

Trabajo Monográfico para optar al título de
Ingeniero Industrial

“Validación del proceso para la obtención de licor tipo vodka a partir de yuca, a escala de laboratorio en la Universidad Nacional de Ingeniería, Centro Universitario Regional Estelí”.

Elaborado por:

Br. Ariadna Cassandra
Sobalvarro Toruño
Carnet: 2016-0950U

Br. Lesly Steven
Rojas Mendoza
Carnet: 2020-0186N

Br. Luis Alejandro
Rodríguez Miranda
Carnet: 2020-0218N

Tutor:

Dra. Alba Veranay
Díaz Corrales



Dirección de Área
de Conocimiento
Industria y Producción

SECRETARIA DE ÁREA ACADÉMICA

F-8: CARTA DE FINALIZADO PLAN DE ASIGNATURA

El Suscrito Secretario del **AREA DE CONOCIMIENTO INDUSTRIA Y PRODUCCIÓN** hace constar que:

RODRÍGUEZ MIRANDA LUIS ALEJANDRO

Carné: **2020-0218N** Turno: **Diurno** Plan de Asignatura: **2015** de conformidad con el Reglamento Académico vigente en la Universidad, ha aprobado todas las asignaturas correspondientes a la carrera de **INGENIERÍA INDUSTRIAL**, en el año 2024 y solo tiene pendiente la realización de una de las formas de culminación de estudio.

Se extiende la presente **CARTA DE FINALIZADO PLAN DE ASIGNATURA**, a solicitud del interesado en la ciudad de Managua, a los tres días del mes de marzo del año dos mil veinte y cinco.

Atentamente,



Msc. Arlen Patricia Reyes Gomez
SECRETARIO DE ÁREA ACADÉMICA



Móvil: (505) 2251 8276



Recinto Universitario Pedro Aráuz Palacios
Costado Sur de Villa Progreso,
Managua, Nicaragua.





Dirección de Área
de Conocimiento
Industria y Producción

SECRETARIA DE ÁREA ACADÉMICA

F-8: CARTA DE FINALIZADO PLAN DE ASIGNATURA

El Suscrito Secretario del **AREA DE CONOCIMIENTO INDUSTRIA Y PRODUCCIÓN** hace constar que:

ROJAS MENDOZA LESLY STEVEN

Carné: **2020-0186N** Turno: **Diurno** Plan de Asignatura: **2015** de conformidad con el Reglamento Académico vigente en la Universidad, ha aprobado todas las asignaturas correspondientes a la carrera de **INGENIERÍA INDUSTRIAL**, en el año 2024 y solo tiene pendiente la realización de una de las formas de culminación de estudio.

Se extiende la presente **CARTA DE FINALIZADO PLAN DE ASIGNATURA**, a solicitud del interesado en la ciudad de Managua, a los tres días del mes de marzo del año dos mil veinte y cinco.

Atentamente,



Msc. Arlen Patricia Reyes Gomez
SECRETARIO DE ÁREA ACADÉMICA



Móvil: (505) 2251 8276



Recinto Universitario Pedro Aráuz Palacios
Costado Sur de Villa Progreso,
Managua, Nicaragua.





Dirección de Área
de Conocimiento
Industria y Producción

SECRETARIA DE ÁREA ACADÉMICA

F-8: CARTA DE FINALIZADO PLAN DE ASIGNATURA

El Suscrito Secretario del **AREA DE CONOCIMIENTO INDUSTRIA Y PRODUCCIÓN** hace constar que:

SOBALVARRO TORUÑO ARIADNA CASSANDRA

Carné: **2016-0950U** Turno: **Diurno** Plan de Asignatura: **2015** de conformidad con el Reglamento Académico vigente en la Universidad, ha aprobado todas las asignaturas correspondientes a la carrera de **INGENIERÍA INDUSTRIAL**, en el año 2024 y solo tiene pendiente la realización de una de las formas de culminación de estudio.

Se extiende la presente **CARTA DE FINALIZADO PLAN DE ASIGNATURA**, a solicitud del interesado en la ciudad de Managua, a los tres días del mes de marzo del año dos mil veinte y cinco.

Atentamente,



Msc. Arlen Patricia Reyes Gomez
SECRETARIO DE ÁREA ACADÉMICA



Móvil: (505) 2251 8276



Recinto Universitario Pedro Aráuz Palacios
Costado Sur de Villa Progreso,
Managua, Nicaragua.



Estelí, 07 de abril del 2026

Arq. Jorge Pavel Valdivia García
Director
CUR UNI Estelí

Estimado arquitecto Valdivia, reciba un cordial saludo.

A través de la presente, le remito informe final del trabajo monográfico que lleva por título "**Validación del proceso para la obtención de licor tipo vodka a partir de yuca, a escala de laboratorio en la universidad Nacional de Ingeniería, Centro Universitario Regional Estelí**". Realizado por los bachilleres Luis Alejandro Rodríguez Miranda, carnet: 2020-0218N, Lesly Steven Rojas Mendoza, carnet: 2020-0186N y Ariadna Cassandra Sobalvarro Toruño, Carnet: 2016-0950U.

He revisado el documento y cumple con la normativa de culminación de estudios establecida por la UNI para optar por el título de Ingeniero Industrial, por lo que solicito su aprobación con el fin de proceder los estudiantes a la defensa del trabajo.

Anuente a sus comentarios, me despido.

Cordialmente



Dra. Alba Veranay Díaz Corrales

Tutora

Docente Titular

CUR UNI, Estelí

Correo: alba.diaz@uni.edu.ni



Centro Universitario
Regional Estelí

CURE-UNI 01.25
Estelí, 06 de agosto del 2025

Bachilleres

Ariadna Cassandra Sobalvarro Toruño
Luis Alejandro Rodríguez Miranda
Lesly Steven Rojas Mendoza

Estimados(as) bachilleres:

Es grato informarles que el PROTOCOLO de su tema monográfico titulado:

"Validación del proceso para la obtención de licor tipo vodka a partir de yuca, a escala de laboratorio en la Universidad Nacional de Ingeniería, Centro Universitario Regional Estelí"

Ha sido aprobado por la Dirección del Centro Universitario Regional Estelí.

Asimismo, les comunico que se ha designado a la Dra. Alba Veranay Díaz Corrales como tutora de su trabajo final, con lo cual estoy totalmente de acuerdo.


La fecha límite para la entrega del documento final, debidamente revisado y avalado por su tutora, será el 10 de enero de 2026.

Confianto en su puntualidad y compromiso en este proceso académico, me despido cordialmente.

Atentamente.


Arq. Jorge Pavel Valdivia Gardía.
Director.
Centro Universitario Regional.
CUR UNI ESTELÍ.
jorge.valdivia@cure.uni.edu.ni
Telf. 76176123

CC: Dra. Alba Veranay Díaz Corrales.
Archivo

 Teléfono: (505) 7677-6123

 Hacienda el Higo, Pulperia
"Los Coquitos" 1000 mts al Sur.

 jorge.valdivia@cure.uni.edu.ni
www.uni.edu.ni

DEDICATORIA

A mi padre, por sus consejos directos y por recordarme, a su manera, cómo mantener los pies en la tierra. A mi hijo, porque desde que supe que vendrías encontré un motivo real para concentrarme, ordenar mis prioridades, planear con intención y trabajar con disciplina para alcanzar mis metas. A mi madre, por su apoyo constante y por estar siempre lista para darme una mano cuando la necesitaba. A mis amigos, porque solos somos buenos, pero juntos siempre somos mejores. Gracias por acompañarme y aportar siempre lo necesario. A todos ustedes, gracias por formar parte de este camino. Este logro también es suyo.

Luis Alejandro Rodríguez Miranda

A mis padres Marling y Rolando, por ser un ejemplo constante de perseverancia, por su apoyo incondicional y, sobre todo, la confianza que siempre depositaron en mí. A mí hermano menor, cuya presencia me dio la valentía necesaria para continuar mi camino. A mis amigos, que me impulsaron a salir de mi zona de confort, por acompañarme en cada paso y ayudarme a crecer y superarme no solo académicamente sino personalmente.

Lesly Steven Rojas Mendoza

A mis padres por no darse por vencidos, aun cuando no lo entendían; por siempre apoyarme y ponerme primero sin saber bien cómo, pero sin dejarme caer. A mis amigos, que sin darse cuenta cambiaron mi vida, creando una mezcla de colores e imágenes abstractas que sólo comprende aquel que ha hallado un tesoro. Y a todo aquel que ha creído llegar al final del camino, lleno de miedos e inseguridades; todo está en darte la oportunidad de amarte UN DÍA MÁS. No vale de nada la valentía, si te rindes contigo mismo.

Ariadna Cassandra Sobalvarro Toruño

AGRADECIMIENTO

Nuestro entero agradecimiento a Dios por habernos permitido cumplir esta meta, por sus bendiciones recibidas, sobre todo por la sabiduría obtenida tanto en el aula de clase como en las situaciones adversas que se nos presentaron, porque sin ello no seríamos las personas que somos ahora; aún falta mucho por aprender y mejorar, pero tenemos la confianza de que Dios sabe forjarnos.

A nuestros familiares y amigos que de alguna u otra manera nos motivaron a culminar este proceso. Gracias por su constante apoyo, por sus palabras de ánimo, por siempre recordarnos nuestros valores y principios, los cuales nos ayudaron a desenvolvernos victoriosamente en muchos aspectos mientras cursábamos nuestros estudios, así como en la vida en general.

A todos los docentes del Centro Universitario Regional - UNI, Estelí por habernos impartido sus conocimientos de calidad, por su dedicación y entrega a su admirable labor. Además de la parte académica nos brindaron su humanidad, lo cual fue crucial en el cumplimiento de este estudio, gracias a esto logramos ver los problemas desde otra perspectiva. En especial a la Dra. Alba Veranay Díaz Corrales, por su infinita paciencia para educarnos desde el amor y la comprensión, gracias por todo, le estamos eternamente agradecidos.

Con mucho amor y respeto, gracias.

Luis, Lesly y Ariadna

RESUMEN

Este estudio surge ante la necesidad de diversificar el aprovechamiento industrial de la yuca, un cultivo amiláceo ampliamente disponible, con el de objetivo de desarrollar y validar el proceso para la elaboración de una bebida tipo vodka, alineada con las tendencias de innovación y diferenciación en la industria de bebidas alcohólicas. La metodología se desarrolló bajo un enfoque experimental, evaluando dos variedades, yuca rosa (INTA-Reyna) y yuca blanca (INTA-Nicaragua) mediante una gelatinización básica, donde la yuca rosa fue seleccionada como materia prima principal debido a su potencial de azúcares iniciales (12.7 °Brix), superior a la yuca blanca (10.7 °Brix). Posteriormente se evaluó la hidrólisis enzimática con métodos de control térmico (baño maría e incubadora), donde los hallazgos demostraron que mediante la acción catalítica prolongada con incubadora se alcanzó una liberación de azúcares en promedio de 30.1 °Brix, duplicando los resultados promedios de 16.1 °Brix obtenidos del baño maría. En la fermentación, la levadura de vodka utilizada para la conversión de azúcares en etanol proporcionó un rendimiento 25 % superior con respecto a la eficiencia alcanzada con la levadura de vino, evidenciando que es técnicamente viable producir un licor tipo vodka a partir de yuca bajo parámetros controlados. Aunque, el estudio se realizó a escala de laboratorio, la estimación de costos indica una atractiva rentabilidad unitaria, ofreciendo una ventaja competitiva al utilizar una materia prima local. Este estudio aporta un referente técnico aplicable a la transformación de materias primas amiláceas en destilados neutros, generando información útil para futuros estudios o iniciativas productivas.

ÍNDICE DE CONTENIDO

I.	INTRODUCCIÓN.....	1
II.	JUSTIFICACIÓN	2
III.	OBJETIVOS	3
	Objetivo General	3
	Objetivos Específicos.....	3
IV.	MARCO TEÓRICO.....	4
	4.1 Caracterización de la materia prima	4
	4.1.1 Almidón	4
	4.1.2 Amilosa.....	4
	4.1.3 Amilopectina	5
	4.2 Procesos para la extracción de almidón de yuca	5
	4.3 Proceso de obtención de alcohol a partir de almidón.....	6
	4.3.1 Hidrólisis enzimática.....	6
	4.3.2 Fermentación.....	8
	4.3.3 Destilación.....	10
	4.4 Características del vodka.....	11
	4.5 Costos de producción	13
V.	Hipótesis de investigación.....	17
VI.	DISEÑO METODOLÓGICO.....	19
	6.1 Fuentes de información	26
	6.2 Tipos de información requeridas de las fuentes	27
	6.3 Instrumentos para la recopilación de datos para obtener información.....	27
	6.3.1 Instrumentos utilizados en el laboratorio.....	28
	6.4 Procedimientos para la recolección de la información	29
	6.5 Procesamiento de la información.....	30
VII.	ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS.....	31
	7.1 Determinación de la formulación óptima para la obtención de mosto fermentable a partir de yuca	31

7.1.1 Determinación del tipo de yuca y tiempo de cocción idóneos	32
7.1.2 Determinación de la proporción agua – yuca.....	36
7.1.3 Tratamiento enzimático	38
7.1.4 Formulación del proceso de acondicionamiento del mosto	40
7.1.5 Eficiencia de la hidrólisis	42
7.2 Caracterización del proceso de fermentación alcohólica del mosto de yuca obtenido con la formulación óptima	46
7.2.1 Calidad del Mosto Fermentado	48
7.2.2 Etapas del proceso de fermentación.....	48
7.2.3 Eficiencia de la Fermentación	49
7.3 Evaluación del contenido de alcohol y composición química del vodka obtenido	50
7.3.1 Evaluación del grado alcohólico y estandarización.....	53
7.3.2 Evaluación de características sensoriales	55
7.3.3 Etapas del proceso de destilación.....	57
7.3.4 Rendimiento del destilado	58
7.4 Estimación de los costos de producción a escala de laboratorio del licor tipo vodka obtenido a partir de yuca.....	61
VIII. CONCLUSIONES.....	65
IX. RECOMENDACIONES	66
X. BIBLIOGRAFÍA.....	67
XI. ANEXOS.....	71

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Códigos del tiempo de cocción según tipo de yuca	20
<i>Tabla 2. Proporción de agua: yuca idónea para el proceso productivo</i>	<i>37</i>
Tabla 3. Estadísticas descriptivas del grado alcohólico por tipo de levadura (Proceso 1)	47
<i>Tabla 4. Estadísticos descriptivos del grado alcohólico después de la tercera destilación por tipo de levadura</i>	<i>52</i>
<i>Tabla 5. Medidas resumen D3 usando levadura de vodka</i>	<i>52</i>
Tabla 6. Resultados fisicoquímicos del destilado de yuca posterior a la triple destilación.....	54
<i>Tabla 7. Costos involucrados en las 4 variantes del proceso</i>	<i>62</i>
<i>Tabla 8. Costos de dextrinizado y sacarificado por cada variante</i>	<i>63</i>

ÍNDICE DE FIGURAS

<i>Figura 1. Yuca blanca y Yuca rosa respectivamente</i>	<i>32</i>
<i>Figura 2. Variación de °Brix en la yuca rosa</i>	<i>33</i>
<i>Figura 3. Variación de °Brix en la yuca blanca.....</i>	<i>34</i>
Figura 4. Comparación de grados brix, yuca rosa vs yuca blanca.....	36
<i>Figura 5. Gelatinización de almidones usando yuca rosa con proporción 01:0.5.....</i>	<i>37</i>
Figura 6. Gelatinización de almidones usando yuca rosa con proporción 1:1	38
Figura 7. Resultados de los grados brix obtenidos en las variables de los procesos	39
Figura 8. Diagrama de bloques para el acondicionamiento de la materia prima	41
Figura 9. Grado alcohólico obtenido en la fermentación según tipo de levadura	47
<i>Figura 10. Proceso de fermentación</i>	<i>49</i>
Figura 11. Aumento de los grados de alcohol en las tres destilaciones, según el tipo de levadura empleado	51
<i>Figura 12. Apariencia del destilado después de la tercera destilación.....</i>	<i>54</i>
<i>Figura 13. Resultados promedio del perfil sensorial del vodka de yuca</i>	<i>55</i>
<i>Figura 14. Diagrama de bloques para la etapa de destilado.....</i>	<i>58</i>

Figura 15. Diagrama de bloques completo usando incubadora..... 59
Figura 16. Diagrama de bloque completo usando baño maría 60

I. INTRODUCCIÓN

En Nicaragua, la yuca, un tubérculo ampliamente cultivado, representa una alternativa viable y sostenible a las materias primas convencionales para la producción de vodka. Además de su alto valor nutricional, la yuca es una fuente rica en almidón, lo que la convierte en una opción atractiva desde el punto de vista técnico y económico.

Su aprovechamiento no solo diversificaría los usos de este cultivo, sino que también podría beneficiar la economía local al generar oportunidades de ingreso para agricultores y pequeños emprendimientos, ya que, a pesar de su abundancia, el uso de la yuca en Nicaragua se ha centrado casi exclusivamente en aplicaciones alimenticias tradicionales.

La producción de bebidas alcohólicas como el vodka, no ha sido explorada nacionalmente de manera significativa, en contraste con estudios extranjeros como el de Guerrero y Yépez (2018), donde elaboraron un destilado tipo vodka a partir de yuca y zanahoria blanca, por lo que, determinar el proceso idóneo de elaboración de este producto promueve el posicionamiento del país como un actor industrial competitivo.

El vodka, tradicionalmente elaborado a partir de almidón de patata o cereales, sigue un proceso que incluye la hidrólisis del almidón para su posterior fermentación mediante levaduras. Este procedimiento genera una base alcohólica neutra que se destila para producir la bebida característica, como explica Díaz (2023) en su estudio de la concentración del almidón en la obtención de un destilado alcohólico a base de yuca.

En este estudio se demuestra que el tratamiento enzimático es clave para la hidrólisis del almidón a azúcares simples que favorezcan el proceso de fermentación, obteniendo un producto final con altos niveles de alcohol, viable tanto sensorial como económicamente; dejando un precedente para futuras iniciativas industriales en el país que deseen utilizar yuca como materia prima para la elaboración de vodka.

II. JUSTIFICACIÓN

La expansión de las industrias de bebidas alcohólicas y la abundante producción de yuca en Nicaragua sugieren una oportunidad estratégica para desarrollar un subproducto, como lo es un licor tipo vodka a partir de este tubérculo. El propósito principal de este estudio fue establecer un proceso eficiente para la producción de vodka a partir de yuca, asegurando la viabilidad técnica y económica del mismo.

Esta investigación se alinea con las tendencias académicas y experimentales actuales que buscan diversificar las fuentes de obtención de alcohol. Toma como referente principal el estudio de Guerrero y Yépez (2018), quienes demostraron la viabilidad técnica de elaborar una bebida alcohólica tipo vodka a partir de la mezcla de yuca y zanahoria blanca.

El estudio aporta valor académico al establecer y documentar parámetros técnicos para el procesamiento de la yuca, detallando las condiciones óptimas de hidrólisis y el comportamiento de levaduras especializadas, generando un cuerpo de conocimientos técnicos sobre el rendimiento y la eficiencia de conversión de este almidón en alcohol etílico bajo condiciones controladas.

El proyecto es viable debido a la disponibilidad inmediata de materia prima, proponiendo una alternativa para mitigar el desperdicio de excedentes de cosechas, transformándolos en un subproducto valioso que aumenta la competitividad de la industria nacional, lo que puede derivar en una mayor estabilidad de precios para los productores al tener un mercado secundario de demanda industrial.

Se espera que los resultados de esta validación impulsen la creación de nuevas oportunidades de negocio en el sector de bebidas, promoviendo el fortalecimiento de la economía regional y visibilizar nuestros cultivos tradicionales no solo como un producto de consumo básico, sino como la base de una cadena de valor industrializada que genera empleos y desarrollo tecnológico.

III. OBJETIVOS

Objetivo General

Validar el proceso para la obtención de licor tipo vodka a partir de yuca, a escala de laboratorio, en el CUR UNI Estelí.

Objetivos Específicos

Determinar la formulación óptima para la obtención de mosto fermentable mediante pruebas de hidrólisis enzimáticas en dos variedades de yuca evaluando las condiciones necesarias para la producción de azúcares.

Caracterizar el proceso de fermentación alcohólica del mosto de yuca obtenido mediante pruebas de rendimiento del mosto analizando la eficiencia de los procesos de fabricación del vodka.

Evaluar el contenido de alcohol y perfil sensorial del vodka elaborado, mediante el análisis de sus características organolépticas, verificando su correspondencia con las especificaciones establecidas para este tipo de bebida alcohólica.

Estimar los costos de producción del vodka elaborado a escala de laboratorio considerando los insumos, la energía y otros gastos asociados determinando la rentabilidad en la elección del proceso.

IV. MARCO TEÓRICO

Un marco teórico es un conjunto de criterios, conceptos y teorías que se utilizan como base para analizar, interpretar y comprender un determinado tema o fenómeno. En este apartado se presentan los fundamentos teóricos relacionados con los objetivos específicos planteados.

4.1 Caracterización de la materia prima

El contenido de materia seca de la raíz de yuca fluctúa entre 30 % y 40 %, aunque ocasionalmente se observan casos que exceden este rango de variación. La materia seca del parénquima está constituida, en su mayor parte (90 % a 95 %) por la fracción no nitrogenada, es decir, por carbohidratos tales como el almidón y azúcares. El resto de esta materia seca corresponde a fibra (1 % a 2 %), grasas (0.5 % a 1 %), cenizas o minerales (1.5 % a 2.5 %) y proteínas (alrededor de 2 %). (Guerrero y Yépez, 2018)

4.1.1 Almidón

El almidón es el principal polisacárido de reserva de la mayoría de los vegetales; se encuentra principalmente en cereales, legumbres, pseudocereales y algunas frutas tropicales. Un almidón está constituido por dos macromoléculas de estructura diferente: la amilosa y la amilopectina; estas moléculas tienen un alto peso molecular, están organizadas en gránulos semicristalinos (entre 1 a 100 μm) y son un factor influyente en las propiedades sensoriales y reológicas, principalmente en su capacidad de hidratación y gelatinización. (Bernal y otros, 2017)

4.1.2 Amilosa

La amilosa es una cadena lineal, aunque se dice que algunas veces se comporta como la amilopectina, debido a moléculas que se modifican. El peso molecular de esta estructura oscila de un orden de un millón y su porcentaje en almidones se encuentra

entre 15 % y 20 %, su estructura es helicoidal no ramificada, responsable del color que adquiere con el yodo (coloración azul). (Guardón, 2013)

4.1.3 Amilopectina

La amilopectina que se encuentra entre un 80 % y 85 % en el almidón, consiste en cadenas bien ramificadas apareciendo cantidades elevadas de glucosas, dando como resultado un peso molecular entre 10 000 000 y 500 000 000. Estas cadenas son las responsables de coloración roja en presencia de yodo porque no se enrollan efectivamente. (Guardón, 2013)

4.2 Procesos para la extracción de almidón de yuca

Según (Guardón, 2013) los procesos de extracción de almidón consisten en la separación del almidón de la materia prima mediante una determinada secuencia de pasos, como se describe a continuación:

- Preparación de la yuca para la extracción del almidón.

La preparación de la yuca determina la correcta secuencia de las operaciones que se realizarán antes de la extracción de almidón, influyendo en la eficiencia y calidad de la extracción.

- Métodos de extracción de almidón

Los métodos de extracción de almidón es el paso clave para obtener el componente principal que será convertido en alcohol durante la fermentación.

Existen diferentes métodos de extracción de almidón ya sea proveniente de maíz, trigo, yuca, papa o plátano. Los principales y más generales son: El método seco y el método húmedo. Estos métodos son bastante simples para extracción de almidón de yuca, papa o plátano y un poco más sencillos que los de cereales y el maíz.

- Método seco

Guardón adaptó este método, consistiendo básicamente en la molienda del fruto después de secado, obteniendo de este proceso harina, para su posterior tamizado y así obtener el almidón. Tomando en cuenta las operaciones pequeñas que se llevan a cabo de manera intermedia de los procesos anteriores para facilitar el desarrollo del método y obtener un producto final de calidad y con características que sean deseables en el almidón.

- Método húmedo

En este método se llevan a cabo los mismos procesos que en el método seco con la diferencia que “se realiza un tamizado lavando con agua hasta que el líquido de salida no lleve partículas de almidón o pulpa de Guineo Majoncho y observando un color transparente. Esta solución se deja reposar por 24 horas en refrigeración.”

Añadiendo además un nuevo paso llamado decantación donde se separa la solución del almidón sedimentado para su posterior secado.

4.3 Proceso de obtención de alcohol a partir de almidón

Durante este proceso se determinan las implicaciones que conlleva la transformación del carbohidrato (almidón) en etanol, englobándose en 3 pasos importantes, los cuales son hidrólisis enzimática, fermentación y destilación.

4.3.1 Hidrólisis enzimática

La hidrólisis enzimática se realiza con el objetivo de descomponer el almidón en azúcares (glucosa) mediante enzimas. Las enzimas amilolíticas se dividen en α -amilasa, glucoamilasa.

- Alfa amilasa

Según la MSc. Puig (2023) en su estudio sobre alfa amilasa, menciona que es una enzima amilolítica del grupo de las endo amilasas que se encarga de la hidrólisis del almidón y de otras moléculas relacionadas, como el glucógeno, produciendo polímeros más pequeños compuestos por unidades repetidas de glucosa.

Al combinar alfa amilasa con almidones, se produce un proceso químico llamado dextrinización o licuefacción, donde se rompen las largas cadenas del almidón en fragmentos más pequeños (dextrinas) por la aplicación de calor, con movimiento constante.

- Glucoamilasa

En otro estudio realizado por MSc. Puig en 2024 (Amilasa), menciona que las γ -amilasas son una tercera clase de amilasas, también denominadas glucoamilasas que, al igual que las β -amilasas, son exoamilasas capaces de remover unidades simples de glucosa de los extremos no reductores de los polisacáridos e invertir su configuración.

Después de una dextrinización, suele usarse glucoamilasa a 60 °C para que hidrolice las dextrinas obtenidas y convertir los carbohidratos complejos en azúcares simples, principalmente glucosa, este proceso se llama sacarificación, como comentó la MSc. Puig.

Para determinar las condiciones óptimas de una hidrólisis se tiene que considerar los factores que afectan a las enzimas, que según Hozbor y Lodeiro (2017) son:

- La temperatura:

La variación de la actividad enzimática con la temperatura es diferente de unas enzimas a otras en función de la barrera de energía de activación de la reacción catalizada. Sin embargo, a diferencia de lo que ocurre en otras reacciones químicas, en las reacciones catalizadas por enzimas el efecto de la temperatura es más complejo

porque casi todas las enzimas se desnaturalizan al ser calentadas por encima de las temperaturas fisiológicas. Esto es, la conformación de las enzimas se altera usualmente de manera irreversible perdiendo la actividad catalítica.

- El PH del mosto:

Las enzimas son muy susceptibles a la concentración de iones hidrógeno en la que se encuentran, de acuerdo con su naturaleza requieren de un pH determinado, por lo que, para que presenten su mayor actividad se debe conocer el pH óptimo, que mayormente son cercanos al punto neutro.

- Fermentación alcohólica

Durante la fermentación los azúcares obtenidos por la hidrólisis enzimática se convertirán en etanol y dióxido de carbono a través de las levaduras añadidas como puede ser la *Saccharomyces cerevisiae*.

La levadura *Saccharomyces cerevisiae* es un hongo unicelular, un tipo de levadura utilizado industrialmente en la fabricación de pan, cerveza y vino. Las utilidades industriales más importantes de esta levadura son la producción de cerveza, pan y vino, gracias a su capacidad de generar dióxido de carbono y etanol durante el proceso de fermentación. (Zurita, 2011)

4.3.2 Fermentación

Para Mora y Torres (2022) "La elección de la materia prima, y el control de la temperatura y el tiempo durante la fermentación, son elementos fundamentales que afectan no solo el rendimiento en alcohol, sino también el sabor y las características organolépticas del vodka."

Según Puerta (2010) en su estudio sobre los fundamentos de fermentación, existen diferentes factores que afectan la fermentación de un mosto como lo son: la cantidad

de oxígeno, la cantidad de azúcares, el tiempo, la temperatura y el pH del mosto, en donde destaca que:

- Cantidad de oxígeno.

Es determinante para el proceso de fermentación debido a que cuando hay oxígeno las levaduras realizan la respiración, crecen, oxidan completamente la glucosa y así obtienen el adenosín trifosfato (ATP) que es la molécula que almacena y transporta la energía química necesaria para que las células sobrevivan sin oxígeno, ya que, en condiciones de anaerobiosis, estos microorganismos fermentan azúcares, como la glucosa y la lactosa.

- Concentración de azúcar:

Como se mencionó con anterioridad las levaduras requieren de azúcares para la transformación en etanol, por lo que es imprescindible en la producción de una bebida alcohólica la presencia de azúcar durante el periodo de fermentación.

- El tiempo

Ya que no existe un tiempo óptimo reglamentario para la fermentación de bebidas alcohólicas tipo vodka se utilizó como referencia los tiempos de fermentación que menciona Puerta, el cual tiene el rango de entre 20 y 30 días, seleccionando para este estudio 21 días como duración de la fermentación.

- La Temperatura.

Para la temperatura y pH del mosto se tomó en cuenta lo descrito por Maigualca (2021) en su estudio sobre una bebida alcohólica destilada a partir de papa donde menciona que el factor de la temperatura está relacionado con la levadura debido a que la transformación de los azúcares produce una reacción exotérmica (desprendimiento de calor). Si la temperatura es baja el proceso de fermentación será lento. Las levaduras utilizadas para la fermentación tienen un rango de temperatura óptima entre 28 °C y 32 °C, por lo que la temperatura ideal para el proceso de fermentación es 30 °C.

- pH del mosto.

Se pueden tener algunas complicaciones debido a que las levaduras son afectadas por el medio alcalino o ácido, y debido a que algunas frutas contienen algunos ácidos (ácido tartárico, málico) que limitan el proceso. Por lo cual se recomienda manejar el rango óptimo en que trabajan las levaduras siendo este desde 3.5 a 5.5 de pH, por lo que deberá ajustarse el mosto a este requerimiento.

4.3.3 Destilación

Durante este proceso se realiza la separación de las sustancias por medio de la evaporación debido a que los líquidos tienen distintos puntos de ebullición para luego bajar su temperatura y devolver a su estado líquido (condensación).

Cubillos (2014) menciona que dependiendo de las condiciones en las que se lleve a cabo el proceso, la destilación se clasifica como: al vacío (presión reducida), fraccionada, en corriente de vapor, micro destilación y simple.

- La destilación al vacío se emplea cuando las sustancias a separar son lábiles al calor y por tanto se hace necesario disminuir la presión del sistema para llevar a cabo la separación a una temperatura de ebullición inferior.
- La destilación fraccionada Se realiza mediante la introducción de una columna de fraccionamiento, se lleva a cabo varias destilaciones simples en un solo paso. Es ampliamente utilizada para la separación de las fracciones del petróleo y en la industria de solventes.
- La micro destilación se emplea para separar líquidos muy viscosos con altos puntos de ebullición.
- El método simple se emplea con métodos de separación inicial, en procesos químicos que requieren una separación rápida de una mezcla de líquidos o de una

separación del líquido de sus impurezas no volátiles. Siendo este, el más idóneo para utilizar en este estudio, debido a su rapidez en separar la mayor cantidad de alcohol posible de la mezcla fermentada.

4.4 Características del vodka

Es importante destacar lo que menciona Fischer (2018) en su artículo “Etanol e impurezas en destilados espirituosos” señalando que el etanol, o alcohol etílico, es el compuesto responsable de los efectos psicoactivos del consumo de bebidas alcohólicas, y su concentración es un factor crítico en la calidad del producto. Mientras que las impurezas, incluyen compuestos como el metanol, aldehídos, y alcoholes de fusel, siendo subproductos indeseables de los procesos de fermentación y destilación.

De acuerdo con el reglamento 2019/787 del Parlamento Europeo y del Consejo (2019) sobre bebidas espirituosas, el vodka se define como una bebida espirituosa obtenida a partir de alcohol etílico de origen agrícola. Bajo esta denominación, la yuca se clasifica como una materia prima apta y legítima, al ser un tubérculo con alto contenido de almidón susceptible de transformación mediante fermentación alcohólica.

Este reglamento, también menciona que el grado de alcohol mínimo debe ser del 37.5 % vol., sin un máximo establecido en Europa, a comparación de la Norma Técnica Obligatoria Nicaragüense (NTON) 03 036 – 00 (2001) que declara que el contenido de alcohol debe estar dentro del rango de 34 % vol. a 40 % vol., sin ningún sabor ni aroma que alteren sus características neutras.

Por otra parte, la normativa ISO 22000 (2018) y el Ministerio de Salud (MINSa, 2011) determinan que el agua empleada en el proceso de producción debe ser libre de contaminantes microbiológicos, contaminantes químicos y debe ser adecuada para el consumo humano.

A nivel nacional la producción de bebidas alcohólicas debe cumplir con las normativas específicas que garantizan la calidad y seguridad del producto. Según el ministerio de fomento, industria y comercio (2006), las bebidas alcohólicas deben etiquetarse adecuadamente, indicando el contenido de alcohol, el origen del producto y advertencias sanitarias, entre otros requisitos.

Además, se deben someter a controles de calidad regulares que aseguren que estos están libres de contaminantes y que su composición cumpla con los estándares establecidos.

Finalmente, la Asamblea Nacional de la República de Nicaragua (2002) con su ley general de salud, Ley No. 423, establece los requisitos de higiene y control microbiológico en la producción de alimentos y bebidas, declarando que las instalaciones de producción deben mantener un entorno controlado, donde se aseguren prácticas de limpieza adecuadas y se minimice el riesgo de contaminación por patógenos, incluyendo todas las etapas del proceso, desde la fermentación hasta el embotellado.

De la información obtenida en la NTON 03 036-00 (2001) y el reglamento 2019/787 (2019), es válido destacar que más allá del contenido alcohólico y la yuca como materia prima, se deben cumplir varios aspectos clave para permitir que el producto final sea reconocido como una bebida alcohólica tipo Vodka, siendo los siguientes:

- Pureza del Alcohol Etílico:

Un vodka de calidad se caracteriza por la alta pureza de su alcohol etílico. Esto significa que, durante la destilación, se deben eliminar rigurosamente los congéneres (otros alcoholes como el metanol, propanol, butanol, así como ésteres, aldehídos y cetonas) que pueden afectar negativamente el sabor, el aroma y la calidad general de la bebida. Sin embargo, al no utilizarse ingredientes que estimulen la generación de este tipo de alcoholes indeseados, se asegurará que el producto final sea de la mayor pureza posible.

- Proceso de Destilación:

Si bien no existe una cantidad reglamentaria de destilaciones, el vodka tradicionalmente se destila múltiples veces para alcanzar su pureza característica. Aunque la materia prima sea la yuca, el proceso de destilación logra emular esta práctica debido a que se considera realizar tres destilados continuos para obtener la transparencia e inocuidad deseadas para lograr un alcohol neutro y limpio.

- Características Organolépticas:

Aunque el vodka se considera una bebida neutra, debe tener ciertas características sensoriales distintivas. Un buen vodka debe ser incoloro, inodoro (o con un ligero aroma a alcohol puro) y tener un sabor limpio y suave en boca, sin sabores o aromas fuertes que recuerden a la materia prima original (en este caso, la yuca).

4.5 Costos de producción

Los costos de producción están determinados por las unidades que se producirán, según, Tello *et al.* (2017) como se citó en (Toaquiza, 2024) conceptualizan de la siguiente manera:

- Costo variable

“Son aquellos valores que modifican constantemente en relación directa a una actividad o volumen de ventas, es decir los costos varían porque están construido de materia prima.” Estos costos se calculan mediante la ecuación 1.

Ecuación 1. Costo variable

$$CV = CVu * UP$$

Nota. Fórmula obtenida de Tello *et al.* (2017) citado por (Toaquiza, 2024)

De donde:

CV = Costos variables totales (C\$)

CVu = costo variable unitario (C\$)

UP = Unidades producidas

- Costos fijos

Son aquellos valores que no se modifica con el cambio del volumen de la actividad. Es decir que estos costos tienden ser bajo el tiempo y no en la cantidad producida, Por lo tanto, a diferencia de los variables, los costos fijos permanecen constante, esto no dependen de la cantidad de bienes o servicios producidos.

- Costos fijos unitarios o estándar

Según Balanda (2005) los costos fijos unitarios “decrecen al incrementarse el grado de aprovechamiento de la Capacidad Instalada, dado que se cuenta con un mayor número de unidades que absorben el Costo Fijo Total.”

Ecuación 2. Costos fijos unitarios

$$CFu = \frac{CF}{UP}$$

Nota. Fórmula obtenida de Balanda (2005)

Donde:

CFu = Costos fijos unitarios (C\$)

CF = Costos Fijos (C\$)

UP = Unidades producidas

- Costo unitario

Para Balanda (2005) el costo unitario “Generalmente es un “promedio” que se calcula dividiendo los “Costos totales incurridos” en una unidad de costeo durante un período determinado de tiempo, entre el número de unidades de costos procesada en ese período de tiempo.”

Ecuación 3. Costo unitario

$$CU = \frac{(CV + CF)}{UP}$$

Donde:

CU = Costo Unitario (C\$)

- Costo Directo

Es el que se deriva de las erogaciones que hace el contratista por el pago de salarios reales al personal que interviene en la ejecución del concepto de trabajo de que se trate, incluyendo al primer mando, entendiéndose como tal hasta la categoría de cabo o jefe de una cuadrilla de trabajadores. No se consideran dentro de este costo las percepciones del personal técnico, administrativo, de control, supervisión y vigilancia que corresponden a los costos indirectos. (Soliz, 2013)

- Materia prima

Según, Tello et al. (2017) como se citó en (Toaquiza Anguisaca, 2024) los materiales están directamente relacionados con el producto terminado simplemente determinando, asignando o correlacionando el valor incluido en el primer componente del costo. Asimismo, es reconocido como elemento principal en la transformación del producto terminado, se identifica por el peso, volumen, etc.

- Reactivos:

- Enzimas

“Una enzima es una proteína que actúa como catalizador biológico, llevando a cabo reacciones químicas a altas velocidades, sin consumirse durante la reacción”. (Badui, 2018)

- Levaduras

Levadura es el nombre genérico que reciben un grupo de hongos ascomicetes pertenecientes al orden endomicetales. Estos microorganismos son los más empleados

para la producción de etanol por vía fermentativa, debido a su alta productividad en la conversión de azúcares a bioetanol debido a que su producción de tóxicos es muy inferior a la de otros microorganismos. (Espinosa, 2017).

- Costos Indirectos:

Son aquellos costes que afectan al proceso productivo en general de uno o más productos, por lo que no se puede asignar directamente a un solo producto sin usar algún criterio de asignación. (Soliz, 2013)

Otros Costos:

- Pruebas de calidad para análisis sensorial

El análisis sensorial hoy en día se perfila como una herramienta para medir de forma objetiva, precisa y reproducible las características de un determinado producto, siempre y cuando se tenga presente exactamente lo que se desea medir. (Cordero, 2013).

V. Hipótesis de investigación

En todo proceso de investigación científica y experimental, la formulación de una hipótesis constituye el eje conductor que otorga dirección y sentido al estudio. Esta permite establecer una meta clara sobre la viabilidad de transformar una materia prima agrícola, como la yuca, en un producto industrial de alta pureza que cumpla con estándares internacionales.

Para este estudio, la hipótesis permite proyectar con precisión si el proceso diseñado es capaz de alcanzar la neutralidad, el perfil aromático suave y la cristalinidad que exige el mercado del vodka, convirtiendo una inquietud académica en una solución técnica comprobable, escalable y reproducible, siendo así la hipótesis es:

Se plantea que el proceso de gelatinización, hidrólisis enzimática, fermentación y triple destilación aplicado a la yuca, bajo condiciones controladas a escala de laboratorio en el CUR-UNI Estelí, permite obtener un destilado tipo vodka que alcanza un grado alcohólico objetivo y presenta un perfil sensorial compatible con las especificaciones establecidas para este tipo de bebida.

Con el objetivo de validar un proceso de elaboración para obtener un licor tipo vodka a base de yuca, se formularon las siguientes hipótesis estadísticas:

- Tipo de yuca

Hipótesis Nula (H_0): No existen diferencias significativas en la cantidad de azúcares generados (°Brix), entre las variedades de yuca utilizadas en la gelatinización.

Hipótesis alternativa (H_1): Existen diferencias significativas en la cantidad de azúcares generados (°Brix), entre las variedades de yuca utilizadas en la gelatinización.

- Métodos de control térmico (baño maría e incubadora)

Hipótesis Nula (H_0): El método de sacarificación controlada mediante incubadora no genera mayor liberación de azúcares fermentables que el tratamiento en baño maría.

Hipótesis alternativa (H_1): El método de sacarificación controlada mediante incubadora genera mayor liberación de azúcares fermentables que el tratamiento en baño maría.

- Tipo de levadura (cepas de fermentación)

Hipótesis Nula (H_0): El tipo de cepa fermentativa no influye significativamente en la conversión de azúcares y el grado de alcohol del licor obtenido.

Hipótesis alternativa (H_1): El tipo de cepa fermentativa influye significativamente en la conversión de azúcares y el grado de alcohol del licor obtenido.

VI. DISEÑO METODOLÓGICO

El presente estudio se enfocó en la validación del proceso para la elaboración de licor tipo vodka a base de yuca a escala de laboratorio. Este trabajo se clasificó como una investigación experimental aplicada, ya que busca desarrollar y validar un proceso industrial idóneo usando el almidón obtenido de la yuca, basándose en pruebas y análisis controlados. La investigación se estructuró en un diseño sistémico, abordando cada etapa del proceso de manera integral y secuencial, desde la obtención de la materia prima hasta la evaluación del producto final. A continuación, se describen los métodos utilizados para dar respuesta a las hipótesis planteadas.

- Determinar el tipo de Yuca y tiempo de cocción:

Para dar respuesta a la hipótesis estadística sobre si existen diferencias significativas en la cantidad de azúcares generadas, entre las variedades de yuca utilizadas en la gelatinización se compararon con tiempos entre rangos de 5 y 10 minutos, en este caso, las variables de estudios (variables independientes) fueron tipo de yuca y tiempo de cocción, de donde:

- Tipo de Yuca (Y)

Se comparan dos variedades de yuca nombradas según el Instituto Nicaragüense de Tecnología Agropecuaria en sus manuales y cartillas como INTA-Reyna (2025) la cual será denominada yuca rosa e INTA-Nicaragua (2025) que será llamada yuca blanca.

Y1 = Yuca rosa

Y2 = Yuca blanca

- Tiempo de cocción (t)

Comparando 10 tiempos distintos con rangos de 5 a 10 minutos de diferencia.

t1 = 5 min, t2 = 10 min, t3 = 15 min, t4 = 20 min, t5 = 25 min,
t6 = 30 min, t7 = 40 min, t8 = 45 min, t9 = 50 min, t10 = 60 min.

Se realizaron n=10 pruebas por cada tiempo mencionado en los dos tipos de yuca, calculando el promedio de grados brix (variable dependiente) obtenidos por tiempo de cocción, codificados según el tipo de yuca y el tiempo de cocción al que fue sometida la muestra, tal como se muestra en la Tabla 1.

Tabla 1. Códigos del tiempo de cocción según tipo de yuca

Tratamientos	Código	Tipo de yuca	Tiempo de cocción
T1	Y1t1	Yuca Rosa	5 minutos
T1	Y1t2	Yuca Rosa	10 minutos
T1	Y1t3	Yuca Rosa	15 minutos
T1	Y1t4	Yuca Rosa	20 minutos
T1	Y1t5	Yuca Rosa	25 minutos
T1	Y1t6	Yuca Rosa	30 minutos
T1	Y1t7	Yuca Rosa	40 minutos
T1	Y1t8	Yuca Rosa	45 minutos
T1	Y1t9	Yuca Rosa	50 minutos
T1	Y1t10	Yuca Rosa	60 minutos
T2	Y2t1	Yuca Blanca	5 minutos
T2	Y2t2	Yuca Blanca	10 minutos
T2	Y2t3	Yuca Blanca	15 minutos
T2	Y2t4	Yuca Blanca	20 minutos
T2	Y2t5	Yuca Blanca	25 minutos
T2	Y2t6	Yuca Blanca	30 minutos
T2	Y2t7	Yuca Blanca	40 minutos
T2	Y2t8	Yuca Blanca	45 minutos
T2	Y2t9	Yuca Blanca	50 minutos
T2	Y2t10	Yuca Blanca	60 minutos

Nota. Elaboración Propia

Para este experimento se sometió a cocción 10 muestras de yuca blanca y 10 muestras de yuca rosa, a partir del momento en que el agua llega al punto de ebullición se adicionaron las muestras de yuca, comenzando la medición del tiempo de cocción establecido para cada una de ellas. Una vez que las muestras logran bajar su temperatura alrededor de los 20 °C, se procede a medir los niveles de °Brix obtenidos y anotar los datos obtenidos en las tablas para registros experimentales del Anexo 1 para la yuca rosa y los datos de la yuca blanca en el Anexo 2.

- Determinación de la proporción agua-yuca:

Utilizando los resultados del experimento anterior (yuca y tiempo de cocción) en esta prueba la variable central fue la proporción del agua que se debe utilizar para facilitar sus posteriores tratamientos y como afecta en los grados brix. Para obtener la mejor gelatinización de los almidones, se comparó la proporción de agua en relación con el peso de la yuca, las combinaciones fueron:

- Por cada mil gramos de yuca se usaron medio litro de agua (1:0.5)
- Por cada mil gramos de yuca se usaron un litro de agua (1:1)
- Por cada mil gramos de yuca se usaron un litro y medio de agua (1:1.5)
- Por cada mil gramos de yuca se usaron dos litros de agua (1:2)

Para este experimento se agregó la muestra de yuca, al agua previamente en ebullición, dejándolos el tiempo idóneo determinado en el inciso anterior. Una vez transcurrido el tiempo se separa el agua de la yuca, realizando un seguimiento de las cantidades de agua y yuca para determinar las pérdidas en la evaporación del agua, para calcular la cantidad necesaria que se debe adicionar para mantener la proporción de agua con respecto a la cantidad de yuca antes de licuarlo, midiendo aquí los °Brix obtenidos y registrando los resultados en el Anexo 3.

- Experimentación del método de control térmico para la sacarificación.

Para este punto ya determinado el tipo de yuca, los tiempos de cocción y la proporción del agua a utilizar, permitió tener las condiciones óptimas para la prueba con enzimas y levaduras. Las enzimas utilizadas fueron alfa-amilasa y glucoamilasa las que permiten la transformación del almidón en azúcares.

Para dar respuesta a la hipótesis sobre si el método de sacarificación controlada mediante incubadora genera mayor liberación de azúcares fermentables que el tratamiento en baño maría, se realizaron 6 pruebas por cada proceso, los cuales se clasificaron según su método térmico de sacarificación:

Proceso 1:

Alfa-amilasa por 1 hora a baño maría a 70 °C y posterior adición de glucoamilasa en incubadora por 24 horas a 60 °C.

Proceso 2:

Alfa-amilasa por 1 hora a baño maría a 70 °C y glucoamilasa a baño maría por 1 hora a 60 °C.

Ambos procesos inician con la dextrinización sometiendo a la mezcla a baño maría agregando la proporción de alfa amilasa en polvo correspondiente a un 1 % del peso de la mezcla, manteniendo una temperatura de 70 °C por una hora.

Posteriormente, para el proceso 1 se permite que la mezcla reduzca su temperatura a 60 °C, momento en el cual se adiciona 0.5 g/L de glucoamilasa en polvo, dejándolo reposar por 24 horas en la incubadora.

Para el proceso 2 se permite que la mezcla reduzca su temperatura a 60 °C, momento en el cual se adiciona 0.5 g/L de glucoamilasa en polvo, manteniendo la temperatura constante a baño maría.

Una vez las mezclas terminan su tiempo de sacarificado, se dejan enfriar para medir los °Brix obtenidos y anotando los datos en el Anexo 4.

Para los cálculos de eficiencia de la hidrolisis, conocemos que la yuca está compuesta por el 30 % - 40 % de materia seca, como almidón y azúcares, tal como se describe en la ecuación 4, de esa materia seca siendo el 96 % almidón, por lo tanto, para el cálculo del almidón se asume que:

Ecuación 4. Cálculo del porcentaje de materia seca existente

$$\text{Materia Seca} = \text{peso de la yuca} \times 30 \%$$

Nota. Elaboración propia en base a información obtenida por Guerrero y Yépez (2018)

Mientras que el almidón teórico responde a la ecuación 5.

Ecuación 5. Cálculo del porcentaje de almidón teórico

$$\text{Almidón Teórico} = \text{Materia Seca} \times 96 \%$$

Nota. Elaboración propia en base a información obtenida por Guerrero y Yépez (2018)

Para obtener la Glucosa Teórica Máxima (GTM), se utilizó la ecuación 6.

Ecuación 6. Cálculo de glucosa teórica máxima

$$\text{GTM} = \text{Almidón Teórico} \times FC_{\text{almidón} \rightarrow \text{glucosa}}$$

Nota. Fórmula obtenida de Chang y Goldsby (2013)

De donde:

GTM = glucosa teórica máxima

FC = Factor de conversión

Ecuación 7. Cálculo de brix real

$$Brix\ real = Brix\ final - Brix\ inicial$$

Nota. Fórmula obtenida de Chang y Goldsby (2013)

Ecuación 8. Eficiencia de hidrólisis

$$E_{Hidrólisis} = \left(\frac{^{\circ}Brix\ final}{^{\circ}Brix\ inicial} \right) \times 100$$

Nota. Fórmula obtenida de Chang y Goldsby (2013)

Ecuación 9. Cálculo de azúcares en una mezcla

$$Azúcar\ disuelta\ (g) = peso\ de\ la\ mezcla\ (g) \times \frac{^{\circ}Brix}{100}$$

Nota. Fórmula obtenida de Chang y Goldsby (2013)

Ecuación 10. Fórmula de glucosa real

$$Glucosa\ real = AdH - AaH$$

Nota. Fórmula obtenida de Chang y Goldsby (2013)

Donde:

Adh = Azúcares después de hidrólisis enzimática

AaH = Azúcares antes de hidrólisis enzimática

Ecuación 11. Eficiencia del proceso de hidrólisis

$$E = \left(\frac{Glucosa\ Real}{Glucosa\ Teórica\ máxima} \right) \times 100$$

Nota. Fórmula obtenida de Chang y Goldsby (2013)

- Experimentación del proceso de tipo de levadura.

Una vez finalizada la transformación del almidón en azúcares mediante las enzimas en cada uno de los procesos, se utilizaron los dos tipos de levaduras para el proceso

de fermentación, con el objetivo de analizar cual proporciona mayor conversión de azúcares en alcohol.

Para dar respuesta a la hipótesis de que el tipo de cepa fermentativa influye significativamente en la conversión de azúcares y el grado de alcohol del licor obtenido, se procedió con las pruebas de fermentación utilizando dos tipos de levaduras: *Saccharomyces cerevisiae* (de ahora en adelante llamada levadura para vino) y una mezcla especial para la producción de vodka la cual contiene *Saccharomyces cerevisiae* con agregados de nutrientes para levadura, enzimas, vitaminas y trazas de minerales (de ahora en adelante llamada levadura para vodka).

Las muestras resultantes de los procesos utilizando incubadora y baño maría se separaron en dos partes para medir las reacciones de las levaduras en cada una de las pruebas, teniendo en cuenta que las levaduras deben ser previamente activada en 100 mL de agua a 30 °C, con una proporción de 2.88 g de levadura en polvo por litro de mezcla a la cual se debe adicionar.

Mientras se permite que la levadura se active, se deja reposar la mezcla sacarificada hasta llegar a 30 °C para mantener viva la levadura. Una vez que ambos se encontraron a la misma temperatura, se mezclaron en un envase transparente totalmente sellado con trampilla de agua, dejando reposar por 21 días. Terminado este tiempo los datos experimentales fueron registrados en el Anexo 5 para las muestras de incubadora y el Anexo 6 para las muestras a baño maría.

- *Grados de alcohol en las tres destilaciones por proceso.*

Se realizaron pruebas de grados de alcohol en cada destilación, según el proceso y levadura utilizada, para poder analizar qué beneficios se obtienen. Una vez terminada la fermentación, se procedió a filtrar con tela fina las muestras obtenidas, procediendo a realizar tres destilaciones por muestra para eliminar impurezas. Los resultados

fueron registrados en el *Anexo 7* para las muestras realizadas en incubadora y en el *Anexo 8* para las muestras realizadas en baño maría.

Debido a que no existen parámetros de rendimiento que se apliquen de forma universal, es importante resaltar que los resultados de las destilaciones pueden variar según las condiciones iniciales del mosto, para compensar esta inconsistencia y asegurar la uniformidad en la producción se estandariza el nivel de alcohol, mediante la ecuación 12.

Ecuación 12. Fórmula para la dilución

$$C1V1 = C2V2$$

Nota. Fórmula obtenida de Chang y Goldsby (2013)

Donde:

C1 = concentración de la sustancia 1 (% vol.)

C2 = concentración de la sustancia 2 (% vol.)

V1 = volumen de la solución 1 (mL)

V2 = volumen de la solución 2 (mL)

6.1 Fuentes de información

Las fuentes de información que se incluyen en esta investigación son con la finalidad de utilizar procedimientos comprobados y/o experimentales para la elaboración de licor tipo vodka:

- Datos experimentales obtenidos en el laboratorio.
- Expertos en procesos de fermentación y destilación, para la identificación de las diferentes etapas del proceso.
- Instituciones académicas y de investigación.
- Literatura científica (artículos, libros, tesis) sobre la producción de bioetanol, la caracterización de la yuca y la producción de vodka.

- Normas técnicas y reglamentos relacionados con la producción de bebidas alcohólicas.
- Datos de proveedores de insumos (enzimas, levaduras).

6.2 Tipos de información requeridas de las fuentes

De las fuentes seleccionadas, se requirió la siguiente información:

- Características fisicoquímicas de las variedades de yuca seleccionadas.
- Métodos y condiciones óptimas para la hidrólisis y fermentación de almidón de yuca.
- Parámetros técnicos y operativos para el diseño del proceso de destilación.
- Opiniones y experiencias de expertos sobre el uso de yuca en la producción de bebidas alcohólicas.
- Rendimiento: Eficiencia de la conversión de almidón en azúcares, eficiencia de la fermentación, rendimiento en volumen de alcohol.
- Calidad: Perfil sensorial del vodka (aroma, sabor, cuerpo), contenido de compuestos volátiles (metanol, ésteres, aldehídos), estabilidad a largo plazo.
- Costos: Costo de las materias primas, insumos, mano de obra, energía, etc.

6.3 Instrumentos para la recopilación de datos para obtener información

Para este estudio se diseñaron instrumentos de recopilación de datos, tales como:

- Entrevista semiestructurada para experto. (Véase *Anexo 9*)
- Fichas técnicas para la recolección de datos fisicoquímicos del vodka de yuca. (Véase *Anexo 10*)
- Cuestionarios: Para evaluar el perfil sensorial del vodka. (Véase *Anexo 11*)
- Hojas de registro: Para registrar los datos de los experimentos. (Véase *Anexo 12*)

- Protocolos experimentales para pruebas de hidrólisis, fermentación y destilación (Véase *Anexo 13*, *Anexo 14* y *Anexo 15* respectivamente)

6.3.1 Instrumentos utilizados en el laboratorio

Para la elaboración de un licor tipo vodka a partir de yuca (*Manihot esculenta*) se utilizaron utensilios de cocina y equipos del laboratorio de agroindustria del CUR-UNI, Estelí y del laboratorio de ASDENIC, los equipos más importantes fueron:

- pH-metro

Marca Estarter, Modelo ST20 con rango de pH 0-14 y rango de temperatura 0-99 °C.

- Brixometro

Marca Milwaukee, Modelo MA871 con rango 0 °Brix – 85 °Brix

- Balanza analítica

Marca RUIZHAN, Modelo RD6002 con Capacidad 6 kg / 0.01 g

- Vinometro

Marca Vin-O-Meter con rango 0 % vol. – 25 % vol.

- Refractómetro de alcohol

Marca Tekcoplus, Modelo RETK-75 con rango 0 % vol. – 80% vol.

- Licuadora

Marca Ninja, Modelo BN701LA con capacidad 2.13 L / 75 oz

- Termómetro

Marca Winco, Modelo TMT-DG4 con rango -40 °C – 230 °C

- Incubadora

Marca Barnstead, Modelo Lab-Line L-C 403 con rango 5 °C – 65 °C

- Destilador

Modelo STDB-10L-U con capacidad de 3 galones.

Si bien para este estudio a escala de laboratorio se utilizan herramientas manuales para el pelado y lavado de la yuca, a escala piloto se recomienda la utilización de un pelador de tambor abrasivo, ya que, este equipo permite procesar cargas de hasta 50kg en ciclos de pocos minutos, eliminando la corteza mediante fricción y lavado simultáneo, lo que reduce la carga microbiana inicial antes de la hidrólisis.

6.4 Procedimientos para la recolección de la información

La recolección de información se ejecutó realizando entrevista a experto y mediante observación y análisis de resultados en el laboratorio. Al mismo tiempo se hizo:

- Toma de muestras representativas de la yuca, mosto y vodka en diferentes etapas del proceso.
- Análisis en laboratorio para determinar las características fisicoquímicas de las propiedades de las muestras.
- Implementación de diseño experimental en laboratorio para probar y optimizar el proceso de elaboración de vodka.
- Organizar paneles sensoriales para evaluar el perfil sensorial del vodka.
- Registrar todos los datos obtenidos en hojas de cálculo o bases de datos.

6.5 Procesamiento de la información

Los resultados experimentales de los procesos implementados se analizaron aplicando análisis estadísticos y los costos de producción a escala de laboratorio se determinaron en hojas de cálculo de Excel.

Una vez obtenida toda la información relevante para el estudio, se procedió a analizar la información por medio de:

- Análisis descriptivo y comparativo de las características fisicoquímicas de las variedades de yuca.
- Matriz de resultados de entrevista a experto.
- Evaluación de la eficiencia y rendimiento de los procesos de hidrólisis, fermentación y destilación.
- Integración de resultados para validar el diseño del proceso y proponer recomendaciones para su escalamiento industrial.
- Organizar los datos en tablas y gráficos para facilitar su análisis.
- Utilizar software estadístico (InfoStat) para realizar análisis descriptivos (media, gráficos, etc.) e inferenciales (ANOVA).
- Interpretar los resultados obtenidos en el contexto del problema de investigación.
- Presentar los resultados de la investigación en un informe técnico, incluyendo la metodología, los resultados y las conclusiones.

Este diseño metodológico aseguró un enfoque sistémico y riguroso para validar el proceso de elaboración de licor tipo vodka a base de yuca, contribuyendo a la innovación y desarrollo industrial en el país.

VII. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS

Los resultados obtenidos permitieron identificar la formulación óptima del mosto fermentable, evidenciando que las características de la yuca influyeron directamente en la concentración de sólidos solubles (°Brix).

La proporción empleada y el control térmico del proceso de hidrolisis enzimática demostraron que el mantenimiento de temperaturas controladas permitió una adecuada conversión del almidón en azúcares fermentables siendo determinante para maximizar la eficiencia de fermentación y obtener un producto con características compatibles con las especificaciones de un licor tipo vodka.

Estos hallazgos confirman que la materia prima, junto con la formulación seleccionada, desempeña un papel clave en la estabilidad y consistencia del producto obtenido. Asimismo, la selección de la cepa de levadura aplicada durante la fermentación incidió de manera significativa en el comportamiento del proceso optimizando la conversión de azúcares en etanol reduciendo variaciones en el perfil del destilado.

Estas condiciones influyeron no solo en el rendimiento alcohólico, sino también en las características sensoriales del producto final, evidenciando que el insumo biológico es una variable crítica del proceso por ser determinante para garantizar calidad y reproducibilidad en la elaboración del vodka a partir de yuca.

7.1 Determinación de la formulación óptima para la obtención de mosto fermentable a partir de yuca

La optimización de la formulación inicial constituyó un hito crucial para la obtención exitosa del mosto fermentable, marcando el umbral de eficiencia del proceso de extracción de azúcares.

Asimismo, la determinación precisa del tiempo de cocción demostró ser un factor limitante, ya que el ajuste de este parámetro no solo garantizó la completa ruptura de la matriz del almidón, sino que también minimizó cualquier degradación térmica de los carbohidratos. El éxito de esta etapa confirmó la viabilidad de la materia prima seleccionada bajo condiciones controladas para maximizar la liberación de precursores de azúcares.

7.1.1 Determinación del tipo de yuca y tiempo de cocción idóneos

Tras preparar las dos variedades de yuca (*Figura 1*), yuca blanca y yuca rosa mediante procedimientos estándar que incluyeron lavado, desinfección, pelado, corte en porciones uniformes y el pesado correspondiente, se sometieron a pruebas hidrolíticas para identificar la más cualificada.

Figura 1. Yuca blanca y Yuca rosa respectivamente



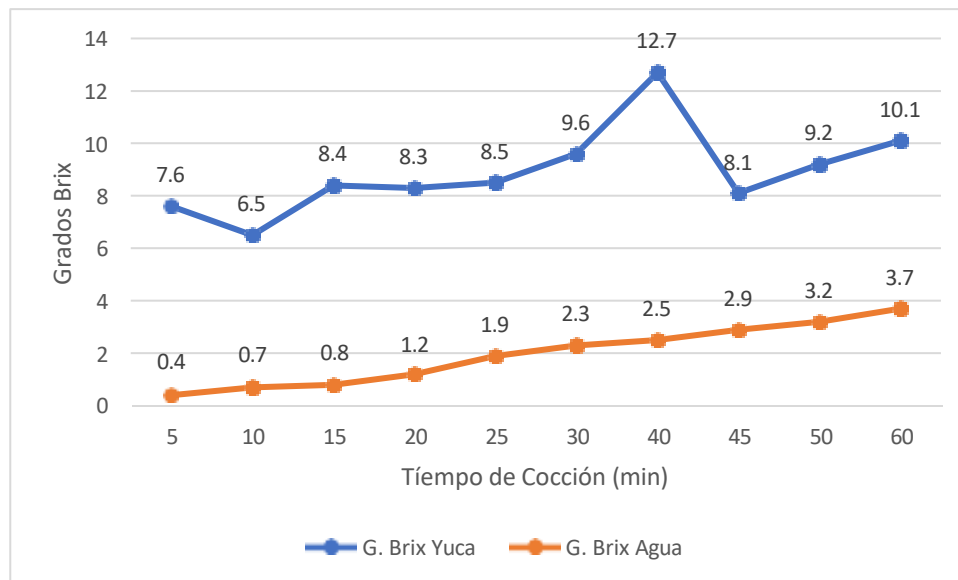
Nota. Elaboración propia

Se puede observar en la (*Figura 2*) que, a medida que aumenta el tiempo de exposición al calor, la yuca rosa, presenta transferencia progresiva de azúcares hacia el medio acuoso, haciéndolo apto para su utilización en el proceso de triturado, facilitando el aprovechamiento de los nutrientes transferidos.

Sin embargo, la pérdida de grados Brix en la materia prima es relativamente baja, lo que sugiere una liberación gradual y controlada de azúcares, fenómeno que, según

Charles, Chang & Huang (2005) está naturalmente asociado a los procesos de gelatinización del almidón que ocurren durante el tratamiento térmico de la yuca, donde el calor y la presencia de agua favorecen la liberación de compuestos solubles del tejido vegetal.

Figura 2. Variación de °Brix en la yuca rosa



Nota. Elaboración propia a partir de datos experimentales

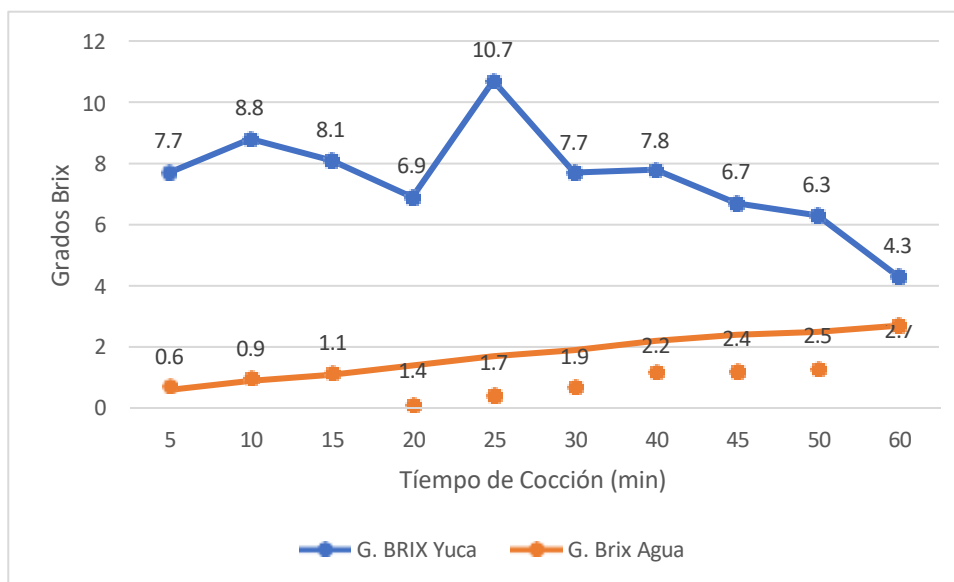
Específicamente, los valores de grados Brix en el líquido aumentan de 7.6 a 10.1 °Brix, alcanzando su punto máximo a los 40 minutos de cocción con un valor de 12.7 °Brix. Este comportamiento indica que la yuca rosada posee características adecuadas para procesos de cocción prolongados, favoreciendo una extracción eficiente de azúcares sin comprometer de forma significativa la integridad de la materia prima, lo cual coincide con lo reportado en el estudio de Moorthy (2002) sobre tubérculos ricos en almidón, donde el tratamiento térmico facilita la gelatinización y la liberación de compuestos solubles hacia el medio acuoso.

Podemos observar una reacción interesante en las últimas 2 repeticiones de esta prueba Y1t9, Y1t10 donde los grados brix empiezan a aumentar, sabiendo que la yuca

aumenta de peso después de la gelatinización solo podemos teorizar que para estos casos los grados brix liberados en el agua fueran reabsorbidos por la yuca.

En el caso de la yuca blanca, en la *Figura 3* se observa una menor retención de sólidos solubles a medida que transcurre el tiempo de cocción. Este comportamiento se refleja en un aumento progresivo de los grados Brix en el agua, lo que indica una mayor liberación de azúcares desde la materia prima hacia el medio líquido.

Figura 3. Variación de °Brix en la yuca blanca



Nota. Elaboración propia a partir de datos experimentales

Los valores iniciales de grados Brix en la yuca blanca fueron de 7.7 °Brix, alcanzando un pico máximo de 10.7 °Brix a los 25 minutos. Sin embargo, a medida que avanzó la cocción, estos valores disminuyeron significativamente hasta llegar a 4.3 en el tiempo máximo evaluado.

Esta tendencia demuestra una pérdida considerable de azúcares, lo cual sugiere que la yuca blanca es menos eficiente en la retención de solutos durante cocciones prolongadas. Este comportamiento puede atribuirse a la difusión progresiva de azúcares hacia el medio acuoso, así como a los cambios estructurales del almidón

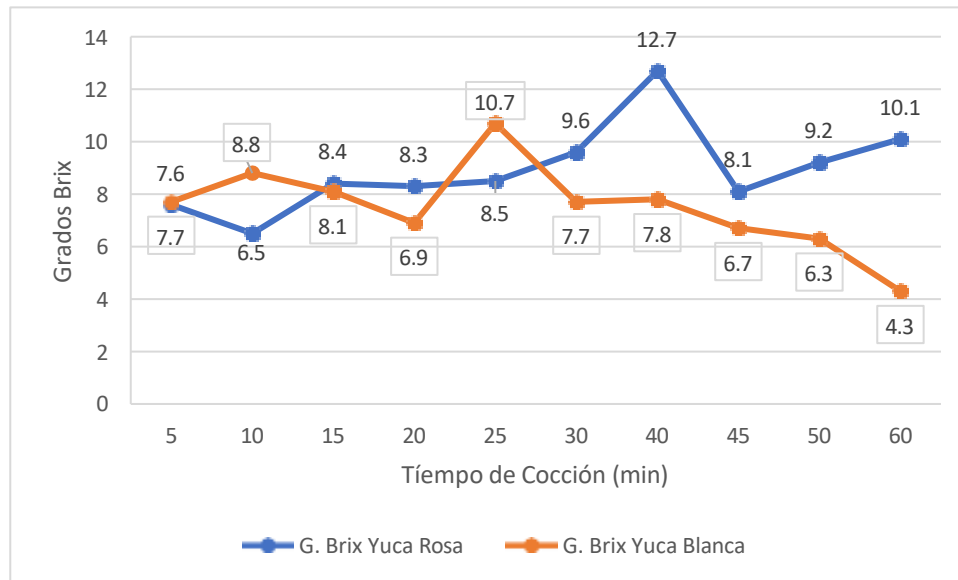
provocados por el tratamiento térmico, que favorecen la liberación de compuestos solubles y la reducción del contenido de sólidos solubles en la materia prima.

En el punto máximo de extracción de grados Brix en la yuca blanca a los 25 minutos se obtienen 10.7 °Brix en la yuca más 1.7 °Brix en el agua, mientras que en la yuca rosada en su punto máximo de extracción a los 40 minutos se generan 12.7 °Brix más 2.5 °Brix; para un total de 12.4 °Brix para la yuca blanca y 15.2 °Brix para la yuca rosada.

Estas diferencias pueden explicarse por las variaciones fisicoquímicas entre variedades de yuca, ya que la composición del almidón, la estructura del tejido y su comportamiento térmico influyen en la gelatinización y en la liberación de compuestos solubles durante la cocción, afectando la extracción de azúcares en el proceso. (Charles et al., 2005)

La selección del tipo de yuca se fundamentó principalmente en los valores comparativos de grados Brix (Figura 4), dado que una mayor concentración de azúcares en el mosto favorece el proceso de fermentación y, por ende, permite obtener mayores niveles de alcohol; perfilando la yuca rosada como más adecuada para procesos de cocción de alta duración, donde se busca una liberación adecuada de azúcares sin comprometer excesivamente la concentración de sólidos solubles en la materia prima.

Figura 4. Comparación de grados brix, yuca rosa vs yuca blanca



Nota. Elaboración propia a partir de datos experimentales

Aunque la yuca rosa requiere un tiempo de cocción aproximadamente 15 minutos mayor que la yuca blanca, dicho incremento resulta compensado por un aumento de grados brix en la concentración final. Además, la yuca rosa presenta ventajas significativas en cuanto a su manipulación, ya que su pelado y corte resultan más sencillos. Sumado a su buena disponibilidad en el mercado, estos factores justifican su elección, validando la hipótesis alternativa del tipo de yuca, donde se declara que la materia prima principal para la elaboración del mosto fermentable influye de manera diferente en la generación de azúcares (°Brix).

7.1.2 Determinación de la proporción agua – yuca

Los resultados obtenidos (*Tabla 2*) muestran que a medida que se incrementa la proporción de agua en relación con el peso de la yuca, los grados Brix del mosto disminuyen de forma proporcional.

Tabla 2. Proporción de agua: yuca idónea para el proceso productivo

Proporción	Yuca	Agua	Grados Brix
01:0.5	2 KG	1 litro	13.6
01:01	2 KG	2 litros	13.1
01:1.5	2 KG	3 litros	7.5
01:02	2 KG	4 litros	7.4

Fuente: Elaboración propia a partir de datos experimentales

En este sentido, la combinación de 0.5 litros de agua por cada kilogramo de yuca arrojó el valor más alto de concentración de sólidos solubles, alcanzando 13.6 °Brix, lo cual sugiere una alta eficiencia en la extracción de azúcares fermentables y menor concentración de diluyente.

No obstante, durante la fase experimental se identificó un aspecto importante asociado a esta proporción, al tratarse de una mezcla con predominancia de sólidos, se torna espesa (*Figura 5*) lo que dificultó considerablemente el proceso de triturado.

Figura 5. Gelatinización de almidones usando yuca rosa con proporción de agua 01:0.5



Nota. Elaboración propia

Siendo esta etapa un punto de control clave para lograr una mezcla homogénea que facilite la acción enzimática durante la conversión del almidón en azúcares simples, se recomienda emplear la combinación de 1 litro de agua por cada kilogramo de yuca (Figura 6), la cual presentó el segundo valor más alto en concentración de grados Brix, con un resultado de 13.1 °Brix.

Figura 6. Gelatinización de almidones usando yuca rosa con proporción de agua 1:1



Fuente: Elaboración propia

Esta proporción representa un equilibrio adecuado entre una alta concentración de azúcares y una viscosidad manejable, lo que permite un procesamiento más eficiente y homogéneo del mosto, evitando la extrema dilución de azúcares que se presenta con mayores proporciones de agua.

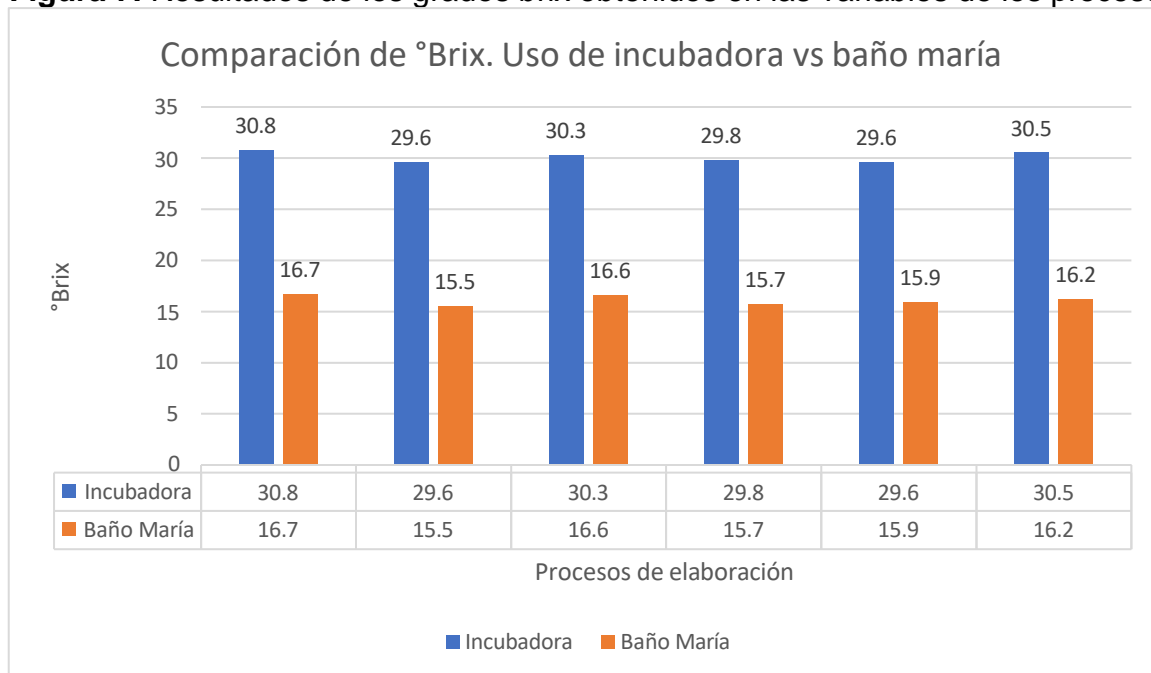
7.1.3 Tratamiento enzimático

Cabe destacar que, si bien la mezcla gelatinizada es fermentable por sus niveles de azúcares, durante la conversión del almidón en azúcares se demostró que utilizar enzimas para desdoblar las proteínas del almidón en azúcares potencia los resultados en el producto final, tal como indicó Gutiérrez (2024) “Para un trabajo eficiente de la levadura y las enzimas se deben de trabajar con una temperatura y pH controlado en

el caso de las enzimas la alfa amilasa a 70 °C y pH 6, mientras que la glucoamilasa a 60 °C y pH 4 al igual que la levadura, pero con temperatura de 28 °C-32 °C.”

En la Figura 7 se puede observar que el *proceso 1*, utilizando incubadora por 24 horas para activar la glucoamilasa, muestra una diferencia significativa en los grados Brix, siendo el proceso que arrojó los mejores resultados.

Figura 7. Resultados de los grados brix obtenidos en las variables de los procesos



Fuente: Elaboración propia a partir de datos experimentales

Se observó una variación significativa en los datos entre las pruebas replicadas por cada proceso, la notable diferencia entre ambos estuvo influenciada por el amplio margen de tiempo de exposición al que fue sometida la enzima glucoamilasa en el proceso 1, la actividad catalítica prolongada resultó en una mayor liberación de azúcares.

En promedio, el proceso 2 obtiene 16.1°Brix, al ser comparados con el 30.1°Brix obtenidos del promedio del proceso 1, estos hallazgos refuerzan la importancia de

mantener condiciones óptimas de temperatura y tiempo para maximizar la eficiencia del tratamiento enzimático durante la etapa de sacarificación.

Es importante destacar que, a diferencia de los mostos de frutas tradicionales donde los azúcares están disponibles inmediatamente, en el mosto de yuca el potencial fermentable depende de la eficiencia de la sacarificación del almidón. Demostrando que la estabilidad térmica de la incubadora en el tratamiento enzimático generó una diferencia significativa en la liberación de azúcares fermentables, aceptando la hipótesis alternativa de los métodos de control térmico.

7.1.4 Formulación del proceso de acondicionamiento del mosto

El establecimiento de la formulación óptima (Figura 8) del mosto a partir de yuca se justificó en la necesidad de maximizar la concentración de almidón y, por ende, el potencial de azúcares fermentables.

La alta eficiencia de la hidrólisis enzimática lograda demuestra que la yuca rosa, como materia prima amilácea, obtenida gracias a la dedicación y los conocimientos de buenas prácticas para el cuidado del cultivo de los agricultores, es un sustrato viable para la producción del alcohol, comparable en rendimiento de conversión a otros almidones tradicionales como el maíz o la papa, aunque requiere una etapa de cocción y licuefacción más rigurosa debido a su estructura granular.

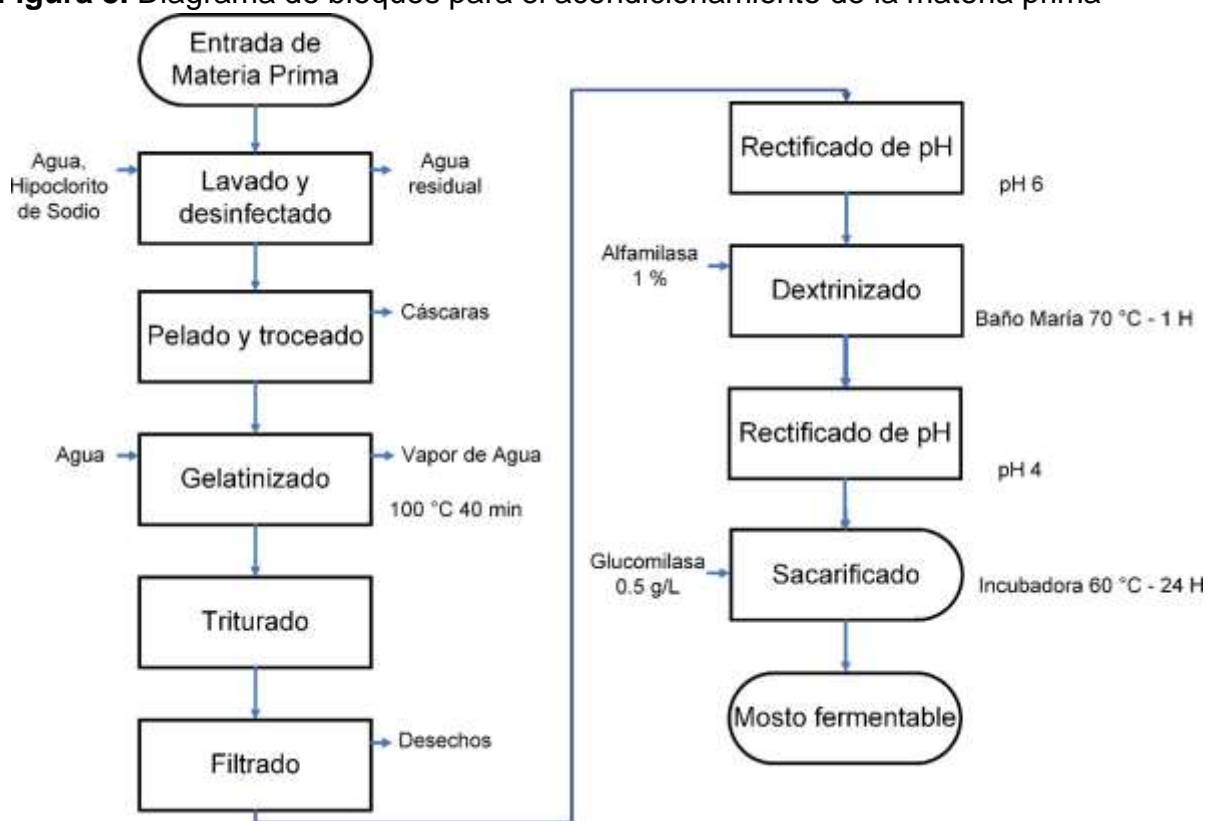
En base a los resultados obtenidos, el proceso idóneo de acondicionamiento se inició con la recepción de la yuca rosa, seguido de un lavado absoluto con agua e hipoclorito de sodio para garantizar la inocuidad. Posteriormente, se realizó el pelado y troceado manual para facilitar la cocción.

Para un resultado ideal se realizó una primera cocción la cual provocó la gelatinización de los almidones llevando la yuca a ebullición por 40 minutos, seguido de un triturado

y filtrado con malla, para eliminar cualquier residuo de raíces que pudiera quedar, dejando una mezcla homogénea y suave.

Se rectificó el pH a 6 para hacerlo ideal para la alfa amilasa, la cual se mantuvo activa por 1 hora a baño maría, la posterior rectificación de pH a 4 para dejar trabajar a la glucoamilasa en incubadora por 24 horas.

Figura 8. Diagrama de bloques para el acondicionamiento de la materia prima



Nota. Elaboración propia

Estos pasos son los que produjeron los mejores resultados de conversión de almidones en azúcares, según las pruebas realizadas, concordando con Acosta et al. (2024) que indican que utilizar ambas enzimas (alfa y glucoamilasa) produce mayor liberación de azúcares simples, según análisis de datos, en donde realizan una comparativa de 10,501 documentos enfocados en las bebidas alcohólicas cuyo componente principal son los tubérculos y/o raíces, donde demuestran que la materia

prima por excelencia para obtención de vodka es la batata con 73.65 % de rendimiento, seguido por la yuca con 50 % de rendimiento, si se agregan otras materias primas llenas de azúcares como indican Guerrero y Yépez (2018) que sugieren añadir zanahoria blanca.

7.1.5 Eficiencia de la hidrólisis

El criterio aplicado para el rendimiento de la hidrólisis fue el de rendimiento porcentual y de glucosa teórica máxima como explican Chang y Goldsby (2013), este enfoque evalúa cuánto se incrementó la concentración de azúcares solubles gracias a la acción enzimática.

Iniciando el proceso con una entrada de materia prima de 5.47 lb, siendo un total de 2480.99 g.

$$5.47 \text{ lb de Yuca} \times 453.59 \frac{\text{g}}{\text{lb}} = 2480.99 \text{ g}$$

Posterior al pelado y troceado se obtuvieron 399.91gr de cáscara y 2081.08gr de yuca sin cáscara, de donde utilizando la ecuación 4 tenemos que:

$$\text{Materia Seca} = 2081.08 \text{ g} \times 30 \%$$

$$\text{Materia Seca} = 624.32 \text{ g}$$

Y el almidón teórico según la ecuación 5, resulta ser:

$$\text{Almidón Teórico} = 624.32 \text{ g} \times 96 \%$$

$$\text{Almidón Teórico} = 599.35 \text{ g}$$

Para la gelatinización (hidrólisis inicial sin enzimas) se adicionaron 2 litros de agua a la yuca para cumplir con la relación 1:1, dejando como resultado 2202.44 g de yuca gelatinizada, sabiendo que 1 mL = 1 g, se obtuvo 2202.44 mL o en su defecto 2.20 L.

$$2202.44 \text{ g} \times \frac{1 \text{ mL}}{1 \text{ g}} = 2202.44 \text{ mL} \text{ o } 2.20 \text{ L}$$

Para obtener la Glucosa Teórica Máxima (GTM) se utilizó la información obtenida de Chang y Goldsby (2013), donde se puede obtener que el factor de conversión de almidón a glucosa es de 1.11 unidades y sabiendo que el almidón teórico obtenido es de 599.35 g, gracias a la ecuación 6, obtenemos que:

$$GTM = 599.35 \text{ g} \times 1.11$$

$$\mathbf{GTM = 665.95 \text{ g}}$$

Con la GTM calculada, se procedió al triturado, donde se utilizó el líquido sobrante de la gelatinización, para aprovechar la dispersión de azúcares y se le adicionó agua purificada hasta completar 2 L de agua para mantener estable la proporción 1:1, donde se obtuvieron 2906.54 g de mezcla, a la cual se le realiza un filtrado con malla, dejando 2868.40 g de mezcla a 13.1 °Brix.

A la mezcla previamente colada se le adicionó el 1 % de alfa amilasa a 70 °C en baño maría por una hora resultando 2701.19 g, para proceder con el sacarificado se agregó 0.5 g/L de glucoamilasa a 60 °C en incubadora por 24 horas dejando como resultado un total de 2403.52 g de mosto listo para fermentación con 30.1°Brix en promedio.

La disminución de la masa total del sistema entre ambas etapas puede atribuirse principalmente a pérdidas por evaporación durante el tratamiento térmico, así como a la retención de sólidos no solubles y a los muestreos realizados durante el proceso.

No obstante, esta reducción de masa no afectó negativamente la concentración final de azúcares, la cual aumentó de manera significativa.

Sabiendo que, los °Brix antes de hidrólisis enzimática 13.1° y los °Brix después de hidrólisis enzimática 30.1°, se calculó la cantidad de azúcares que realmente se obtuvieron utilizando las enzimas con la ecuación 7.

$$Brix\ real = 30.1^{\circ} - 13.1^{\circ} \rightarrow Brix\ real = 17^{\circ} Brix$$

Obteniendo finalmente la eficiencia de hidrólisis con respecto a los °Brix por la ecuación 8.

$$E_{Hidrólisis} = \left(\frac{17^{\circ} Brix}{13.1^{\circ} Brix} \right) \times 100 \rightarrow EH = 129.8 \%$$

Este resultado evidencia que el tratamiento enzimático aplicado fue altamente eficiente, lo que puede atribuirse a una adecuada gelatinización del almidón, una correcta selección de las condiciones de temperatura y tiempo para ambas enzimas, y una dosificación apropiada de glucoamilasa. Asimismo, el valor final de 30.1 °Brix sugiere un mosto con elevado potencial fermentativo, favorable para la obtención de altos rendimientos de etanol en etapas posteriores del proceso.

Considerando que los °Brix representa gramos de sólidos solubles por cada 100 g de solución, se determinó la cantidad de azúcares presentes antes y después de la hidrólisis utilizando enzimas utilizando la ecuación 9.

Azúcares antes de la Hidrólisis enzimática

$$AaH = 2868.40\ g \times \frac{13.1}{100}$$
$$AaH = 375.76\ g$$

Azúcares después de Hidrólisis enzimática

$$AdH = 2403.52\ g \times \frac{30.1}{100}$$
$$AdH = 723.46\ g$$

Incremento real de azúcares por hidrólisis enzimática, utilizando la ecuación 10.

$$Glucosa\ real = 723.46\ g - 375.76\ g \rightarrow Glucosa\ real = 347.70\ g$$

En la etapa anterior a la dextrinización, la cantidad de azúcares solubles fue de 375.76 g, mientras que tras la acción de la alfa amilasa y glucoamilasa se alcanzó un total de 723.46 g de azúcares solubles. Esto representa un incremento neto de 347.70 g de azúcares generados por la conversión de dextrinas y almidón residual.

Ahora bien, la Eficiencia de todo el proceso de hidrólisis utilizando la ecuación 11, desde la gelatinización pasando por su dextrinización y sacarificación es:

$$E = \left(\frac{347.70\ g}{665.95\ g} \right) \times 100 \rightarrow ER = 52.21\ \%$$

La eficiencia de la hidrólisis enzimática durante la sacarificación fue del 52.21 %, evidenciando una conversión parcial de los polímeros residuales a azúcares fermentable. Este comportamiento es consistente con lo reportado en procesos de hidrólisis de almidón mediante enzimas amilasas, donde la eficiencia de conversión depende de factores como la temperatura, el pH, la disponibilidad del sustrato y la actividad enzimática. (Pandey et al., 2000)

En conjunto, los resultados obtenidos demuestran que el proceso aplicado que combina operaciones físicas (pelado, triturado y filtrado con malla) con una hidrólisis enzimática secuencial mediante α -amilasa y glucoamilasa fue altamente eficiente para la obtención de un mosto con elevado contenido de azúcares fermentables. El valor final de 30.1 °Brix confirma el alto potencial fermentativo del mosto, lo que lo convierte en una materia prima adecuada para la producción de bebidas alcohólicas o bioetanol, garantizando condiciones favorables para alcanzar altos rendimientos en la etapa de fermentación.

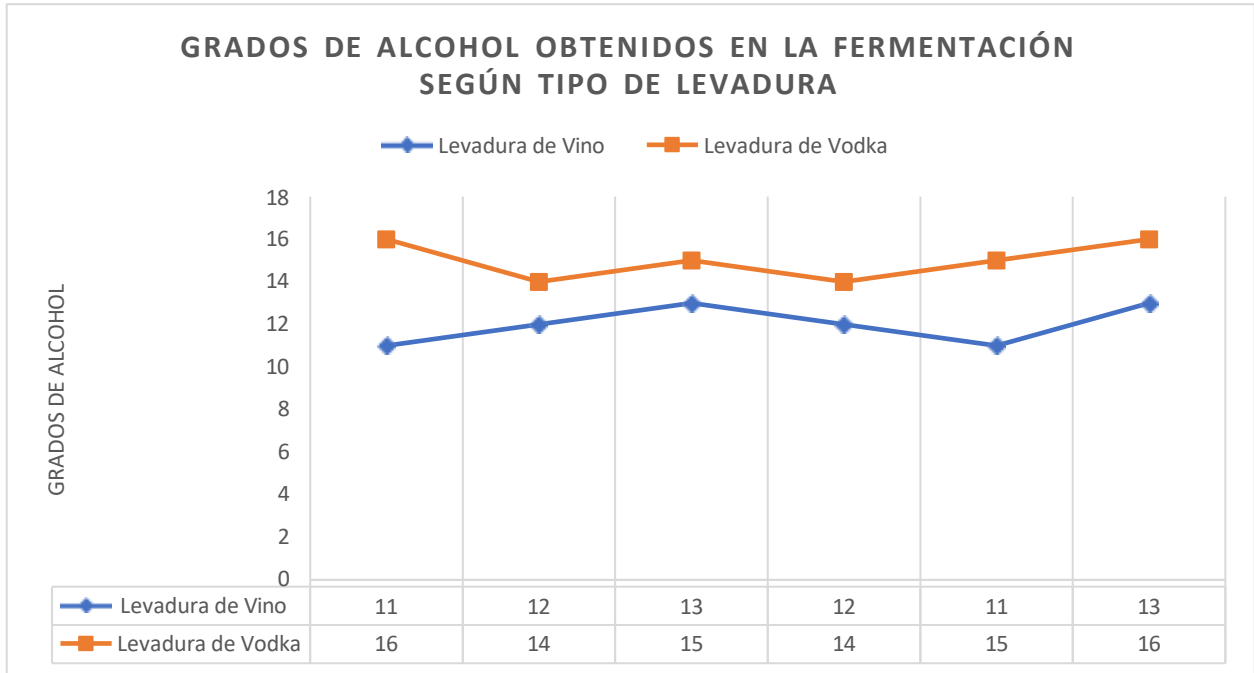
En términos generales, los resultados obtenidos confirman que la hidrólisis enzimática secuencial empleada constituye una estrategia efectiva para la conversión del almidón en azúcares fermentables, cumpliendo con los requerimientos técnicos necesarios para su aplicación en procesos de producción de bebidas alcohólicas, ya que este tipo de procesos se basan en la conversión eficiente del almidón en azúcares disponibles para la fermentación mediante etapas de licuefacción y sacarificación enzimática, ampliamente utilizadas en la producción de alcohol a partir de materias primas ricas en almidón. (Walker, 2010)

7.2 Caracterización del proceso de fermentación alcohólica del mosto de yuca obtenido con la formulación óptima

El desarrollo de la fermentación se llevó a cabo bajo condiciones controladas que favorecieron el metabolismo de la levadura. El proceso siguió la ruta metabólica de la glucólisis en condiciones de anaerobiosis, las levaduras transformaron la glucosa liberada por la hidrólisis enzimática en etanol y dióxido de carbono.

Para las pruebas de fermentación con los dos tipos de levadura (*Figura 9*) se expone una notable diferencia con respecto a los grados de alcohol, generando el mejor rendimiento la levadura de vodka con 16 grados de alcohol. Este resultado puede relacionarse con las diferencias observadas previamente en la etapa de gelatinización entre los tipos de yuca, donde la cantidad de azúcares liberados, reflejada en los grados Brix, influyó en la disponibilidad de sustrato para la fermentación. En este sentido, los resultados obtenidos respaldan la hipótesis alternativa planteada en el estudio, la cual establece que existe una diferencia significativa en la cantidad de azúcares generados entre los tipos de yuca durante la gelatinización, lo que posteriormente impacta en el rendimiento del proceso fermentativo.

Figura 9. Grado alcohólico obtenido en la fermentación según tipo de levadura (proceso productivo 1)



Nota. Elaboración propia a partir de datos experimentales

La levadura de vodka presentó un mejor desempeño fermentativo en comparación con la levadura de vino, alcanzando un valor promedio de 15° de alcohol frente a los 12° producidos en promedio por la levadura de vino (Tabla 3), bajo las mismas condiciones de volumen de mosto (370 mL). Además, la levadura de vodka mostró una menor variabilidad en los resultados (rango de 14–16° frente a 11–13°), lo que evidencia una mayor estabilidad y eficiencia en la conversión de azúcares en etanol.

Tabla 3. Estadísticas descriptivas del grado alcohólico por tipo de levadura (Proceso 1)

Medidas resumen						
Proceso 1	Variable	n	Media	D.E.	Min	Máx
Levadura de vino	Grado de alcohol	6	12.00	0.89	11.00	13.00
Levadura de Vodka	Grado de alcohol	6	15.00	0.89	14.00	16.00

Fuente: Elaboración propia a partir de datos experimentales

La levadura de vodka se considera más adecuada para la obtención de destilados de alta graduación alcohólica, ya que garantiza un mosto con mayor contenido y uniformidad de alcohol en el proceso de fermentación optimizando así el rendimiento y la calidad del producto final, revelando la existencia de una diferencia significativa entre las cepas de fermentación utilizadas, aceptando la hipótesis alternativa del tipo de levadura.

7.2.1 Calidad del Mosto Fermentado

Al finalizar el periodo de fermentación, se obtuvo un mosto alcohólico con características superiores. La evaluación del contenido alcohólico final reveló el éxito de la formulación seleccionada.

Como se evidencia en la *Figura 9*, el mosto fermentado con la Levadura de Vodka alcanzó un grado alcohólico promedio de 15 % vol., con un rango de variación mínima entre 14 % y 16 %. Este valor es significativamente alto para un fermentado no destilado, superando el promedio de 12 % obtenido con la levadura de vino.

Este alto grado alcohólico en el "punto final" indica dos fenómenos exitosos:

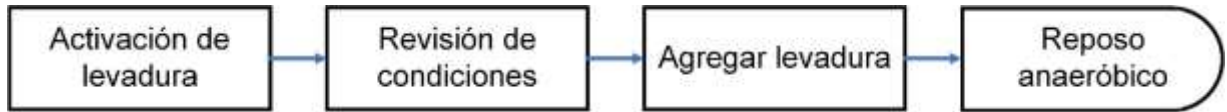
- Hidrólisis completa: Las enzimas lograron romper la mayor parte del almidón de la yuca rosa.
- Atenuación alta: La levadura consumió en su totalidad los azúcares disponibles, deteniendo su actividad únicamente cuando se alcanzó su tolerancia al alcohol o se agotó el sustrato.

7.2.2 Etapas del proceso de fermentación

El proceso de fermentación es clave para que todas las azúcares se transformen en alcohol. Este proceso (*Figura 10*) se inicia con una activación de las levaduras con agua tibia (30 °C) y azúcar, mientras estas se encuentran en reposo en un ambiente oscuro y cálido, se revisa que la mezcla se encuentre en *buenas condiciones*, es decir,

que no sufriera cambios en el pH o temperatura abruptos o que no entraran agentes externos que puedan dañar la mezcla.

Figura 10. Proceso de fermentación



Nota. Elaboración propia

En el fermentado entran 2403.52 g de mosto fermentable junto con 7 g de levadura de vodka, una vez que la levadura está activada y se reconoce que la mezcla está en condiciones óptimas, se mezclan para dejar en reposo por 21 días, en un ambiente anaeróbico y cálido.

7.2.3 Eficiencia de la Fermentación

La eficiencia del proceso de fermentación se concluye cuantitativamente a través de la capacidad del sistema para generar etanol, siendo este obtenido a partir de la transformación de ingredientes ricos en almidón.

- Rendimiento en volumen:

Partiendo de un volumen de mosto estandarizado de 370 mL para las pruebas a escala de laboratorio, se logró obtener una concentración de etanol del 15 % vol. Esto demuestra que la yuca rosa es una materia prima competitiva, capaz de generar una base alcohólica robusta.

- Eficiencia comparativa:

El uso de la levadura especializada para vodka incrementó el rendimiento alcohólico en un 25 % en comparación con la levadura convencional (pasando de 12 % vol. a 15 % vol. promedio).

La caracterización del proceso valida que la combinación de hidrólisis prolongada (24h) y el uso de cepas especializadas permite obtener un mosto de alta graduación, libre de defectos perceptibles y con un rendimiento óptimo para ser sometido al proceso de destilación.

Esta segunda etapa del proceso se consideró como etapa de fermentación *Figura 10*, para propósitos de control del proceso. Consistiendo en que, una vez obtenido el mosto gelatinizado, triturado y filtrado con malla, se realizó una corrección a pH 6 para una hidrólisis enzimática llamada dextrinización utilizando alfa amilasa a 70 °C para licuar el almidón.

Luego de corregir a pH 4, se agregó glucoamilasa a 60 °C durante un período de incubación de 24 horas, para asegurar la máxima conversión de almidones en azúcares fermentables. Finalmente, el mosto rico en glucosa pasó a fermentación donde se inoculó la levadura por 21 días.

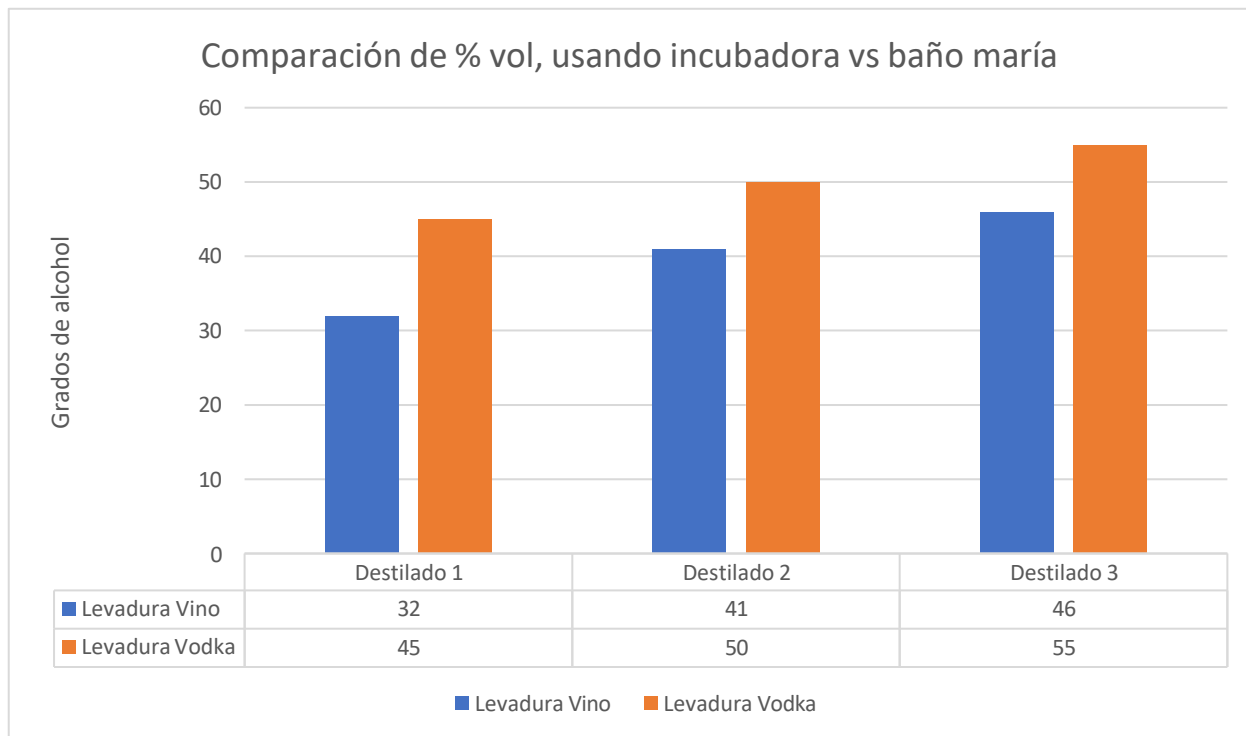
7.3 Evaluación del contenido de alcohol y composición química del vodka obtenido

Como se aprecia a continuación, se realizaron 6 pruebas a las que se le aplicó la triple destilación, presenta el promedio de los resultados en la Figura 11 que diferencia al vodka de otros productos que utilizan el almidón como ingrediente principal, para determinar los grados de alcohol que puede alcanzar la muestra. Se decidió realizar pruebas a ambas levaduras para confirmar que la levadura de vodka sea la mejor opción, como se planteó en el inciso anterior.

En la Figura 11 se puede observar la superioridad de la levadura de vodka, alcanzando grados alcohólicos significativamente más altos en comparación del mosto fermentando, resultando destilado base superior al máximo legal en Nicaragua, de modo que promete mayores beneficios en la producción final. En todas las pruebas y

con ambos tipos de levadura, se observa un aumento consistente y progresivo en el grado alcohólico después de cada etapa de destilación.

Figura 11. Aumento de los grados de alcohol en las tres destilaciones, según el tipo de levadura empleado



Nota. Elaboración propia a partir de datos experimentales

La mayor diferencia en el grado alcohólico ocurre entre la primera y segunda destilación, lo que sugiere que la primera destilación fue crucial para separar los componentes más volátiles y la mayor parte del agua, mientras que la tercer destilación, proporciona el refinamiento final, logrando la máxima concentración. En términos industriales, podría considerarse realizar una cuarta destilación y comprobar si el aumento de grados de alcohol es beneficioso con relación al precio y la cantidad de producto final obtenido.

Para determinar si esta diferencia era estadísticamente significativa, se aplicó un análisis por medio de sus medias y desviación estándar en cada caso, *Tabla 4* para levadura de vino y *Tabla 5* para levadura de vodka, como se muestra a continuación.

Tabla 4. Estadísticos descriptivos del grado alcohólico después de la tercera destilación por tipo de levadura

Medidas resumen						
Variable	N	Media	D.E.	CV	Min	Máx
Levadura de vino	6	46.50	1.05	2.26	45.00	48.00

Nota. D.E. = desviación estándar; CV = Coeficiente de variación. Elaboración propia a partir de datos experimentales.

En la *Tabla 4* se muestra que el coeficiente de variabilidad (CV) para la levadura de vino tiene un valor de baja variabilidad, significando que los lotes producidos con esta levadura son muy consistentes entre sí. El proceso de producción es altamente predecible en cuanto al grado alcohólico final. Si bien el alcohol final es menor, el proceso es fácil de controlar dentro de un rango estrecho.

Tabla 5. Medidas resumen D3 usando levadura de vodka

Medidas resumen						
Variable	N	Media	D.E.	CV	Min	Máx
Levadura de vodka	6	55.00	2.68	4.88	52.00	58.00

Nota. D.E. = desviación estándar; CV = Coeficiente de variación. Elaboración propia.

Para la levadura de vodka, el coeficiente de variabilidad según la *Tabla 5*, es más del doble que el de la levadura de vino, lo que indica una mayor variabilidad en el proceso. Aunque el grado alcohólico promedio es mucho mayor (55 % vol.), las pruebas produjeron lotes con una dispersión más amplia (entre 52 % vol. y 58 % vol.).

A pesar de que esta levadura introduce una mayor variabilidad, el rendimiento promedio significativamente superior la convierte en la opción preferida. Se aconseja elegir el proceso de mayor rendimiento y posteriormente reducir la variabilidad mediante un control de calidad más estricto y optimizando los parámetros operativos.

Dicha levadura consistentemente produjo lotes con un grado alcohólico mayor en cada etapa de la destilación. El promedio final con levadura de vodka (55 % vol.) supera en 8.5 puntos porcentuales al promedio obtenido con la levadura de vino (46.5 % vol.). Este resultado infiere que la levadura de vodka fue más eficiente durante la etapa de fermentación previa a la destilación, probablemente debido a:

- Mayor tolerancia al alcohol, permitiendo alcanzar un grado alcohólico inicial más alto en el mosto.
- Mejor rendimiento en la conversión de azúcares a etanol.
- Una menor producción de impurezas que pudieron haber obstaculizado la eficiencia de la destilación en el caso de la levadura de vino.

7.3.1 Evaluación del grado alcohólico y estandarización

El destilado final, antes de la estandarización, fue caracterizado en términos de su potencial alcohólico, pH y pureza, cuyos resultados se resumen en la Tabla 6.

El producto se consideró apto para la estandarización mediante dilución con agua destilada, ajustándolo al 40 % vol. de la norma comercial. Este paso no solo asegura el cumplimiento legal, sino que también balancea la agresividad del alcohol, haciéndolo apto para el paladar.

Tabla 6. Resultados fisicoquímicos del destilado de yuca posterior a la triple destilación.

Experimento	Graduación Alcohólica % vol.	pH	Transparencia / Pureza (Esc: 1 – 10)
1	58	7.0	10
2	52	6.0	9
3	53	6.5	9
4	56	7.0	10
5	53	6.5	9
6	58	7.0	10
Promedio	55	6.7	9.5

Nota. Elaboración propia

La evaluación visual arrojó un promedio de 9.5 en la escala de 10, con la mayoría de las muestras alcanzando el valor máximo (10), siendo una evidencia directa (*Figura 12*) de la calidad del destilado, sugiriendo la baja presencia de aceites de fusel y otros sólidos suspendidos, lo cual es indicativo de la limpieza lograda por el proceso de triple destilación, siendo estos subproductos no deseados, ya que disminuyen su calidad comercial.

Figura 12. Apariencia del destilado después de la tercera destilación



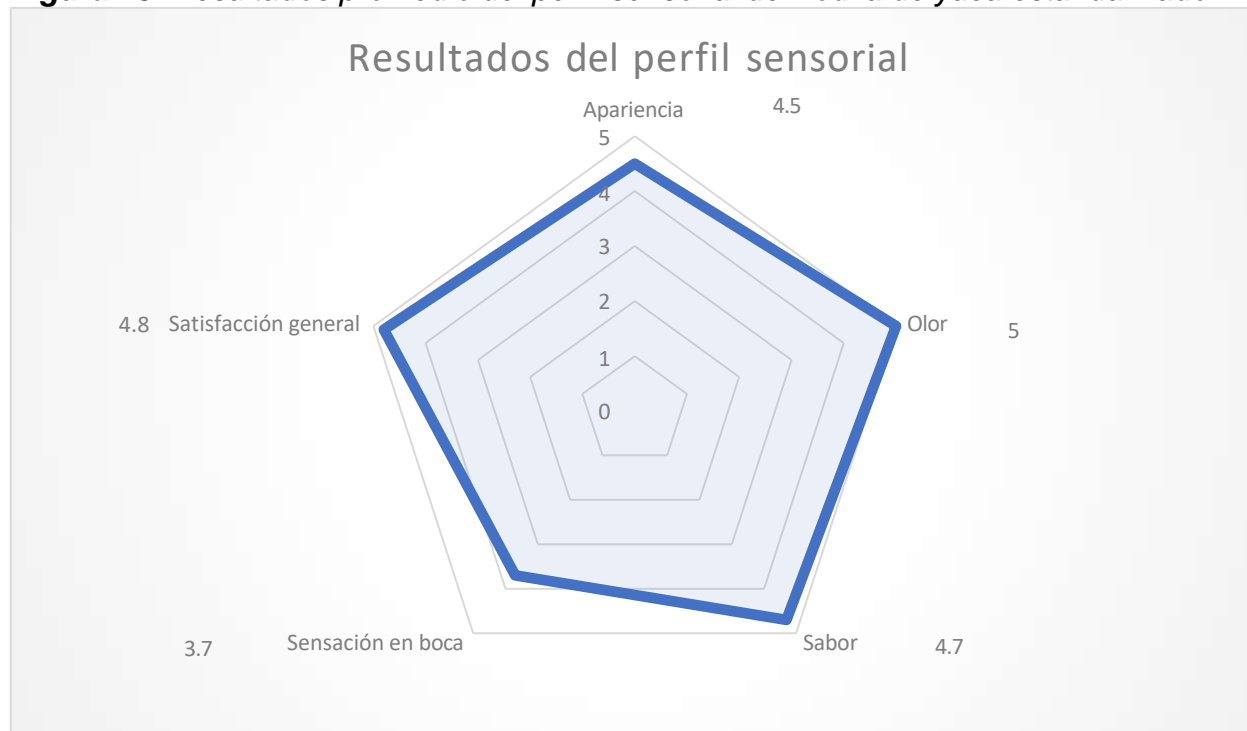
Nota. Muestra representativa del destilado cristalino después de la triple destilación

Se determinó que el pH promedio del destilado fue de 6.7. Este valor, cercano a la neutralidad (pH 7), es deseable en destilados blancos, ya que la tendencia a la neutralidad minimiza la acidez o la causticidad, contribuyendo a una sensación suave y neutra en boca, característica buscada en este tipo de bebidas alcohólicas. (Jackson, 2014)

7.3.2 Evaluación de características sensoriales

La evaluación de la aceptación y características sensoriales del vodka estandarizado a 40 % vol. (*Figura 13*) se llevó a cabo mediante un panel de cata que evaluó cinco atributos clave (Apariencia, olor, sabor, sensación en boca y satisfacción en general), usando una escala del 1 al 5. El panel se realizó aleatoriamente con un total de 6 panelistas no expertos, sin contacto visual unos con otros para obtener respuestas no guiadas.

Figura 13. Resultados promedio del perfil sensorial del vodka de yuca estandarizado



Fuente: Elaboración propia

Dado que el análisis sensorial fue realizado por un panel de consumidores, los resultados describen la preferencia y aceptabilidad del producto, más no deben interpretarse como un diagnóstico técnico de su calidad fisicoquímica o comercial. Los resultados sensoriales confirman el éxito del proceso:

Olor (5.0): El puntaje más alto (5.0) en el atributo "Olor" indica que el proceso de destilación fue altamente efectivo en la eliminación de los aromas residuales de la materia prima (yuca), proporcionando un perfil aromático limpio y neutral, característico de un vodka de alta calidad.

Sabor (4.7) y Apariencia (4.5): Los altos puntajes en "Sabor" y "Apariencia" (*Figura 12*) validan que el producto es visualmente cristalino y posee un sabor que cumple con la expectativa de ser suave y neutro.

Sensación en Boca (3.7): Este fue el puntaje más bajo. Aunque es un valor positivo, sugiere que el producto, al 40 % vol., aún podría percibirse como ligeramente "áspero" por algunos catadores. Este es un comportamiento común en vodkas sin añejamiento y puede ser objeto de mejora a través de procesos de filtración adicionales (ej. filtración con carbón activado) que no se contemplaron en el alcance del estudio.

Satisfacción General (4.8): El alto nivel de satisfacción general corrobora la viabilidad comercial del producto, indicando que, a pesar de la ligera aspereza en boca, el vodka de yuca es bien aceptado y cumple con las expectativas del consumidor.

El perfil sensorial del vodka de yuca obtenido se caracterizó por su neutralidad, tal como lo exige la categoría del producto. A diferencia de destilados de caña o frutas que buscan retener aromas de la materia prima, el proceso validado logró eliminar las notas terrosas o fuertes características de la yuca cruda.

El resultado tras la estandarización a 40 % vol. es una bebida de aroma limpio (etéreo), sabor suave en boca y sin retrogustos agresivos, lo que valida su potencial para ser utilizado tanto para consumo directo como en coctelería.

Considerando la Influencia de la yuca en el vodka a nivel de los compuestos químicos según Gutiérrez (comunicación personal, 6 de noviembre de 2024) “sabemos que debido a que la yuca contiene mayor cantidad de almidón, pero bajas en proteínas reduciendo la formación de ciertos alcoholes superiores, además debido a que la transformación del almidón en la yuca es a través de enzimas la glucosa termina derivando en una menor generación de alcoholes secundarios.”

En comparación con Guerrero y Yépez (2018) que iniciaron su proceso de elaboración con 50 % de zanahoria blanca alta en azúcares y 50 % de yuca (para agilizar el proceso) obtuvieron 20°Brix una vez terminada la fermentación y al realizar la destilación, si bien no declaran la cantidad de vodka obtenido, describen la obtención de un alcohol base de 39 % vol., lo cual se encuentra por debajo de lo obtenido con el proceso planteado en esta investigación.

7.3.3 Etapas del proceso de destilación

Las etapas del proceso de destilación se muestran en la *Figura 14*, estas inician con la filtración de 1720.16 g de mosto ya fermentado para eliminar residuos sólidos, obteniendo 750 mL a 15 % vol. que se sometieron a un proceso de destilación escalonada, alcanzando un rango de 75 ° - 80 °C para eliminar toda posibilidad de obtener congéneres indeseados, dejando 328 mL alcohol base al 58 % vol. el cual es estandarizado al 40 % vol. con agua destilada antes de su embotellado final.

En base en los resultados de las pruebas realizadas, se determinó que el proceso productivo utilizando incubadora (*Figura 15*) es el idóneo, si bien presenta dos demoras, ambas son necesarias, una en el fermentado para dejar actuar las levaduras

y otra en la sacarificación para permitir que la glucoamilasa desdoble las dextrinas obtenidas.

Figura 14. Diagrama de bloques para la etapa de destilado



Nota. Elaboración propia.

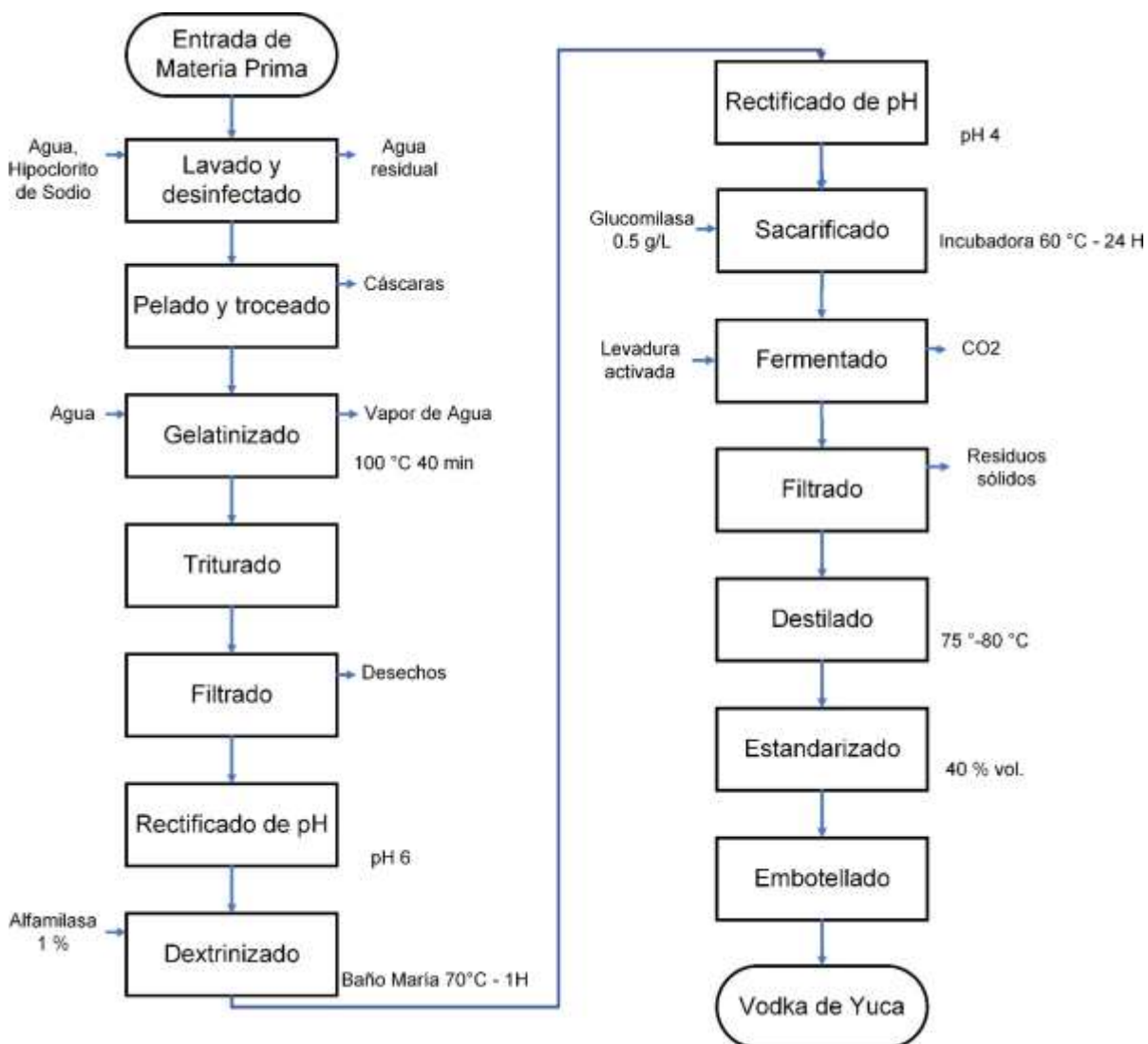
7.3.4 Rendimiento del destilado

La eficiencia del proceso de destilación se concluye cuantitativamente a través de los grados de alcohol obtenidos. Los datos de medición de alcohol fueron registrados manualmente tras la observación directa en el refractómetro de alcohol, al tratarse de un proceso de inspección visual, no se dispone de evidencia fotográfica.

Rendimiento en volumen: Partiendo de que, con la preparación de 2081.08 g de yuca pelado y troceada, se logró obtener 475 mL de destilado a 40 % vol., demostrando la alta capacidad de la yuca de ofrecer un producto alcohólico bebible y comerciable.

Eficiencia comparativa: La formulación obtenida en este estudio genera un rendimiento alcohólico en un 18 % mayor, en comparación de los promedios obtenidos con la levadura de vino 46.5 % y la levadura de vodka a 55 % vol.

Figura 15. Diagrama de bloques completo usando incubadora

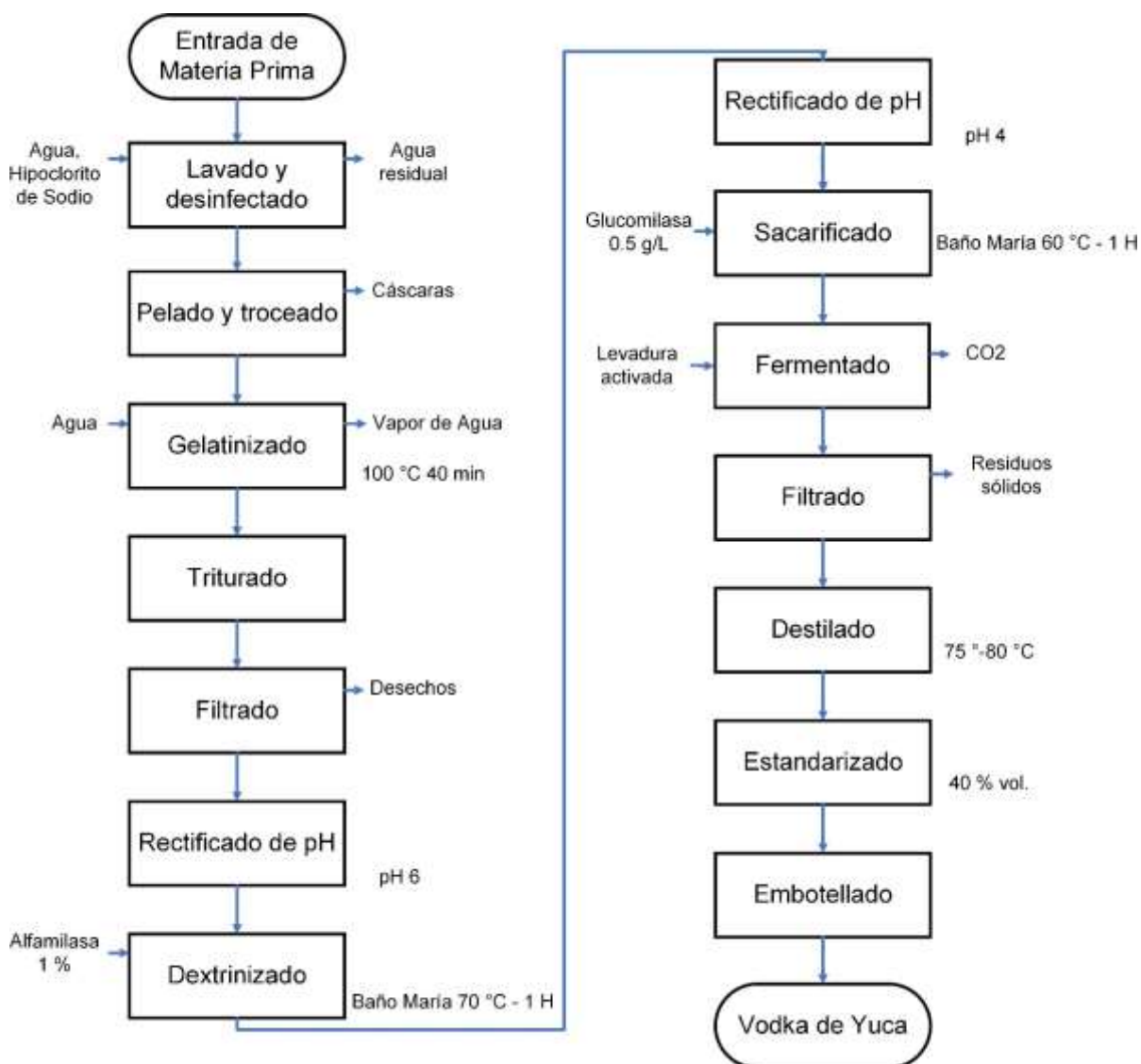


Nota. Elaboración propia

Algo a considerar es que los desechos obtenidos en el proceso pueden ser utilizados como abono orgánico, generando otras fuentes de ingresos. Al mismo tiempo los desechos obtenidos del filtrado con tela fina posterior a la fermentación no solamente pueden utilizarse como abono sino también como fuente de levadura activa para las próximas fermentaciones.

Si bien, el proceso donde se utilizan dos baños maría como se muestra en la Figura 16 (para la dextrinización y el sacarificado) se elimina una demora de 24 horas, se reduce significativamente el grado de azúcares obtenidas, siendo esto un punto a considerar al momento de establecer las preferencias del productor, haciendo una comparación de precio del producto obtenido en cada caso.

Figura 16. Diagrama de bloque completo usando baño maría



Fuente: Elaboración propia

7.4 Estimación de los costos de producción a escala de laboratorio del licor tipo vodka obtenido a partir de yuca

Para la estimación de costos se tomó en cuenta ambos procesos: uso de incubadora por 24 horas (*Figura 15*) y uso exclusivo de baño maría (*Figura 16*) para la activación de enzimas, también se tomó en cuenta el uso de ambas levaduras.

Los procesos de producción a comparar se describieron de la siguiente manera:

- Producción1 (P1): Uso de incubadora con levadura de vino
- Producción 2 (P2): Uso de incubadora con levadura de vodka
- Producción 3 (P3): Baño maría con levadura de vino
- Producción4 (P4): Baño maría con levadura de vodka

Se calcularon los precios para una producción de 5 libras de yuca, donde los no aplicables (NA) son los instrumentos y equipos facilitados por el laboratorio de la universidad, sin embargo, los costos luz y gas fueron calculados por rendimiento energético y el agua por litros utilizados, según centros de cobro de servicios en Estelí, Nicaragua.

Debido a que no se realizó contratación de personal, ni existieron remuneraciones asociadas a la operación de los equipos o la ejecución de las etapas del proceso, no se incorporaron costos de mano de obra, ya que, estos no se toman en cuenta por que el estudio se basa en validar a escala de laboratorio.

En la *Tabla 7* se expresan los precios de los pasos que se repiten en cada variante del proceso, junto con los materiales que se utilizan, siendo los pasos de sacarificado y fermentado donde se destacan las diferencias entre procesos.

Tabla 7. Costos involucrados en las 4 variantes del proceso

Costos por paso del proceso		
Etapas	Material Utilizado	Costo monetario
Lavado y desinfectado	Desinfectante, Materia prima, agua	C\$ 70.18
Pelado y troceado	NA	NA
Gelatinizado	Agua purificada, gas	C\$ 21.78
Triturado	Luz	C\$ 0.18
Filtrado con malla	NA	NA
Rectificado de pH 1	Ácido cítrico / bicarbonato	NA
Dextrinizado	Alfa amilasa, gas	C\$ 87.50
Rectificado de pH 2	Ácido cítrico / bicarbonato	NA
Sacarificado	Glucamilasa, gas	Según variante
Fermentado	Levadura activada	Según variante
Filtrado con tela	NA	NA
Destilado	Hielo, gas	C\$ 52.60
Estandarizado	Agua destilada	C\$ 31.58
Embotellado	Botella 750 mL	C\$ 75
Total		C\$ 338.83

Nota. NA = no aplicables al ser proporcionados por el laboratorio, se utilizaron precios en córdobas (C\$) moneda actual nicaragüense, esta tabla es de elaboración propia.

En la *Tabla 8* se muestran los costos parciales bases que conlleva la realización de los pasos de sacarificado y fermentado por cada variante del proceso productivo, sabiendo que, en cada variante, para una producción de 5lb de yuca rosa se realiza una inversión de al menos C\$ 338.83, se demuestra que los procesos sin incubación (P3 y P4), resultan ser más económicos, con un aumento de apenas C\$ 59.83 y C\$ 124.35, respectivamente.

Tabla 8. Costos de dextrinizado y sacarificado por cada variante

	P1	P2	P3	P4
Sacarificado	C\$ 156.67	C\$ 156.67	C\$ 17.55	C\$ 17.55
Fermentado	C\$ 42.28	C\$ 106.80	C\$ 42.28	C\$ 106.80
Costo por producción	C\$ 537.78	C\$ 602.30	C\$ 398.66	C\$ 463.18

Nota. Elaboración propia

Por el contrario, donde se realiza un proceso de incubación (P1 y P2) son los más costosos por su mayor tiempo de preparación, a su vez, la diferencia en costos del proceso usando incubadora con levadura de vodka y levadura de vino llega apenas a C\$ 65.57, lo que demuestra, que la levadura de vodka apenas encarece el proceso productivo, pues es en la etapa de fermentación donde el precio varía notablemente según la levadura utilizada.

Si bien existe una diferencia considerable de costos, utilizar o no un proceso dependerá del resultado que espera obtener la industria, ya que, al obtenerse niveles de alcohol mayores en el Proceso 2 (el más costoso), existe mayor margen de producto obtenido al momento de estandarizar el destilado base.

Los resultados económicos demuestran que, de los procesos propuestos, el más viable es donde se utiliza la levadura de vino sin incubación (C\$ 398.66), sin embargo, este proceso produce menor cantidad de porcentaje alcohólico por lo cual se debe tomar en consideración la calidad esperada del producto final, ya que, el proceso con mejores resultados en aspectos de calidad y porcentaje alcohólico es el proceso que utiliza incubadora y levadura de vodka (C\$ 602.30), al obtener un producto sobresaliente, al momento de estandarizarlo se obtiene mayor cantidad de producto final, mejorando las posibles ganancias.

En el mercado, el precio de una botella de vodka de 750 mL a 40 % vol. puede alcanzar aproximadamente los C\$ 2,550 en supermercados del país, como en el caso del vodka

Stolichnaya Gold comercializado en cadenas de supermercados (Walmart/La Unión). Este valor es considerablemente mayor en comparación con los C\$ 602.30 estimados mediante el proceso propuesto en esta investigación. Dicho precio en el mercado se ve influenciado por diversos factores, entre ellos el margen de ganancia del establecimiento comercial, los costos de importación del producto, impuestos aplicables a bebidas alcohólicas y gastos de distribución. Además, es importante considerar que en Nicaragua predominan bebidas alcohólicas locales como el ron, por ejemplo, productos de la marca Flor de Caña, mientras que el vodka disponible en supermercados suele ser principalmente importado, lo que también incide en su precio final para el consumidor.

VIII. CONCLUSIONES

La formulación óptima del mosto fermentable se determinó mediante la estabilización de las condiciones de hidrólisis enzimática, donde el método de control térmico por incubadora resultó superior al lograr una concentración de 30.8 °Brix duplicando los resultados del método de baño maría (16.7 °Brix), demostrando que las etapas desde hidrólisis son clave para la liberación de azúcares. Partiendo de una materia seca de 624.32 g resultando en un almidón teórico de 599.35 g se proyectó una glucosa teórica máxima de 665.95 g logrando calcular una eficiencia de sacarificación del 52.21 %.

En el caso de las pruebas con las cepas de fermentación estas arrojaron que la levadura de vodka se consolidó como el agente óptimo de fermentación con una eficiencia del 25 % mayor que la levadura de vino y una variabilidad de 4.88 %, permitiendo obtener un volumen de 328 mL con un 58 % de alcohol en la tercera destilación. Finalmente, para su estandarización se agregó 475 mL de agua destilada para obtener un producto final de 803 mL a 40 % vol. cumpliendo con las especificaciones de contenido alcohólico, presentando alta claridad y aceptación sensorial para ser clasificado como un licor tipo vodka.

Como resultado se acepta la hipótesis de la investigación ya que se comprobó que el proceso de gelatinización, hidrólisis enzimática, fermentación y triple destilación si permiten obtener un destilado tipo vodka, validando que es crítica la elección de la materia prima, el insumo biológico y el método de control térmico con respecto a la liberación de azúcares y su posterior conversión en etanol.

Los costos de producción a escala de laboratorio reflejaron que la viabilidad de la elaboración de vodka a base de yuca no se ve comprometida por el factor económico debido a una ligera diferencia entre los tipos de levadura de C\$ 64.52 y entre los procesos usando levadura de vodka de C\$ 139.12, derivando la selección del método óptimo según la eficiencia, cantidad y la calidad del producto, sentando las bases para una evaluación económica a escala piloto o industrial.

IX. RECOMENDACIONES

Programar estudios de estabilidad acelerados y en tiempo real (mínimo de 6 a 12 meses) para el producto final diluido. Esto permitirá determinar la vida útil comercial del vodka de yuca y monitorear la evolución de compuestos clave (contenido alcohólico y perfiles congéneres) y de las características sensoriales, asegurando la calidad del producto hasta el final de su vida útil.

Implementar un sistema de control de temperaturas más riguroso en la etapa de fermentación y destilación. Esto es crucial para reducir la variabilidad (CV = 4.88 %) observada en la producción con levadura de vodka y mejorar la consistencia del producto final.

Realizar un estudio escalado a nivel de planta piloto que permita determinar los costos de inversión fijos y variables a escala comercial. Se recomienda, además, evaluar la optimización del uso de enzimas para reducir el costo de los insumos más caros del proceso, así como también la utilización de equipos avanzados como una peladora industrial tipo cepillo para lavar y pelar grandes cantidades de yuca.

Investigar la aplicación de diferentes tipos de filtración (por ejemplo, carbón activado derivado de fuentes locales como cáscara de coco) para refinar aún más el destilado final, buscando una mejora marginal en la pureza y en la suavidad sensorial del vodka, para aquellos clientes con paladar sensible.

Evaluar el potencial uso o valorización del bagazo (residuo sólido) de la yuca resultante de las etapas de hidrólisis y fermentación, como posible sustrato para alimentación animal, biocombustibles o compostaje, para mejorar la sostenibilidad y económica circular del proceso.

Se recomienda realizar tanto un estudio fisicoquímico, como una evaluación del perfil sensorial realizada por un panel de expertos para garantizar la precisión de los datos.

X. BIBLIOGRAFÍA

- Acosta, L., Cuenca, M., & Mason, M. (2024). *Bibliographic study for the obtaining process of a vodka-type distilled alcoholic beverage based on yam (dioscorea spp.)*. Ing-Nova. Cartagena - Colombia: Ing-Nova. <https://doi.org/10.32997/rin-2024-4675>
- Asamblea Nacional de la República de Nicaragua. (2002). *Ley General de Salud (Ley No. 423)*. Managua: Gaceta Diario Oficial No. 91.
- Badui, S. (2018). *Química de los alimentos*. Ciudad de México: McGraw-Hill Interamericana.
- Balanda, A. T. (2005). *Contabilidad de costos*. https://bibliotecadigital.fce.unam.edu.ar/bitstream/handle/bhp/518/Balanda%20AT_2005_Contabilidad.pdf?sequence=1
- Bernal Bustos, C. R., Morales, D., Cuellar, L., & Jaramillo, S. (2017). Hidrólisis enzimática de almidón. *Revista De Investigación*, 10(1), 129-140. <https://doi.org/10.29097/2011-639X.70>
- Chang, R., & Goldsby, K. A. (2013). *Química* (11ma ed.). D.F., México: Mc Graw Hill education.
- Charles, A. L., Chang, Y. L., & Huang, T. C. (2005). Algunas propiedades físicas y químicas de almidones aislados de genotipos de yuca. *Starch*, 414-420.
- Comisión Nacional de Normalización Técnica y Calidad, Ministerio de Fomento, Industria y Comercio. (2001). *NTON 03 036 - 00 Norma técnica de especificaciones de bebidas alcohólica - Aguardiente*.
- Cordero-Bueso, G. (2013). *Aplicación del análisis sensorial de los alimentos en la cocina y en la industria alimentaria*. Sevilla: Universidad Pablo Olavide.
- Cubillos, G. I. (2014). Separación de los componentes de las mezclas: destilación simple. *Acuerdo para el trabajo en el laboratorio*, 43.
- Díaz Ruíz, J. P. (2023). *Efecto de la concentración de almidón y del tiempo de cocción de la suspección en la obtención de un destilado alcohólico de yuca (Manihot esculenta)*. <https://repositorio.unj.edu.pe/handle/UNJ/590>
- Du Bois, M. (2015). *The Chemistry of Food and Flavor*. New Jersey: Wiley.

- Espinosa Díaz, M. (2017). *Obtención de bioetanol a partir de Malanga por medio de hidrólisis y fermentación de azúcares*. Quito: Universidad Central del Ecuador.
- Fischer, G. (2018). Ethanol and impurities in distilled spirits: Analytical methods and safety evaluation. *Journal of Food Chemistry*, 147-160.
- Guardón de Delgado, E. N. (2013). *Diseño y desarrollo del proceso para la extracción de almidón a partir del guineo majoncho verde (musa sp.variedad cuadrado), para su uso en la industria de alimentos*. Universidad de el Salvador Facultad de Ingeniería y Arquitectura Escuela de Ingeniería Química e Ingeniería de Alimentos. <https://repositorio.ues.edu.sv/items/e32a9330-518c-43e8-9eff-f660dfb4caec>
- Guerrero Marchán, E. I., & Yépez Albuja, A. C. (2018). *Elaboración de una bebida alcohólica destilada a partir de yuca (Manihot esculenta) y zanahoria blanca (Arracacia xanthorrhiza)*. Universidad San Francisco de Quito. Quito - Peru: Quito. <http://repositorio.usfq.edu.ec/handle/23000/7471>
- Hozbor, D. F., & Lodeiro, A. R. (2017). Efectos del pH y la Temperatura. En A. Capparelli, A. Lagares , G. Parisi, D. F. Hozbor , A. Melgarejo, D. Bottero, & A. R. Lodeiro , *Catálisis enzimática: Fundamentos químicos de la vida* (pág. 231). La Plata: Editorial de la Universidad de La Plata. https://sedici.unlp.edu.ar/bitstream/handle/10915/59590/Documento_completo___pdf-PDFA.pdf?sequence=1#page=137
- Huxley, J. (2018). *The Science of Spirits: Understanding the Body of Alcoholic Beverages*. Oxford: Oxford University Press.
- Instituto Nicaragüense de Tecnología Agropecuaria. (2025). *Yuca INTA-Nicaragua*. Retrieved 2025, from <https://inta.gob.ni/wp-content/uploads/2023/11/Yuca-INTA-Nicaragua.pdf>
- Instituto Nicaragüense de Tecnología Agropecuaria. (2025). *Yuca INTA-Reyna*. <https://inta.gob.ni/wp-content/uploads/2023/11/Yuca-INTA-Reyna.pdf>
- International Organization for Standardization. (2018). *ISO 22000:2018 Food safety management systems — Requirements for any organization in the food chain*. Ginebra: International Organization for Standardization.

- Jackson, R. S. (2014). *Ciencia del vino: principios y aplicaciones*. San Diego, California, Estados Unidos: Academic Press.
- Maigualca Pilatasig, J. A. (2021). *Elaboración de una bebida alcohólica destilada (vodka) a partir de dos variedades de papa chaucha (solanum phureja) y super chola (solanum tuberosum l.) con alfa amilasa*. Latacunga: Universidad Técnica de Cotopaxi. <http://repositorio.utc.edu.ec/handle/27000/10131>
- Ministerio de Fomento, Industria y Comercio. (2006). *NTON 03 044 - 05 Normativa sobre etiquetado de bebidas alcohólicas y control de calidad en Nicaragua*. Managua: Gaceta Diario Oficial No. 36.
- Ministerio de Salud. (2011). *Normas de calidad del agua potable para la producción de alimentos y bebidas en Nicaragua*. Managua.
- Moorthy, S. N. (2002). Propiedades fisicoquímicas y funcionales de los almidones de tubérculos tropicales. *Stärke*, 559-592.
- Mora, L., & Torres, A. (2022). *Evaluación de la producción de vodka artesanal "La Destilería"*. Bogotá: Universidad de América.
- Pandey, A., Nigam, P., & Soccol, C. R. (2000). Avances en amilasas microbianas. *Biotecnología y bioquímica aplicada*, 135-152.
- Parlamento Europeo, Consejo de la Unión Europea. (2019). *Reglamento (UE) 2019/787 del Parlamento Europeo y del Consejo*. <https://eur-lex.europa.eu/eli/reg/2019/787/oj>
- Puerta Quintero, G. I. (2010). Fundamentos del proceso de fermentación en el beneficio del café. *Avances Técnicos Cenicafé*, 1-12. https://publicaciones.cenicafe.org/index.php/avances_tecnicos/article/view/1366
- Puig, R. P. (2023). *Alfa amilasa: características, estructura, funciones*. <https://www.lifeder.com/alfa-amilasa/>
- Puig, R. P. (2024). *Amilasa*. <https://www.lifeder.com/amilasa/>
- Soliz Baldovinos, I. (2013). *Costos indirectos en la construcción*. https://bibliotecadigital.fce.unam.edu.ar/bitstream/handle/bhp/518/Balanda%20AT_2005_Contabilidad.pdf?sequence=1

- Toaquiza Anguisaca, J. (2024). *Costo de producción y su repercusión en la rentabilidad en la panadería* y. <http://dspace.unach.edu.ec/handle/51000/13678>
- Walker, G. M. (2010). *Bioetanol: ciencia y tecnología del alcohol combustible*. Londres: Ventus Publishing.
- Zurita Malliquinga, W. (2011). *Elaboración de vinos de frutas (Pitahaya *Hylocereus triangularis* y carambola *averrhoa L.*) en 3 diferentes concentraciones de mosto y con 2 tipos de levaduras del género *saccharomices* (*s. cereviceae* y *s. ellipsoideus*).* Latacunga. <http://repositorio.utc.edu.ec/handle/27000/907>

XI. ANEXOS

Anexo 1. Formato de evaluación de tiempos de cocción para yuca rosa

	Tiempo de cocción (minutos)									
	5	10	15	20	25	30	40	45	50	60
Grados Brix										

Fuente: Elaboración propia para el registro de datos experimentales

Anexo 2. Formato de evaluación de tiempos de cocción para yuca blanca

	Tiempo de cocción (minutos)									
	5	10	15	20	25	30	40	45	50	60
Grados Brix										

Fuente: Elaboración propia para el registro de datos experimentales

Anexo 3. Grados brix en función de la proporción de agua

Proporción	Yuca	Agua	Grados Brix
1:0.5			
1:1			
1:1.5			
1:2			

Fuente: Elaboración propia para el registro de datos experimentales

Anexo 4. Evaluación del proceso de elaboración

	Grados Brix					
Proceso 1						
Proceso 2						

Fuente: Elaboración propia para el registro de datos experimentales

Anexo 5. Grados Brix obtenidos con alfa-amilasa por una hora a baño maría y posterior adición de glucoamilasa por 24 horas en incubadora

	Levadura de vino	Levadura de Vodka
Prueba 1		
Prueba 2		
Prueba 3		
Prueba 4		
Prueba 5		
Prueba 6		

Fuente: Elaboración propia para el registro de datos experimentales

Anexo 6. Grados Brix obtenidos con alfa-amilasa y glucoamilasa ambas a baño maría por 1 hora

	Levadura de vino	Levadura de Vodka
Prueba 1		
Prueba 2		
Prueba 3		
Prueba 4		
Prueba 5		
Prueba 6		

Fuente: Elaboración propia para el registro de datos experimentales

Anexo 7. Grados de alcohol obtenidos con alfa-amilasa por una hora a baño maría y posterior adición de glucoamilasa por 24 horas en incubadora

	Levadura de vino			Levadura de Vodka		
	D1	D2	D3	D1	D2	D3
Prueba 1						
Prueba 2						
Prueba 3						
Prueba 4						
Prueba 5						
Prueba 6						

Nota. D1 = primera destilación, D2 = segunda destilación, D3 = tercera destilación.

Elaboración propia para el registro de datos experimentales

Anexo 8. Grados de alcohol obtenidos con alfa-amilasa y glucoamilasa ambas a baño maría por 1 hora

	Levadura de vino			Levadura de Vodka		
	D1	D2	D3	D1	D2	D3
Prueba 1						
Prueba 2						
Prueba 3						
Prueba 4						
Prueba 5						
Prueba 6						

Nota. D1 = primera destilación, D2 = segunda destilación, D3 = tercera destilación.

Elaboración propia para el registro de datos experimentales

Anexo 9. Instrumento de Entrevista expertos en fermentación

Entrevista a Experto en Fermentación y Destilación para la Producción de Vodka

Datos del Entrevistado:

1. Nombre: _____
2. Cargo/Especialidad: _____
3. Experiencia en el sector: _____

Introducción:

1. ¿Cómo se desarrolla su experiencia en el campo de la fermentación y destilación, particularmente en la producción de bebidas alcohólicas? ¿Cuáles han sido los aspectos más relevantes de su trayectoria?

Fermentación de la Yuca: 2. La yuca es un almidón complejo. ¿Cuáles son los pasos clave para convertir el almidón de la yuca en azúcares fermentables durante la fermentación?

3. ¿Qué técnicas específicas se utilizan para la conversión del almidón en azúcares en el caso de la yuca? ¿Es similar a otros almidones como el maíz o el trigo?
4. ¿Cómo se controla la temperatura y el pH durante la fermentación para obtener una eficiencia máxima en la conversión del almidón de yuca?
5. ¿Existen características particulares de la yuca (en comparación con otros cultivos) que puedan afectar el proceso de fermentación o la calidad del alcohol obtenido?
6. ¿Qué tipos de levaduras son más recomendables para la fermentación de la yuca? ¿Qué factores deben tenerse en cuenta al seleccionar la cepa de levadura adecuada?

Destilación: 7. Una vez que el mosto fermentado está listo, ¿cuáles son los principales pasos del proceso de destilación para la producción de vodka de alta calidad a partir de la yuca?

8. En la destilación del vodka, ¿qué importancia tiene la separación de los diferentes compuestos durante el proceso de destilación (por ejemplo, cabeza, corazón y cola)?

9. ¿Cuál es la relación entre la pureza del alcohol obtenido y los métodos empleados en la destilación? ¿Existen técnicas específicas para obtener una mayor pureza cuando se usa yuca?
10. A nivel técnico, ¿qué desafíos presenta la destilación de alcohol a partir de la yuca en comparación con otros tipos de almidón como el maíz o el trigo? ¿Se requieren ajustes en las temperaturas o en el equipo de destilación?
11. ¿En qué momentos del proceso de destilación se realizan pruebas de calidad del alcohol? ¿Cómo se determina que el producto es adecuado para el siguiente paso?

Calidad del Producto Final: 12. ¿Qué parámetros de control de calidad deben ser monitoreados durante la fermentación y la destilación para garantizar que el vodka producido tenga un sabor limpio y suave?

13. A nivel de los compuestos químicos involucrados, ¿cómo influye la fermentación de yuca en el perfil final del sabor del vodka? ¿Qué diferencias notaríamos si utilizáramos otro almidón?

En su experiencia, ¿hay algún tipo de posprocesamiento o tratamiento adicional que se recomienda para mejorar la calidad del vodka después de la destilación? (Ejemplo: filtrado con tela, purificación, etc.)

Matriz de resultados de entrevista al experto.

Pregunta	Categoría	Respuesta
1	Pasos conversión de almidón	
2	Técnicas de conversión	
3	Control temperatura y pH	
4	Características de la yuca-alcohol	
5	Levadura, Factor de selección	
6	Pasos para destilar	
7	Cabeza-Corazón-cola	
8	Relación pureza-métodos	
9	Desafíos en la destilación	

10	Tiempos pruebas de calidad	
11	Parámetros para monitorear	
12	Influencia yuca-vodka	
13	Tratamientos de calidad	

Anexo 10. Ficha técnica para la recolección de datos fisicoquímicos del vodka de yuca

Información general

- Fecha de análisis: _____
- Responsable del análisis: _____

Parámetros fisicoquímicos para evaluar

Parámetro	Método de Análisis	Unidad de Medida
Graduación alcohólica	Alcoholímetro	% vol.
pH	Potenciómetro	Unidades de pH
Transparencia/Pureza	Observación	Escala 1-10

Anexo 11. Cuestionario para evaluación de perfil sensorial

Cuestionario evaluación perfil sensorial del vodka	
Pregunta	Escala de Evaluación
Apariencia	1 (Muy opaca) – 5 (Muy clara)
Olor	1 (Desagradable) – 5 (Muy agradable)
Sabor	1 (Muy amargo) – 5 (Muy suave y neutro)
Sensación en boca	1 (Muy áspero) – 5 (Muy suave)
Satisfacción general	1 (Muy insatisfecho) – 5 (Muy satisfecho)

Anexo 12. Hojas de registro

Fecha	Experimento	Parámetro Medido	Valor Obtenido	Observaciones

Anexo 13. Comparación de °Brix según el tipo de yuca

Yuca Rosa		Yuca Blanca		Tiempo de Cocción
Código	°Brix Yuca	Código	°Brix Yuca	

Anexo 14. Grado alcohólico obtenido en fermentación según tipo de levadura (proceso 1)

Levadura de vino						
	Prueba 1	Prueba 2	Prueba 3	Prueba 4	Prueba 5	Prueba 6
Mosto a destilar						
Grados de alcohol						
Levadura de Vodka						
	Prueba 1	Prueba 2	Prueba 3	Prueba 4	Prueba 5	Prueba 6
Mosto a destilar						
Grados de alcohol						

Anexo 15. Aumento de los grados de alcohol en las tres destilaciones, según el tipo de levadura empleada.

	Levadura de vino			Levadura de Vodka		
	D1	D2	D3	D1	D2	D3
Prueba 1						
Prueba 2						
Prueba 3						
Prueba 4						
Prueba 5						
Prueba 6						