



UNIVERSIDAD NACIONAL DEL ALTIPLANO
FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA QUÍMICA



**OBTENCIÓN DE INULINA CRISTALIZADA A PARTIR DEL
EXTRACTO DE YACÓN (*Smallanthus sonchifolius*)**

TESIS

PRESENTADA POR:

**Bach. MARIELA DE LA MERCED ZOLANCH HUAYTA
FARFÁN**

PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE:

INGENIERO QUÍMICO

PUNO – PERÚ

2024



Reporte de similitud

NOMBRE DEL TRABAJO

**OBTENCIÓN DE INULINA CRISTALIZADA
A PARTIR DEL EXTRACTO DE YACÓN (S
mallanthus sonchifolius)**

AUTOR

**Mariela de la Merced Zolanch Huayta Far
fán**

RECuento DE PALABRAS

18140 Words

RECuento DE CARACTERES

101368 Characters

RECuento DE PÁGINAS

117 Pages

TAMAÑO DEL ARCHIVO

15.7MB

FECHA DE ENTREGA

Aug 14, 2024 11:02 AM GMT-5

FECHA DEL INFORME

Aug 14, 2024 11:04 AM GMT-5

● **18% de similitud general**

El total combinado de todas las coincidencias, incluidas las fuentes superpuestas, para cada base de datos.

- 16% Base de datos de Internet
- Base de datos de Crossref
- 10% Base de datos de trabajos entregados
- 4% Base de datos de publicaciones
- Base de datos de contenido publicado de Crossref

● **Excluir del Reporte de Similitud**

- Material bibliográfico
- Material citado
- Material citado
- Coincidencia baja (menos de 8 palabras)


M.Sc. Marleni Yovanna Valencia Pacho




D. Sc. German Quille Calizaya
DIRECTOR DE LA UNIDAD DE INVESTIGACIÓN
FIQ UNA - PUNO

Resumen



DEDICATORIA

Quiero dedicar esta tesis a Dios, por ser siempre mi guía y fuente inagotable de fortaleza, sabiduría y esperanza, por iluminar mi camino y por darme la determinación para superar cada obstáculo que se me presentó en este viaje académico.

Así mismo dedico este trabajo a mi mamá y papá, por su amor incondicional, por su apoyo constante, su sabiduría, sus palabras de aliento, su ejemplo de perseverancia y por enseñarme el valor del esfuerzo, la disciplina y la dedicación, por creer en mí y por brindarme todo lo necesario para alcanzar mis objetivos. Esta tesis también es un reflejo de su amor y sacrificio.

Mariela de la Merced Zolanch



AGRADECIMIENTOS

Primero, quiero expresar mi más profundo agradecimiento a Dios, por su infinita sabiduría y guía en cada paso de mi camino académico, su presencia me ha brindado fortaleza y paciencia para culminar esta tesis. A lo largo de mi vida, he sentido su mano guiando mis decisiones y sosteniéndome en los momentos de dificultad, a Él le debo cada logro y cada aprendizaje obtenido en este proceso. De igual forma quiero agradecer a mi mamá y papá por su apoyo constante, gracias por ser mi inspiración y por brindarme las herramientas necesarias para alcanzar este logro. Este triunfo es tanto de ustedes como mío.

También agradezco a la Universidad Nacional del Altiplano, a mi Facultad por formarme académicamente en sus aulas, a lo largo de estos años he aprendido de docentes que han enriquecido mi desarrollo personal y profesional. Así mismo agradezco a los catedráticos que me brindaron su apoyo en el desarrollo de esta tesis, gracias por sus comentarios constructivos, su enfoque riguroso y su disponibilidad para resolver mis dudas, siempre estaré agradecida por haber contado con su sabiduría y experiencia.

Mariela de la Merced Zolanch



ÍNDICE GENERAL

	Pág.
DEDICATORIA	
AGRADECIMIENTOS	
ÍNDICE GENERAL	
ÍNDICE DE TABLAS	
ÍNDICE DE FIGURAS	
ÍNDICE DE ANEXOS	
ACRÓNIMOS	
RESUMEN	17
ABSTRACT.....	18
CAPÍTULO I	
INTRODUCCIÓN	
1.1 OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN.....	20
1.1.1 Objetivo General.....	20
1.1.2 Objetivos Específicos	20
1.2 JUSTIFICACIÓN DEL TRABAJO.....	21
1.2.1 Justificación Ambiental	21
1.2.2 Justificación social.....	22
1.2.3 Justificación Científica	23
CAPÍTULO II	
REVISIÓN DE LITERATURA	
2.1 ANTECEDENTES DE PROYECTO.....	25



2.1.1	Antecedentes internacionales.....	25
2.1.2	Antecedentes nacionales	29
2.2	MARCO TEÓRICO	31
2.2.1	El Yacón (<i>Smallanthus sonchifolius</i>)	31
2.2.1.1	Historia y cultivo del yacón	31
2.2.1.2	Nombres comunes.....	32
2.2.1.3	Variedades.....	33
2.2.1.4	Composición nutricional	33
2.2.2	Descripción botánica del yacón (<i>Smallanthus sonchifolius</i>)	34
2.2.2.1	La planta.....	34
2.2.2.2	La raíz reservante	35
2.2.2.3	La cepa o corona	35
2.2.2.4	La hoja.....	35
2.2.2.5	La inflorescencia	36
2.2.2.6	El fruto	37
2.2.3	Distribución geográfica y zonas de cultivo.....	38
2.2.3.1	Distribución geográfica.....	38
2.2.3.2	Zonas de Cultivo	39
2.2.3.3	Estadísticas de Áreas de Cultivo en el Perú.....	39
2.2.3.4	El Yacón Fuera de los Andes	39
2.2.4	Composición química	40
2.2.4.1	Composición química de las raíces	40
2.2.4.2	Fructooligosacáridos	41
2.2.4.3	Efecto de los fructooligosacáridos sobre la salud	42
2.2.4.3.1	Salud gastrointestinal.....	42



2.2.4.3.2	Triglicéridos y colesterol.....	42
2.2.4.3.3	Asimilación de calcio y otros minerales.....	42
2.2.4.3.4	Obesidad.....	42
2.2.4.4	Diabetes.....	43
2.2.5	Inulina.....	44
2.2.5.1	Estructura Química.....	44
2.2.5.2	Aislamiento y Producción.....	45
2.2.5.3	Usos en la industria alimentaria.....	46
2.2.5.4	Características Fisicoquímicas.....	47
2.2.5.5	Solubilidad.....	48
2.2.5.6	Reología y viscosidad.....	48
2.2.5.7	Características térmicas.....	49
2.2.5.8	Estabilidad física.....	49
2.2.5.9	Vínculos entre dieta, salud y alimentos funcionales.....	49
2.2.6	Cristalización.....	50
2.2.6.1	Cristalización selectiva.....	51
2.2.7	Técnicas experimentales de cristalización.....	52
2.2.7.1	Filtración.....	52
2.2.7.2	Filtración en Caliente.....	53

CAPÍTULO III

MATERIALES Y MÉTODOS

3.1	TIPO DE INVESTIGACIÓN.....	55
3.2	LUGAR DE ESTUDIO.....	56
3.2.1	Ubicación del sitio de trabajo.....	56
3.2.1.1	Proceso de extracción de inulina.....	56



3.2.1.2	Materia prima.....	57
3.3	MATERIALES.....	59
3.3.1	Materia prima.....	59
3.3.2	Equipos e instrumentos de laboratorio.....	59
3.3.2.1	Equipos.....	59
3.3.2.2	Instrumentos.....	60
3.3.2.3	Reactivos.....	60
3.4	METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN.....	61
3.4.1	Trabajo de campo.....	61
3.4.2	Diseño experimental propuesto.....	61
3.4.3	Obtención de inulina cristalizada a partir del extracto de yacón (<i>Smallanthus sonchifolius</i>).....	63
3.4.4	Determinación de la concentración de azúcares presentes en el yacón (<i>Smallanthus sonchifolius</i>).....	68
3.4.5	Determinación de los parámetros óptimos de la temperatura, tiempo y relación solvente – materia prima para la extracción de inulina.....	70
3.4.6	Cristalización y caracterización de la inulina obtenida a partir del extracto de yacón (<i>Smallanthus sonchifolius</i>).....	72

CAPÍTULO IV

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1	DETERMINACIÓN DE LA CONCENTRACIÓN DE AZÚCARES PRESENTES EN EL YACÓN (<i>Smallanthus sonchifolius</i>).....	75
4.2	DETERMINACIÓN DE LOS PARÁMETROS ÓPTIMOS DE TEMPERATURA, TIEMPO Y RELACIÓN SOLVENTE – MATERIA PRIMA PARA LA EXTRACCIÓN DE INULINA.....	78



4.2.1	Diseño experimental para hallar los parámetros óptimos para la extracción de inulina.....	78
4.2.2	Matriz de diseño experimental desarrollado en el software RStudio	78
4.2.3	Análisis de varianza (ANOVA).....	80
4.2.4	Modelo matemático	82
4.2.5	Optimización de respuesta.....	83
4.2.6	Diagrama de Pareto.....	85
4.2.7	Gráfica de efectos principales.....	86
4.3	CRISTALIZACIÓN Y CARACTERIZACIÓN DE LA INULINA OBTENIDA A PARTIR DEL EXTRACTO DE YACÓN (<i>Smallanthus sonchifolius</i>).....	87
4.3.1	Monitoreo de los °Brix en la fase de evaporación.....	87
4.3.2	Caracterización de los Cristales de Inulina.....	88
V.	CONCLUSIONES.....	93
VI.	RECOMENDACIONES.....	94
VII.	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	95
ANEXOS.....		103

Área: Tecnologías Ambientales y Recursos Naturales

Tema: Cristalización de inulina de yacón

FECHA DE SUSTENTACIÓN: 20 de agosto del 2024



ÍNDICE DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1 Contenido Nutricional del Yacón (100g de raíz fresca sin cáscara).....	34
Tabla 2 Composición química promedio de 10 entradas de yacón procedentes de Perú, Bolivia, Ecuador y Argentina (en relación a 1 kg de materia comestible de raíz fresca).....	41
Tabla 3 Contenido calórico de las raíces del yacón en comparación con otros alimentos.....	43
Tabla 4 Diversos sustitutos de grasas junto con sus usos alimentarios	47
Tabla 5 Fuentes y longitud de cadena de la inulina	48
Tabla 6 Diseño experimental 2 ³ para determinar los parámetros óptimos de temperatura, tiempo y relación solvente – materia prima para la extracción de inulina	62
Tabla 7 Variable respuesta de para la extracción de inulina a partir del extracto de yacón (<i>Smallanthus sonchifolius</i>).	62
Tabla 8 Rango de Temperatura de Extracción.....	71
Tabla 9 Rango de Tiempo de Extracción.....	71
Tabla 10 Rango de Relación Solvente – Materia Prima	71
Tabla 11 Formulaciones de extracción	71
Tabla 12 Resultados de la medición de Parámetros Físicoquímicos	75
Tabla 13 Resultados del Análisis	77
Tabla 14 Resultados de la Interacción de las Variables del Bloque 1	79
Tabla 15 Resultados de la Interacción de las Variables del Bloque 2	79
Tabla 16 Factor de Reproducibilidad.....	80
Tabla 17 Resultados del Análisis de Varianza (ANOVA).....	81



Tabla 18	Coeficiente de regresión para los grados Brix	83
Tabla 19	Optimización de Respuesta.....	84
Tabla 20	Concentración de °Brix en la Fase de Evaporación.....	88
Tabla 21	Características Organolépticas	91
Tabla 22	Características Fisicoquímicas	92



ÍNDICE DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1 Sistema de cultivo de yacón en Cochamarca, Cajamarca.....	32
Figura 2 Planta entera de yacón	34
Figura 3 Corte transversal de la corona.....	35
Figura 4 Hojas de una planta de yacón de ocho meses de edad.....	36
Figura 5 Inflorescencia típica de una planta de yacón	37
Figura 6 Fruto del yacón	37
Figura 7 Distribución del yacón en la región andina.....	38
Figura 8 Estructura de la Inulina	45
Figura 9 Filtración	53
Figura 10 Filtración al Vacío.....	54
Figura 11 Ubicación de la Provincia de Sandía en el mapa del Perú.....	58
Figura 12 Yacón (<i>Smallanthus sonchifolius</i>) variedad morada	61
Figura 13 Lavado de las raíces de yacón (<i>Smallanthus sonchifolius</i>).....	64
Figura 14 Cepillado manual de las raíces de yacón (<i>Smallanthus sonchifolius</i>)	64
Figura 15 Pelado de las raíces de yacón (<i>Smallanthus sonchifolius</i>).....	65
Figura 16 Diagrama de Flujo del Proceso de Obtención de Inulina Cristalizada a partir del Extracto de Yacón (<i>Smallanthus sonchifolius</i>).....	68
Figura 17 Diagrama de Pareto Estandarizada	85
Figura 18 Efectos Principales para grados Brix	86
Figura 19 Vista Microscópica de la Aparición de Cristales de Inulina.....	89
Figura 20 Vista Microscópica de Cristales alargados de inulina	89
Figura 21 Vista microscópica de la inulina cristalizada.....	90
Figura 22 Variedad morada de yacón.....	108



Figura 23	Calibración del multiparámetro	108
Figura 24	Obtención del gráfico de calibración para pH	108
Figura 25	Medida de pH y conductividad del yacón.....	109
Figura 26	Trituración del yacón para medida preliminar de los °Brix.....	109
Figura 27	Medida de los grados Brix con un refractómetro portátil	109
Figura 28	Medida de los volúmenes de materia prima y solvente.	110
Figura 29	Armado del sistema de extracción	110
Figura 30	Armado del sistema de filtración	110
Figura 31	Filtración en caliente del extracto obtenido	111
Figura 32	Resultado de la filtración en caliente	111
Figura 33	Encendido y calibración del refractómetro digital.....	111
Figura 34	Lectura de los grados Brix y nD en el refractómetro Mettler Toledo R4 ..	112
Figura 35	Lectura de datos de todas las corridas.....	112
Figura 36	Encendido y programación de la centrifugadora	112
Figura 37	Colocación de los tubos tipo falcon	113
Figura 38	Precipitado de inulina luego de la centrifugación y precipitado luego de 24 horas	113
Figura 39	Acondicionamiento de placas para el secado.....	113
Figura 40	Distribución de la muestra concentrada en la placa.....	114
Figura 41	Caracterización morfológica de los cristales de inulina	115



ÍNDICE DE ANEXOS

	Pág.
ANEXO 1 Certificado de análisis del yacón variedad morada.....	103
ANEXO 2 Certificado de análisis proximal de la inulina de yacón cristalizado	104
ANEXO 3 Certificado de material de referencia refractómetro Mettler Toledo R4	105
ANEXO 4 Informe de ensayo específico del refractómetro Mettler Toledo	106
ANEXO 5 Certificado de INACAL de laboratorio de calibración del refractómetro Mettler Toledo.....	107
ANEXO 6 Fotografías del desarrollo de la investigación.....	108



ACRÓNIMOS

°C:	Grados Celcius
ANOVA:	Análisis de Varianza
AOAC:	Association of Analytical Communities
CD:	Dicroísmo circular
FOS:	Fructooligosacáridos
FT – IR:	Espectroscopia infrarroja por transformada de Fourier
G.P.	Grado de polimerización
HMF:	Hidroximetilfurfural
HOMA:	Evaluación del modelo de homeostasis
HPLC:	Cromatografía líquida de alta densidad
IM:	Índice de madurez
INACAL:	Instituto Nacional de Calidad
INIA:	Instituto Nacional de Innovación Agraria
IRC:	Carbohidratos ricos en inulina
JAT:	Tubérculos de alcachofa de Jerusalén
LDL:	Lipoproteínas de baja densidad
m.s.n.m.:	Metros sobre el nivel del mar
MALDI-TOF-MS:	Espectrometría de masas de tiempo de vuelo de ionización/ desorción láser asistida por matriz



min:	Minutos
mm:	Milímetros
nD:	Índice de Refracción
NMR:	Resonancia magnética nuclear
p.c.:	peso corporal
pH:	Potencial de hidrógeno
RPM:	Revoluciones por minuto
S – MP:	Solvente – materia prima
SENAMHI:	Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú
Tg:	Temperatura de transición vítrea
UHT:	Ultra High Temperature (Ultra Alta Temperatura)
VIF:	Factor de inflación de varianza
VLDL:	Colesterol de lipoproteínas de muy baja densidad
XRD:	Difracción de rayos X
$\mu S/cm$:	microsiemens por centímetro



RESUMEN

La inulina es un tipo de fibra dietética soluble que ha sido objeto de creciente interés en la industria alimentaria y farmacéutica debido a sus propiedades prebióticas y funcionales. La presente tesis de investigación se enfocó en la obtención de inulina cristalizada a partir del extracto de yacón (*Smallanthus sonchifolius*) variedad morada de la Provincia de Sandia – Puno, una raíz tuberosa andina rica en fructooligosacáridos. Con respecto a la metodología se comenzó realizando un análisis fisicoquímico de la materia prima que reveló una concentración de azúcares de 11,02°Brix, un índice de refracción de 1,3494; un pH de 6,038; indicativos de un alto contenido de sólidos solubles y una ligera acidez favorable para la estabilidad del extracto, además de 4,80 mg/L de inulina; 3,40 mg/L de fructosa y 21,90 mg/L de azúcares reductores presentes en el yacón de variedad morada. Posteriormente la optimización de los parámetros de extracción se realizó mediante un diseño experimental factorial 2^3 , controlando las variables de temperatura, tiempo y relación solvente – materia prima. Los parámetros óptimos para la extracción fueron: 87°C, 45 minutos y 3:1. Para cristalizar la inulina, se sometió a un proceso de evaporación que incrementó la concentración de azúcares de 9,33°Brix a 56,59°Brix en 6 horas. La posterior precipitación con etanol y secado resultó en la formación de cristales de inulina, confirmada mediante microscopía. Finalmente, la inulina cristalizada fue sometida a un análisis proximal presentando un color característico a yacón (marrón), sabor y olor (dulce), aspecto (en polvo ligeramente granulado), humedad (5,51%), cenizas (2,65%), proteína (9,65%), grasa (3,55%), fibra cruda (1,58%), carbohidratos (77,06%) y una energía total de (378,79 kcal/100 g).

Palabras clave: Azúcares, Cristalización, Inulina, Optimización, *Smallanthus sonchifolius*.



ABSTRACT

Inulin, a soluble dietary fiber, has garnered increasing attention in the food and pharmaceutical industries due to its prebiotic and functional properties. This research focuses on the extraction and crystallization of inulin from the purple variety of yacon (*Smallanthus sonchifolius*) grown in the Province of Sandia, Puno, a region known for this Andean tuberous root, which is rich in fructooligosaccharides. The physicochemical analysis of the raw material revealed a sugar concentration of 11,02°Brix, a refractive index of 1,3494, and a pH of 6,038; indicating a high content of soluble solids and a slight acidity conducive to the stability of the extract. Additionally, the yacon sample contained 4,80 mg/L of inulin; 3,40 mg/L of fructose, and 21,90 mg/L of reducing sugars. The optimization of extraction parameters was achieved using a 2³ factorial experimental design, with temperature, time, and solvent-to-raw material ratio as the controlled variables. The optimal extraction conditions were determined to be 87°C, 45 minutes, and a solvent-to-material ratio of 3:1. Crystallization of the inulin was then accomplished through an evaporation process that increased the sugar concentration from 9,33°Brix to 56,59°Brix over a period of 6 hours. Subsequent precipitation with ethanol and drying led to the formation of inulin crystals, as confirmed by microscopy. Finally, the crystallized inulin underwent proximate analysis, revealing the following characteristics: a characteristic yacon color (brown), taste and odor (sweet), appearance (slightly granular powder), moisture content (5,51%), ash content (2,65%), protein (9,65%), fat (3,55%), crude fiber (1,58%), carbohydrate (77,06%), and total energy (378,79 kcal/100 g).

Keywords: Crystallization, Inulin, Optimization, *Smallanthus sonchifolius*, Sugars.



CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN

La inulina es un carbohidrato de almacenamiento presente en diversas plantas, ampliamente utilizada en la industria alimentaria debido a sus propiedades prebióticas y su capacidad para mejorar la textura de los productos. Se encuentra de manera natural en vegetales como la achicoria, la alcachofa, raíces de dalia, el yacón (*Smallanthus Sonchifolius*) (Roberfroid, 2005). En particular, el yacón es una raíz tuberosa originaria de los Andes, conocida por su alto contenido de fructooligosacáridos (FOS), entre los cuales destaca la inulina, estos compuestos no solo mejoran la salud intestinal al promover el crecimiento de bacterias beneficiosas, sino que también poseen un bajo valor calórico, lo que los hace ideales para personas que buscan opciones más saludables en su dieta (Mensik et al., 2015).

La extracción y cristalización de la inulina a partir del yacón presenta una oportunidad para desarrollar productos innovadores y saludables ya que el extracto de yacón tiene potenciales propiedades antidiabéticas, efectos hipoglucemiantes y propiedades antioxidantes (Hachkova et al., 2021). Sin embargo, la variabilidad en la concentración de azúcares y la necesidad de optimizar los parámetros de extracción, como la temperatura, el tiempo y la relación solvente materia prima, representan desafíos significativos (Redondo et al., 2021). La optimización de estos parámetros es crucial para maximizar el rendimiento de inulina y asegurar su pureza, lo cual es fundamental para su uso comercial y su efectividad como ingrediente funcional.

En los últimos años, ha habido un creciente interés en la investigación sobre métodos eficientes para la extracción de inulina, especialmente a partir de fuentes vegetales no tradicionales como el yacón. Los estudios han demostrado que el yacón no



solo es una fuente rica en inulina, sin que también tiene un perfil de azúcares favorables para la salud, incluyendo bajas cantidades de glucosa y fructosa libres, lo cual es beneficioso para personas con restricciones dietéticas relacionadas con el azúcar (Kamp et al., 2019). De manera que la caracterización de la inulina obtenida, así como su cristalización, son etapas críticas que determinan la viabilidad del proceso a escala industrial (Genta et al., 2009).

Este proyecto de investigación tuvo como objetivo principal la obtención de inulina cristalizada a partir del extracto de yacón. Los objetivos específicos incluyen la determinación de la concentración de azúcares presentes en el yacón, la optimización de los parámetros de extracción y cristalización y caracterización de la inulina obtenida. Este enfoque integral no solo contribuirá al conocimiento científico sobre la inulina y sus métodos de extracción, así mismo potencia el valor comercial del yacón de la provincia de Sandía y promueve su cultivo en regiones andinas.

1.1 OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN

1.1.1 Objetivo General

Obtener inulina cristalizada a partir del extracto de yacón (*Smallanthus sonchifolius*).

1.1.2 Objetivos Específicos

- Determinar la concentración de azúcares presentes en el yacón (*Smallanthus sonchifolius*).
- Determinar los parámetros óptimos de temperatura, tiempo y relación solvente materia prima para la extracción de inulina.



- Cristalizar y caracterizar la inulina obtenida a partir del extracto de yacón (*Smallanthus sonchifolius*).

1.2 JUSTIFICACIÓN DEL TRABAJO

1.2.1 Justificación Ambiental

El cultivo del yacón (*Smallanthus sonchifolius*) posee un impacto positivo en la sostenibilidad ambiental debido a su capacidad para crecer en suelos marginales donde otras plantas agrícolas no prosperan (Cabrera et al., 2019). Este cultivo requiere menos pesticidas y fertilizantes en comparación con otros cultivos convencionales, lo que disminuye la contaminación del suelo y contribuye a la retención de humedad, lo cual es beneficioso para la agricultura sostenible en regiones vulnerables a la sequía.

La obtención de inulina a partir del yacón puede fomentar prácticas agrícolas sostenibles al proporcionar un incentivo económico para el cultivo de esta planta. El aumento en la demanda de yacón incentivará a los agricultores a cultivar más, lo que a su vez puede reducir la presión sobre otros cultivos que requieren mayores recursos. La diversificación de cultivos es una estrategia clave para mitigar los efectos del cambio climático y asegurar la resiliencia agrícola.

El procesamiento de yacón para la obtención de inulina genera subproductos que pueden ser utilizados como fertilizantes orgánicos, cerrando así el ciclo de nutrientes y reduciendo la necesidad de fertilizantes sintéticos (Díaz et al., 1956). Estos subproductos, como las fibras residuales, pueden ser compostados y devueltos al suelo, mejorando su fertilidad y reduciendo los residuos orgánicos.



La producción local de inulina a partir del yacón puede disminuir la huella de carbono asociada con la importación de inulina de otros países. Al producir inulina de manera local, se reducen las emisiones de gases de efecto invernadero, generadas por el transporte de larga distancia. Esto contribuye a los esfuerzos globales para reducir las emisiones de carbono y combatir el cambio climático.

Finalmente, la promoción del cultivo de yacón puede ayudar a preservar la biodiversidad agrícola en la provincia de Sandia y en otras regiones. El yacón es una planta nativa de los Andes y su cultivo contribuye a la conservación de variedades locales y a la protección de ecosistemas agrícolas tradicionales. La conservación de la biodiversidad es esencial para mantener la resiliencia de los sistemas agrícolas frente a las perturbaciones ambientales.

1.2.2 Justificación social

La investigación y desarrollo de la obtención de inulina cristalizada a partir del yacón tiene el potencial de generar beneficios significativos para las comunidades agrícolas locales. El yacón (*Smallanthus sonchifolius*) es una planta tradicionalmente cultivada en la región andina, y su explotación comercial puede proporcionar ingresos adicionales a los agricultores (Mensik et al., 2015). Esto contribuirá a mejorar los medios de vida rurales y reducir la pobreza en estas áreas.

El desarrollo de una industria local de producción de inulina en la provincia de Sandia puede crear empleo en diversas etapas de la cadena de valor, desde el cultivo y cosecha del yacón hasta su procesamiento y comercialización. La generación de empleo en áreas rurales es fundamental para el desarrollo social y económico, ya que permite a las comunidades mejorar su calidad de vida y acceder a mejores servicios (Grodzicki & Jankiewicz, 2022).



La inulina obtenida a partir del yacón también puede traer beneficios directos para la salud de la población. La inulina es conocida por sus propiedades prebióticas, que ayudan a mejorar la salud digestiva al promover el crecimiento de bacterias beneficiosas en el intestino. Además, su bajo índice glucémico la hace adecuada para personas con diabetes y para quienes buscan reducir el consumo de azúcar.

La integración de la inulina de yacón en programas de nutrición y salud pública puede ayudar a abordar problemas de malnutrición y enfermedades crónicas. La inulina puede ser utilizada en la formulación de productos alimenticios destinados a mejorar la salud de la población, como suplementos dietéticos y alimentos funcionales, proporcionando una solución accesible y localmente sostenible para mejorar la nutrición (Lachman et al., 2018).

1.2.3 Justificación Científica

La investigación sobre la obtención de inulina cristalizada a partir del extracto de yacón (*Smallanthus sonchifolius*) proporciona información valiosa para el ámbito de la ciencia de los alimentos y la biotecnología. La inulina es un compuesto de gran relevancia debido a sus propiedades funcionales y sus beneficios para la salud. Explorar nuevas fuentes y métodos de extracción puede ampliar las aplicaciones de este prebiótico en la industria alimentaria (Madrigal & Sangronis, 2007).

La determinación de la concentración de azúcares en el yacón y la optimización de los parámetros de extracción son elementos clave para mejorar la eficiencia del proceso. Este conocimiento es esencial para desarrollar métodos de extracción que maximicen el rendimiento de inulina, lo que a su vez puede reducir



costos y aumentar la viabilidad comercial del proceso. Además, esta investigación puede facilitar la estandarización de técnicas de extracción que sean aplicables a otras fuentes vegetales.

La cristalización de la inulina es un desafío experimental que requiere una comprensión detallada de las condiciones fisicoquímicas óptimas (Saavedra et al., 2014). Este proceso no solo es importante para la obtención del producto final, sino también para sus propiedades funcionales. La investigación en esta área puede llevar al desarrollo de nuevas técnicas de cristalización que mejoren la calidad y funcionalidad de la inulina, beneficiando a la industria alimentaria y farmacéutica.

La caracterización de la inulina obtenida del yacón mediante técnicas analíticas, como la refractometría, proporciona datos valiosos sobre su composición y propiedades. Este conocimiento es esencial para entender como la inulina del yacón se compara con otras fuentes, lo que puede influir en su aplicación en productos alimenticios y suplementos dietéticos. Además, esta información es útil para estudios de biocompatibilidad y eficacia prebiótica.

Como se describe anteriormente, esta investigación puede abrir nuevas líneas de estudio sobre el uso de yacón, vegetales y otras fuentes andinas en la obtención de compuestos funcionales. Al contribuir al cuerpo de conocimiento existente sobre la bioprospección de plantas nativas, se fomenta la innovación en el desarrollo de productos alimenticios saludables y sostenibles. Esto puede tener un impacto duradero en la industria alimentaria y en la promoción de la salud pública (Madrigal & Sangronis, 2007).



CAPÍTULO II

REVISIÓN DE LITERATURA

2.1 ANTECEDENTES DE PROYECTO

2.1.1 Antecedentes internacionales

Bedoya et al. (2008) en su artículo de investigación establecieron el uso del yacón (*Smallanthus sonchifolius* (Poepp. & Endl.)), una planta no cultivada de la región andina en Nariño, que, debido a su alto contenido de inulina, se utilizó en la industria alimentaria y farmacéutica para la fabricación de edulcorantes para diabéticos y como fibra en alimentos refinados; además, optimizaron el proceso de extracción sólido-líquido utilizando agua caliente para obtener inulina de la raíz de yacón, y la cuantificación de la inulina en el extracto se llevó a cabo mediante refractometría. Utilizaron varias combinaciones de tiempo, temperatura y relación solvente-materia prima en el diseño experimental utilizando un diseño central compuesto de 2^3 con puntos estrella. Utilizaron la metodología de superficie de respuesta que determinó que será capaz de obtener una excelente producción del 20,7% de inulina en condiciones de extracción de 23 min a 82,2°C y relación disolvente-materia prima de 4,5 L/500g. La técnica para la separación de cristales de una solución rica en inulina obtuvo una producción del 17,3% en relación con el peso fresco del material experimental. Los cristales se caracterizaron bajo propiedades físicas, químicas y organolépticas.

Cooper et al. (2015) en su investigación muestran que las micropartículas semicristalinas de inulina (MPI) tienen utilidad clínica como potentes adyuvantes de vacunas humanas, pero su estructura superficial relevante y su ensamblaje



cristalino siguen sin definirse. Mostraron que las superficies de los cristales de inulina se asemejan a esferulitas radiales discoideas de múltiples capas que resultan de la formación muy rápida de estructuras terciarias complejas, lo que implica una iniciación cristalina dirigida.

Apolinário et al. (2017) en su estudio realizado llevaron a cabo la extracción, aislamiento y caracterización de inulina a partir de los bulbos de *Agave sisalana*. El procedimiento comenzó con la recolección de plantas de seis años en Monteiro, PB, Brasil, las cuales fueron secadas y molidas. La extracción se realizó a 80°C con agitación durante dos horas. La inulina cruda fue precipitada con acetona a baja temperatura (4°C), y luego purificada mediante cromatografía de intercambio iónico. El producto resultante fue un polvo blanco obtenido por liofilización y caracterizado utilizando diversas técnicas analíticas como FT-IR, NMR, XDR, análisis térmico, CD y MALDI-TOF-MS. Estas técnicas revelaron una prevalencia de oligosacáridos con un grado de polimerización entre 5 y 13.

Basarán et al. (2018) en su artículo de investigación cromatografía líquida de alto rendimiento con detección de índice refractivo para la determinación de inulina en raíces de achicoria, desarrollaron un método rápido y directo para la determinación de inulina utilizando cromatografía líquida de alta eficiencia (HPLC) con detección del índice de refracción. El procedimiento incluyó la extracción de inulina con agua caliente en un baño ultrasónico a 70°C durante 1 hora. Luego determinaron directamente la inulina, fructosa y glucosa utilizando ácido clorhídrico a 80°C durante 1 hora. Los rangos de inulina variaron de 89,78 a 143,95 g/kg, con recuperaciones del 80,75% al 110,9%. Los límites de detección para fructosa, glucosa, sacarosa e inulina fueron 0,14; 0,20; 0,09 y 0,23 g/kg. Los pasteles de raíz de achicoria también se analizaron y se encontró que son



adecuados para la alimentación del ganado debido a su contenido en proteína cruda y cenizas.

Rubel et al. (2018) en su artículo de investigación extracción de carbohidratos ricos en inulina de tubérculos de alcachofa de Jerusalén (*Helianthus tuberosus L.*) y aplicación de diferentes métodos de secado, estudiaron las variables de extracción operativa para obtener mayores rendimientos de inulina de JAT, así como las condiciones óptimas para obtener un producto en polvo estable y dispersable por pulverización o liofilización. Se empleo agua caliente destilada como disolvente y la extracción IRC fue la más óptima sin asistencia de ultrasonido a 76°C empleando un S:S de 1:16, durante 90 minutos. Además, el polvo obtenido por liofilización del extracto de IRC mostró ventajas con respecto al polvo obtenido por secado por pulverización.

Álvarez et al. (2019) en su artículo de investigación llevaron a cabo la determinación del contenido de fructano tipo inulina en yacón (*Smallanthus sonchifolius*) utilizando un procedimiento estandarizado de HPLC. Para ello, emplearon un diseño multifactorial 2³ mediante el programa Statgraphics V. 16. Se seleccionaron 3 variables independientes, cada una con dos niveles: temperatura (59,85°C y 79,85°C), tiempo (5 y 25 minutos) y una relación agua – yacón (3 mL/200 g y 7 mL/200 g). El rendimiento máximo alcanzado fue del 18%. Las condiciones óptimas para la extracción se establecieron en un tiempo de 24 min, una temperatura de 78,85°C y una relación de volumen de agua a masa de yacón de 6,9 mL/200 g. Adicionalmente, diseñaron una tecnología de producción industrial utilizando el programa SuperPro Designer, implementando un proceso por lotes y realizaron un análisis económico basado en una planta de procesamiento de 100 kg/día. Los productos de la fermentación de fructanos tipo



inulina en el colon actúan como sustratos y señalizadores, regulando la respuesta inmune, la homeostasis de la glucosa y el metabolismo de los lípidos, lo que contribuye a reducir el riesgo de hiperglucemia, obesidad y cáncer colorrectal.

El-Kholy et al. (2020) en su artículo de investigación estudiaron la utilización de inulina extraída de las raíces de achicoria (*Cichorium intybus L.*) para mejorar las propiedades del yogur simbiótico bajo en grasa, para lo cual siguieron el siguiente procedimiento; primero las raíces crudas se lavaron cuidadosamente para eliminar la tierra y otras impurezas, se sumergió en una solución de ácido cítrico al 0,75% para eliminar el sabor amargo, se secó en un horno eléctrico a 40°C por 10 horas y se molió. La extracción de inulina se realizó añadiendo agua al polvo de raíz a 80°C durante 1 hora, el extracto se filtró y se clarificó adicionando hidróxido de calcio, seguido de una filtración al vacío. Luego se adicionó inulina al 1%, esta mejoró las propiedades microestructurales, texturales y sensoriales del yogur.

Escobar et al. (2020) en su artículo de investigación extracción de inulina de plantas andinas: un enfoque a cultivos no tradicionales del Ecuador utilizaron tres etapas para la obtención de inulina: preparación de materia prima, extracción y purificación. Las condiciones de extracción se determinaron utilizando un diseño aleatorio con 3 niveles de velocidad de agitación (0, 130 y 300 RPM), y un diseño experimental factorial de 3² con tres niveles de temperatura (40, 60 y 80°C) y relación sólido-líquido (1:2, 1:3 y 1:5). Sus resultados mostraron que las mejores condiciones de extracción para la jícama fueron 130 RPM, 75°C, 1:5 S-L y 25 minutos; mientras que para la cabuya fueron 300 RPM, 80°C, 1:5 S-L y 100 minutos.



Redondo et al. (2021) en su artículo de investigación nos detalla la extracción de inulina de fuentes vegetales comunes que contienen inulina, como los tubérculos de alcachofa de Jerusalén, raíz de achicoria y alcachofa de globo. Optimizaron los parámetros de relación disolvente – sólido, la temperatura y el tiempo para la extracción de inulina mediante la metodología de superficie respuesta. Las condiciones óptimas que hallaron son: 27,8 – 37,4 mL/g de relación disolvente – sólido, 62 – 80 °C y 22 – 60 minutos. El mayor contenido de inulina se logró en la raíz de achicoria (70,5 g/100 g de peso seco) y el tubérculo de alcachofa de Jerusalén (81,1 g/100 g de peso seco) y los más bajos se alcanzaron en el producto de alcachofa de globo (4,2 g/100 g).

Hartati et al. (2023) en su artículo de investigación extracción de inulina de diferentes tipos de tubérculos en el distrito de Magelang, tuvieron como objetivo determinar los niveles y características de la inulina contenida en varios tipos de tubérculos, utilizaron boniato de miel (*Lpomoea batatas L.*), boniato morado (*Lpomoea batatas L.*), gadung (*Dioscorea hispida*), uwi (*Dioscorea alata L.*), ganyong (*Canna edulis Ker.*) y arrurruz (*Maranta arundinacea*). El mayor rendimiento encontrado fue del tubérculo de arrurruz (0,155%) pero menor contenido de inulina, el boniato con miel dio el menor rendimiento (0,035%), con el mayor contenido de inulina (6,472%), el mayor contenido de agua (14,385%) y la mayor solubilidad (0,685%) y la mayor producción de inulina la obtuvo el boniato morado.

2.1.2 Antecedentes nacionales

Arévalo y Porras (2010) en su tesis de investigación se centraron en la obtención de inulina a partir de raíces de yacón (*Smallanthus sonchifolius*) a nivel



piloto. Seleccionaron el yacón de Huaraz por su alto contenido de azúcares (10,1°Brix). Las raíces fueron lavadas, desinfectadas, cortadas y sometidas a difusión en agua caliente (100°C, 10 minutos, 1:3 relación materia prima – solvente). La purificación incluyó carbonatación con $\text{Ca}(\text{OH})_2$ y CO_2 , seguida de filtrado, deionización y decoloración a 85°C. El líquido purificado se secó por atomización (150°C de entrada, 82°C de salida). La inulina obtenida presentó un 2,85% de humedad, 5,25% de cenizas totales y 2,13 ppm de Pb. Los rendimientos fueron 65,3% para extracción, 98,0% para secado y 50,57% de rendimiento global, obteniendo 3,20 kg de inulina por cada 20 kg de yacón.

Huamán et al. (2007) en su artículo de investigación identificación de inulina y oligosacáridos en las hojas de yacón (*Polymnia sonchifolia*) para la obtención de un edulcorante, sometieron las muestras a tratamientos térmicos y analizadas mediante cromatografía líquida de alta eficiencia (HPLC). Los hallazgos revelaron una presencia casi inexistente de inulina y cantidades mínimas de azúcares tales como fructosa, glucosa, xilosa y arabinosa. La evaluación se llevó a cabo utilizando un índice de refracción junto con una columna de intercambio iónico, empleando una solución eluyente de ácido sulfúrico 0,005 N. Las concentraciones de azúcares detectadas fueron extremadamente bajas, lo que demuestra la inviabilidad de extraer inulina y oligosacáridos a nivel industrial para la fabricación de edulcorantes.

Jesús & Carbajal (2019) en su tesis de investigación se centraron en la obtención y caracterización de inulina a partir del bulbo de ajo (*Allium sativum*) de la variedad Mapuri, cultivado en Ahuac-Chupaca durante el 2018. Emplearon una metodología de extracción sólido-líquido en medio acuoso con tratamiento térmico entre 30 y 80°C durante 35 minutos. Las características fisicoquímicas



del ajo Mapuri mostraron humedad de 64,65%, proteínas 5,50%; grasa 0,31%; fibra 0,88%; cenizas 1,31% y carbohidratos totales 27,35%; con una acidez de 1,66%; pH de 3,67; °Brix de 10,57 e índice de madurez (IM) de 4,11. La extracción de inulina en diferentes condiciones mostró que a 30°C y 400 mL/200g se obtuvo 13,09 g de inulina, mientras que a 80°C y la misma relación se obtuvo 24,52 g, con 800 mL/200 g a 30°C se obtuvo 19,12 g; y a 80°C se logró el mayor rendimiento con 33,79 g.

2.2 MARCO TEÓRICO

2.2.1 El Yacón (*Smallanthus sonchifolius*)

El yacón (*Smallanthus sonchifolius*), es perteneciente a la familia Asteraceae y originario de los Andes, es una planta perenne de porte herbáceo que alcanza entre 1,5 y 2,5 metros de altura, presenta raíces fibrosas y engrosadas, de forma fusiforme u ovada, con colores que van desde el blanco y crema hasta el púrpura (Seminario et al., 2003). Estas raíces han sido consumidas desde tiempos ancestrales como un alimento refrescante y bajo en calorías.

2.2.1.1 Historia y cultivo del yacón

El yacón puede cultivarse en la costa, sierra y selva del Perú hasta los 3000 m.s.n.m. En suelos entre 100 y 1000 m.s.n.m., es ideal para semilleros debido al bajo rendimiento de raíces reservantes. Los valles interandinos, entre 1100 y 2500 m.s.n.m., son más adecuados para la producción. El yacón prefiere suelos francos, bien drenados, profundos, porosos y ricos en materia orgánica, con un pH óptimo de 6,0 a 7,5, aunque tolera suelos ligeramente ácidos, deben evitarse suelos arcillosos y salinos (Seminario et al., 2003).

El cultivo tolera temperaturas de 10°C a 25°C, siendo el rango óptimo de 14°C a 20°C. Temperaturas menores a 10°C ralentizan el crecimiento y reducen los rendimientos, mientras que temperaturas superiores a 26°C, sin suficiente humedad, provocan estrés en la planta y detienen su desarrollo. El yacón es susceptible a heladas y vientos fuertes, y se desarrolla bien con una precipitación anual de 550 a 1000 mm.

No requiere horas de luz ni intensidad específica; sin embargo, se asume que necesita al menos nueve horas de luz diaria. Puede crecer bajo sombra parcial de otras especies forestales o con luz solar directa (Valderrama, 2005).

Figura 1

Sistema de cultivo de yacón en Cochamarca, Cajamarca



Fuente: (INIA, 2019)

2.2.1.2 Nombres comunes

En el norte de Perú, esta planta se conoce como “yacón”, “llacón” o “lajuash”. En el centro del país se llama “aricoma” o “aricona”. En



Ecuador, es conocida como “jicama” o “jiquima”, y en Colombia y Venezuela, se le llama “jiquima” y “jiquimilla” (López, 2005).

2.2.1.3 Variedades

Los cultivares más conocidos en cada país coinciden en cuanto al color de la parte comestible de las raíces: “Blanca”, “Morada” y “Amarilla”.

Para el Perú se conocen 5 variedades de yacón: (variedades; color de piel/color de pulpa):

- Qéllo Llajum; crema, amarillo
- Ch’ecche Llajum; crema, amarillo
- Yurac ch’ecche; crema oscuro, blanco
- Yurac llajum; Rosado, blanco
- Culli Llajum; Púrpura, blanco

2.2.1.4 Composición nutricional

La planta produce raíces reservantes que son una fuente importante de fructooligosacáridos (FOS), un azúcar no digerible que proporciona pocas calorías y no eleva los niveles de glucosa en sangre. Por esta razón, tiene un impacto positivo en la lucha contra el colesterol, la diabetes y la osteoporosis (Lachman et al., 2018).

Tanto las raíces reservantes como las hojas contienen compuestos fenólicos antioxidantes, los cuales están asociados con la prevención de enfermedades crónicas como la arterioesclerosis y la diabetes.

Tabla 1

Contenido Nutricional del Yacón (100g de raíz fresca sin cáscara)

Compuesto	Rango
Agua	85,0 – 90,0 g
Fructooligosacáridos (FOS)	6,0 – 12,0 g
Azúcares simples*	2,2 – 4,0 g
Proteínas	0,1 – 0,5 g
Potasio	185,0 – 295,0 mg
Calcio	6,0 – 13,0 mg
Calorías	14,0 – 22,0 kcal

*Incluye sacarosa, fructosa y glucosa

Fuente: (Siche et al., 2012)

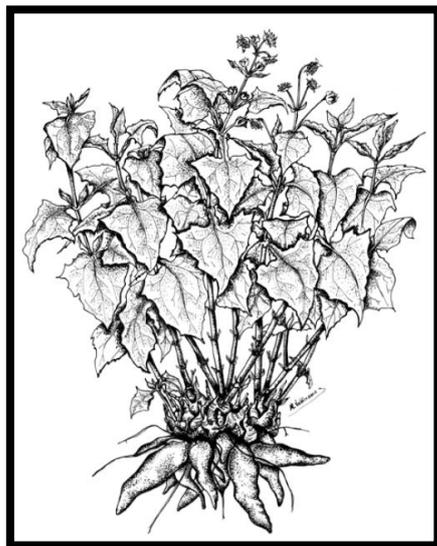
2.2.2 Descripción botánica del yacón (*Smallanthus sonchifolius*)

2.2.2.1 La planta

El yacón es una planta perenne cuyo ciclo de vida depende de factores ambientales como el clima, el suelo, el agua; y prácticas de cultivo como el manejo de plagas, rotación de cultivos, destaca por sus raíces reservantes y su estructura foliar, vitales para su crecimiento y producción (Seminario et al., 2003).

Figura 2

Planta entera de yacón



Fuente: (Seminario et al., 2003)

2.2.2.2 La raíz reservante

Las raíces del yacón son largas y jugosas, almacenando principalmente fructooligosacáridos (FOS), que son azúcares no digeribles beneficiosas para la salud. Estas raíces son esenciales para almacenar nutrientes y energía (Amaya, 2000).

2.2.2.3 La cepa o corona

La cepa es la parte del tallo subterráneo que conecta con las raíces reservantes, almacenando carbohidratos simples y FOS. Es la base para el crecimiento de nuevas yemas (Seminario et al., 2003).

Figura 3

Corte transversal de la corona



Fuente: (Seminario et al., 2003)

2.2.2.4 La hoja

Las hojas del yacón son opuestas y triangulares, con una base que puede ser trunca, hastada o cordada. La planta produce de 13 a 16 pares de

hojas hasta la floración, después de la cual solo se generan hojas pequeñas (Seminario et al., 2003).

Figura 4

Hojas de una planta de yacón de ocho meses de edad



Fuente: (Seminario et al., 2003)

2.2.2.5 La inflorescencia

El yacón tiene una inflorescencia terminal con capítulos que contienen flores femeninas y masculinas. Cada planta puede producir entre 20 y 80 capítulos, cada uno con 14 a 16 flores femeninas y 80 a 90 masculinas (Seminario et al., 2003).

Figura 5

Inflorescencia típica de una planta de yacón



Fuente: (Seminario et al., 2003)

2.2.2.6 El fruto

El fruto del yacón es un aquenio derivado de un ovario ínfero con varios carpelos (Font Quer, 1970). Tiene un pericarpio delgado y seco, y sus semillas son exalbuminosas, almacenando nutrientes en los cotiledones.

Figura 6

Fruto del yacón



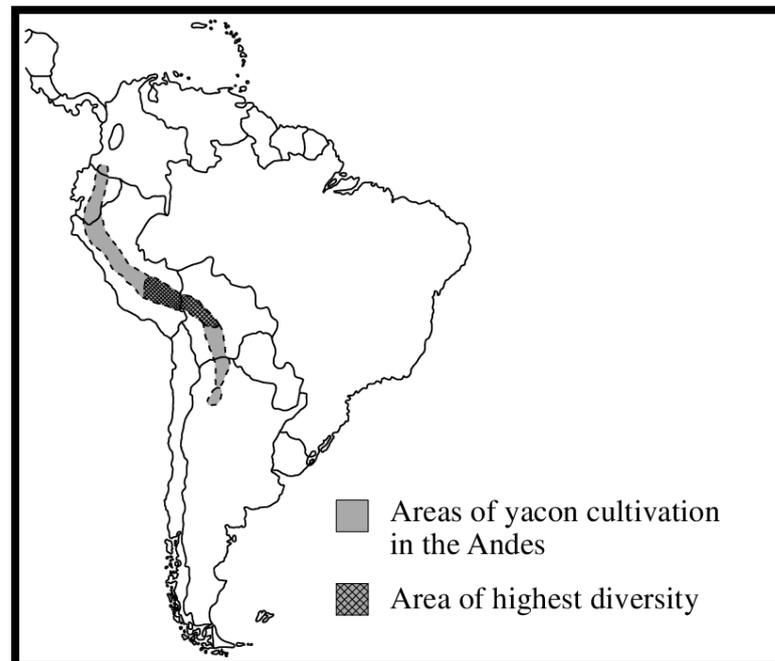
2.2.3 Distribución geográfica y zonas de cultivo

2.2.3.1 Distribución geográfica

El yacón (*Smallanthus sonchifolius*) es originario de los Andes, abarcando regiones desde Colombia hasta el noroeste de Argentina (Cárdenas, 1969). Se encuentra principalmente en altitudes entre 900 y 3500 m.s.n.m., este cultivo ha sido tradicionalmente manejado por comunidades indígenas, quienes lo valoran por sus propiedades medicinales y nutritivas. En el Perú, se cultiva en regiones como Cajamarca, Huánuco, Junín, Cusco, Ayacucho y Puno; siendo parte esencial de la biodiversidad agrícola de estas áreas (Seminario et al., 2003).

Figura 7

Distribución del yacón en la región andina



Fuente: (Pande & Rai, 2019)



2.2.3.2 Zonas de Cultivo

El cultivo del yacón se adapta bien a climas templados y subtropicales, prefiriendo suelos bien drenados y ricos en materia orgánica. Se cultiva exitosamente en la sierra peruana, donde las condiciones climáticas y edáficas favorecen su desarrollo. Además, su capacidad de crecer en terrenos con diferentes texturas de suelo, desde arenosos hasta arcillosos, le confiere una versatilidad notable. Las prácticas agrícolas en estas zonas suelen incluir la rotación de cultivos y el uso de técnicas de conservación del suelo (Seminario et al., 2003).

2.2.3.3 Estadísticas de Áreas de Cultivo en el Perú

En el Perú, las áreas dedicadas al cultivo del yacón han mostrado una tendencia al aumento, impulsadas por la creciente demanda tanto local como internacional (Kim et al., 2012). Las estadísticas agrícolas indican que las regiones de Huánuco y Cajamarca lideran la producción, con superficies cultivadas que superan las 500 hectáreas cada una, estas regiones destacan por sus condiciones agroclimáticas favorables y el conocimiento ancestral de los agricultores sobre el manejo del yacón. La producción anual ha alcanzado cifras significativas, contribuyendo al ingreso económico de las comunidades rurales (Seminario et al., 2003).

2.2.3.4 El Yacón Fuera de los Andes

Aunque el yacón es originario de los Andes, su cultivo se ha extendido a otras partes del mundo debido a sus beneficios nutricionales y medicinales. En países como Brasil, Japón y Nueva Zelanda, el yacón ha encontrado nichos de mercado importantes. Estos países han adaptado las



prácticas de cultivo andinas a sus propias condiciones locales, logrando buenos rendimientos (Kim et al., 2012).

La investigación agrícola en estas regiones ha permitido optimizar las técnicas de cultivo, mejorando la calidad y cantidad de la producción. Además, se ha promovido el uso del yacón en la industria alimentaria y farmacéutica, destacando sus propiedades como edulcorante natural y prebiótico (Huamán & Marcelo, 2007).

2.2.4 Composición química

2.2.4.1 Composición química de las raíces

Las raíces del yacón se destacan por su alto contenido de agua, representando entre el 83 y 90% de su peso fresco. En cuanto a los carbohidratos, constituyen alrededor del 90% del peso seco de las raíces recién cosechadas, de los cuales entre el 50 y 70% son fructooligosacáridos (FOS) (Hermann et al., 1999). La composición exacta de los azúcares, que incluye sacarosa, fructosa, glucosa, varía significativamente según factores como el cultivar, la época de siembra y cosecha, y las condiciones de poscosecha. Además, las raíces almacenan cantidades importantes de potasio, compuestos polifenólicos derivados del ácido cafeico, antioxidantes como el ácido clorogénico y triptófano, y varias fitoalexinas con actividad fungicida (Takenaka et al., 2003).

Tabla 2

Composición química promedio de 10 entradas de yacón procedentes de Perú, Bolivia, Ecuador y Argentina (en relación a 1 kg de materia comestible de raíz fresca)

Variable	Promedio	Rango
Materia seca (g)	115	98 – 136
Carbohidratos totales (g)	106	89 – 127
Fructanos (g)	62	31 – 89
Glucosa libre (g)	3,4	2,3 – 5,9
Fructosa libre (g)	8,5	3,9 – 21,1
Sacarosa libre (g)	14	10 – 19
Proteína (g)	3,7	2,7 – 4,9
Fibra (g)	3,6	3,1 – 4,1
Lípidos (mg)	244	112 – 464
Calcio (mg)	87	56 – 131
Fósforo (mg)	240	182 – 309
Potasio (mg)	2282	1843 – 2946

Fuente: (Hermann et al., 1999)

2.2.4.2 Fructooligosacáridos

Los fructooligosacáridos (FOS), también conocidos como oligofructanos u oligofructosa, son una clase específica de azúcares llamados fructanos. Estos se caracterizan por una estructura de unidades de fructosa enlazadas por enlaces glucosídicos β (2 → 1) y/o β (2 → 6), y suelen tener una molécula de glucosa al inicio de la cadena. Aunque existe varios tipos de fructanos, los más relevantes nutricionalmente son los FOS y la inulina. A diferencia de la inulina, que puede contener entre 2 y 60 moléculas de fructosa, los FOS tienen cadenas más cortas, entre 2 y 10 moléculas (Seminario et al., 2003).



2.2.4.3 Efecto de los fructooligosacáridos sobre la salud

2.2.4.3.1 Salud gastrointestinal

El consumo de inulina del yacón mejora la salud digestiva al actuar como prebiótico, estimulando el crecimiento de bacterias beneficiosas en el colon, como bifidobacterias y lactobacilos, lo que contribuye a una microbiota intestinal saludable y mejora la función intestinal general (Conway, 2001).

2.2.4.3.2 Triglicéridos y colesterol

La inulina del yacón ayuda a reducir los niveles de triglicéridos y colesterol en la sangre, lo que favorece la salud cardiovascular. Esto se logra mediante la fermentación de la inulina en el intestino, produciendo ácidos grasos de cadena corta que inhiben la síntesis de colesterol en el hígado (Madrigal y Sangronis, 2007).

2.2.4.3.3 Asimilación de calcio y otros minerales

La inulina promueve la absorción de minerales esenciales como el calcio, magnesio y hierro en el intestino, este efecto se debe a la acidificación del colon para la fermentación de la inulina, lo que mejora la solubilidad de estos minerales y su posterior absorción (Seminario et al., 2003).

2.2.4.3.4 Obesidad

El consumo de inulina puede contribuir a la pérdida de peso y la prevención de la obesidad, la inulina aumenta la sensación de saciedad y

reduce la ingesta calórica, además de mejorar el metabolismo de las grasas (Seminario et al., 2003).

Tabla 3

Contenido calórico de las raíces del yacón en comparación con otros alimentos.

Alimento	Contenido calorías (kcal/100 g alimento)
Yacón	15 – 20*
Piña	40
Naranja	50
Manzana	60
Plátano	80
Papa	120
Carne de pollo	120
Arroz cocido	135
Carne de res	160
Pan	250
Helado	400
Chocolate	500

Fuente: (Hermann et al., 1999)

2.2.4.4 Diabetes

La inulina del yacón ayuda a regular los niveles de glucosa en sangre. Actúa disminuyendo la absorción de glucosa en el intestino y mejorando la sensibilidad a la insulina, lo cual es beneficioso para el manejo de diabetes (Seminario et al., 2003).

Aunque los efectos hipolipidémicos de las raíces de yacón se han demostrado en estudios preclínicos, la evidencia de ensayos en humanos aún es escasa, observaron que el jarabe de yacón a 0,14 g/kg de peso



corporal redujo la insulina sérica en ayunas y se asoció significativamente con una disminución de la función de las células beta y la resistencia a la insulina en una evaluación del modelo de homeostasis (HOMA), lo que sugiere que el jarabe de yacón FOS promueve la absorción de glucosa en los tejidos periféricos y mejora la insulina (Genta et al., 2009). La administración oral de inulina en los individuos con obesidad y dislipidemia disminuyó las concentraciones de colesterol total, LDL, VLDL y triglicéridos, sin modificar la sensibilidad a la insulina (Balcázar et al., 2003).

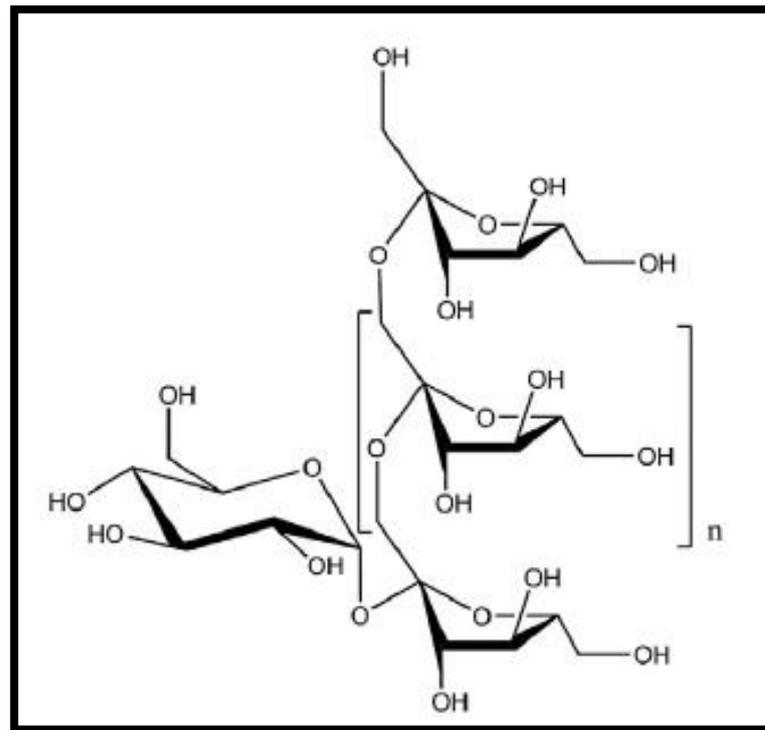
2.2.5 Inulina

2.2.5.1 Estructura Química

La inulina es un polisacárido del tipo fructano compuesto por residuos de fructosilo $\beta - D$ unidos en enlaces ($2 \rightarrow 1$). La cadena de inulina puede variar en longitud desde 2 hasta 60 unidades, generalmente terminando con una unidad de glucosa $\beta - D$ unida a la fructosa (Mensik et al., 2015). Su resistencia a la digestión humana permite que actúe como fibra dietética, favoreciendo la salud intestinal al promover el crecimiento de bacterias beneficiosas. La longitud de la cadena de inulina, puede variar considerablemente, afecta su solubilidad y aplicación en alimentos funcionales (Ahmed & Rashid, 2017)

Figura 8

Estructura de la Inulina



Fuente: (Mensik et al., 2015)

2.2.5.2 Aislamiento y Producción

La inulina se extrae principalmente de plantas como la achicoria y el agave. El proceso de producción involucra la extracción con agua caliente seguida de una purificación por métodos de filtración y precipitación para obtener un producto de alta pureza (Mensik et al., 2015).

Las principales fuentes de inulina son plantas de las familias Liliaceae, Amaryllidaceae, Compositae y Graminae. La achicoria y el topinambur (alcachofa de Jerusalén) son especialmente valorados para la producción industrial de inulina debido a su alto contenido de este fructano y su capacidad de cultivo en diversas condiciones ambientales (Ahmed & Rashid, 2017). Además, mayoritariamente la inulina, se obtiene



industrialmente a partir de raíces achicoria (*Cichorium intybus*) y alcachofa de Jerusalén (*Helianthus tuberoso*) que también es conocido como topinambur, girasol de Jerusalén, este es originario de América del Norte. Esta planta es flexible en términos ecológicos, permitiendo sus cultivos en diversas condiciones de suelo y clima. Los tubérculos frescos del topinambur contienen aproximadamente 80% de agua y una cantidad significativa de inulina, lo que los convierte en una fuente importante de este fructano. Sin embargo, existen varios estudios de extracción de inulina a escala de laboratorio a partir de la bardana (*Arctium lappa L.*), dalia (*Dalia spp.*), ajo (*Allium sativum*), cebolla (*Allium cepa*), agave tequilana (*Agave tequilana*) (Escobar et al., 2020).

2.2.5.3 Usos en la industria alimentaria

En la industria alimentaria, la inulina se utiliza para modificar la textura, reemplazar grasas y como un edulcorante de bajas calorías. Además, tiene aplicaciones en la industria farmacéutica, siendo utilizada como agente diagnóstico para la función renal y estabilizador de proteínas (Mensik et al., 2015). Los alimentos basados en inulina se caracterizan por su contenido de fibra dietética, lo cual mejora la salud digestiva y el perfil nutricional de los productos. La inulina puede sustituir grasas y azúcares en alimentos procesados, reduciendo las calorías y mejorando la digestibilidad. Los productos alimenticios enriquecidos con inulina también pueden beneficiarse de una mejor textura y mayor estabilidad durante el almacenamiento (Ahmed & Rashid, 2017).

Tabla 4

Diversos sustitutos de grasas junto con sus usos alimentarios

Sustitutos de grasas a base de carbohidratos	Alimentos
Inulina	Yogur, queso, postres helados, productos horneados, glaseados, rellenos, crema batida, productos lácteos, suplementos de fibra, carnes procesadas.
Maltodextrinas	Productos lácteos, aderezos para ensaladas, productos para untar, salsas, glaseados, rellenos, carne procesada, postres congelados, productos extruídos.
Dextrinas	Aderezos para ensaladas, pudines, productos para untar, productos lácteos, postres congelados.
Gomas	Productos de panadería, postres helados, salsas, sopas, carnes, rellenos de tartas, yogures.
Fibra	Productos de panadería congelados reducidos en grasas.
Polidextrosa	Productos horneados, chicles, dulces, aderezos, postres lácteos congelados, gelatinas, pudines.
Carragenano	Postres bajos en grasa, quesos, carne molida.

Fuente: (Ognean & Darie, 2006)

2.2.5.4 Características Físicoquímicas

Las propiedades físicoquímicas de la inulina, como su solubilidad, dependen de la longitud de la cadena de fructosa y la temperatura. La inulina es insoluble a bajas temperaturas, pero su solubilidad aumenta significativamente con el calor, lo cual es crucial para su extracción y uso en alimentos. Estas propiedades permiten que la inulina se utilice en una variedad de aplicaciones alimentarias, mejorando la textura y el valor nutricional (Ahmed & Rashid, 2017).

La inulina presenta una serie de características físicoquímicas que la hacen versátil, estas incluyen:

- **Longitud de la Cadena**

La longitud de la cadena de inulina puede variar significativamente, afectando sus propiedades.

Tabla 5

Fuentes y longitud de cadena de la inulina

Planta	Inulina (g/100g)	Grado de Polimerización (DP)
Centeno	4,5– 6,4	> 9
Trigo	1,5 – 2,3	≤ 5
Cebada	1,6	5 – 15
Topinambur	17 – 20,5	2 – 50
Achicoria	15 – 20	2 – 65
Alcachofa globo	2 – 7	5 – 200
Ajo	9 – 16	≥ 5
Puerro	3 – 10	12 es el más frecuente
Cebolla	1 – 7,5	2 – 12
Plátano	± 1	< 5

Fuente: (Roberfroid, 2005)

2.2.5.5 Solubilidad

La solubilidad de la inulina depende de la longitud de la cadena y la temperatura. A temperaturas más altas, la solubilidad aumenta, lo que permite su uso en diversas aplicaciones alimentarias y farmacéuticas (Mensik et al., 2015).

2.2.5.6 Reología y viscosidad

La inulina en solución exhibe comportamientos reológicos interesantes, como la viscosidad dependiente de la concentración y la temperatura. Esto es crítico para su aplicación en la modificación de la textura de alimentos (Mensik et al., 2015).



2.2.5.7 Características térmicas

- Temperatura de transición vítrea: La Tg de la inulina es un indicador clave de su estabilidad física, influyendo en su almacenamiento y procesamiento.
- Sorción de vapor: La capacidad de la inulina para absorber vapor de agua es crítica para su estabilidad en productos secos.
- Temperatura de fusión: La inulina tiene una temperatura de fusión que varía según la longitud de la cadena y las condiciones de procesamiento.

2.2.5.8 Estabilidad física

La estabilidad física de la inulina está influenciada por su estructura cristalina y su interacción con el medio ambiente, especialmente la humedad y la temperatura. Esto es vital para su aplicación en productos que requieren una larga vida útil (Mensik et al., 2015).

2.2.5.9 Vínculos entre dieta, salud y alimentos funcionales

Estudios experimentales y clínicos han informado que el consumo de yacón es importante para regular varias vías relacionadas con el cáncer de colon, la diabetes y la obesidad. El contenido de FOS que se encuentra en las raíces de yacón puede modular la microbiota intestinal humana, aumentar la absorción de glucosa en los tejidos periféricos, estimular la secreción de insulina en el páncreas y modular las vías celulares relacionadas con la homeostasis de los lípidos. Por lo tanto, con base en estos hallazgos, la mayoría de los estudios revisados concluyeron que,



debido a sus propiedades funcionales, las raíces de yacón pueden usarse eficazmente como suplemento dietético para prevenir y tratar enfermedades crónicas (Caetano et al., 2016).

Los alimentos funcionales están diseñados para proporcionar beneficios adicionales a la salud más allá de la nutrición básica. Estos productos, como los que contienen inulina, pueden ayudar a prevenir enfermedades crónicas y mejorar la salud digestiva. Los fructanos, incluidos la inulina y los fructooligosacáridos, se destacan por sus efectos prebióticos, que promueven el crecimiento de bacterias beneficiosas en el intestino. La inclusión de estos componentes en la dieta puede contribuir significativamente a la salud general y al bienestar de los consumidores.

Como fibra dietética, la inulina tiene múltiples beneficios para la salud, incluyendo la mejora de la función digestiva y el fortalecimiento del sistema inmunológico. Actúa como prebiótico, estimulando el crecimiento de bacterias beneficiosas en el intestino. Además, puede ayudar en la regulación del azúcar en la sangre y reducir el riesgo de enfermedades cardiovasculares al mejorar los perfiles lipídicos (Ahmed & Rashid, 2017).

2.2.6 Cristalización

En este caso, el líquido se denomina siempre disolvente, mientras que los sólidos son los solutos. En general, es relativamente fácil separar los componentes de una disolución binaria de este tipo (separar el líquido del sólido), ya que el líquido suele ser volátil (se puede fácilmente en vapor), mientras que el sólido no lo es. La destilación simple (para recuperar el líquido) o la evaporación simple (para recuperar sólo el sólido), a temperatura y presión ambiente, o forzando

mediante la reducción de la presión y/o el aumento de la temperatura, suelen dar lugar a separaciones muy eficaces de alto rendimiento (Gomes et al., 2011).

2.2.6.1 Cristalización selectiva

Cuando dos (o más) sustancias sólidas disueltas están presentes en una solución, ambas en cantidades apreciables, a menudo es posible forzar a una de ellas a cristalizar, dejando a la otra en solución. Este proceso se denomina cristalización selectiva y es, evidentemente, un método de separación de mezclas. Hay dos variables que podemos manipular para «forzar» la cristalización: la temperatura y la cantidad de disolvente (Gomes et al., 2011).

- **Temperatura:** como la solubilidad de la mayoría de las sustancias disminuye al disminuir la temperatura, si enfriamos cualquier solución concentrada obtendremos generalmente algún material cristalizado. Si hacemos esto con una mezcla como la mencionada anteriormente, a menudo sólo obtendremos cristales del material menos soluble.
- **Cantidad de disolvente:** También es posible aumentar la concentración de la solución evaporando el disolvente. Esta evaporación puede realizarse a temperatura ambiente (un proceso lento pero eficaz) o puede acelerarse mediante calentamiento. Y, por supuesto, este proceso puede combinarse con un posterior descenso de la temperatura. ¿Es posible separar ambos sólidos en estado puro? En la gran mayoría de los casos, no: sólo se puede obtener uno (o incluso ninguno) en estado puro mediante este proceso. Sin embargo, lo que ocurre en un proceso de cristalización selectiva depende de las curvas



de solubilidad de las sustancias y de sus cantidades relativas (Gomes et al., 2011).

2.2.7 Técnicas experimentales de cristalización

2.2.7.1 Filtración

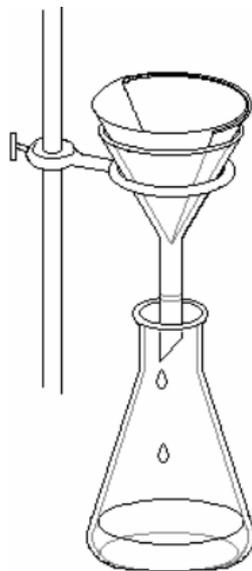
La operación de separar un sólido (generalmente fragmentado, o «en polvo») de un líquido se denomina filtración; consiste en hacer pasar la mezcla a través de un elemento filtrante, es decir, un medio que contiene orificios o canales muy pequeños: el líquido pasa a través de los orificios, mientras que el sólido, formado por granos más grandes que los orificios, no puede atravesarlos y queda retenido. El medio filtrante más utilizado es una hoja de papel poroso, llamado papel de filtro, generalmente de forma circular o rectangular. Otros medios utilizados ocasionalmente son: algodón, lana de vidrio, pasta de papel, tela, placa de vidrio poroso, arena, cerámica porosa, kieselguhr, etc. La elección del medio filtrante se hace teniendo en cuenta muchos aspectos del caso en cuestión; los principales son la resistencia química (no se puede filtrar en papel una solución que contenga una alta concentración de ácido sulfúrico, ya que el papel quedaría destruido por el ácido; hay que utilizar lana de vidrio o una placa de vidrio porosa) y el tamaño de los orificios, que debe elegirse en función del tamaño de los granos del sólido que se quiere filtrar (para filtrar una mezcla de agua y granos enteros de arroz, por ejemplo, basta con un tamiz fino, pero el café en polvo no lo retiene ningún tamiz, y requiere una tela o papel de filtro) (Gomes et al., 2011).

En ocasiones tenemos un polvo muy fino que atraviesa el papel ordinario y requiere un papel especial con orificios más pequeños. Para forzar el líquido a atravesar el medio filtrante, generalmente utilizamos la fuerza de la gravedad o la presión atmosférica.

La filtración por gravedad se realiza formando un recipiente cónico con el papel de filtro, adaptando este recipiente a un embudo común (que cumple dos funciones: como soporte, ya que el papel es frágil y se rompe con facilidad, sobre todo cuando está mojado; y como conductor del líquido que atraviesa el papel) y vertiendo la mezcla en el recipiente. El propio peso del líquido hace que éste atraviese el papel y salga por el vástago del embudo (Gomes et al., 2011).

Figura 9

Filtración



Fuente: (Gomes et al., 2011)

2.2.7.2 Filtración en Caliente

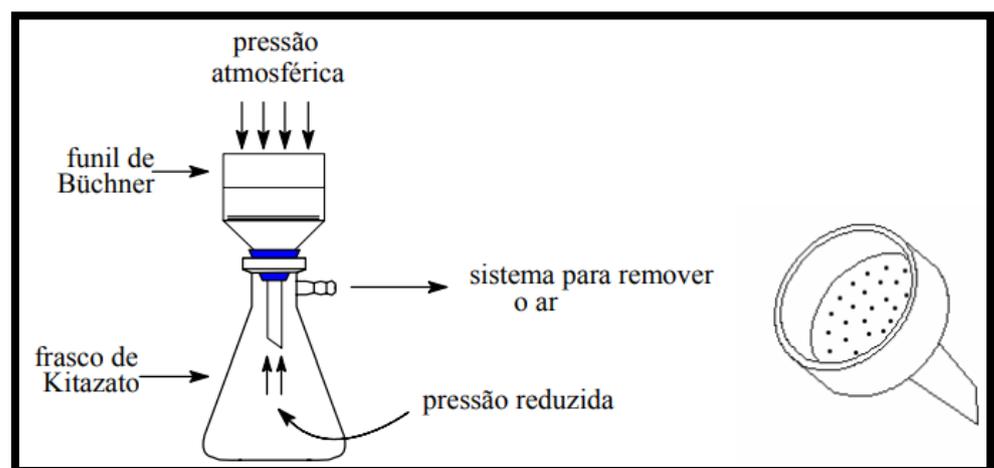
A veces es necesario filtrar una disolución cuando aún está caliente; no podemos dejar que se enfríe, ni siquiera durante la filtración,

porque si lo hace, el compuesto que intentamos obtener (en una disolución filtrada) cristalizará y quedará atrapado en el papel o en el embudo. Podemos utilizar la filtración por gravedad ordinaria o la filtración al vacío; en cualquier caso, lo principal que tenemos que hacer es calentar el embudo en un horno y filtrar con el embudo aún caliente.

Naturalmente, la filtración ordinaria puede no funcionar porque lleva más tiempo; durante el tiempo que tarda en filtrarse, tanto el embudo como la solución pueden enfriarse y el material disuelto cristaliza y parte de él se queda en el papel. La filtración al vacío, que es mucho más rápida, suele funcionar muy bien. Si la solución filtrada dentro del Kitazato se enfría y se produce la cristalización, no importa; ya se ha filtrado, y todo lo que hay que hacer es recalentarla para disolver de nuevo el sólido, y entonces la solución caliente se puede transferir a donde se quiera (Gomes et al., 2011).

Figura 10

Filtración al Vacío



Fuente: (Gomes et al., 2011)



CAPÍTULO III

MATERIALES Y MÉTODOS

3.1 TIPO DE INVESTIGACIÓN

El proyecto de investigación actual se enmarcó dentro de los paradigmas de investigación experimental y estadística, adoptando un enfoque metodológico riguroso y sistemático para abordar los objetivos propuestos. La naturaleza experimental de este proyecto permitió manipular variables clave bajo condiciones controladas, facilitando la observación y medición precisa de los efectos resultantes.

Para estructurar el análisis de manera coherente y estadísticamente, se implementó un diseño factorial 2^3 . Este enfoque metodológico es particularmente valioso en investigaciones donde se busca evaluar el impacto simultáneo de múltiples variables independientes sobre una o más variables dependientes. En el contexto específico de este estudio, se identificó tres variables independientes:

- **Temperatura de extracción:** Esta variable térmica se consideró fundamental en el proceso de extracción, dado que puede influir significativamente en la solubilidad del compuesto de interés.
- **Tiempo de extracción:** El factor temporal jugó un papel crucial en la eficiencia del proceso extractivo, influyendo en la concentración de los grados Brix y la calidad del extracto obtenido.
- **Relación solvente – materia prima:** Esta proporción entre el solvente utilizado y la cantidad de materia prima procesada puede afectar la eficacia de la extracción y la concentración final del compuesto de interés.



La selección de estas variables no fue arbitraria, sino que se basó en una revisión exhaustiva de la literatura científica pertinente y en consideraciones teóricas sobre los mecanismos subyacentes al proceso de extracción.

Para el análisis estadístico y la modelización estadística de los datos obtenidos, se empleó el software RStudio versión 4.1.0.

3.2 LUGAR DE ESTUDIO

3.2.1 Ubicación del sitio de trabajo

3.2.1.1 Proceso de extracción de inulina

El estudio que se llevó a cabo fue el resultado de la utilización de diversos laboratorios especializados dentro de la Universidad Nacional del Altiplano, ubicada en la ciudad de Puno. La investigación se desarrolló en múltiples fases, cada una de las cuales requirió instalaciones y equipos específicos para garantizar la precisión y la calidad de los resultados.

En primera instancia, la optimización de los parámetros de extracción se realizó en el Laboratorio de Investigación perteneciente a la Facultad de Ingeniería Química. Este espacio fue fundamental para llevar a cabo varias etapas importantes del proyecto. Aquí se ejecutaron los procesos de extracción, que implicaron la separación meticulosa de los componentes de interés de la materia prima.

La fase de filtración, esta etapa es importante para eliminar el bagazo y obtener una muestra más pura, también se llevó a cabo en estas instalaciones. Además, el Laboratorio de Investigación proporcionó el entorno y los equipos necesarios para realizar los análisis de



refractometría, una técnica óptica utilizada para medir los grados Brix y el índice de refracción de las muestras, así como para determinar diversos parámetros fisicoquímicos esenciales para la caracterización del material en estudio.

Sin embargo, la investigación no se limitó a un solo laboratorio. Para la etapa final y quizás una de las más críticas del proceso, la cristalización, fue necesario trasladar la muestra al Laboratorio de Operaciones y Procesos Unitarios (LOPU). Un componente adicional y crucial de la investigación involucró el Laboratorio de Química General, que se encuentra equipado con un microscopio, ahí se llevó a cabo la visualización detallada de los cristales de inulina obtenidos.

La utilización de estos diferentes laboratorios demuestra la naturaleza multifacética y compleja de la investigación, así como la importancia de contar con instalaciones especializadas para cada etapa del proceso y llevar a cabo un estudio completo.

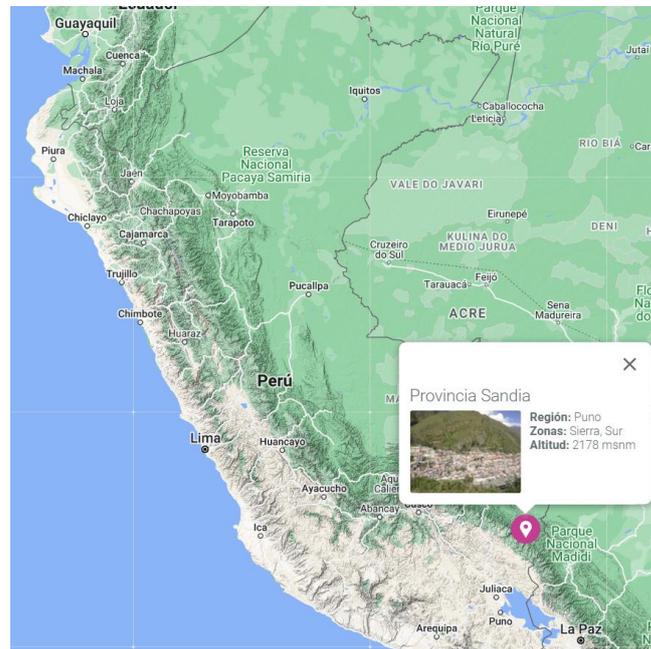
3.2.1.2 Materia prima

En el marco de la investigación, se seleccionó como materia prima el yacón (*Smallanthus sonchifolius*) de la variedad morada, procedente de la provincia de Sandia, ubicada en el departamento de Puno – Perú.

La provincia de Sandia, situada en la zona nororiental del departamento de Puno, se caracteriza por su diversidad ecológica y microclimas particulares que favorecen el cultivo de esta especie.

Figura 11

Ubicación de la Provincia de Sandia en el mapa del Perú



Fuente: (SENAMHI)

Un factor determinante en la selección de esta variedad específica fue su contenido de sólidos solubles, cuantificado mediante la medición de grados Brix. El análisis refractométrico revela la concentración de azúcares presentes en la variedad morada de yacón (*Smallanthus sonchifolius*) de la Provincia de Sandia.

Es importante contextualizar la relevancia de este valor de grados Brix. En el ámbito de la investigación sobre tubérculos y raíces andinas, un mayor contenido de sólidos solubles se correlaciona frecuentemente con una concentración más elevada de carbohidratos, particularmente fructooligosacáridos (FOS) e inulina, que son los compuestos de interés primario en este proyecto.



Es pertinente señalar que la elección de esta materia prima también está alineada con los objetivos más amplios de valorización de cultivos andinos y la promoción de la agrobiodiversidad local. El yacón, siendo un cultivo ancestral con un creciente reconocimiento por sus propiedades funcionales, representa una oportunidad significativa para el desarrollo agroindustrial sostenible en la región de Puno.

3.3 MATERIALES

3.3.1 Materia prima

- Yacón (*Smallanthus sonchifolius*) variedad morada

3.3.2 Equipos e instrumentos de laboratorio

3.3.2.1 Equipos

- Refractómetro Mettler Toledo R4
- Agitador Magnético Velp Scientifica AREX-6 Digital Pro Heating Magnetic Stirrer
- Bomba de vacío de alta presión Vacuumbrand 2
- Centrífuga Centurion Scientific Limited (Benchtop Centrifuges)
- Cocinilla Eléctrica Finezza
- Mufla eléctrica Protherm Furnaces
- Estufa de Secado Precision Scientific Co
- Microbalanza analítica
- Multiparámetro Thermo Scientific Orion VersaStar PRO
- Equipo de secador por convección forzada
- Refractómetro Digital Portable



- Microscopio binocular Premiere
- Termómetro digital
- Termómetro Infrarojo

3.3.2.2 Instrumentos

- Frita biohall TM
- Kitasato EuroLab Germany 500 mL
- Matraz Erlenmeyer Kyntel Boro 3.3 100 mL
- Recipientes de vidrio
- Vasos precipitados
- Probeta
- Piceta
- Espátula macro spoon 150 mm IsoLab
- Pipeta 2 mL de plástico
- Crisol
- Gradilla
- Mortero
- Tubos Falcon
- Envases de plástico
- Papel aluminio

3.3.2.3 Reactivos

- Extracto de yacón
- Etanol al 96%
- Agua destilada

- Agua UHT
- Acetona

3.4 METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN

3.4.1 Trabajo de campo

El yacón (*Smallanthus sonchifolius*), materia prima central de este estudio, fue obtenido directamente de los productores locales de la Provincia de Sandia. La decisión de utilizar este yacón específico se fundamentó principalmente en sus excepcionales características organolépticas como su sabor dulce y refrescante que se complementaron con análisis fisicoquímicos preliminares, incluyendo mediciones de sólidos solubles (grados Brix) y pH, para corroborar las percepciones sensoriales con resultados cuantitativos.

Figura 12

Yacón (Smallanthus sonchifolius) variedad morada



3.4.2 Diseño experimental propuesto

El presente estudio se enmarca dentro de la investigación experimental. La estructura analítica del trabajo se fundamenta en la implementación de un diseño factorial 2^k , donde k representa el número de variables independientes,

específicamente establecido en 3 para este proyecto de investigación. La utilización de un diseño factorial 2^3 implica la evaluación de ocho combinaciones experimentales distintas, representando todas las posibles combinaciones de los niveles alto y bajo de cada factor. Este enfoque permite una exploración completa del espacio experimental, facilitando la identificación de condiciones óptimas y la construcción del modelo estadístico.

Tabla 6

Diseño experimental 2^3 para determinar los parámetros óptimos de temperatura, tiempo y relación solvente – materia prima para la extracción de inulina

Símbolo	Nombre de la Variable	Unidad	X_{min}	X_{max}
X_1	Temperatura de extracción	°C	61	87
X_2	Tiempo de extracción	min	30	45
X_3	Relación solvente – materia prima	mL	1:1	3:1

Tabla 7

*Variable respuesta de para la extracción de inulina a partir del extracto de yacón (*Smallanthus sonchifolius*).*

Símbolo	Nombre de la variable respuesta	Unidad
Y_1	Grados Brix	°Brix



3.4.3 Obtención de inulina cristalizada a partir del extracto de yacón *(Smallanthus sonchifolius)*

El presente procedimiento de investigación detalla el proceso que se siguió para la extracción, cristalización y caracterización de inulina a partir del yacón (*Smallanthus sonchifolius*). Este estudio se fundamentó en un enfoque experimental riguroso, diseñado para optimizar cada etapa del proceso y garantizar la obtención de resultados reproducibles a mayor escala y científicamente válidos.

a) Selección de materia prima

La fase inicial de estudio se centra en la caracterización de la materia prima. Se llevó a cabo una evaluación cuantitativa de los sólidos solubles presentes en el yacón mediante refractometría, expresada en grados Brix. Este parámetro sirvió como criterio primario de selección, optando por la variedad que exhibió el mayor contenido de sólidos solubles, lo cual se correlaciona potencialmente con una mayor concentración de fructooligosacáridos e inulina.

Adicionalmente, se realizó una caracterización fisicoquímica que incluyó la medición de pH y conductividad del yacón, estos parámetros proporcionaron una caracterización de la materia prima, estableciendo una base sólida para la interpretación de los resultados subsiguientes.

b) Lavado y desinfección de la materia prima

El proceso de lavado y desinfección se ha diseñado para minimizar la carga microbiana superficial sin comprometer la integridad estructural del yacón. El proceso incluyó las siguientes etapas:

- i. Lavado mecánico: Se realizó un lavado exhaustivo con agua potable, empleando la fricción entre raíces para facilitar la remoción de partículas de suelo adheridas.

Figura 13

Lavado de las raíces de yacón (Smallanthus sonchifolius)



- ii. Cepillado manual: Utilizando un cepillo de cerdas suaves, se procedió a la limpieza meticulosa de la superficie del yacón, prestando especial atención a las irregularidades morfológicas donde puedan acumularse residuos.

Figura 14

Cepillado manual de las raíces de yacón (Smallanthus sonchifolius)



- iii. Desinfección: Se sumergió las raíces en una solución de hipoclorito de sodio a una concentración de 4 mL por litro de agua. El tiempo de inmersión fue de 3 minutos, optimizando la eficacia antimicrobiana sin inducir cambios organolépticos indeseables.

c) Pelado de materia prima

El proceso de pelado se ejecutó manualmente, empleando utensilios de grado alimentario (cuchillo de acero inoxidable). Para mitigar la oxidación enzimática, se implementó un sistema de inmersión inmediata en agua potable post – pelado.

Figura 15

*Pelado de las raíces de yacón (*Smallanthus sonchifolius*)*



d) Etapa de extracción y filtrado

La extracción de inulina se realizó mediante un proceso de extracción acuosa asistida por calor. El proceso incluyó:



- i. Trituración mecánica: Utilizando un extractor de jugos industrial para maximizar la ruptura celular y facilitar la liberación de compuestos solubles.
- ii. Extracción térmica: Se empleó agua caliente como solvente, con parámetros de temperatura, tiempo y relación solvente – materia prima a optimizar mediante un diseño factorial.
- iii. Filtración al vacío: Se implementó un sistema de filtración al vacío en caliente para separar eficientemente el bagazo del extracto líquido, minimizando la pérdida de inulina.

e) Etapa de evaporación para la obtención del sirope

La concentración del extracto se llevó a cabo mediante evaporación controlada:

- i. Rango de temperatura: 80 – 85°C
- ii. Objetivo: reducir el volumen a un cuarto de su contenido inicial
- iii. Parámetro de control: concentración de sólidos solubles

Se monitoreó continuamente la temperatura y los grados Brix para optimizar el proceso y evitar la degradación térmica.

f) Etapa de cristalización

- i. Precipitación: Se adicionó etanol al 96% en una relación 1:1 (v/v) con el jarabe concentrado y refrigeración a 1 – 3°C durante 24 horas para promover la precipitación.
- ii. Separación: Se centrifugó para observar el precipitado de inulina.



- iii. Secado: Se utilizó un secador de convección forzada para obtener los cristales de inulina.
- iv. Caracterización morfológica: Se realizó un análisis microscópico de los cristales obtenidos para confirmar su identidad.

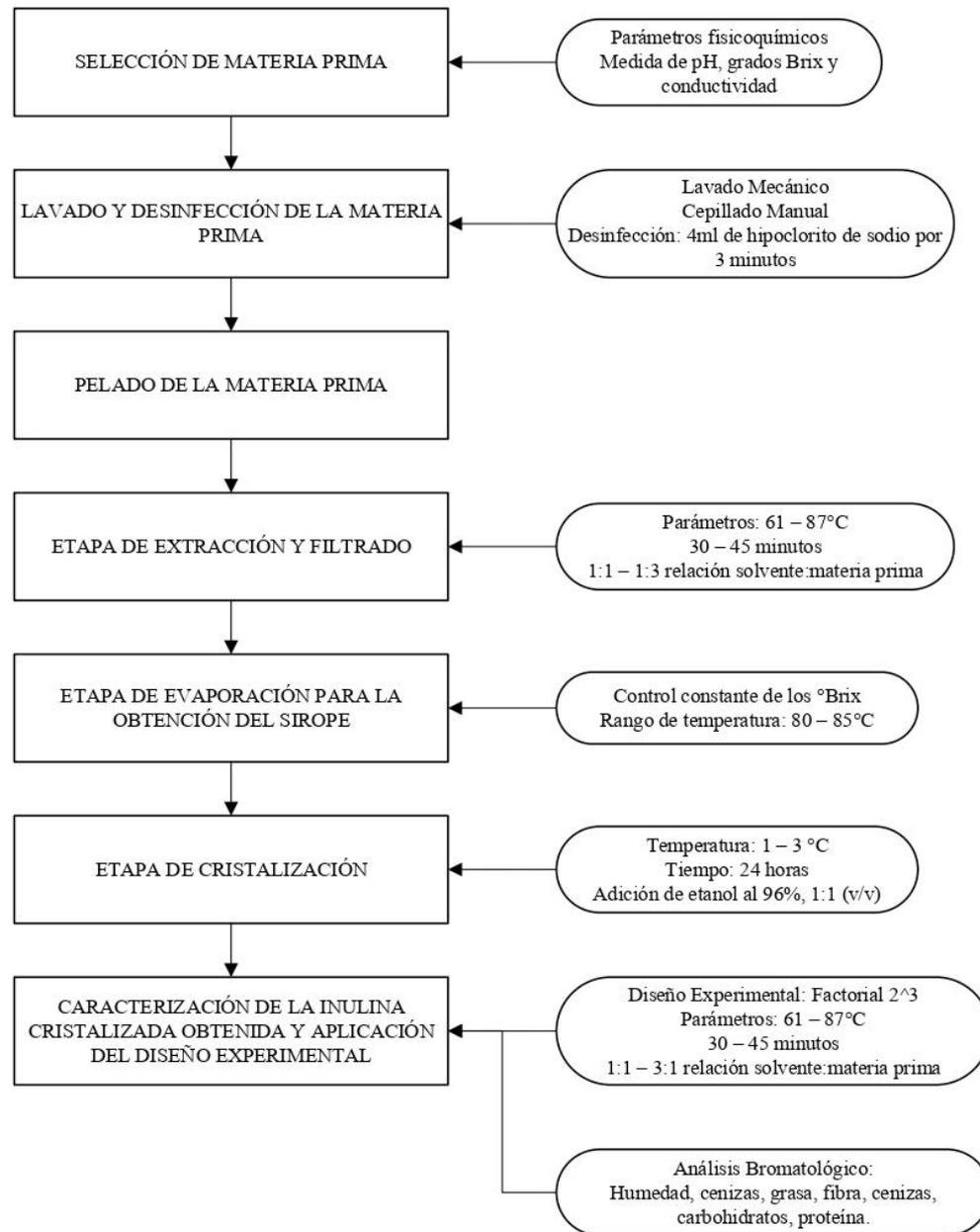
g) Caracterización de la inulina y aplicación de un diseño experimental

La fase final del estudio comprendió la caracterización bromatológica de la inulina obtenida y la optimización del proceso mediante un diseño experimental.

- i. Análisis bromatológico: Determinación de humedad, cenizas, proteínas, grasa, fibra cruda, carbohidratos y energía total.
- ii. Diseño experimental: Implementación de un diseño factorial 2^3 , con los siguientes factores y niveles.
 - Temperatura de extracción: 61°C y 87°C
 - Tiempo de extracción: 30 y 45 minutos
 - Relación solvente – materia prima: 1:1 y 3:1
- iii. Análisis estadístico: Se utilizó el software estadístico para el análisis de varianza (ANOVA) y la determinación de condiciones óptimas de proceso.

Figura 16

*Diagrama de Flujo del Proceso de Obtención de Inulina Cristalizada a partir del Extracto de Yacón (*Smallanthus sonchifolius*)*



3.4.4 Determinación de la concentración de azúcares presentes en el yacón (*Smallanthus sonchifolius*)

El presente procedimiento metodológico fue el que se siguió para la cuantificación precisa de los azúcares presentes en el yacón (*Smallanthus*



sonchifolius), empleando una técnica refractométrica. Este método se fundamenta en la correlación entre el índice de refracción de una solución acuosa y su concentración de sólidos solubles, principalmente azúcares.

a. Preparación de la muestra

- i. Se seleccionó una muestra de yacón y se procedió a la reducción del tamaño de partícula con la ayuda de un triturador.
- ii. El material triturado se sometió a un proceso de filtración y este filtrado resultante constituyó el extracto que fue objeto de análisis refractométrico.

b. Configuración y calibración del refractómetro

- i. Inicio del equipo: Se utilizó el refractómetro de precisión Mettler Toledo R4, seleccionado por su alta sensibilidad, se encendió el equipo y se permitió un periodo de estabilización térmica.
- ii. Autenticación: Se accedió al sistema utilizando las credenciales de administrador, garantizando el acceso a todas las funciones analíticas y de calibración del equipo.

c. Calibración

- i. Se calibró el equipo utilizando agua destilada como estándar, se verificó que la lectura del agua destilada sea 0,0°Brix a 25°C, ajustando si es necesario.

d. Análisis refractométrico

- i. Se seleccionó el método predefinido para el análisis de grados Brix, siguiendo las indicaciones del equipo, se depositó



cuidadosamente varias gotas del extracto filtrado de yacón con ayuda de una pipeta plástica sobre el prisma y se aseguró una distribución uniforme de la muestra, evitando la formación de burbujas de aire.

- ii. Se cerró la tapa del prisma, asegurando un contacto óptimo entre la muestra y la superficie de medición y se inició la medición y se esperó a que el equipo alcance el equilibrio térmico y óptico.
- iii. Se registró la concentración de sólidos solubles (expresada en °Brix) directamente de la pantalla del refractómetro y se anotó el resultado.

e. Limpieza del prisma

- Inmediatamente después de la medición, se retiró cuidadosamente la muestra del prisma, se lavó el prisma con agua destilada para eliminar todos los residuos de la muestra y se aplicó acetona para facilitar la evaporación, se secó el prisma asegurando que no queden residuos.

3.4.5 Determinación de los parámetros óptimos de la temperatura, tiempo y relación solvente – materia prima para la extracción de inulina.

Para la optimización de los parámetros, primeramente, se establecieron los siguientes rangos para las variables independientes, asignamos una cantidad mínima y máxima para cada parámetro. A continuación, en las Tablas 8, 9 y 10 se detallan los rangos de valores de las variables independientes.

Tabla 8*Rango de Temperatura de Extracción*

Temperatura de Extracción		
Nivel mínimo	61°C	-1
Nivel máximo	87°C	+1

Tabla 9*Rango de Tiempo de Extracción*

Tiempo de Extracción		
Nivel mínimo	30 minutos	-1
Nivel máximo	45 minutos	+1

Tabla 10*Rango de Relación Solvente – Materia Prima*

Relación Solvente – Materia Prima		
Nivel mínimo	1:1	-1
Nivel máximo	3:1	+1

Se desarrollaron 8 formulaciones con 2 repeticiones, siendo de la siguiente manera (Ver Tabla 11):

Tabla 11*Formulaciones de extracción*

N° Formulación	Temperatura (°C)	Tiempo (min)	Relación Solvente – Materia Prima
1	61	30	1:1
2	87	30	1:1
3	61	45	1:1
4	87	45	1:1
5	61	30	3:1
6	87	30	3:1
7	61	45	3:1
8	87	45	3:1



- a. Preparación del sistema de extracción: Se utilizó un agitador magnético y se estandarizó la velocidad de agitación a 700 RPM para todas las corridas.
- b. Dosificación: Se midió el volumen de extracto de yacón y agua caliente utilizando una probeta y se colocó sobre el agitador magnético, se controló la temperatura con termómetro digital y el tiempo con un temporizador.
- c. Filtración en caliente: Se armó un sistema de filtración al vacío compuesto por una bomba de vacío, un Kitasato y un embudo buchner con una frita de vidrio. Una vez completado el tiempo de extracción, se procedió a la filtración en caliente, para maximizar la extracción de azúcares.
- d. Análisis refractométrico: Se procedió a medir los °Brix, se tomó una alícuota del filtrado al prisma del refractómetro, se realizó la lectura de los °Brix. Se registró los valores obtenidos con la precisión proporcionada por el equipo.
- e. Análisis estadístico: Se empleó un software estadístico y se realizó el Análisis de Varianza (ANOVA), determinación de efectos principales y la optimización de respuesta.
- f. Interpretación de resultados: Se identificó los parámetros óptimos para la extracción de inulina y se evaluó la significancia estadística de cada factor y sus interacciones.

3.4.6 Cristalización y caracterización de la inulina obtenida a partir del extracto de yacón (*Smallanthus sonchifolius*)

En esta fase de la investigación, se procedió a la cristalización y caracterización de la inulina extraída del yacón, siguiendo el siguiente procedimiento:



a. Proceso de extracción y concentración

Primero, se utilizó los parámetros más óptimos en estudios preliminares. El extracto obtenido se sometió a una etapa de evaporación controlada durante un periodo de 6 horas. Durante este proceso, se monitoreó constantemente los °Brix para asegurar una adecuada concentración de los azúcares presentes en el extracto. La medida de °Brix fue crucial para determinar la concentración de sólidos solubles, principalmente azúcares, y asegurar que el extracto alcance el nivel deseado de concentración antes de proceder a la cristalización.

b. Adición de etanol

Una vez concentrado el extracto, se añadió etanol al 96%, utilizado como solvente cristalizador, además la adición de etanol favoreció la precipitación de la inulina al disminuir su solubilidad en el medio. Esta mezcla se colocó en tubos tipo falcón y se sometió a centrifugación a una temperatura de 10°C, con una velocidad de rotación de 5500 revoluciones por minuto (RPM) durante 4 minutos.

c. Enfriamiento y precipitación

Posteriormente, el concentrado restante, después de la centrifugación, se refrigeró durante 24 horas. Después de este tiempo, se observó el precipitado formado en el fondo del vaso precipitado.

d. Secado y Observación de los Cristales

Luego la muestra obtenida se sometió a secado en un horno de convección forzada a 90°C por un periodo de tiempo de 3 horas y 30 minutos, un método que aseguró una eliminación uniforme y controlada de la humedad, sin desnaturalizar los cristales de inulina. Finalmente, los cristales obtenidos se analizaron utilizando



un microscopio, lo que permitió la caracterización morfológica detallada de la inulina cristalizada.

CAPÍTULO IV

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los resultados presentados en esta sección del capítulo se desarrollaron conforme a los objetivos específicos establecidos en la investigación. Los datos obtenidos se muestran mediante un análisis exhaustivo de tablas y figuras. Las interpretaciones se fundamentan en el marco teórico y en investigaciones previas, que sirven como antecedentes y contexto para este proyecto de investigación.

4.1 DETERMINACIÓN DE LA CONCENTRACIÓN DE AZÚCARES PRESENTES EN EL YACÓN (*Smallanthus sonchifolius*)

En la Tabla 12 se presentan los resultados de las mediciones de los parámetros fisicoquímicos obtenidos después de realizar los análisis correspondientes. Estos datos fueron recopilados y organizados en dicha tabla. Esta información sirvió como base para posteriores análisis y comparaciones, brindando un registro detallado de las características fisicoquímicas de la muestra estudiada.

Tabla 12

Resultados de la medición de Parámetros Fisicoquímicos

Parámetros	Unidad	Valores
Concentración de Azúcares	°Brix	11,02
Índice de Refracción	nD	1,3494
Temperatura	°C	25
pH	Escala pH	6,038
Conductividad	$\mu S/cm$	2084

La concentración de azúcares, medida en grados Brix, es de 11,02; lo que indica un nivel considerable de sólidos solubles, principalmente azúcares, en el extracto. Este



valor fue fundamental para determinar la viabilidad de la extracción en la producción de inulina y otros productos derivados. Esto permite hacer una comparación con Arévalo & Porras (2010) que, dentro del yacón de Bagua, Huaraz y Huancayo, seleccionó la materia prima de Huaraz por su alto contenido de azúcares ($10,1^{\circ}\text{Brix}$), se observó que la variedad morada de yacón de la Provincia de Sandia es superior al de Huaraz.

El índice de refracción obtenido, con un valor de $n_D = 1,3494$, corrobora la concentración de solutos y sugiere una composición consistente con extractos de plantas ricas en fructanos como el yacón.

El pH que se registró fue de 6,038, indicando una ligera acidez, lo cual es típico en extractos vegetales y relevante para su estabilidad y comportamiento en diversas aplicaciones. En su trabajo, Ramos (2007) reportó los valores de pH de tres variedades específicas: el yacón Qello llajum, que mostró un pH de 6,36, el yacón Yurac checche con un pH de 6,52 y el yacón Yurac llajum que tuvo un pH de 6,17; ahí observamos que el pH del yacón variedad morada se encuentra dentro del promedio. La conductividad del extracto, con un valor de $2084 \mu\text{S}/\text{cm}$, reflejó una alta presencia de iones y minerales, lo cual es crucial para la caracterización del perfil nutricional y funcional del extracto.

Adicionalmente se sometió la muestra inicial a un análisis de azúcares presentes en el yacón variedad morada de la Provincia de Sandia, mostrando los siguientes resultados:

Tabla 13*Resultados del Análisis*

Parámetros	Unidad	Valores
Inulina	mg/L	4,80
Fructosa Libre	mg/L	3,40
Azúcares Reductores	mg/L	21,90

Estos datos indican que el yacón de la variedad morada contiene una cantidad considerable de azúcares reductores, seguido por inulina y fructosa libre en menores cantidades. Campos et al. (2012) analizaron diferentes variedades de yacón y encontraron que el contenido de inulina variaba entre 6,4 y 65,0 mg/g de materia seca. El resultado de 4,80 mg/L de inulina se encuentra en un rango inferior a este valor.

La diferencia entre los azúcares reductores totales y la fructosa libre (3,40 mg/L) sugiere que una cantidad significativa de inulina y FOS se ha hidrolizado en azúcares más simples. Esto podría deberse al tiempo de almacenamiento o la madurez del yacón al momento de la cosecha.

Con respecto a los azúcares reductores, Lachman et al. (2003) encontraron contenidos entre 15 y 40 g/kg de materia fresca. El valor de 21,90 mg/L se encuentra relativamente debajo del rango reportado, lo que sugiere que el valor del contenido de azúcares reductores en el yacón de variedad morada podría estar influenciado por factores como la variedad de la planta o el grado de madurez.

Además, factores como el tiempo de cosecha, las condiciones de almacenamiento y el procesamiento postcosecha pueden influir significativamente en la composición de azúcares presentes en el yacón.



4.2 DETERMINACIÓN DE LOS PARÁMETROS ÓPTIMOS DE TEMPERATURA, TIEMPO Y RELACIÓN SOLVENTE – MATERIA PRIMA PARA LA EXTRACCIÓN DE INULINA.

4.2.1 Diseño experimental para hallar los parámetros óptimos para la extracción de inulina

Variables Independientes

- Temperatura de extracción
- Tiempo de extracción
- Relación solvente – materia prima

Variable respuesta

- °Brix

4.2.2 Matriz de diseño experimental desarrollado en el software RStudio

La parte experimental de esta investigación se llevó a cabo utilizando un software estadístico. Este se utilizó porque se distingue por su precisión y capacidad para generar resultados exhaustivos y de alta calidad, lo que lo convierte en una herramienta valiosa para el análisis estadístico en estudios científicos. A continuación, se muestra los resultados de la interacción de las variables de la réplica 1 y 2, (Ver Tabla 14 y 15).

Tabla 14*Resultados de la Interacción de las Variables del Bloque 1*

B1	Factor A		Factor B		Factor C		Réplica 1
1	-1	61°C	-1	30 min	-1	1:1	5,83
2	+1	87°C	-1	30 min	-1	1:1	6,83
3	-1	61°C	+1	45 min	-1	1:1	5,76
4	+1	87°C	+1	45 min	-1	1:1	6,50
5	-1	61°C	-1	30 min	+1	3:1	8,09
6	+1	87°C	-1	30 min	+1	3:1	8,68
7	-1	61°C	+1	45 min	+1	3:1	8,35
8	+1	87°C	+1	45 min	+1	3:1	8,94

Tabla 15*Resultados de la Interacción de las Variables del Bloque 2*

B2	Factor A		Factor B		Factor C		Réplica 2
1	-1	61°C	-1	30 min	-1	1:1	5,63
2	+1	87°C	-1	30 min	-1	1:1	6,83
3	-1	61°C	+1	45 min	-1	1:1	5,90
4	+1	87°C	+1	45 min	-1	1:1	6,83
5	-1	61°C	-1	30 min	+1	3:1	8,29
6	+1	87°C	-1	30 min	+1	3:1	8,94
7	-1	61°C	+1	45 min	+1	3:1	8,88
8	+1	87°C	+1	45 min	+1	3:1	9,33

La optimización de los parámetros de extracción se realizó en dos bloques, cada uno con ocho tratamientos diferentes. En la primera réplica (Tabla 14), se observó que los valores de la variable respuesta oscilaron entre 5,83 y 8,94. Los valores más bajos se obtuvieron cuando la relación S – MP era 1:1 (Factor C en nivel bajo), mientras que los valores más altos se alcanzaron con una relación de

S – MP de 3:1 (Factor C en nivel alto). De igual manera en la segunda réplica (Tabla 15), se observó una tendencia similar, con valores que variaron entre 5,63 y 9,33.

Con respecto al promedio de los resultados de ambas réplicas. Los valores promedio de la variable respuesta oscilaron entre 5,73 y 9,135. En general se observó que los valores más altos de la variable respuesta se obtuvieron cuando la relación S – MP era de 3:1, independientemente de los niveles de otros factores.

Tabla 16

Factor de Reproducibilidad

R1	R2	Factor de Reproducibilidad	%
5,83	5,63	0,036	3,55
6,83	6,83	0,000	0,00
5,76	5,90	0,024	2,37
6,50	6,83	0,048	4,83
8,09	8,29	0,024	2,41
8,68	8,94	0,029	2,91
8,35	8,88	0,060	5,97
8,94	9,33	0,042	4,18

En la Tabla 16 se puede observar los valores hallados de factor de reproducibilidad de las réplicas y el porcentaje promedio fue de 2,39.

4.2.3 Análisis de varianza (ANOVA)

En la Tabla 17, se presenta los resultados del Análisis de varianza (ANOVA). Este análisis evaluó la significancia estadística de tres factores principales temperatura (A), tiempo (B) y relación S – MP (C) y sus interacciones (AB, AC y BC) en el proceso estudiado. Esta información fue importante para determinar y conocer que factores tienen un impacto significativo en el resultado del experimento.

Tabla 17*Resultados del Análisis de Varianza (ANOVA)*

Fuente	Suma de Cuadrados	GI	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
A	2,36391	1	2,36391	58,88	0,0000
B	0,117306	1	0,117306	2,92	0,1216
C	23,4983	1	23,4983	585,25	0,0000
AB	0,0333063	1	0,0333063	0,83	0,3862
AC	0,158006	1	0,158006	3,94	0,0786
BC	0,166056	1	0,166056	4,14	0,0725
Error Total	0,361356	9	0,0401507		
Total (corr.)	26,6982	15			

R-cuadrada = 98,6465 %

R-cuadrada (ajustada por g.l.) = 97,7442 %

Error estándar del est. = 0,200376

Error absoluto medio = 0,130703

A partir de este ANOVA, podemos observar que la temperatura tiene un efecto significativo sobre los grados Brix, como lo indica un valor-P extremadamente bajo (0,0000). La alta razón-F (58,88) confirma que las variaciones en la temperatura contribuyen de manera sustancial a las diferencias observadas en la concentración de azúcares. El tiempo de extracción, aunque tiene un efecto no estadísticamente significativo al nivel del 5% (valor-P = 0,1216). Esto sugiere que el tiempo, por sí solo, no influye de manera decisiva en los grados Brix. La relación S – MP muestra un efecto altamente significativo sobre los grados Brix, con un valor-P de 0,0000 y una razón-F de 585,25. Este factor fue el más determinante en la concentración de azúcares del extracto de yacón.



Con respecto a la interacción entre los factores AB, la interacción entre temperatura y tiempo no es significativa (valor-P = 0,3862), indicando que no hay una sinergia importante entre estos dos factores en su influencia sobre los grados Brix. La interacción entre los factores AC, es marginalmente no significativa (valor-P = 0,0786), sugiriendo una posible pero no concluyente influencia conjunta sobre los grados Brix. La interacción BC, también es marginalmente no significativa (valor-P = 0,0725), lo que sugiere una influencia combinada leve pero no concluyente.

Con respecto a los altos valores de R-cuadrada y R-cuadrada ajustada indican que el modelo explica muy bien la variabilidad de los datos observados.

4.2.4 Modelo matemático

Con respecto al modelo matemático, la siguiente tabla contiene los coeficientes de regresión para un modelo que predice los grados Brix. Estos coeficientes cuantifican el impacto de los diferentes factores y sus interacciones en la variable de respuesta. Los factores principales estudiados son la temperatura (A), tiempo (B) y la relación S – MP (C), juntos con sus interacciones (AB, AC, BC). A continuación, se presenta la tabla de los coeficientes de regresión para la variable respuesta (Ver Tabla 18).

Tabla 18

Coefficiente de regresión para los grados Brix

Coefficiente	Estimado
Constante	1,02462
A: Temperatura	0,0624038
B: Tiempo	0,0188782
C: Relación solvente – materia prima	0,0126817
AB	-0,000467949
AC	-0,0000764423
BC	0,000135833

La ecuación del modelo ajustado es:

$$\begin{aligned} \text{Grados Brix} = & 1,02462 + 0,0624038 * \text{Temperatura} + 0,0188782 * \text{Tiempo} \\ & + 0,0126817 * \text{Relacion S:MP} - 0,000467949 * \text{Temperatura} * \text{Tiempo} - \\ & 0,0000764423 * \text{Temperatura} * \text{Relacion S:MP} + 0,000135833 * \text{Tiempo} * \text{Relacion} \\ & \text{S:MP} \end{aligned}$$

4.2.5 Optimización de respuesta

Con respecto a la optimización de respuesta, en la siguiente tabla se muestran los niveles bajo, alto y óptimo para los tres factores clave; que son la temperatura, el tiempo y la relación S – MP. La información detallada fue importante para determinar los parámetros de extracción más óptimos del proceso.

Meta: Incrementar los grados Brix

Valor Óptimo = 9,11437

Tabla 19*Optimización de Respuesta*

Factor	Bajo	Alto	Óptimo
Temperatura	61	87	87
Tiempo	30	45	45
Relación solvente – materia prima	1:1	3:1	3:1

En la Tabla 19 se pudo observar que la temperatura más alta dentro del rango evaluado (87°C), es la que maximizó los grados Brix. Esto sugiere que una mayor temperatura aumentó la concentración de azúcares, probablemente debido a la evaporación del solvente. Con respecto al segundo factor, el tiempo máximo de 45 minutos también se identificó como el valor óptimo, este resultado indica que un tiempo de procesamiento más prolongado permitió una mayor extracción y concentración de los azúcares en el extracto. Y en cuanto a la relación S – MP de 3:1 fue la más efectiva para maximizar los grados Brix.

Estos datos obtenidos permitieron realizar una comparación con Arévalo & Porras (2010) que realizó una extracción con agua caliente a una temperatura de 100°C, tiempo de operación de 10 minutos y relación materia prima – solvente (1:3) de una sola etapa. Así mismo, Bedoya et al. (2008) optimizó el proceso de extracción con agua caliente bajo las condiciones de extracción de un tiempo de 23 minutos, una temperatura de 82,2°C y una relación solvente – materia prima de 4.5 L/500 g. De igual manera, Escobar et al. (2020) mostraron que las mejores condiciones de extracción de inulina para la jícama fueron, una temperatura de 75°C, 1:5 de relación solvente – materia prima y un tiempo de 25 minutos; mientras que para la cabuya fueron una temperatura de 80°C, 1:5 relación de solvente – materia prima y un tiempo de 100 minutos. Ante esto, se evidencia que,

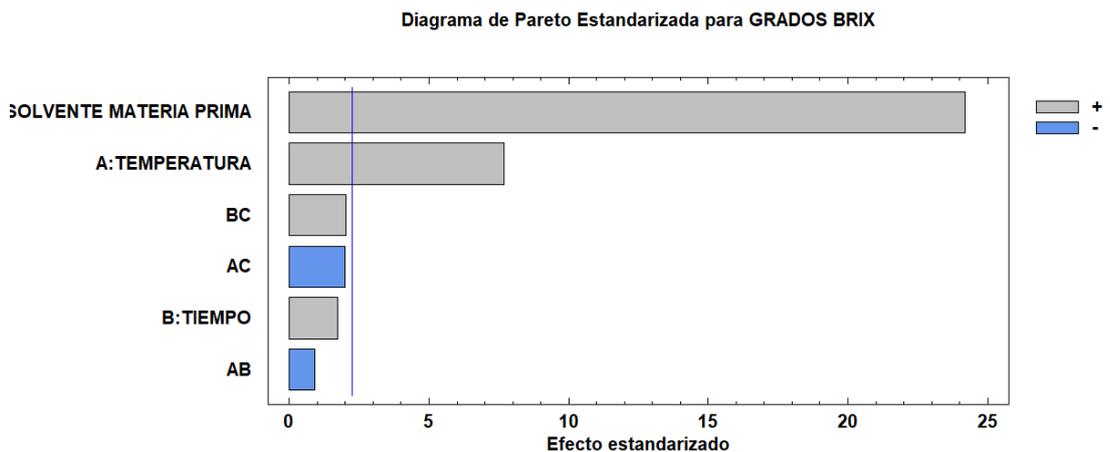
en todos los estudios realizados presentados, la relación entre el solvente y la materia prima es la variable más representativa.

4.2.6 Diagrama de Pareto

Este diagrama de Pareto estandarizado para los grados Brix proporcionó una visión clara de los factores más influyentes en la medida de la concentración de sólidos solubles. A continuación, se presenta una interpretación detallada de los datos reflejados en el diagrama (Ver Figura 17).

Figura 17

Diagrama de Pareto Estandarizada



En este diagrama de Pareto estandarizado se puede observar que el Factor C (Relación S – MP) y el Factor A (Temperatura) son los más influyentes en la variación de la concentración de los grados Brix. Esto sugiere que cualquier cambio o mejora en estos factores puede resultar en un impacto significativo en los °Brix. Las interacciones “BC” y “AC” también presentan efectos notables, aunque estos son menores en comparación con los factores individuales principales, indicando que aún deben ser considerados en un análisis detallado de optimización de parámetros.

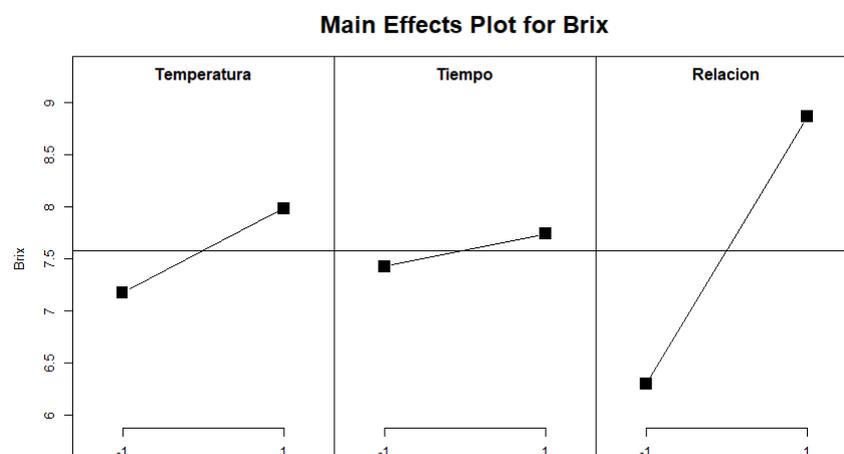
En contraste, el Factor B “Tiempo” y “AB” muestran efectos mucho menores, lo que denota que su influencia es relativamente insignificante en comparación con los otros factores principales detallados anteriormente. Además, los efectos positivos indican que un aumento en el factor correspondiente resulta en un incremento de los °Brix, en cambio los efectos negativos indican una disminución.

Por ende, para mejorar y controlar eficazmente los °Brix en el proceso, se debe priorizar la optimización del Factor C (Relación S – MP) y el Factor A (Temperatura), pero sin dejar de monitorear y ajustar los otros factores y también sus interacciones según sea necesario. Bedoya et al. (2008) en su artículo de investigación en su diagrama de Pareto para el estudio de los factores de extracción del yacón de Nariño obtuvieron que el factor que tuvo más efecto fue la relación solvente – materia prima, seguido por la temperatura y la interacción temperatura y relación solvente – materia prima.

4.2.7 Gráfica de efectos principales

Figura 18

Efectos Principales para grados Brix





En la Figura 18 de la gráfica de efectos principales para °Brix presentada ilustró la influencia de tres factores experimentales: temperatura, tiempo y relación solvente – materia prima, sobre la concentración de azúcares en el extracto de yacón. El primer cuadrante del gráfico mostró que un aumento en la temperatura de 61°C a 87°C se correlaciona con un incremento de los °Brix, sugiriendo que temperaturas más altas favorecen la concentración de azúcares. El segundo cuadrante del gráfico reveló que el tiempo, variando entre 30 y 45 minutos, tiene un impacto positivo leve pero significativo sobre los °Brix, indicando que periodos más largos de extracción contribuyen a una mayor concentración de azúcares. Finalmente, el tercer cuadrante del gráfico destacó que la relación solvente – materia prima tiene el efecto más pronunciado, donde un incremento en la proporción de solvente de 1 a 3 resulta en un marcado aumento de los °Brix.

4.3 CRISTALIZACIÓN Y CARACTERIZACIÓN DE LA INULINA OBTENIDA A PARTIR DEL EXTRACTO DE YACÓN (*Smallanthus sonchifolius*)

4.3.1 Monitoreo de los °Brix en la fase de evaporación

La etapa de evaporación comenzó a las 08 h 30 y culminó a las 14 h 30. En la Tabla 20, se detalla el incremento de los °Brix con respecto al tiempo de evaporación.

Tabla 20*Concentración de °Brix en la Fase de Evaporación*

Hora	°Brix	nD
08 h 30	9,33	1,3468
09 h 30	15,56	1,3644
10 h 30	21,79	1,3820
11 h 30	28,02	1,3996
12 h 30	34,25	1,4172
13 h 30	40,42	1,4223
14 h 30	56,59	1,4343

Con respecto a la precipitación de inulina se sometió a una evaporación del extracto filtrado hasta alcanzar los 56,59°Brix, por el contrario (Bedoya et al., 2008) alcanzaron una reducción del volumen de agua del extracto del 80% aproximadamente, con una concentración aproximada de 22°Brix.

4.3.2 Caracterización de los Cristales de Inulina

Después de añadir etanol al 96% al concentrado, esta fue refrigerada durante un periodo de 24 horas y se pudo observar un precipitado de inulina. Este proceso de refrigeración permitió que el etanol interactuara adecuadamente con la muestra, favoreciendo la precipitación de la inulina. Una vez transcurrido el tiempo de refrigeración, se llevó a cabo un secado de la muestra utilizando un secador por convección forzada. Este método de secado fue importante para eliminar la humedad y para identificar los cristales de inulina.

Posteriormente se realizó un análisis mediante microscopía para caracterizar los cristales de inulina que se habían formado. Este análisis

microscópico permitió observar la propiedad morfológica de la forma cristalina de la inulina. En la Figura 19 y 20, se puede observar la formación de cristales aciculares con forma de aguja y amorfos, que fueron identificados con un aumento de 4x, una apertura numérica de 0,10, diseñado para un microscopio con una longitud de tubo de 160 mm.

Figura 19

Vista Microscópica de la Aparición de Cristales de Inulina

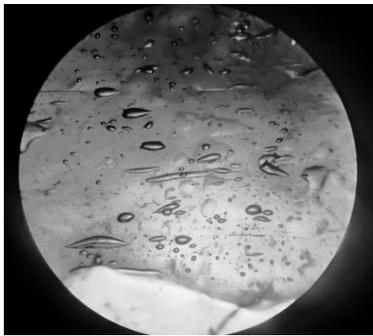
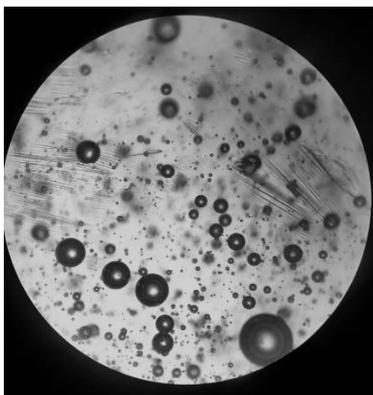


Figura 20

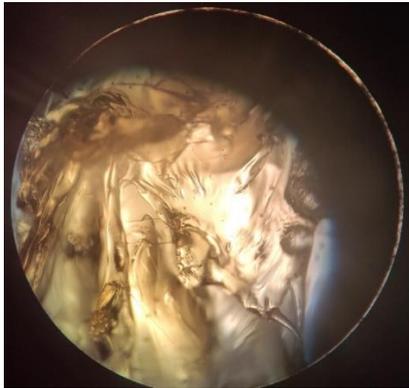
Vista Microscópica de Cristales alargados de inulina



Al concluir el proceso de cristalización, en la Figura 21 se muestra la inulina extraída del yacón en su estado completamente cristalizado.

Figura 21

Vista microscópica de la inulina cristalizada



En la etapa de cristalización de la inulina del yacón variedad morada, se identificó la presencia de cristales aciculares con forma de aguja y amorfos que se obtuvo en la etapa de secado por convección forzada a 90°C por un tiempo de 3 horas 30 minutos y fueron identificados por microscopía. Por otro lado, Campos et al. (2013) añadieron alcohol al 96% al extracto y enfriaron la muestra hasta una temperatura de 2°C y así lograron la formación de cristales. Así mismo, Bedoya et al. (2008) observó la presencia de esfero cristales patrón 40x, en el yacón de la región de Nariño de Colombia, aplicando también el secado por convección de aire forzado por un tiempo de 4 horas. Frente a todo esto, Cooper et al. (2015) mostraron que la estructura superficial relevante y el ensamblaje cristalino de la inulina siguen sin definirse aún.

Una vez obtenido el yacón cristalizado se procedió a someter la muestra a un análisis proximal, cuyos resultados se detallan en la Tabla 21 y 22.

Las características organolépticas mostraron que el color, sabor y olor son consistentes con la naturaleza de la inulina y el aspecto en polvo ligeramente granulado indica un proceso de cristalización exitoso.

Tabla 21*Características Organolépticas*

Ensayos	Resultados	Especificaciones	Conclusión
Color	Característico a yacón	Característico a yacón	Conforme
Sabor y Olor	Dulce	Sabores y olores dulces	Conforme
Aspecto	En polvo ligeramente granulado	Libre de materias extrañas	Conforme

En el trabajo realizado por Arévalo & Porras (2010) sometieron el líquido purificado a un secado por atomización obteniendo una inulina con una apariencia (polvo ligeramente granulado), color (marrón claro), que coinciden con las características organolépticas halladas en la inulina cristalizada obtenida del yacón variedad morada de esta investigación. En cambio, Campos et al. (2013) en su trabajo de extracción de inulina de los tubérculos de la *Dahlia* spp, la caracterizaron y mostraron que presentaba un olor inodoro y un sabor insípido.

En términos de las características fisicoquímicas, la humedad (5,51%), es relativamente bajo lo que es favorable para la estabilidad y almacenamiento del producto, las cenizas (2,65%) indica la presencia de minerales, lo cual es esperado en un producto derivado de una raíz como lo es el yacón, la proteína (9,65%) esta característica podría ser beneficiosa desde una perspectiva nutricional.

Tabla 22

Características Fisicoquímicas

Ensayos	Resultados
Humedad (%)	5,51
Cenizas (%)	2,65
Proteína (%)	9,65
Grasa (%)	3,55
Fibra cruda (%)	1,58
Carbohidratos (%)	77,06
Energía Total Kcal/ 100 g	378,79

En resumen, la inulina cristalizada de yacón variedad morada presentó una humedad (5,51%), cenizas (2,65%), proteína (9,65%), grasa (3,55%), fibra cruda (1,58%), carbohidratos (77,06%) y una energía total de (378,79 kcal/100 g). En el trabajo realizado por Arévalo & Porras (2010) obtuvieron una inulina del yacón de Huaraz con una humedad (2,85%) y cenizas totales (5,25%), las diferencias observadas pueden deberse a varios factores como la variedad de yacón que se utilizó, condiciones de cultivo o la madurez del yacón. Frente a estos datos, Campos et al. (2013) en su trabajo de inulina extraída de los tubérculos de la *Dahlia spp* obtuvo una humedad (5,34%), °Brix (42,8), un pH (6,72) y una densidad de (1,19 g/mL), se puede observar que en cuanto a la humedad poseen valores relativamente iguales comparado con el yacón de variedad morada.



V. CONCLUSIONES

- El yacón (*Smallanthus sonchifolius*) variedad morada de la provincia de Sandía presentó una concentración de 11,02°Brix; un pH de 6,038; un índice de refracción de 1,3494 y una conductividad de 2084 $\mu S/cm$.
- Los parámetros óptimos para la extracción de inulina a partir del extracto de yacón (*Smallanthus sonchifolius*), realizada mediante un diseño factorial completo 2^3 , fueron una temperatura de 87°C, un tiempo de extracción de 45 minutos y una relación solvente – materia prima de 3:1.
- Se logró cristalizar la inulina del yacón (*Smallanthus sonchifolius*), observándose la presencia de cristales con forma de aguja y amorfos; además, se caracterizó la inulina, la cual presentaba un color marrón característico del yacón, un sabor y olor dulces y un aspecto de polvo ligeramente granulado, con un contenido de humedad del 5,51%; cenizas del 2,65%; proteína del 9,65%; grasa del 3,55%; fibra cruda del 1,58%; carbohidratos del 77,06% y una energía total de 378,79 kcal por cada 100 g.



VI. RECOMENDACIONES

- Se recomienda explorar nuevas fuentes de inulina, investigar y evaluar la viabilidad de extraer inulina de otras frutas y vegetales disponibles en el departamento de Puno. Este enfoque permitirá identificar nuevas fuentes de inulina, potencialmente con características y rendimientos superiores.
- Se recomienda implementar el proceso optimizado de extracción de inulina a una escala industrial para evaluar su viabilidad económica y técnica, en un entorno de producción masiva. Esto podría incluir el diseño de equipos y procesos industriales adecuados para manejar grandes volúmenes de materia prima y solvente.
- Se recomienda continuar la optimización de los parámetros de extracción a escala industrial, asegurando que los resultados obtenidos en el laboratorio sean replicables en una producción a gran escala, que pueda contribuir al desarrollo económico y tecnológico en el departamento de Puno.



VII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Ahmed, W., & Rashid, S. (2017). Functional and therapeutic potential of inulin: A comprehensive review. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 59(1), 1–13. <https://doi.org/10.1080/10408398.2017.1355775>
- Álvarez-Borroto, Reynerio, González-Gavilánez, Humberto R., & Montenegro-Cepeda, Andrea C. (2019). Extraction and determination of inulin type fructan from yacón (*Smallanthus sonchifolius*): technological scheme for its industrial production. *Tecnología Química*, 39(1), 37-48.
- Amaya J. (2000). Efeitos de doses crescentes de nitrogenio e potasio na produtividade de yacon (*Polymnia sonchifolia* Poep. & Endl.). [Tese do titulo de Mestre em Agronomia – Area de concentracao em horticultura Universidade Estadual Paulista Julio de Mesquita Filho], Brasil
- Apolinário, A. C., de Carvalho, E. M., de Lima Damasceno, B. P. G., da Silva, P. C. D., Converti, A., Pessoa, A., & da Silva, J. A. (2017). Extraction, isolation and characterization of inulin from *Agave sisalana* boles. *Industrial Crops and Products*, 108, 355–362. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2017.06.045>
- Arévalo Fabián, C. J., & Porras Ricra, P. L. (2010). Obtención de la inulina a partir de raíces de Yacón (*Smallanthus Sonchifolius*) a nivel piloto.
- Balcázar-Muñoz, Blanca R, Martínez-Abundis, Esperanza, & González-Ortiz, Manuel. (2003). Efecto de la administración oral de inulina sobre el perfil de lípidos y la sensibilidad a la insulina en individuos con obesidad y dislipidemia. *Revista médica de Chile*, 131(6), 597-604. <https://dx.doi.org/10.4067/S0034-98872003000600002>



- Başaran, U., Akkbik, M., Mut, H., Gülümser, E., Çopur Doğrusöz, M., & Koçoğlu, S. (2018). High-Performance Liquid Chromatography with Refractive Index Detection for the Determination of Inulin in Chicory Roots. *Analytical Letters*, 51(1–2), 83–95. <https://doi.org/10.1080/00032719.2017.1304952>
- Bedoya, O. A., Fajardo, J. C., & Cuarán, G. P. (2008). Extracción, cristalización y caracterización de inulina a partir de yacón (*smallanthus sonchifolius* (poepp. & endl.) para su utilización en la industria alimentaria y farmacéutica. *Biotecnología en el Sector Agropecuario y Agroindustrial*, 6(2), 14-20.
- Cabrera Pintado, R. M., Sánchez Jhong, K. J., & Linares Estrada, A. (2019). *MANUAL DE MANEJO AGRONÓMICO DEL YACÓN (SMALLANTHUS SONCHIFOLIUS (POEPP. & ENDL.) H. ROBINSON)*.
- Caetano, B., de Moura, N., Almeida, A., Dias, M., Sivieri, K., & Barbisan, L. (2016). Yacon (*Smallanthus sonchifolius*) as a Food Supplement: Health-Promoting Benefits of Fructooligosaccharides. *Nutrients*, 8(7), 436. <https://doi.org/10.3390/nu8070436>
- Campos, D., Betalleluz-Pallardel, I., Chirinos, R., Aguilar-Galvez, A., Noratto, G., & Pedreschi, R. (2012). Prebiotic effects of yacon (*Smallanthus sonchifolius* Poepp. & Endl), a source of fructooligosaccharides and phenolic compounds with antioxidant activity. *Food Chemistry*, 135(3), 1592–1599. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2012.05.088>
- Campos, M. F., Cotrina, L., & Guzmán, B. R. (2013). Extracción y caracterización de la inulina presente en los tubérculos de la *Dahlia* spp. *Revista del Instituto de investigación de la Facultad de minas, metalurgia y ciencias geográficas*, 16(31).



- Cárdenas M. (1969). Manual de plantas económicas de Bolivia. Imprenta Icthus, Cochabamba, Bolivia.
- Conway, P. L. (2001). Prebiotics and human health: The state-of-the-art and future perspectives. *Näringsforskning*, 45(1), 13–21.
<https://doi.org/10.3402/fnr.v45i0.1784>
- Cooper, P. D., Rajapaksha, K. H., Barclay, T. G., Ginic-Markovic, M., Gerson, A. R., & Petrovsky, N. (2015). Inulin crystal initiation via a glucose-fructose cross-link of adjacent polymer chains: Atomic force microscopy and static molecular modelling. *Carbohydrate Polymers*, 117, 964–972.
<https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2014.10.022>
- Díaz, L., Savage, G., Eggerth, L., & Golueke, C. (1956). COMPOSTING. *Medical Journal of Australia*, 2. <https://doi.org/10.1201/b18712-8>.
- El-Kholy, W. M., Aamer, R. A., & Ali, A. N. A. (2020). Utilization of inulin extracted from chicory (*Cichorium intybus* L.) roots to improve the properties of low-fat synbiotic yoghurt. *Annals of Agricultural Sciences*, 65(1), 59–67.
<https://doi.org/10.1016/j.aos.2020.02.002>
- Escobar-Ledesma, F. R., Sánchez-Moreno, V. E., Vera, E., Ciobotă, V., Jentsch, P. V., & Jaramillo, L. I. (2020). Extraction of Inulin from Andean Plants: An Approach to Non-Traditional Crops of Ecuador. *Molecules*, 25(21), 5067.
<https://doi.org/10.3390/molecules25215067>
- Font Quer P. (1970). Diccionario de botánica. Editorial Labor, Barcelona, España.



- Genta, S., Cabrera, W., Habib, N., Pons, J., Carillo, I. M., Grau, A., & Sánchez, S. (2009). Yacon syrup: Beneficial effects on obesity and insulin resistance in humans. *Clinical Nutrition*, 28(2), 182–187. <https://doi.org/10.1016/j.clnu.2009.01.013>
- Gomes Constantino, M., Valdo José da Silva, G., & Marcos Donate, P. (2011). *Fundamentos de Química Experimental* (2nd ed., Vol. 1).
- Graefe, S., Hermann, M., Manrique, I., Golombek, S., & Buerkert, A. (2004). Effects of post-harvest treatments on the carbohydrate composition of yacon roots in the Peruvian Andes. *Field Crops Research*, 86(2–3), 157–165. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2003.08.003>
- Grodzicki, T., & Jankiewicz, M. (2022). The role of the common agricultural policy in contributing to jobs and growth in EU's rural areas and the impact of employment on shaping rural development: Evidence from the Baltic States. *PLOS ONE*, 17(2), e0262673. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0262673>
- Hachkova, H., Nagalievskaya, M., Soliljak, Z., Kanyuka, O., Kucharska, A. Z., Sokół-Łętowska, A., Belonovskaya, E., Buko, V., & Sybirna, N. (2021). Medicinal Plants Galega officinalis L. and Yacon Leaves as Potential Sources of Antidiabetic Drugs. *Antioxidants*, 10(9), 1362. <https://doi.org/10.3390/antiox10091362>
- Hartati, L., Septian, M. H., Fitria, N. A., Idayanti, R. W., & Sihite, M. (2023). Inulin Extraction from Different Types of Tubers in Magelang District. *JURNAL ILMIAH PETERNAKAN TERPADU*, 11(1), 1. <https://doi.org/10.23960/jipt.v11i1.p1-12>



- Hermann M, Freire I & C Pazos. (1999). Compositional diversity of the yacon storage root. In: Impact on a changing world: Program report 1997-98. International Potato Center (CIP), Lima (Perú).
- Huamán, M. B. C., & Marcelo, E. H. J. (2007). Identificación de inulina y oligosacáridos en las hojas de Yacón (*Polymnia sonchifolia*) para la obtención de un edulcorante. *Prospectiva Universitaria*, 4(1).
- Jesús Rios, J. L., & Carbajal Gómez, W. N. (2019). Obtención y caracterización de inulina a partir de bulbo de *Allium sativum* " AJO", variedad" MAPUR" obtenida en Ahuac-Chupaca abril a diciembre 2018.
- Kamp, L., Hartung, J., Mast, B., & Graeff-Hönninger, S. (2019). Tuber Yield Formation and Sugar Composition of Yacon Genotypes Grown in Central Europe. *Agronomy*, 9(6), 301. <https://doi.org/10.3390/agronomy9060301>
- Kim, S., Jin, Y., Hwan, N., , 흥., Chang, D., Yoon, Y., Cho, H., & Jeong, J. (2012). Domestic and Overseas Status and Future Trends of Yacon Production. *The Journal of the Korean Society of International Agriculture*, 24, 417-424.
- Lachman, J., Fernández, E. y Orsák, M. (2003). Yacon [*Smallanthus sonchifolia* (Poepp. et Endl.) H. Robinson] chemical composition and use-a review. *Plant soil and environment*, 49(6), 283-290
- Lachman, J., Havrland, B., Fernández, E. C., & Dudjak, J. (2018). Saccharides of yacon [*Smallanthus sonchifolius* (Poepp. et Endl.) H. Robinson] tubers and rhizomes and factors affecting their content. *Plant, Soil and Environment*, 50(9), 383–390. <https://doi.org/10.17221/4048-PSE>



- López, S. E. (2005). Caracterización morfológica, bioquímica y revisión del nivel de ploidía de *Smallanthus Sonchifolius* (Poepp. & Endl.) H. Robinson “Llacón” de tres Provincias ambientalmente diferentes de la región la Libertad (Tesis doctoral). Universidad Nacional de Trujillo. Trujillo, Perú. Recuperado de <http://dspace.unitru.edu.pe/handle/UNITRU/6002>
- Madrigal, Lorena, & Sangronis, Elba. (2007). La inulina y derivados como ingredientes claves en alimentos funcionales. *Archivos Latinoamericanos de Nutrición*, 57(4), 387-396.
- Mensink, M. A., Frijlink, H. W., van der Voort Maarschalk, K., & Hinrichs, W. L. J. (2015). Inulin, a flexible oligosaccharide I: Review of its physicochemical characteristics. *Carbohydrate Polymers*, 130, 405–419. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2015.05.026>
- Mensink, M. A., Frijlink, H. W., van der Voort Maarschalk, K., & Hinrichs, W. L. J. (2015). Inulin, a flexible oligosaccharide. II: Review of its pharmaceutical applications. *Carbohydrate Polymers*, 134, 418–428. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2015.08.022>
- Ognean, C. F., Darie, N., & Ognean, M. (2006). Fat replacers: review. *Journal of Agroalimentary Processes and Technologies*, 12(2), 433-442.
- Pande, Samip & Rai, Basanta. (2019). EFFECT OF ALCOHOLIC FERMENTATION ON PHYTOCHEMICAL (POLYPHENOL/FLAVONOID, VITAMIN C AND FOS) LEVELS AND RADICAL SCAVENGING ACTIVITY OF YACON (*Smallanthus sonchifolius*) ROOT SLICES. 10.13140/RG.2.2.36526.36168.



- Ramos Zapana, R. (2007). Estudio químico-bromatológico de algunas variedades de yacón (*Smallanthus sonchifolius*) (Poepp and Endl) H. Robinson. De la provincia de Sandia-Puno.
- Redondo-Cuenca, A., Herrera-Vázquez, S. E., Condezo-Hoyos, L., Gómez-Ordóñez, E., & Rupérez, P. (2021). Inulin extraction from common inulin-containing plant sources. *Industrial Crops and Products*, *170*, 113726. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2021.113726>
- Roberfroid, M. B. (2005). Introducing inulin-type fructans. *British Journal of Nutrition*, *93*(S1), S13–S25. <https://doi.org/10.1079/BJN20041350>
- Rubel, I. A., Iraporda, C., Novosad, R., Cabrera, F. A., Genovese, D. B., & Manrique, G. D. (2018). Inulin rich carbohydrates extraction from Jerusalem artichoke (*Helianthus tuberosus* L.) tubers and application of different drying methods. *Food Research International*, *103*, 226–233. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2017.10.041>
- Saavedra Leos, M. Z., Alcalá, M. Á. E., Soto Guerrero, J., & Leyva Porras, C. (2014). *CARACTERIZACIÓN FÍSICA DE LAS PROPIEDADES TÉRMICAS DE LA INULINA*. En *Memorias del Congreso Internacional de Investigación e Innovación 2014*. Cortazar, Guanajuato, México. ISBN: 978-607-95635.
- Seminario, J., Valderrama, M. y Manrique, I. (2003). El yacón: Fundamentos para el aprovechamiento de un recurso promisorio. Centro Internacional de la Papa (CIP), Universidad Nacional de Cajamarca, Agencia Suiza para el Desarrollo y la Cooperación (COSUDE). Lima, Perú. Recuperado de http://cipotato.org/wp-content/uploads/2014/07/Yacon_Fundamentos_password.pdf



- Siche, R., Armas, V., Lezama, R., Iparraguirre, R. y Corcuera, A. (2012). Aumento ebulloscópico de extracto de jugo de yacón (*Smallanthus sonchifolius*) y determinación de gráficas de Dühring. *Agroindustrial Science*, 2(2), 146-152.
- Stökle, K., Jung, D., & Kruse, A. (2023). Acid-assisted extraction and hydrolysis of inulin from chicory roots to obtain fructose-enriched extracts. *Biomass Conversion and Biorefinery*, 13(1), 159–170. <https://doi.org/10.1007/s13399-020-01108-y>
- Takenaka M., Yan X., Ono H., Yoshida M., Nagata T & T Nakanishi. (2003). Caffeic acid derivatives in the roots of yacón (*Smallanthus sonchifolius*). *Journal of Agricultural and Food Chemistry*.
- Valderrama, M. (2005). Manual del cultivo de yacón. Experiencias de introducción y manejo técnico en el Valle de Condebamba. Cajamarca-Perú: PYMAGROS.
Recuperado de <http://www.asocam.org/sites/default/files/publicaciones/files/74455093814a213d6976637f4f71ad5f.pdf>



ANEXOS

ANEXO 1. Certificado de análisis del yacón variedad morada



PERÚ

**Ministerio
de Desarrollo Agrario
y Riego**



inia
Instituto Nacional de Innovación Agraria

CERTIFICADO DE ANALISIS

SOLICITANTE

INTERESADOS

DIRECCION

PROCEDECENCIA

PRODUCTO

TIPO DE ANALISIS

N° DE ANALISIS

FECHA DE RECEPCIÓN

FECHA DE CERTIFICACIÓN

: Obtención de Inulina Cristalizada a partir del Extracto de Yacón (*Smallanthus sonchifolius*).

: Mariela del Merced Zolanch Huayta Farfán.

: Jr. Tinta L1 Urb. Santa Adriana

: Varios

: Yacón.

: Varios.

: 01.

: 25 de Junio del 2024.

: 15 de Julio del 2024.

N°	Determinaciones Clave	Mg/L
01	Inulina	4,80
02	Fructosa Libre	3,40
03	Azucares reductores	21,90
04		
05		
06		
07		
08		
09		
10		

Normas ó Métodos de ensayo utilizados en el Laboratorio:
NTP. 1981 Extracción por solvente.

Nota:
Cualquier corrección y/o enmendadura anula al presente documento. (El informe sólo afecta a la muestra sometida a ensayo).





Jorge Canitua Rojas
Responsable Laboratorio EEA Ilpa Puno.

La Rinconada Salcedo S/N°-Puno
T: (051) 363 812
www.inia.gob.pe
www.minagri.gob.pe



ANEXO 2. Certificado de análisis proximal de la inulina de yacón cristalizado



UNIVERSIDAD NACIONAL DEL ALTIPLANO
FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA
LABORATORIO DE CONTROL DE CALIDAD



FIQ Nro

Nº 002907

Certificado de Análisis

ASUNTO : Análisis PROXIMAL DE: YACON CRISTALIZADO
PROCEDENCIA : LABORATORIO DE INVESTIGACIÓN DE LA ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERIA QUIMICA - UNIVERSIDAD NACIONAL DEL ALTIPLANO
INTERESADO : MARIELA DE LA MERCED ZOLANCH HUAYTA FARFAN
POYECTO : OBTENCION DE INULINA CRISTALIZADA A PARTIR DEL EXTRACTO DE YACON (*Smallanthus sonchifolius*).
MOTIVO : CONTROL DE CALIDAD
MUESTREO : 03/07/2024, por el interesado
ANÁLISIS : 22/07/2024
RESULTADO : 25/07/2024
COD. MUESTRA : B009 - 000624

CARACTERÍSTICAS ORGANOLÉPTICAS:

ENSAYOS	RESULTADOS	ESPECIFICACIONES	CONCLUSIÓN
COLOR	Característico a yacón	Característico a yacón	Conforme
SABOR Y OLOR	Dulce	sabores y olores dulce	Conforme
ASPECTO	En Polvo ligeramente granulada	libre de materias extrañas	Conforme

CARACTERÍSTICAS FÍSICO - QUÍMICAS

ENSAYOS	RESULTADOS	MÉTODO DE ANÁLISIS
Humedad %	5.51	AOAC 923.03
Cenizas %	2.65	AOAC 978.10
Proteína %	9.65	AOAC 920.85
Grasa %	3.55	AOAC 925.10
Fibra Cruda %	1.58	AOAC 920.87
Carbohidratos %	77.06	
Energía total Kcal / 100 g	378.79	

CONCLUSIÓN: Los resultados de los análisis están conformes.

FECHA DE EMISION: Puno, C. U. 25 de julio del 2024

ING. LUZ MARINA TEVES PONCE
 AV. STR. DE F. 500 - 10001 - CONTROL DE CALIDAD
 PUNO - TEL.: 951755420

DECANO
 DECANO DE LA F.I.Q.
 UNA / PUNO



ANEXO 3. Certificado de material de referencia refractómetro Mettler Toledo

R4



LGC Standards Sp. z o.o. Tel 48 22 751 31 40, 751 55 69
ul. Ogrodowa 27/29 Fax 48 22 751 58 45
Kielcin www.lgcstandards.com
05-092 Łomianki, Poland pi@lgcstandards.com

Certificate of Reference Material

PRG 17.1 Water – Refractive Index and Density

(Produced for METTLER TOLEDO, ordering number 51338010)

Lot No: 171619
Date of certification: 6. August 2019
Valid to: 6. August 2021
Content: 9 ml in a glass vial
Storage: at room temperature



01171619756690001000000300101010000

Certified values of refractive index and density

Temperature	Refractive index at wavelength 589,3 nm	Density [kg/m ³]	([g/cm ³])
15°C	$n_D = 1.33341 \pm 0.00002$	$\rho = 999.11 \pm 0.02$	(0.99911)
20°C	$n_D = 1.33299 \pm 0.00002$	$\rho = 998.21 \pm 0.02$	(0.99821)
25°C	$n_D = 1.33249 \pm 0.00002$	$\rho = 997.05 \pm 0.02$	(0.99705)

The density values of water can be found over the temperature range (15 ÷ 25 °C) using the following equation:

$$\rho = c_0 + c_1 \cdot t + c_2 \cdot t^2$$

where:

$$\begin{aligned} c_0 &= +1000.214 \text{ kg/m}^3, \\ c_1 &= +5.100 \cdot 10^{-3} \text{ kg/(m}^3 \cdot \text{°C)}, \\ c_2 &= -5.265 \cdot 10^{-3} \text{ kg/(m}^3 \cdot \text{°C}^2), \\ t &= \text{temperature in } \text{°C} \end{aligned}$$

APPLICATION: This reference material is intended for checking and calibration of refractometers and density meters for liquids.

USE:

Refractive index: A sample of the reference material should be used according to the refractometer user's manual. The sample should be disposed of after use.

Density: A sample of the reference material should be used according to the density meter's user's manual. The sample should be used once, immediately after the vial is opened.



ANEXO 4. Informe de ensayo específico del refractómetro Mettler Toledo

Specific Test Report

Refractometer

Serial Number

Chip-ID

R4

B941375661

013C35981B00008D

We herewith certify that the above mentioned device or board has been tested and fulfils the technical specifications listed in this document.
The complete test report is filed in our archives. All tests have been performed according to test instructions TST-30474903.

		Tested	Measured Value	Criterion/Tolerance*	Passed
1	Interfaces	✓	n.a.	Operability	Yes
1.1	Automation	✓	n.a.	Operability	Yes
1.2	Ethernet	✓	n.a.	Operability	Yes
1.3	USB PC	✓	n.a.	Operability	Yes
1.4	USB 1	✓	n.a.	Operability	Yes
1.5	USB 2	✓	n.a.	Operability	Yes
1.6	USB Terminal	✓	n.a.	Operability	Yes
1.7	ErgoSens	✓	n.a.	Operability	Yes
1.8	LevelSens	✓	n.a.	Operability	Yes
1.9	CAN out	✓	n.a.	Operability	Yes
1.10	Aux	✓	n.a.	Operability	Yes
1.11	DryPro	✓	n.a.	Operability	Yes
1.12	SPR200	✓	n.a.	Operability	Yes
2	Final Performance Test	✓	n.a.	Operability	Yes
2.1	Water nD (20°C)	✓	1.3330	1.3330 +/- 0.0001	Yes
3	Endurance Test	✓	n.a.	Operability	Yes

n.a. Not applicable

Test passed

Yes

Delivered with

Cell SNR
Deviceboard Chip ID

MWA97906
2D539F1429000054

Test performed
Nänikon
Name

24.09.2019
P.Elcher

METTLER TOLEDO

TR-30474903-A
Page 1/1

ANEXO 5. Certificado de INACAL de laboratorio de calibración del refractómetro Mettler Toledo

Certificado

INACAL
Instituto Nacional
de Calidad
Acreditación

La Dirección de Acreditación del Instituto Nacional de Calidad – INACAL, en el marco de la Ley N° 30224, **OTORGA** el presente certificado de Renovación de la Acreditación a:

QSI PERÚ S.A.

Laboratorio de Calibración

En su sede ubicada en: Av. República de Panamá N° 2577, distrito de La Victoria, provincia de Lima y departamento de Lima.
Con base en la norma

NTP-ISO/IEC 17025:2017 Requisitos Generales para la Competencia de los Laboratorios de Ensayo y Calibración

Facultándolo a emitir Certificados de Calibración con Símbolo de Acreditación. En el alcance de la acreditación otorgada que se detalla en el DA-acr-06P-22F que forma parte integral del presente certificado llevando el mismo número del registro indicado líneas abajo.

Fecha de Renovación: 26 de febrero de 2021
Fecha de Vencimiento: 25 de febrero de 2025

Firmado digitalmente por RODRIGUEZ ALEGRIA Alejandra FAU
20600293015.pdf
Fecha: 2021-03-11 23:30:04
Motivo: Soy el Autor del Documento

ALEJANDRA RODRIGUEZ ALEGRIA
Directora, Dirección de Acreditación - INACAL

Fecha de emisión: 08 de marzo de 2021

Cédula N° : 082-2021-INACAL-DA
Contrato N° : 006-2021-INACAL-DA
Registro N° : LC - 021

El presente certificado tiene validez con su correspondiente Alcance de Acreditación y cédula de notificación, todo que el alcance puede estar sujeto a ampliaciones, reducciones, actualizaciones y suspensiones temporales. El alcance y vigencia debe confirmarse en la página web www.inacal.gob.pe/acreditacion/categorias/acreditacion al momento de hacer uso del presente certificado.

La Dirección de Acreditación del INACAL es firmante del Acuerdo de Reconocimiento Multilateral (MCA) de Inter American Accreditation Co-operation (IAAC) e International Accreditation Forum (IAF) y del Acuerdo de Reconocimiento Mútuo con la International Laboratory Accreditation Cooperation (ILAC).

DA-acr-06P-02MVer_02

ANEXO 6. Fotografías del desarrollo de la investigación

Figura 22

Variedad morada de yacón



Figura 23

Calibración del multiparámetro



Figura 24

Obtención del gráfico de calibración para pH

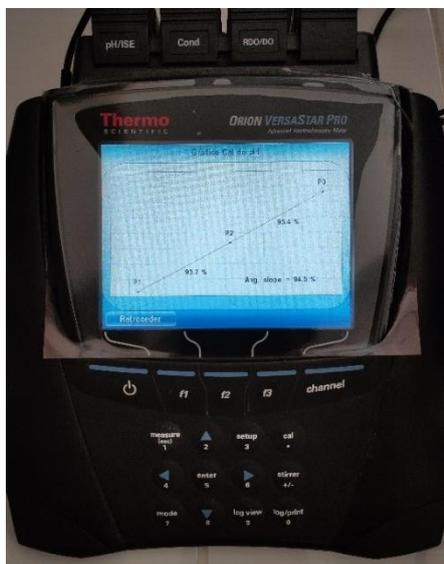


Figura 25

Medida de pH y conductividad del yacón



Figura 26

Trituración del yacón para medida preliminar de los °Brix



Figura 27

Medida de los grados Brix con un refractómetro portátil



Figura 28

Medida de los volúmenes de materia prima y solvente.



Figura 29

Armado del sistema de extracción



Figura 30

Armado del sistema de filtración



Figura 31

Filtración en caliente del extracto obtenido



Figura 32

Resultado de la filtración en caliente



Figura 33

Encendido y calibración del refractómetro digital



Figura 34

Lectura de los grados Brix y nD en el refractómetro Mettler Toledo R4



Figura 35

Lectura de datos de todas las corridas



Figura 36

Encendido y programación de la centrifugadora



Figura 37

Colocación de los tubos tipo falcon

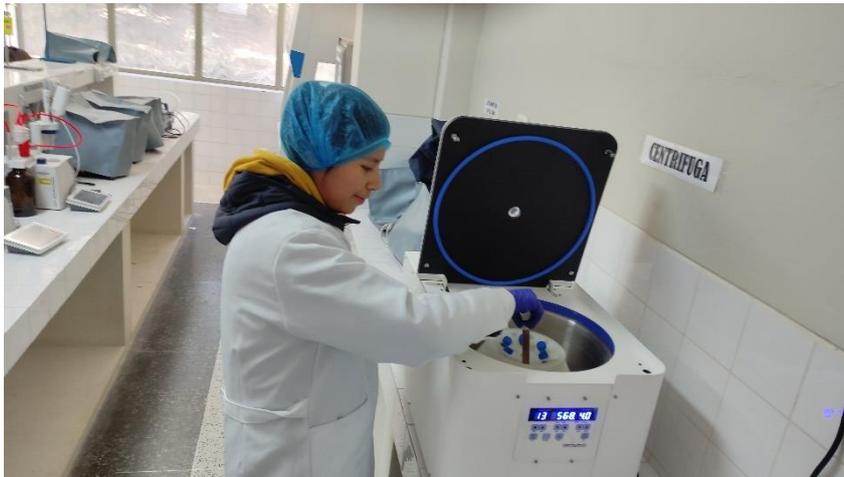


Figura 38

Precipitado de inulina luego de la centrifugación y precipitado luego de 24 horas



Figura 39

Acondicionamiento de placas para el secado



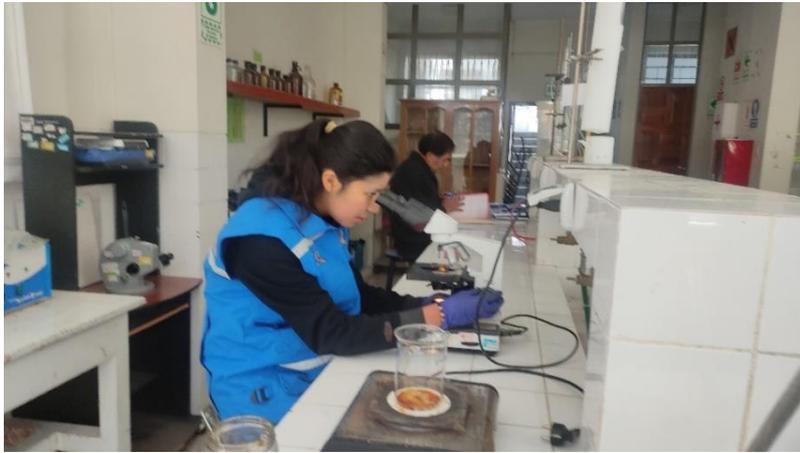
Figura 40

Distribución de la muestra concentrada en la placa



Figura 41

Caracterización morfológica de los cristales de inulina





DECLARACIÓN JURADA DE AUTENTICIDAD DE TESIS

Por el presente documento, Yo Mariela de la Merced Zolanch Huayta Farfán,
identificado con DNI 72406044 en mi condición de egresado de:

Escuela Profesional, Programa de Segunda Especialidad, Programa de Maestría o Doctorado
Ingeniería Química

informo que he elaborado el/la Tesis o Trabajo de Investigación denominada:
" Obtención de Inulina Cristalizada a partir del extracto de
yacón (Smallanthus sonchifolius) "

Es un tema original.

Declaro que el presente trabajo de tesis es elaborado por mi persona y **no existe plagio/copia** de ninguna naturaleza, en especial de otro documento de investigación (tesis, revista, texto, congreso, o similar) presentado por persona natural o jurídica alguna ante instituciones académicas, profesionales, de investigación o similares, en el país o en el extranjero.

Dejo constancia que las citas de otros autores han sido debidamente identificadas en el trabajo de investigación, por lo que no asumiré como tuyas las opiniones vertidas por terceros, ya sea de fuentes encontradas en medios escritos, digitales o Internet.

Asimismo, ratifico que soy plenamente consciente de todo el contenido de la tesis y asumo la responsabilidad de cualquier error u omisión en el documento, así como de las connotaciones éticas y legales involucradas.

En caso de incumplimiento de esta declaración, me someto a las disposiciones legales vigentes y a las sanciones correspondientes de igual forma me someto a las sanciones establecidas en las Directivas y otras normas internas, así como las que me alcancen del Código Civil y Normas Legales conexas por el incumplimiento del presente compromiso

Puno 12 de agosto del 2024

FIRMA (obligatoria)



Huella



AUTORIZACIÓN PARA EL DEPÓSITO DE TESIS O TRABAJO DE INVESTIGACIÓN EN EL REPOSITORIO INSTITUCIONAL

Por el presente documento, Yo Mariela de la Merced Zolanch Huayta Farfán,
identificado con DNI 72106044 en mi condición de egresado de:

Escuela Profesional, Programa de Segunda Especialidad, Programa de Maestría o Doctorado
Ingeniería Química

informo que he elaborado el/la Tesis o Trabajo de Investigación denominada:

“ Obtención de Inulina Cristalizada a partir del extracto de yacón (Smilanthus sonchifolius) ”

para la obtención de Grado, Título Profesional o Segunda Especialidad.

Por medio del presente documento, afirmo y garantizo ser el legítimo, único y exclusivo titular de todos los derechos de propiedad intelectual sobre los documentos arriba mencionados, las obras, los contenidos, los productos y/o las creaciones en general (en adelante, los “Contenidos”) que serán incluidos en el repositorio institucional de la Universidad Nacional del Altiplano de Puno.

También, doy seguridad de que los contenidos entregados se encuentran libres de toda contraseña, restricción o medida tecnológica de protección, con la finalidad de permitir que se puedan leer, descargar, reproducir, distribuir, imprimir, buscar y enlazar los textos completos, sin limitación alguna.

Autorizo a la Universidad Nacional del Altiplano de Puno a publicar los Contenidos en el Repositorio Institucional y, en consecuencia, en el Repositorio Nacional Digital de Ciencia, Tecnología e Innovación de Acceso Abierto, sobre la base de lo establecido en la Ley N° 30035, sus normas reglamentarias, modificatorias, sustitutorias y conexas, y de acuerdo con las políticas de acceso abierto que la Universidad aplique en relación con sus Repositorios Institucionales. Autorizo expresamente toda consulta y uso de los Contenidos, por parte de cualquier persona, por el tiempo de duración de los derechos patrimoniales de autor y derechos conexos, a título gratuito y a nivel mundial.

En consecuencia, la Universidad tendrá la posibilidad de divulgar y difundir los Contenidos, de manera total o parcial, sin limitación alguna y sin derecho a pago de contraprestación, remuneración ni regalía alguna a favor mío; en los medios, canales y plataformas que la Universidad y/o el Estado de la República del Perú determinen, a nivel mundial, sin restricción geográfica alguna y de manera indefinida, pudiendo crear y/o extraer los metadatos sobre los Contenidos, e incluir los Contenidos en los índices y buscadores que estimen necesarios para promover su difusión.

Autorizo que los Contenidos sean puestos a disposición del público a través de la siguiente licencia:

Creative Commons Reconocimiento-NoComercial-CompartirIgual 4.0 Internacional. Para ver una copia de esta licencia, visita: <https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>

En señal de conformidad, suscribo el presente documento.

Puno 12 de agosto del 2024

FIRMA (obligatoria)



Huella