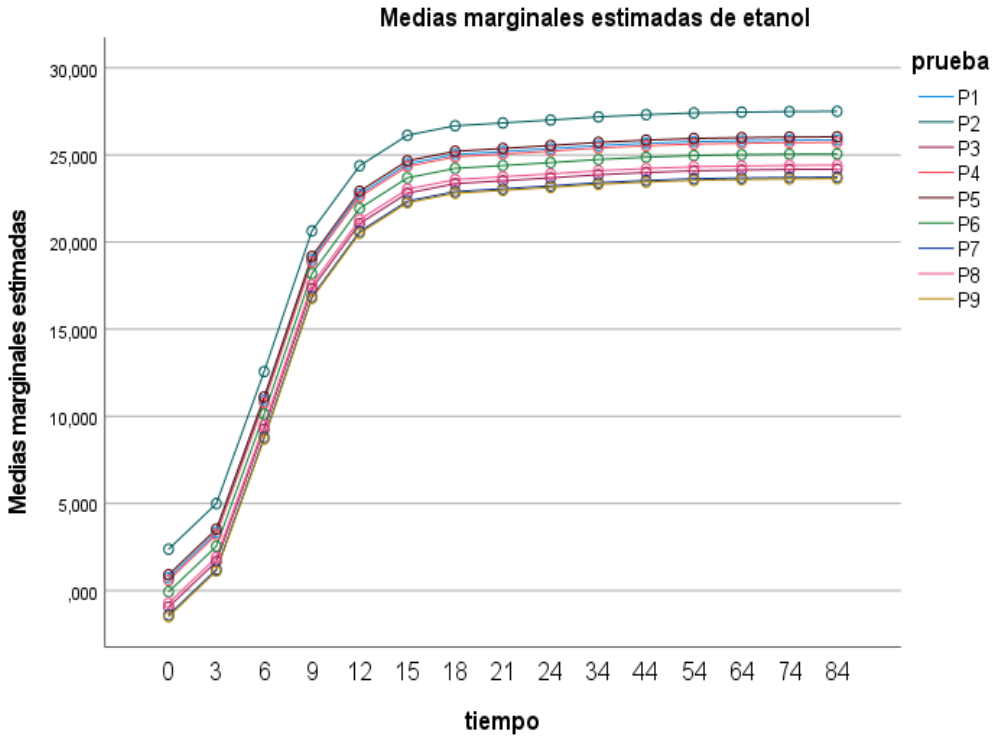


Figura 24. **Concentración de etanol en función del tiempo para cada prueba experimental**

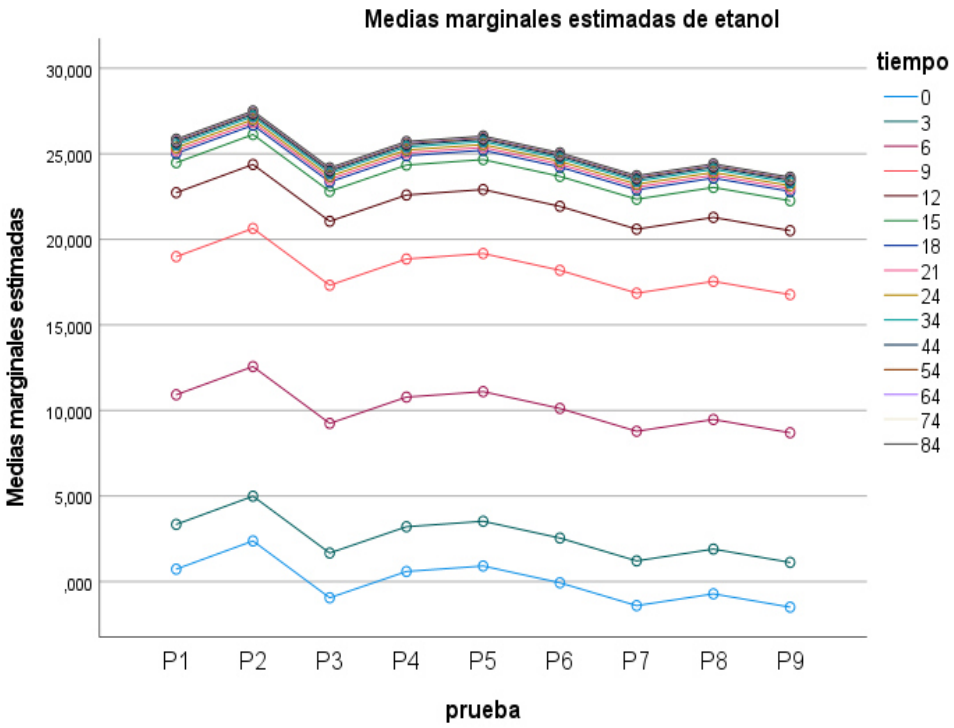


Figura 25. **Concentración de etanol en función de cada prueba experimental para cada tiempo**

En el Anexo 3 se expone el análisis estadístico correspondiente a la producción de biomasa y al consumo de azúcares reductores durante el proceso de fermentación alcohólica del mosto de papa variedad Yungay.

5.9. Análisis y discusión de resultados

La industrialización de la papa es escasamente desarrollada en Perú, siendo en su mayoría utilizada para el consumo y comercialización como materia prima. Sin embargo, gracias a sus popiedades fisicoquímicas se puede convertir en una fuente potencial para su industrialización para la obtención de productos como bebidas alcohólicas. La papa variedad Yungay fue seleccionada para la presente investigación debido a que posee un alto rendimiento de almidón (15% a 18%), es resistente a las plagas, su tiempo de almacenamiento puede ser largo sin que pierda el sabor, además de ser la de mayor produccion en Perú (Leyva, 2019).

Se determinó la cantidad de almidón contenida en la muestra, y se obtuvo 15,8% de almidón, este resultado es cercano a lo reportado por Carrion y Huaman (2008) quienes obtuvieron un porcentaje de almidón de 15,44% para la variedad Yungay, mientras que Contreras (2017) en un estudio de las caracteristicas fisicoquímicas de 5 variedades de papa obtuvo un porcentaje de almidón de 16,35% para la misma variedad. Estas diferencias en el contenido de almidón pueden ocasionarse a diferentes factores como la variedad de papa analizada, las condiciones de cultivo que incluyen la altitud, el clima y la composición del suelo (Franco, 2002). Tomando en cuenta el rendimiento obtenido por los otros autores, se puede deducir que el rendimiento de almidón obtenido en el presente trabajo es alto ya que se encuentra dentro del rango establecido teóricamete y supera a los reportado por Carrion y Huaman.

Para la obtención de los azúcares reductores, se realizó previamente la hidrólisis del almidón de papa Yungay, durante esta etapa se utilizaron las enzimas alfa amilasa y glucoamilasa a una concentración de 0,4 g/L y las condiciones de operación para cada enzima fueron las siguientes: el proceso de dextrinización se realizó utilizando la enzima alfa amilasa a temperatura de 72°C, pH 6,5 y tiempo de 1 hora mientras que la sacarificación se llevó a cabo utilizando glucoamilasa como enzima a temperatura de 60°C, pH 4,2 y tiempo de 2 horas llegandose a obtener la máxima conversión de almidón con un rendimiento máximo de 94,89% de azúcares reductores; dicho rendimiento es superior a lo reportado por Odar y Parraguez (2018) quienes al realizar la hidrólisis de almidón de papa llegaron a obtener un rendimiento de 89,37% de azúcares reductores. Las condiciones trabajadas de manera experiental proporcionan un proceso de hidrólisis enzimatica de almidón casi completa e incluso superior a lo reportado por otros autores lo que demuestra que la concentracion de enzima

utilizada, las condiciones de temperatura, pH y tiempo trabajados son adecuados para obtener una alta conversión de almidón en azúcares reductores.

Durante el proceso de fermentación alcohólica se evaluaron las condiciones de pH y temperatura, las cuales son fundamentales para asegurar una fermentación de calidad y un rendimiento de etanol alto. Se llevaron a cabo pruebas experimentales a temperatura de 28°C, 30°C y 32°C y pH 3,5; 4 Y 4,5, asi mismo se empleó *Saccharomyces cerevisiae* Lalvin D47 como levadura a una concentracion de 1,2 g/L y el nutriente fosfato diamónico a una concentración de 1,2 g/L. La prueba N°2 permitió obtener 27,313 g/L de etanol, lo cual proporcionó el mayor rendimiento Yp/s = 0,4744 a temperatura de 28°C y pH 4). Se determinó que el rendimiento de etanol fue de 0,4744 , lo cual representa que el 92,83% del sustrato fue convertido en etanol durante el proceso de fermentación alcohólica. Forero (2008) en su estudio para la producción de bioetanol usando como materia prima la harina de papa reportó que a la temperatura de 30°C y pH 4,5 obtuvó la mayor eficiencia, llegando a obtener una conversión del 90,91%, asi mismo Leal (2014), al estudiar el proceso de fermentación del mosto de Agave Cocui obtuvo una conversión máxima del 81,5% de sustrato en etanol, del mismo modo Robles (2021) mediante su investigación de las condiciones adecuadas de fermentación alcohólica del jugo de cabuya azul logró un rendimiento máximo de etanol igual a 0,4779, llegando a obtener una conversión del 93,5% de sustrato en etanol a las condiciones de 28°C y pH igual a 3,5. Tomando en cuenta que el rendimiento teorico de etanol en la fermentación alcoholica es de 0,511; se puede inferir que el rendimiento obtenido experimentalmente (0,4744) es muy cercano al teórico, el cual puede ser considerado un alto rendimiento de etanol dejando entre ver que las condiciones utilizadas de manera experimental son adecuadas.

El tiempo de fermentación alcohólica fue de 84 horas, este tiempo concuerda con lo reportado por Carrion y Huaman (2008), cuyo proceso de fermentación alcohólica de papa Yungay fue de 72 horas el cual se realizó a las condiciones de temperatura 33°C y pH 4,5; del mismo modo Maigualca (2021) en su estudio para la obtención de una bebida alcoholica clasificada como vodka a partir de las papas Super chola y Chaucha, cuyas condiciones de fermentación alcohólica trabajadas fueron 18°C y pH 5 culminó con el proceso de fermentación a los 15 dias. Se debe tener en cuenta que temperaturas bajas ralentizan el proceso de fermentación lo cual deja evidencia de la diferencia existente en el tiempo de fermentación reportada por los diferentes autores, por lo que se demuestra

que las condiciones utilizadas en el presente trabajo proporcionan una fermentación rápida y con rendimiento alto de etanol.

Se logró obtener 340 ml de etanol con una graduación alcohólica de 64°GL producto de tres destilaciones que se realizaron al mosto fermentado de 3,5 kg de papa, dicho resultado es similar a lo reportado por Arce (2023) quien obtuvo a partir de 1kg de papa amarga 143 ml de alcohol con una graduación alcohólica de 53°GL, así mismo según lo reportado por Benavides y Pozo (2008) se obtuvo 851,7 ml de alcohol con una graduación alcohólica de 82,87°GL a partir de 12 kg de papa variedad Super Chola, sin embargo el resultado obtenido en la presente investigación es superior a lo reportado por Odar y Parraguez (2018) quienes obtuvieron 41,3 ml de etanol por kg de papa variedad Canchay. En resumen, el proceso experimental, así como las condiciones de operación empleadas en el presente trabajo fueron las adecuadas ya que permitieron obtener un volumen de etanol de alta graduación alcohólica y mayor a lo reportado por otros autores partiendo de la misma cantidad de materia prima.

VI. CONCLUSIONES

- Se concluye que el empleo de papa variedad Yungay como materia prima permitió alcanzar un elevado rendimiento de etanol durante el proceso de fermentación alcohólica, resultado que estuvo directamente relacionado con el alto contenido de almidón obtenido experimentalmente (15,8 %), el cual constituyó la principal fuente para la generación de azúcares fermentables como sustrato.
- Se concluye que el proceso de hidrólisis enzimática de almidón de papa Yungay empleado en el presente trabajo utilizando alfa amilasa y glucoamilasa como enzimas es el adecuado ya que se obtuvo una conversión casi completa del almidón en azúcares reductores, con un rendimiento máximo del 94,89%.
- A las condiciones de fermentación de temperatura 28°C, pH 4; 1,2 g/L de levadura *Saccharomyces cerevisiae*, 1,2 g/L de nutriente fosfato diamónico y un tiempo de 84 horas se obtuvo la concentración de etanol más elevada (27,313 g/L a partir de 58,123 g/L de azúcares reductores), lo cual generó un rendimiento máximo de etanol durante la fermentación alcohólica del mosto de papa variedad Yungay igual a 47,44%, considerando que teóricamente el rendimiento de etanol es del 51,1% el rendimiento obtenido en el presente trabajo de tesis es aceptable, así mismo se da por aceptada la hipótesis planteada ya que el rendimiento máximo de etanol obtenido representa el 92,83% del valor teórico.
- Partiendo de las condiciones experimentales evaluadas, se concluye que la temperatura ejerce una influencia significativa sobre el proceso fermentativo, afectando directamente al tiempo de fermentación. Asimismo, se identificó al pH como un factor determinante en la producción y el rendimiento de etanol, así como en la generación de biomasa, evidenciando su papel clave en el desempeño metabólico de la levadura durante el proceso fermentativo.
- El uso de una columna empacada, así como la aplicación de tres destilaciones consecutivas al mosto fermentado fueron determinantes para obtener un volumen de etanol de alta pureza (340 ml de etanol con una graduación alcohólica de 64°GL a partir de 3,5 kg de papa Yungay), así como un producto característico de una bebida alcohólica tipo vodka cuyos resultados serían difíciles de obtenerse usando un alambique artesanal, así como una sola destilación.

VII. RECOMENDACIONES

- La papa Yungay es la variedad más cultivada en el Perú y debido a sus múltiples propiedades la hacen atractiva para su utilización como materia prima en la producción de bebidas alcohólicas, por lo que se recomienda extender las investigaciones y los conocimientos para su explotación a nivel piloto o incluso industrial.
- Se recomienda investigar otras variedades de papa para la producción de una bebida alcohólica tipo vodka.
- Se debe investigar el proceso de hidrólisis de almidón de papa, considerando factores como las condiciones de operación, concentración de enzimas o incluso otros métodos de hidrólisis como la hidrolisis ácida.
- Se recomienda realizar investigaciones en el proceso de fermentación alcohólica considerando otras cepas de levaduras o la adición de otros nutrientes, así como la concentración de estos para maximizar la producción de etanol.
- Se recomienda trabajar con temperaturas dentro del rango de 28°C a 32°C durante el proceso de fermentación alcohólica de papa Yungay ya que temperaturas muy bajas pueden ralentizar el proceso, mientras que temperaturas demasiado altas pueden causar la inhibición de la levadura. Asi mismo en base a las pruebas experimentales empleadas en el presente trabajo de tesis se recomienda trabajar con un pH ligeramente ácido (entre 3,5 y 4,5) a fin de evitar la muerte de las levaduras.

VIII. REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

Agudo, L. (2014). Fundamentos de la fermentación alcohólica [Documento PDF]. Recuperado de: https://es.slideshare.net/slideshow/fundamentos-de-la-fermentacin-alcohlica/39986183.

Alcazar, E. (2016). Capacidades fermentativas y generación de volátiles de cepas de levaduras aisladas en diferentes estados productores de mezcal [Tesis de Maestría]. CIATEJ. https://ciatej.repositorioinstitucional.mx/jspui/bitstream/1023/91/1/Elba%20Montserrat%20Alcazar%20Valle.pdf.

Alcivar, V. (2017). Diseño de una planta productora de vodka, utilizando como materia prima la papa [Tesis de pregrado]. Universidad Central del Ecuador. Recuperado de: http://www.dspace.uce.edu.ec/handle/25000/12666.

Anaya, Y., & Mantero, G. (2019). Obtención de una bebida alcohólica tipo vodka a partir de almidones de tres variedades de papa (*Solanum tuberosum*) por vía enzimática [Tesis de pregrado]. Universidad Nacional Hermilio Valdizán Huánuco. Recuperado de: https://hdl.handle.net/20.500.13080/5461.

ANDINA. (2024). Día de la Papa: Cuál es la variedad creada en memoria de víctimas del terremoto de 1970. ANDINA, agencia peruana de noticias, pp. Recuperado de: https://andina.pe/agencia/noticia-la-papa-yungay-celebra-sus-50-anos-una-variedad-creada-honor-a-victimas-del-terremoto-846972.aspx.

Arango, L., & Gómez, D. (2016). Elaboración de manual de instrucciones para el desarrollo del trabajo con el banco de ensayos CE 640 producción biotecnológica de etanol adquirido por el programa de Ingeniería Mecatrónica de la Universidad Tecnológica de Pereira [Tesis de pregrado]. Universidad Tecnológica de Pereira. Recuperado de: https://repositorio.utp.edu.co/entities/publication/c0107c91-2575-4d0e-9cf4-5223f4e5ea5e.

Arce, G. (2023). Estudio básico para la elaboración de una bebida alcohólica a partir de la papa. [Tesis de pregrado]. Universidad Mayor de San Andrés. Recuperado de: https://repositorio.umsa.bo/bitstream/handle/123456789/35152/PG 8789.pdf?sequence=1&isAllowed=y.

Badui, S. (2006). Química de los alimentos. México: PEARSON EDUCACIÓN.

Benavides, I., & Pozo, M. (2008). Elaboración de una bebida alcohólica destilada (vodka) a partir de tres variedades de Papa (*Solanum tuberosum*) utilizando dos tipos de enzimas. [Tesis de pregrado]. Universidad Técnica del Norte. Recuperado de: http://repositorio.utn.edu.ec/handle/123456789/327.

Burgos, L. (2020). Cuantificación de azúcares reductores del sustrato en residuos de piña con el método del ácido 3,5-dinitrosalicílico. Fundación Universidad de América, 13(1). Recuperado de: https://doi.org/10.29097/23461098.308.

Carbonero, P. (1957). Bioquímica de las Fermentaciones. Escuela Técnico Superior de Ingenieros Agrónomos. https://oa.upm.es/55235/1/FERMENTACIONES.pdf.

Carrión, N., & Huamán, K. (2008). Determinación de los parámetros óptimos para obtener etanol por fermentación del almidón de papa (*Solanum tuberosum*) variedad Yungay, de la localidad de Levanto, Provincia de Chachapoyas, Región Amazonas [Tesis de pregrado]. Universidad Nacional Toribio Rodríguez de Mendoza de Amazonas. Recuperado de: https://repositorio.untrm.edu.pe/bitstream/handle/20.500.14077/936/FIA_5.1.pdf?sequence=1&isAllowed=y.

Castillo, A., Sandoval, F., Martinez, G., & Garcia, I. (2018). Equipo para el proceso de hidrólisis enzimática del almidón de papa a escala piloto. Revista de Ingeniería Biomédica y Biotecnología, 2(5), 29-33. Recuperado de: https://www.ecorfan.org/taiwan/research_journals/Ingenieria_Biomedica_y_Biotecnologia/vol2num5/Revista_de_Ingenier%C3%ADa_Biom%C3%A9dica_y_Biotecnolog%C3%ADa_V2_N5_4.pdf.

Castro, D., & Suarez, N. (2004). Estudio de una alternativa para el aprovechamiento de la papa en el valle de Ubaté. [Tesis de pregrado]. Universidad de la Salle. Recuperado de: https://ciencia.lasalle.edu.co/items/b740fe61-ffe9-4304-81bf-2c4ce7fbc854/full.

Chamorro, D. (2021). Evaluación de la producción de vodka artesanal "La Destilería" haciendo uso de *Passiflora edulis* (Maracuyá) como fruta adicional [Tesis de pregrado]. Fundación Universidad de América. Recuperado de: https://hdl.handle.net/20.500.11839/8314.

Chavez, D., Martinez, G., & Ortega, E. (2018). Proyecto de fabricación de licor a base de papa en la comunidad de Chopcca-Huancavelica [documento PDF]. TECSUP. Recuperado de: https://www.laccei.org/LACCEI2018-Lima/student_Papers/SP580.pdf.

Contreras, M. (2017). Determinación de la relación entre el contenido de almidón y materia seca con la gravedad especifica de cinco variedades de papa (*Solanum tuberosum*). [Tesis de pregrado]. Universidad Nacional Del Centro del Perú. Recuperado de: https://repositorio.uncp.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12894/4370/Contreras%20E.pdf.

De anda, R., & Vera, C. (2019). Vodka sabor cereza "RULIA". Universidad Autónoma de Nuevo León. Recuperado de: hhttps://www.academia.edu/40214351/Historia_y_Elaboraci%C3%B3n_del_Vodka_RULIA_.

Egues, F., & Ramos, K. (2022). Estudio de prefactibilidad para la instalación de una planta productora de papa amarilla (*Solanum phureja*) pre frita congelada con cáscara. [Tesis de pregrado]. Universidad de Lima. Recuperado de: https://repositorio.ulima.edu.pe /bitstream/handle/20.500.12724/16512/Eg%C3%BCes-Mejia_Ramos-Riva_Estudio-Papa-Prefrita.pdf? sequence=1&isAllowed=y.

Flores, Z., & León, P. (2019). Factores de gestión en la industrialización de la papa en el distrito de Huasahuasi-Tarma. [Tesis de pregrado]. Universidad Nacional del Centro del Perú. https://repositorio.uncp.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12894/5280/T010_70240557_T.pdf? sequence=1&isAllowed=y.

Font, A. (2019). Historia, elaboración y tipos de licores y aguardientes [Documento PDF]. Instituto de Educación Superior Ricardo Palma. Recuperado de: https://www.studocu.com/pe/document/instituto-de-educacion-superior-ricardo-palma/historia-del-deporte/historia-elaboracion-y-tipos-de-licores-y-aguardientes/31375979.

Forero, D. (2008). Producción de bioetanol a partir de harina de papa basada en la comparación de enzimas hidrolisantes en el proceso de sacarificación [Tesis de pregrado]. Universidad de Los

Andes. https://repositorio.uniandes.edu.co/server/api/core/bitstreams/e931e3fe-eee2-4a8f-bf98-877e559a20c0/content.

Franco, J. (2002). El cultivo de la papa en Guatemala. (Archivo PDF). https://www.icta.gob.gt/publicaciones/Papa/El%20cultivo%20de%20la%20papa%20en%20Guatemala,%202002.pdf.

Herrera, S. (2019). Obtención del vodka por hidrólisis enzimática a partir de la papa (*Solanum tuberosum*) de las variedades Huagalina y Tumbay [Tesis de pregrado]. Universidad Nacional del Callao. Recuperado de: https://hdl.handle.net/20.500.12952/4045.

Indecopi. (2010, 05 26). CIP. NTP 011.119-2010 papa y derivados. Recuperado de: https://cipotato.org/wp-content/uploads/publication%20files/books/005713.pdf

INEI. (2024). A nivel nacional la producción de papa creció 73.2%. Recuperado de: https://www.gob.pe/institucion/inei/noticias/978915-a-nivel-nacional-la-produccion-de-papa-crecio-en-73-2-cuatro-departamentos-contribuyeron-con-el-71-3-del-total-durante-abril-de-2024

Leal, I., Tarantino, G., Hernández, R., & Mora, H. (2014). Efecto de la temperatura y el pH en la fermentación del mosto del Agave Cocui. Multiciencias, 14(4), 375-381. Recuperado de: https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=90433839012.

Leyva, L. (2019). La papa. Tuberculos.org. Recuperado de: https://www.tuberculos.org/papa-patata/yungay/

Liu, X., Jia, B., Sun, X., Ai, J., Wang, L., Zhao, F., . . . Huang, W. (2015). Effect of Initial pH on Growth Characteristics and fermentation properties of *Saccharomyces cerevisiae*. Food Microbiology & Safety, Vol. 80, Nr. 4, M800-M808. Recuperado de: https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/25777552/.

Lopez, D. (2014). Elaboració de vodka a partir de midó de patata [Trabajo final de grado]. Universidad Politécnica de Cataluña. Recuperado de: http://hdl.handle.net/2099.1/20712.

Mackenzie, D. (2019). Evaluación de tres métodos de destilación en el proceso de obtención de una bebida alcohólica tipo vodka empleando *Colocasia esculenta* (MALAGANGA) [Tesis de

pregrado]. Universidad Técnica Estatal de Quevedo. Recuperado de: https://repositorio.uteq.edu.ec/items/fe120c3d-dca3-4d57-a059-deadc54df4d6.

Maigualca, J. (2021). Elaboración de una bebida alcohólica destilada (vodka) a partir de dos variedades de papa Caucha (*Solanum phureja*) y Super Chola (*Solanum tubersosum L.*) con alfa amilasa [Tesis de pregrado]. Universidad Técnica de Cotopaxi. https://repoadmin.utc.edu.ec/items/94e137e7-d228-49de-9154-a4e91264d2d5.

Melo, Y. (2025). Peligro de sobreproducción de papa blanca en Perú: Midagri insta a frenar nuevas siembras. infobae. Recuperado de: https://www.infobae.com/peru/2025/01/06/peligro-de-sobreproduccion-de-papa-blanca-en-peru-midagri-insta-a-frenar-nuevas-siembras/.

Ministerio de Agricultura y Riego. (2017). Catálogo de variedades de papa nativa. Repositorio del MIDAGRI. Recuperado de: http://repositorio.midagri.gob.pe:80/jspui/handle/20.500.13036/391.

Miranda, B., & Molina, M. (2015). Evaluación de factores que pueden influir en el proceso de sacarificación-fermentación simultáneas para la producción de etanol a partir de materiales amiláceos. Ingeniería, 25(1), 47-61. https://doi.org/10.15517/ri.v25i1.14665.

Odar, M., & Parraguez, D. (2019). Evaluación del rendimiento de la fermentación alcohólica a partir del almidón de la papa (*Solanum tuberosum*), camote (*Ipomoea batata*) y olluco (*Ullucus tuberosus*) [Trabajo de suficiencia profesional]. Universidad Nacional Pedro Ruiz Gallo. https://hdl.handle.net/20.500.12893/3689.

Ordoñez, L. (2022). Desarrollo de una bebida alcohólica destilada tipo (vodka) a partir de dos variedades de tubérculos, papa china (Colacasia *esculenta*) y oca (*Oxalis tuberosa*) [Tesis de pregrado]. Universidad de Azuay. Recuperado de: http://dspace.uazuay.edu.ec/handle/datos/11671.

Pinedo, l., & Reátegui, A. (2010). Evaluación del cumplimiento de las normas técnicas peruanas en bebidas destiladas tradicionales de mayor consumo en el mercado del distrito de Belén - Iquitos - 2010. [Tesis de pregrado]. Universidad Nacional De La Amazonia Peruana. http://repositorio.unapiquitos.edu.pe/handle/20.500.12737/2397.

Robles, R. (2021). Condiciones óptimas del proceso de fermentación alcohólica del jugo de la Cabuya Azul (Agave Americana), empleando cepas de levadura *Saccharomyces cerevisiae* [Tesis de maestría]. Universidad Nacional Mayor de San Marcos. Recuperado de: https://hdl.handle.net/20.500.12672/16795.

Rodriguez, D., Arredondo, J., Anastacio, G., Aguirre, J., & Sonco, J. (2019). Modelo ARIMA aplicado a la producción de papa en el Perú para el periodo 1960-2019. Universidad Nacional Mayor de San Marcos. Recuperado de: http://www.researchgate .net/publication/357430823_Modelo_Arima_produccion_de_papa.

Santamaria, M., Lopez, R., Gutierrez, A., & Garcia, E. (1995). Influencia de la temperatura en la fermentación alcohólica. Centro de Investigaciones Agrarias de la Comunidad Autónoma de la Rioja, 137-149. https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=110328.

Segura, B. (2014). Cadena de valor de papas nativas (*Solanum andigenum sp.*) en la provincia de Jauja, Perú. [Tesis de Doctorado]. Universidad Politécnica de Madrid. https://oa.upm.es/32188/1/BILLY_SEGURA_SALAZAR.pdf.

Siddiqui, S. (2022). Almidón, evolución y avances recientes. IntechOpen. Recuperado de: https://www.intechopen.com/books/10798.

Suárez, C., Garrido, N., & Guevara, C. (2016). Levadura *Saccharomyces cerevisiae* y la producción de alcohol. Revisión bibliográfica. ICIDCA, 50(1). 20-28. https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=223148420004.

Torija, J., Rozés, N., Poblet, M., Guillamon, J., & Mas, A. (2003). Efectos de la temperatura de fermentación sobre la cepa. International Journal of food microbiology, 80,47-53. https://doi.org/10.1016/S0168-1605(02)00144-7.

Vazquez, H., & Dacota, O. (2007). Fermentación alcohólica: una opción para la producción de energía. Ingeniería, investigación y tecnología, 8(4), 249-259. Recuperado de: https://www.scielo.org.mx/pdf/iit/v8n4/v8n4a4.pdf.

Yañez, J. (2019). Optimización en la etapa de fermentación de la elaboración de mezcal empleando como catalizador la semilla de guayaba [Informe técnico de residencia profesional]. Instituto

tecnológico de Tuxtla Gutiérrez. Recuperado de: http://repositoriodigital. tuxtla.tecnm.mx/xmlui/handle/123456789/2967.

IX. ANEXOS

ANEXO 1

- **Cálculo del porcentaje de almidón**

$$\%\ almidón = \frac{P_a}{P_{mu}} * 100 \quad (6)$$

Donde:

P_a: $Peso\ del\ almidón\ obtenido$

P_{mu}: $Peso\ de\ la\ muestra$

$$\%\ almidón = \frac{35{,}25}{223} * 100$$

$$\%\ almidón = 15{,}8\%$$

- **Cálculo del porcentaje de materia seca**

$$\%\ materia\ seca = \frac{P_{ms}}{P_m} * 100 \quad (7)$$

Donde:

$P_{ms} = Peso\ de\ materia\ seca$

$P_m = Peso\ de\ materia\ antes\ de\ ser\ secada$

$$\%\ materia\ seca = \frac{2{,}3}{9{,}8} * 100$$

$$\%\ materia\ seca = 23{,}47\%$$

- **Cálculo del porcentaje de humedad**

$$\%\ humedad = \frac{P_m - P_{ms}}{P_m} * 100 \quad (8)$$

Donde:

$P_{ms} = Peso\ de\ materia\ seca$

$P_m = Peso\ de\ materia\ antes\ de\ ser\ secada$

$$\%\ humedad = \frac{9{,}8 - 2{,}3}{9{,}8} * 100$$

$$\%\ humedad = 76.53\%$$

ANEXO 2



Figura 26. **Recepción de la papa Yungay**



(a) **(b)** **(c)**

Figura 27. **Proceso de obtención del almidón de la papa Yungay**



(a) **(b)**

Figura 28. **Proceso de obtención de la materia seca de la papa Yunga**



Figura 29. **Proceso de hidrólisis de almidón de papa Yungay**

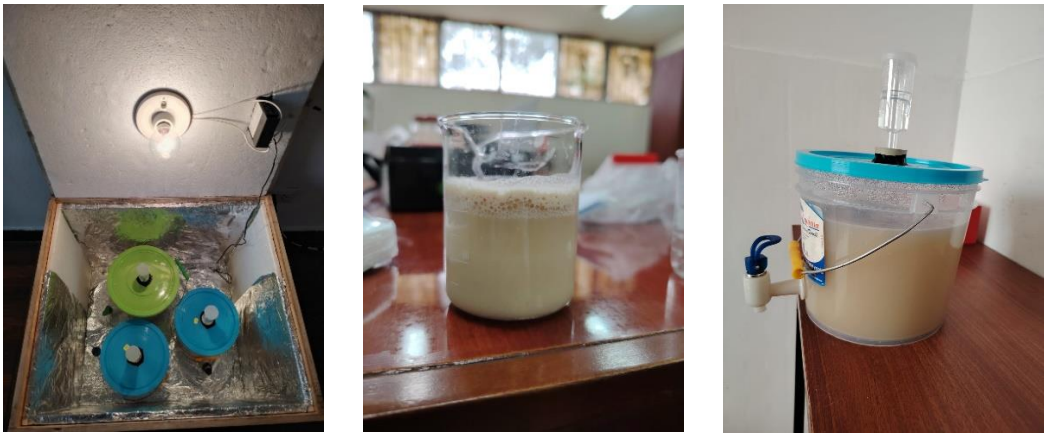


(a) enzima alfa amilasa **(b)** enzima glucoamilasa

Figura 30. **Enzimas utilizadas en la hidrólisis del almidón**



Figura 31. **Cuantificación de glucosa por espectrofotometría UV-Vis para la construcción de la curva de calibración**



(a) **(b)** **(c)**

Figura 32. **Proceso de fermentación alcohólica del mosto de papa Yungay**



(a) Nutriente de la levadura **(b)** Levadura *Saccharomyces cerevisiae*

Figura 33. **Nutriente y levadura utilizados en la fermentación alcohólica**

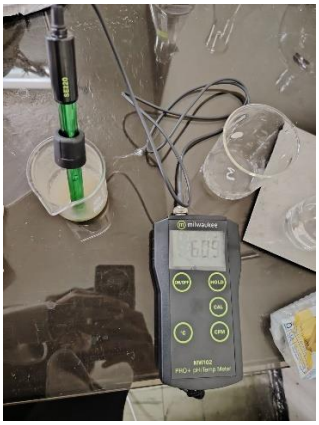
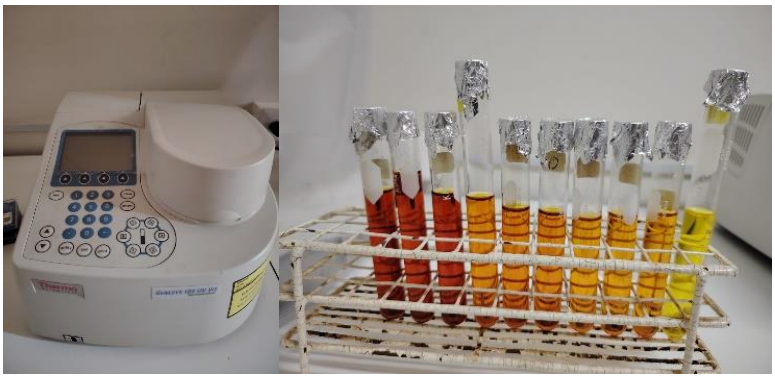


Figura 34. **Medición del pH**



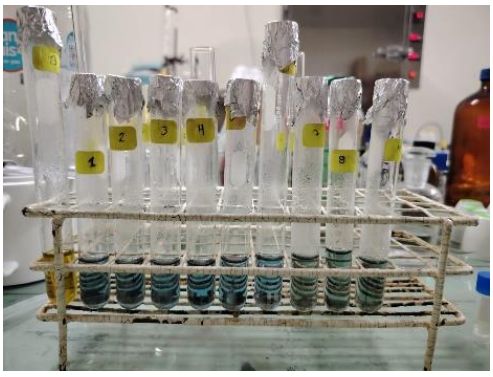
(a) **(b)** **(c)**

Figura 35. **Determinación de la producción de biomasa**



(a) **(b)**

Figura 36. **Cuantificación de azucares reductores y etanol por espectrofotometría UV-Vis**



(c)



(a) **(b)** **(c)**

Figura 37. **Proceso de destilación del mosto fermentado de papa Yungay**



Figura 38. **Medición de la graduación alcohólica del etanol obtenido**



Figura 39. **Fermentador marca Blichmann de 27 L de capacidad**

ANEXO 3

1. Análisis estadístico del consumo de azúcares reductores en el proceso de fermentación alcohólica

Prueba paramétrica

Como etapa inicial del análisis estadístico, se evaluó la distribución de los datos mediante una prueba de normalidad, con el propósito de verificar el cumplimiento del supuesto de normalidad. En función de los resultados obtenidos, se procedió a definir el enfoque estadístico más adecuado, estableciendo si correspondía la aplicación de métodos paramétricos o no paramétricos.

Prueba de hipótesis

- (Ho) hipótesis nula: Los datos presentan una distribución normal
- (Ha) hipótesis alterna: Los datos presentan una distribución no normal

Nivel de significación

- Confianza del 95%
- Significancia del 5%

Tabla 45.

Pruebas de normalidad para azúcares reductores

	Kolmogorov-Smirnov			Shapiro-Wilk		
	Estadístico	**GL**	**p**	**Estadístico**	**GL**	**p**
Tiempo	0,089	135	0,011	0,945	135	0,000
Prueba	0,113	135	0,000	0,931	135	0,000
Azúcar	0,324	135	0,000	0,632	135	0,000

La evaluación de la normalidad de los datos experimentales correspondientes a la concentración de azúcares reductores se llevó a cabo en el software IBM SPSS Statistics. Dado que el tamaño muestral es mayor que 50, se optó por la aplicación de la prueba de Kolmogorov-Smirnov como método estadístico para la verificación de la distribución de los datos.

Tabla 46.

Prueba Kolmogorov-Smirnov para normalidad

	Estadístico	gl	p
Tiempo	0,089	135	0,011
Prueba	0,113	135	0
Azucar	0,324	135	0

Criterio de decisión.

- Cuando el valor de p es < a 0,05, entonces de acepta Ha y se rechaza Ho
- Cuando el valor de p es ≥ a 0,05, entonces se acepta Ho y se rechaza Ha

Conclusión y decisión

Dado que el valor de p obtenido es < a 0,05, se procedió a rechazar la hipótesis nula y aceptar la hipótesis alterna, lo que indica que los datos no presentan una distribución normal. En consecuencia, se determinó la aplicación de métodos estadísticos no paramétricos para el análisis de los resultados.

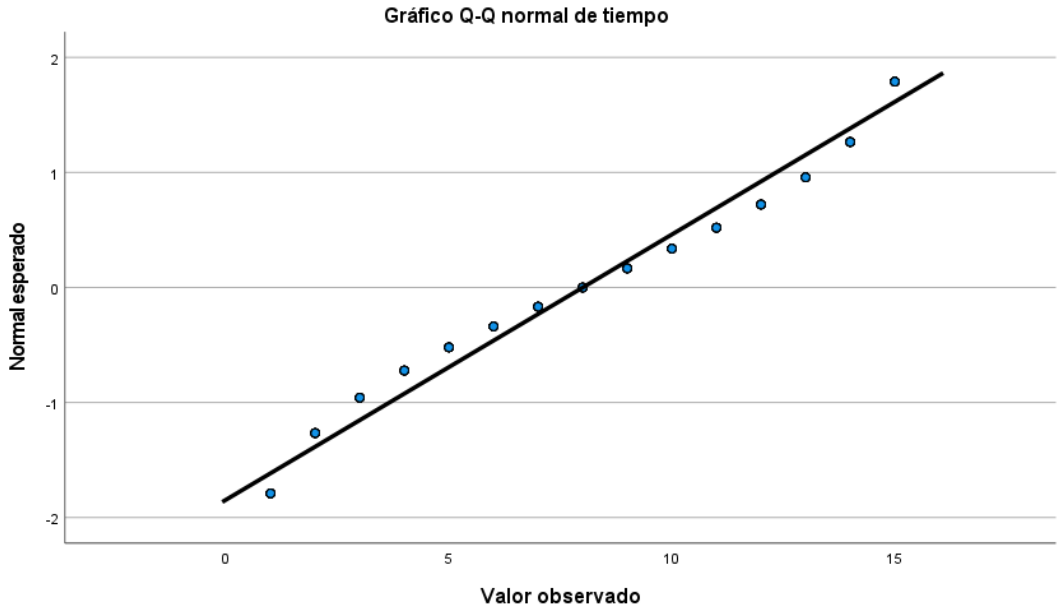


Figura 40. **Gráfico de normalidad en función del tiempo**

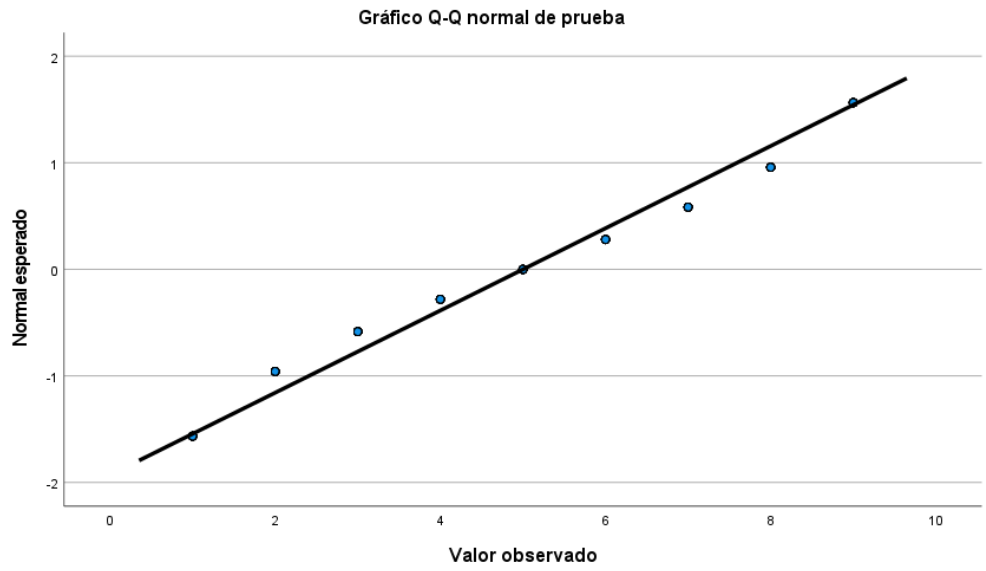


Figura 41. **Gráfico de normalidad en función de la prueba experimental**

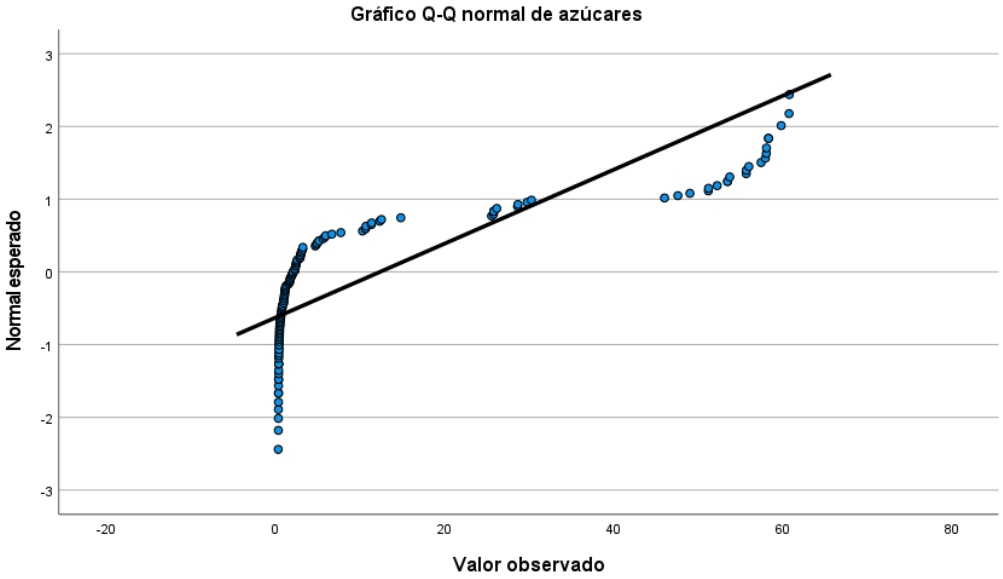


Figura 42. **Gráfico de normalidad en función de la concentración de azúcares**

En la figura 42 se observa una gráfica típica de distribución no normal para concentración de azúcares lo cual comprueba el criterio de decisión al aceptar la hipótesis alternativa, en virtud de esta condición de no normalidad, se determinó la aplicación de un enfoque estadístico no paramétrico, empleándose específicamente la prueba de correlación de Spearman para el análisis de los datos.

Prueba de correlación de Spearman

El análisis de la relación entre el tiempo, las pruebas experimentales y la concentración de azúcares reductores se efectuó mediante la aplicación de la prueba de correlación de Spearman, utilizando el software IBM SPSS Statistics.

Tabla 47.

Prueba de correlación en función del tiempo, prueba y concentración de azúcares

			Tiempo	**Prueba**	**Azúcar**
Rho de Spearman	Tiempo	ρ	1,000	0,000	-0,956
		Sig. (bilateral)	.	1,000	0,000
		N	135	135	135
	Prueba	ρ	0,000	1,000	0,211
		Sig. (bilateral)	1,000	.	0,014
		N	135	135	135
	Azúcar	ρ	-0,956	0,211*	1,000
		Sig. (bilateral)	0,000	0,014	.
		N	135	135	135

Se aplica la prueba de correlación de Spearman debido a que se está aplicando la estadistica no paramétrica.

Tabla 48.

Correlación de Spearman para la concentración de azúcares

Correlación de Spearman				
		ρ	**p**	**N**
Tiempo -	Azúcar	-0,956	0,000	135
Prueba-	Azúcar	0,211	0,014	135

Planteamiento de hipótesis

- Ho: $\rho = 0$ (no existe correlación entre el tiempo y la concentración de azúcares)
- Ha: $\rho \neq 0$ (si existe correlación entre el tiempo y la concentración de azúcares)

Nivel de significancia

- Alfa es igual a 0,05

Regla de decisión

- Cuando el valor de p es < a 0,05, entonces de acepta Ha y se rechaza Ho
- Cuando el valor de p es ≥ a 0,05, entonces se acepta Ho y se rechaza Ha

Como p < 0,05, existe relación significativa entre tiempo y concentración de azúcares, la relación es indirecta, es decir, a mayor tiempo menor concentración de azúcares.

Análisis univariado de varianza

El análisis de varianza univariado permite evaluar el comportamiento de una variable dependiente a través de procedimientos de regresión y análisis de varianza, considerando la influencia de uno o varios factores o variables independientes.

Prueba de hipótesis

- Ho: El tiempo no influye en la concentración de azúcares
- Ha: El tiempo influye en la concentración de azúcares

Tabla 49.

Prueba de efectos inter-sujetos

Variable dependiente: Concentración de azúcares					
Origen	**Tipo III de suma de cuadrados**	**gl**	**Media cuadrática**	**F**	**Sig.**
Modelo corregido	50718,800[a]	22	2305,400	233,627	0,000
Intersección	20752,715	1	20752,715	2103,062	0,000
Tiempo	50334,865	14	3595,348	364,349	0,000
Prueba	383,934	8	47,992	4,863	0,000
Error	1105,200	112	9,868		
Total	72576,714	135			
Total corregido	51823,999	134			

a. R al cuadrado = 0,979 (R al cuadrado ajustada = 0,974)

Nivel de significancia

- Alfa es igual a 0,05

Regla de decisión

- Cuando el valor de p es < a 0,05, entonces de acepta Ha y se rechaza Ho
- Cuando el valor de p es ≥ a 0,05, entonces se acepta Ho y se rechaza Ha

Como p < 0,05, se puede inferir que el tiempo influye en la concentración de azúcares.

Las medias marginales estimadas (MME) se definen como las medias de la variable de respuesta (azúcares) para diferentes niveles de un factor (tiempo y prueba).

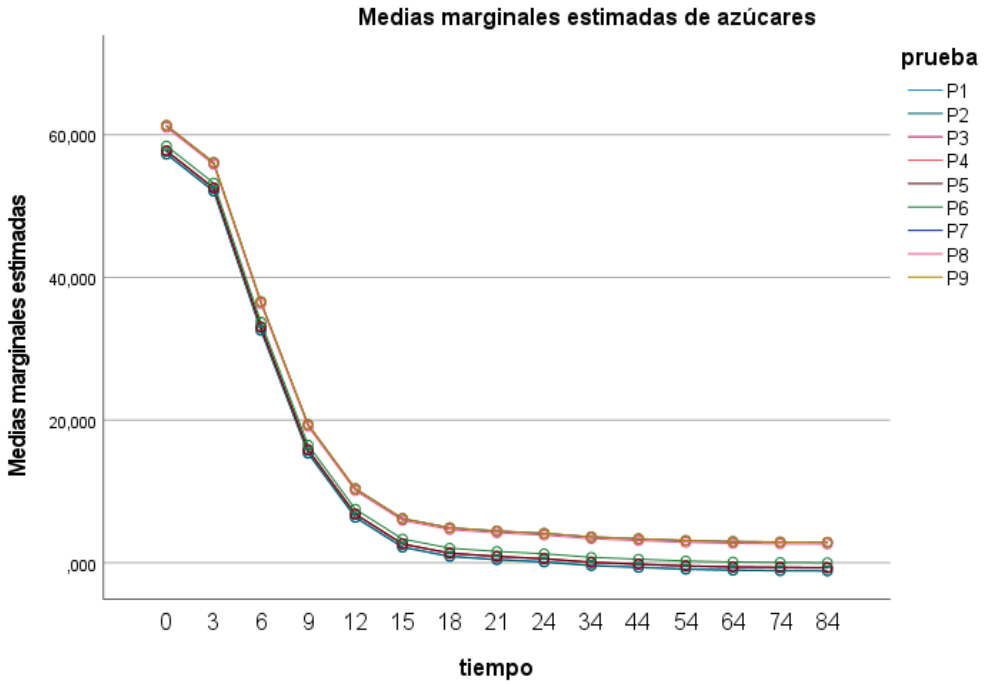


Figura 43. **Concentración de azúcares en función del tiempo para cada prueba experimental**

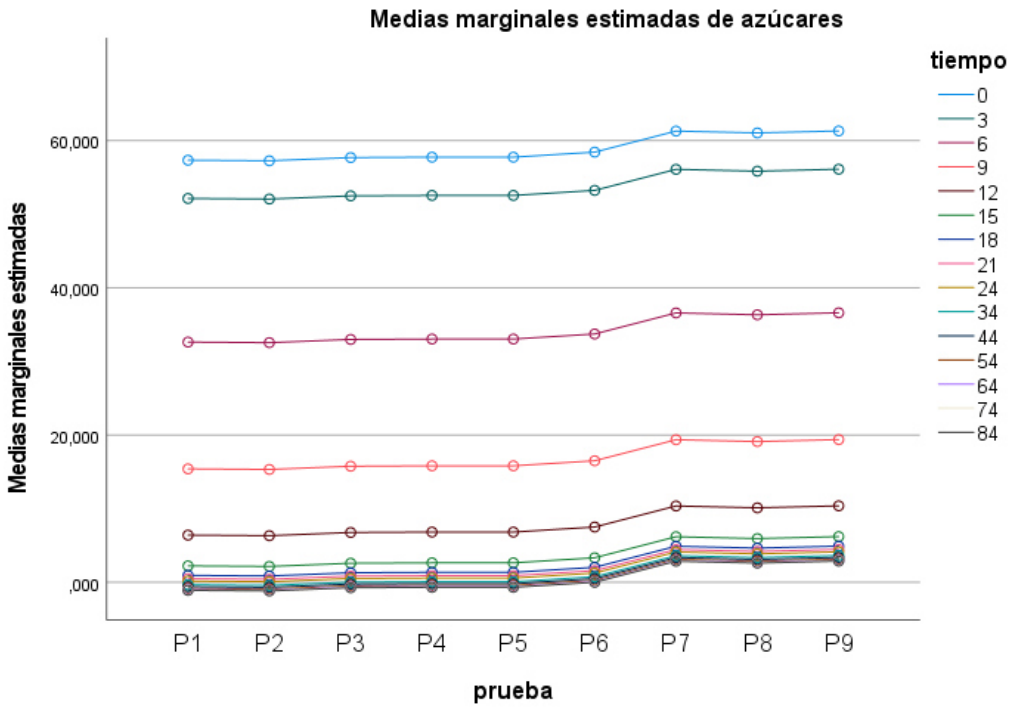


Figura 44. **Concentración de azúcares en función de cada prueba experimental para cada tiempo**

1. Análisis estadístico de la producción de biomasa en el proceso de fermentación alcohólica

Prueba paramétrica

Como etapa inicial del análisis estadístico, se evaluó la distribución de los datos mediante una prueba de normalidad, con el propósito de verificar el cumplimiento del supuesto de normalidad. En función de los resultados obtenidos, se procedió a definir el enfoque estadístico más adecuado, estableciendo si correspondía la aplicación de métodos paramétricos o no paramétricos.

Prueba de hipótesis

- (Ho) hipótesis nula: Los datos presentan una distribución normal
- (Ha) hipótesis alterna: Loa datos presentan una distribución no normal

Nivel de significación

- Confianza del 95%
- Significancia del 5%

Tabla 50.

Pruebas de normalidad para la biomasa

	Kolmogorov-Smirnov			Shapiro-Wilk		
	Estadístico	**GL**	**p**	**Estadístico**	**gl**	**p**
Tiempo	0,089	135	0,011	0,945	135	0,000
Prueba	0,113	135	0,000	0,931	135	0,000
Biomasa	0,249	135	0,000	0,806	135	0,000

La evaluación de la normalidad de los datos experimentales correspondientes a la concentración de biomasa se llevó a cabo en el software IBM SPSS Statistics. Dado que el tamaño muestral es mayor que 50, se optó por la aplicación de la prueba de Kolmogorov-Smirnov como método estadístico para la verificación de la distribución de los datos.

Tabla 51.

Prueba *Kolmogorov-Smirnov para normalidad*

	Estadístico	**gl**	**p**
Tiempo	0,089	135	0,011
Prueba	0,113	135	0,000
Biomasa	0,249	135	0,000

Criterio de decisión.

- Cuando el valor de p es $<$ a 0,05, entonces de acepta Ha y se rechaza Ho
- Cuando el valor de p es $\geq$ a 0,05, entonces se acepta Ho y se rechaza Ha

Conclusión y decisión

Dado que el valor de p obtenido fue $<$ a 0,05, se procedió a rechazar la hipótesis nula y aceptar la hipótesis alterna, lo que indica que los datos no presentan una distribución normal. En consecuencia, se determinó la aplicación de métodos estadísticos no paramétricos para el análisis de los resultados.

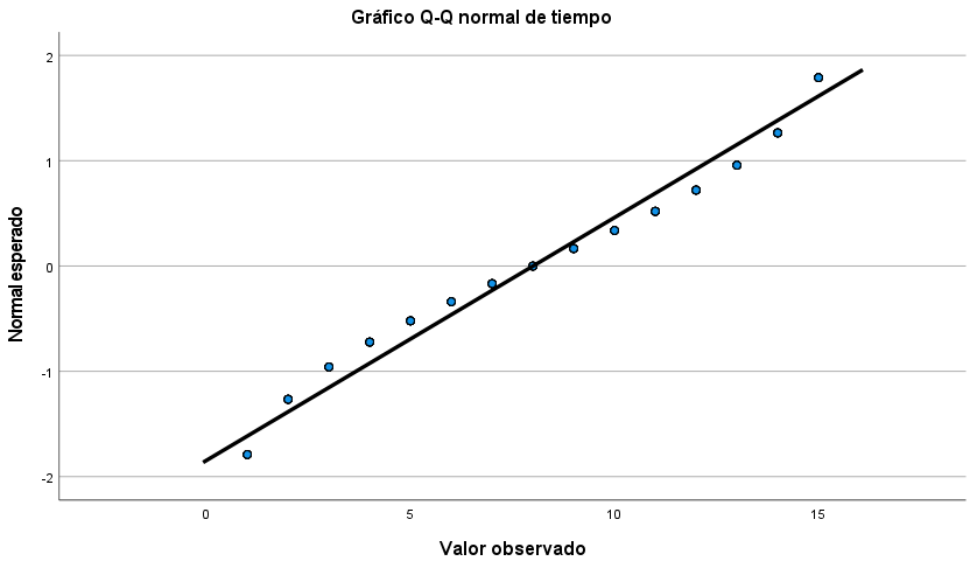


Figura 45. **Gráfico de normalidad en función del tiempo**

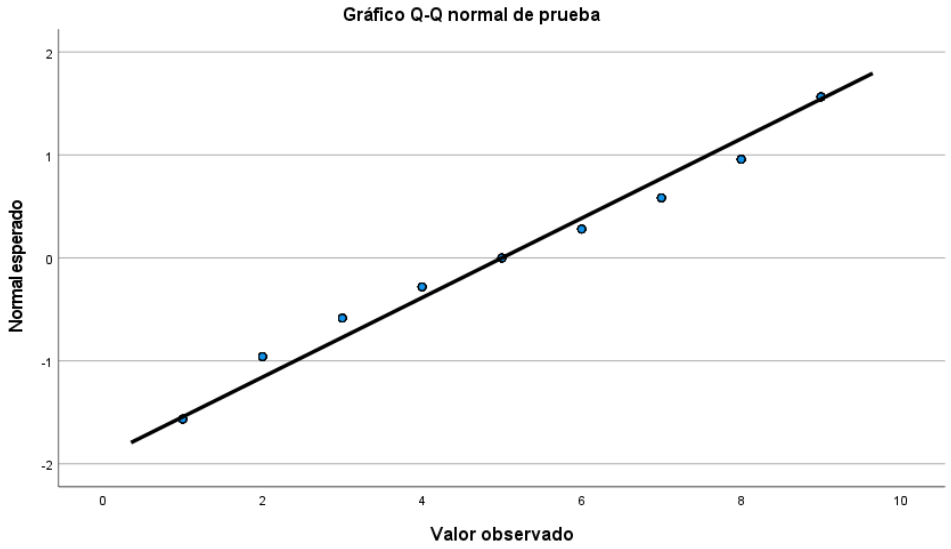


Figura 46. **Gráfico de normalidad en función de la prueba experimental**

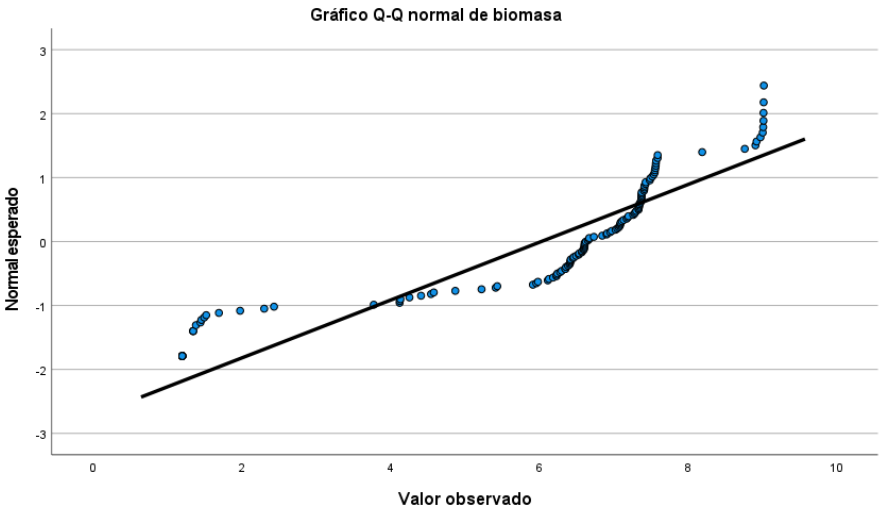


Figura 47. **Gráfico de normalidad en función de la concentración de biomasa**

En la figura 47 se observa una gráfica típica de distribución no normal para la concentración de biomasa lo cual comprueba el criterio de decisión al aceptar la hipótesis alternativa, en virtud de esta condición de no normalidad, se determinó la aplicación de un enfoque estadístico no paramétrico, empleándose específicamente la prueba de correlación de Spearman para el análisis de los datos.

Prueba de correlación de Spearman

Usando El análisis de la relación entre el tiempo, las pruebas experimentales y la concentración de biomasa se efectuó mediante la aplicación de la prueba de correlación de Spearman, utilizando el software IBM SPSS Statistics

Tabla 52.

Prueba de correlación en función del tiempo, prueba y concentración de biomasa

			Tiempo	**Prueba**	**Biomasa**
Rho de Spearman	Tiempo	ρ	1,000	0,000	0,711
		Sig. (bilateral)	.	1,000	0,000
		N	135	135	135
	Prueba	ρ	0,000	1,000	-0,203
		Sig. (bilateral)	1,000	.	0,018
		N	135	135	135
	Biomasa	ρ	0,711**	-0,203*	1,000
		Sig. (bilateral)	0,000	0,018	.
		N	135	135	135

Se aplica la prueba de correlación de Spearman ya que se esta aplicando la estadistica no paramétrica.

Tabla 53.

Correlación de Spearman para la concentración de biomasa

Correlación de Spearman				
		ρ	**p**	**N**
Tiempo -	Biomasa	0,711	0,000	135
Prueba-	Biomasa	-0,203	0,018	135

Planteamiento de hipótesis

- Ho: $\rho = 0$ (no existe correlación entre el tiempo y la concentración de biomasa)
- Ha: $\rho \neq 0$ (si existe correlación entre el tiempo y la concentración de biomasa)

Nivel de significancia

- Alfa es igual a 0,05

Regla de decisión

- Cuando el valor de p es $<$ a 0,05, entonces de acepta Ha y se rechaza Ho
- Cuando el valor de p es $\geq$ a 0,05, entonces se acepta Ho y se rechaza Ha

Como $p < 0,05$, existe relación significativa entre tiempo y concentración de biomasa; la relación es directa, es decir, a mayor tiempo mayor concentración de biomasa.

Análisis univariado de varianza

El análisis de varianza univariado permite evaluar el comportamiento de una variable dependiente a través de procedimientos de regresión y análisis de varianza, considerando la influencia de uno o varios factores o variables independientes.

Prueba de hipótesis

- Ho: El tiempo no influye en la concentración de biomasa
- Ha: El tiempo influye en la concentración de biomasa

Tabla 54.

Prueba de efectos inter-sujetos

Variable dependiente: Concentración de biomasa					
Origen	**Tipo III de suma de cuadrados**	**gl**	**Media cuadrática**	**F**	**Sig.**
Modelo corregido	638,416[a]	22	29,019	180,946	0,000
Intersección	4903,948	1	4903,948	30578,349	0,000
Tiempo	580,670	14	41,476	258,625	0,000
Prueba	57,746	8	7,218	45,009	0,000
Error	17,962	112	0,160		
Total	5560,326	135			
Total corregido	656,378	134			

a. R al cuadrado = 0,973 (R al cuadrado ajustada = 0,967)

Nivel de significancia

- Alfa es igual a 0,05

Regla de decisión

- Cuando el valor de p es $<$ a 0,05, entonces de acepta Ha y se rechaza Ho
- Cuando el valor de p es $\geq$ a 0,05, entonces se acepta Ho y se rechaza Ha

Como $p < 0,05$, se puede concluir que el tiempo influye en la concentración de biomasa.

Las medias marginales estimadas (MME) se definen como las medias de la variable de respuesta (biomasa) para diferentes niveles de un factor (tiempo y prueba).

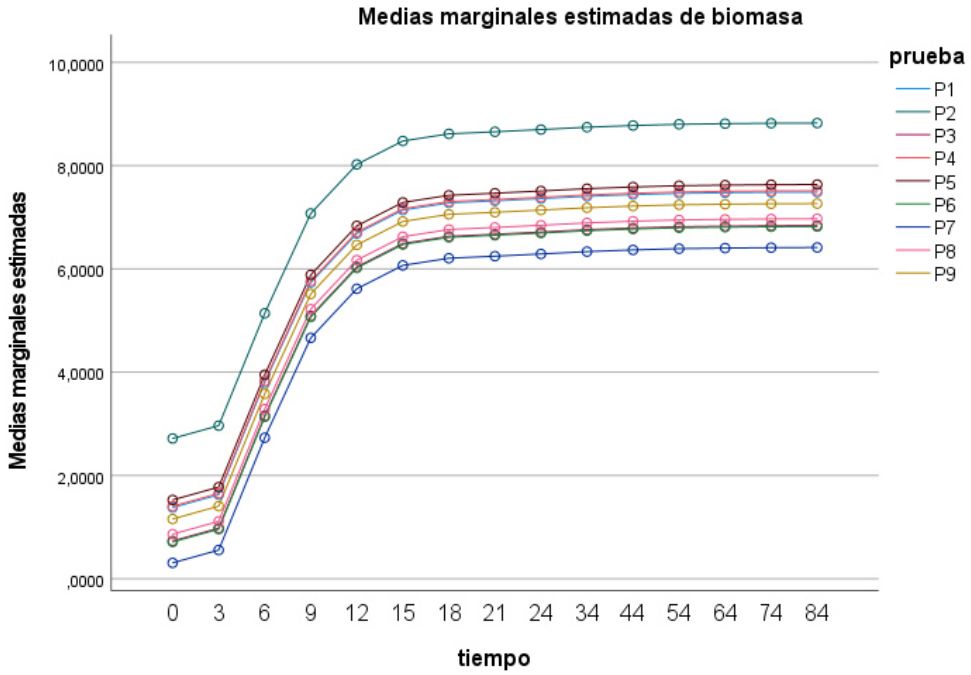


Figura 48. **Concentración de biomasa en función del tiempo para cada prueba experimental**

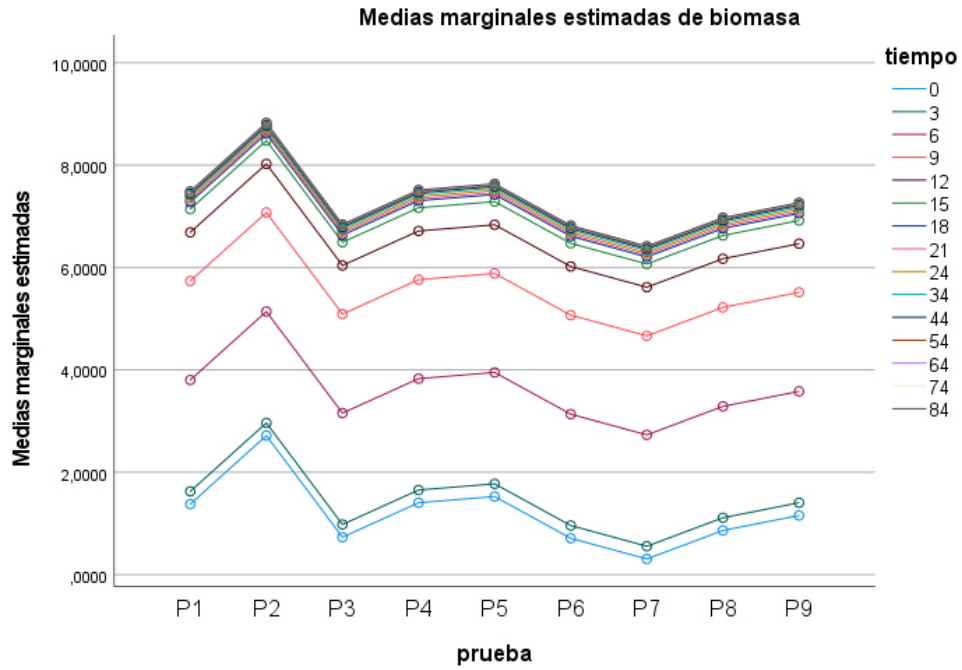


Figura 49. **Concentración de biomasa en función de cada prueba experimental para cada tiempo**