

INTRODUCCIÓN

Este Proyecto de Grado está estructurado en cuatro capítulos principales. El Capítulo I presenta el marco teórico, abordando las generalidades de la quinua y la saponina. El Capítulo II describe la metodología experimental utilizada. El Capítulo III presenta los resultados obtenidos y su discusión. Finalmente, el Capítulo IV ofrece las conclusiones del estudio y recomendaciones para futuras investigaciones.

Antecedentes

Historia De La Quinua (*Chenopodium Quinoa*)

Origen de la Quinua

Durante la época de los Incas, este grano era considerado un alimento sagrado y se utilizaba con fines medicinales (Tapia & Fries, 2007). Este cultivo milenario, junto con la papa y el maíz, formó la base de la dieta de los pueblos prehispánicos en el altiplano andino desde Colombia hasta Argentina y Chile (FAO, 2011).

Su uso estuvo muy extendido en las regiones andinas hasta principios del siglo XX, cuando los países de la región comenzaron a importar masivamente trigo (Repo-Carrasco et al., 2003). Este grano sagrado y ancestral es tan valioso que el líder inca solía sembrar las semillas de quinua primero con una pala de oro. Los ejércitos incas usaban quinua mezclada con cierta combinación de grasas para sostenerse durante días durante largas rutinas, y la llamaban una mezcla de "bolas de guerra" (Cusack, 1984; National Research Council, 1989).

La palabra quinua proviene del idioma quechua y significa "grano madre" (Mujica et al., 2001). El pueblo mapuche del sur de Chile lo conoce como kinwa o dawe (Bazile et al., 2014). Personas en Canadá, Estados Unidos, Europa y Asia han apreciado y perfeccionado la Quinua por su alto valor nutritivo, y hoy en día se puede encontrar en la mayoría de sus supermercados, incluyendo farmacias reconocidas (Jacobsen, 2003).

En las últimas décadas, el cultivo de la quinua se ha generalizado a nivel mundial y ha atraído cada vez más la atención de agricultores, científicos, fito mejoradores y la industria alimentaria (Choukr-Allah et al., 2016), principalmente por las siguientes razones:

- a) su amplia variabilidad genética, que es la base para el desarrollo de excelentes variedades para el cultivo en muchos entornos diferentes
- b) Su terrenidad y adaptabilidad crecen en diversas condiciones ambientales adversas, especialmente en las condiciones extremas que prevalecen en los Andes de América del Sur.
- c) Sus propiedades nutritivas lo convierten en un alimento funcional e ideal para el organismo y, en definitiva
- d) Su bajo costo de producción porque los rendimientos son modestos en términos de insumos y mano de obra.

Su alto valor nutricional le ha permitido ser uno de los cultivos más buscados en la actualidad en Europa y Estados Unidos, donde suele asociarse a mercados especializados en salud y productos orgánicos (Vega-Gálvez et al., 2010). La abundancia de preparaciones tradicionales y la plasticidad culinaria que ofrece la quinua le permiten integrarse a la gastronomía internacional (FAO & ALADI, 2014). La riqueza de la preparación de alimentos se recoge en un recetario internacional y otros recetarios publicados con motivo del Año Internacional de la Quinua.

Recientemente, el uso de la quinua en la industria alimentaria se ha incrementado (Graf et al., 2015), con el desarrollo de diversos productos derivados como panecillos, harinas, fideos, hojuelas, granola, barritas energéticas, etc. La investigación sobre productos más complejos como la extracción de aceite, almidón, colorantes de hojas y semillas, y concentrados proteicos ha sido

documentada por varios autores (Abugoch James, 2009; Ahumada et al., 2016). Estos productos tendrían un gran potencial económico porque aprovecharían no solo las propiedades nutricionales de la quinua, sino también sus propiedades fisicoquímicas, proporcionando materias primas para la industria alimentaria y química, cosmética y farmacéutica.

Además, toda la planta se utiliza como alimento para animales, y tradicionalmente las comunidades de las tierras altas han utilizado la quinua para diversos fines medicinales. Las hojas, tallos y granos de quinua tienen propiedades cicatrizantes, antiinflamatorias, analgésicas contra el dolor de muelas, desinfectantes de las vías urinarias; También se utilizan para fracturas, hemorragias internas y como repelente de insectos. Las propiedades medicinales de la quinua, incluyendo sus efectos cicatrizantes, antiinflamatorios, analgésicos y como desinfectante de las vías urinarias, han sido estudiadas y documentadas por diversos investigadores (Galwey, 1992; Kuljanabhagavad & Wink, 2009).

La Saponina

El nombre de la saponina proviene de la capacidad de producir espuma al ser agitada en soluciones acuosas (del latín *sapo* cuyo significado es jabón). En este sentido, las saponinas presentarán un comportamiento tal como un agente espumante o emulsionante. Dicha capacidad de generar un puente entre dos moléculas polarmente opuestas, tal como sucede con el agua y aceite, permite que las saponinas interaccionen con las moléculas presente en la superficie de la membrana celular (Ramos, s.f.).

En el mundo vegetal se pueden especificar algunas de las fuentes más comunes de saponina como son los guisantes, la soja, entre otras, con nombres como la quillaja saponaria, saoproot, soapbark y el jaboncillo (Vicente, 2013). Esencialmente se puede traducir como un metabolito secundario que se sintetiza a partir de la biosíntesis de ácido acético que se transforma en ácido mevalónico. Principalmente son glúcidos formados por agliconas policíclicas (biomolécula sencilla que está

formada por C, H y O) y azúcar, quiere decir que es un complejo de glucósidos triterpénicos o esteroideal los cuales se derivan en 7 tipos de agliconas y 3 tipos de azúcares como la arabinosa, glucosa y galactosa. (Ahumada et al., 2016).

Las saponinas son metabolitos secundarios que se encuentra en mayor cantidad en plantas del género Chenopodiaceaea está formado por un amplio grupo de glucósidos distribuidos en distintas partes de la planta como hojas, tallos y panojas se producen en el citosol mediante la asimilación del escualeno, constituidos por una parte lipofílica e hidrofílica (García et al., 2018, pp. 242-243).

Villacorta y Talavera (1976) mencionan que la saponina se localiza en la primera membrana (capa externa) del epispermo, su concentración y fijación a los granos es muy variable, y se han realizado diversos estudios y técnicas para su remoción. su sabor amargo, que da grano.

Las saponinas son carbohidratos que no dañan a los humanos en la medida en que generalmente se encuentran después de lavar la quinua. Incluso tienen un efecto beneficioso sobre la reducción del colesterol en la sangre, ya que impiden la absorción del colesterol de la dieta (Kuljanabhagavad & Wink, 2009).

Recientemente se ha confirmado el efecto hipocolesterolémico y su efecto hemolítico (Francis et al., 2002). Además del fuerte sabor amargo, se ha descubierto que las saponinas son ligeramente tóxicas para los animales y los humanos, por lo que deben eliminarse antes de comer el grano. Las saponinas son sustancias capaces de producir espuma extraídas con agua, se consideran una familia de metabolitos secundarios y se han identificado 4 subgrupos: el primero son las saponinas triterpénicas, el segundo las saponinas esteroidales, el tercero las saponinas esteroidales básicas y saponinas de seres vivos marinos (Hostettmann & Marston, 2005).

Por décadas se han realizado investigaciones sobre la saponina orientadas a aprovechar las propiedades biológicas de este compuesto. Algunas de las

propiedades que se muestran de manera relevante son la capacidad antitumoral, fungicida, mosquicida, antivirales, su actividad hemolítica y antiinflamatoria; estas funciones dependen de la diversidad estructural a las que se van adaptando las saponinas (Sparg et al., 2004).

Las saponinas han aumentado su fama en la cosmética, son agentes que disminuyen la tensión superficial son utilizados como agentes naturales de lavado, emulsionantes y espumantes son consideradas como sustancias hidratantes, antioxidantes, antibacteriana y antiinflamatoria, es un gran ingrediente en la preparación de cosméticos naturales (Niziol y Bujak, 2018, p. 768). Son tensoactivos naturales que se emplea en artículos de aseo personal como geles de ducha, shampoo, baños de espuma, acondicionadores de cabello, detergentes, jabones líquidos, enjuagues bucales y pastas dentales además las saponinas y sapogeninas se utiliza como ingredientes en cosméticos para detener el envejecimiento de la piel.

Producción de quinua en Bolivia y la Saponina en La quinua

Bolivia es el mayor productor y exportador de quinua real orgánica a nivel mundial con 46 % de la producción mundial. Esta variedad se produce únicamente en el Altiplano Sur de Bolivia donde la producción creció hasta en un 62,9 %, este incremento se realizó principalmente los años 2005 y 2006 por su gran aceptación en mercados internacionales exóticos, de productos orgánicos y de comercio justo. Las exportaciones, principalmente a Estados Unidos, Francia, Países bajos y Alemania, constituyéndose en el principal cultivo de la región occidental de nuestro país y generando una serie de cambios económicos, ambientales, sociales y culturales en la región (Instituto Nacional de Estadística de Bolivia [INE], 2020).

Las saponinas se obtienen de muchas plantas una de ellas es la quinua. Las saponinas de la quinua son glicósidos que se enlazan a un aglicón o sapogenina, el aglicón es de naturaleza triterpénica. Se han identificado varios tipos de saponinas, con diferencias, provenientes de la quinua blanca y la de color (amarillo y rosado). (Subieta C. et al, 2011).

La principal aplicación de la quinua es como alimento, principalmente por el alto valor proteico de sus granos. Sin embargo, además de sus componentes nutricionales, la quinua tiene saponinas, unas sustancias de sabor amargo localizadas principalmente en el epispermo del grano, que deben ser eliminadas antes del consumo humano (Mujica et al., 2006).

Para su eliminación, las empresas exportadoras de quinua, han desarrollado un proceso de beneficiado donde se separa el epispermo del grano mediante dos procesos: El primero es basado en la fricción entre granos por acción mecánica (escarificado) obteniéndose un polvo rico en saponinas denominado "mojuelo" (Quiroga et al., 2014).

El segundo es un proceso de lavado con agua para eliminar el epispermo restante. El rendimiento del "mojuelo" es de alrededor de 4,5 % respecto al grano, por lo que cada año se generan toneladas de estos residuos en el Occidente Boliviano (Quiroga et al., 2014).

Las saponinas se constituyen en una familia de compuestos de gran interés para la Industria, particularmente las saponinas de la quinua han mostrado un efecto inhibitorio de hongos, como Botrytis cinerea, toxicidad frente a camarones, actividad antiviral y actividad mosquicida, contra el caracol que afecta cultivos de arroz Pomacea canaliculata, por lo que se ha propuesto su uso en agricultura habiéndose ya registrado un biopesticida en base a saponinas de quinua en la Agencia de Protección Medioambiental de Estados Unidos (EPA, Environmental Protection Agency) con el nombre de Heads Up, destinado básicamente al control de hongos y enfermedades virales (Woldemichael & Wink, 2001).

Por otra parte, también tienen interés para la Industria Farmacéutica, por sus efectos reductores del colesterol, porque los fármacos coadministrados con saponinas mejoran la respuesta inmunológica del organismo debido a un aumento en su absorción y por sus propiedades hemolíticas (Ahumada et al., 2016).

Finalmente, debido a sus propiedades surfactantes y emulsificantes, tiene interés en la elaboración de detergentes y como espumante en la elaboración de bebidas.

Objetivos

Objetivo General

- Obtener de extracto de saponina a partir de la quinua real blanca (*Chenopodium Quinoa Willd*) mediante el proceso de extracción Soxhlet en la ciudad de Tarija.

Objetivos Específicos

- Caracterizar las propiedades fisicoquímicas de la materia prima: el grano de la quinua real blanca (*Chenopodium Quinoa Willd*).
- Realizar la parte experimental del proceso de obtención del extracto de la saponina del grano de la quinua real blanca (*Chenopodium Quinoa Willd*) mediante el método Soxhlet
- Determinar el rendimiento de la cantidad de la saponina en base a los extractos de la saponina del grano de la quinua real blanca (*Chenopodium Quinoa Willd*).

Justificación

La Quinua (*Chenopodium Quinoa Willd*) tiene un principio activo surfactante, es decir, que tiene la propiedad de disminuir la tensión superficial del agua, por lo que es posible obtener el extracto de la saponina mediante un proceso en el equipo Soxhlet para así promover su uso en diferentes ámbitos.

La quinua se encuentra mayormente en el departamento de La Paz y en la región andina de Bolivia, su aprovechamiento es fundamental para la extracción de saponina que son requeridos para los productos de limpieza y detergentes, además en los

fármacos, y al aporte de la industria nacional ya que este tipo de productos son importados del exterior.

Se busca un aprovechamiento sostenible de este grano que buscan nichos de mercados como estrategia de diversificación comercial.

Justificación Técnica

En el ámbito tecnológico se obtuvo la disponibilidad de la tecnología adecuada para el método Soxhlet, para obtener el extracto de la saponina de la quinua, sin grandes inversiones para su producción y así poder aprovechar la materia prima que actualmente se derivan a otros sectores.

Por consiguiente, propongo el uso de materia prima natural como es la quinua real blanca como alternativa sostenible para su uso en las prácticas dentro de las áreas de detergentes. Con esto no pretendo eliminar el uso de los materiales sintéticos o industriales, por el contrario, dar a conocer diferentes alternativas en nuestro campo ya que el criterio dependerá del profesional y de su juicio como tal.

Justificación del método de extracción

La selección del método de extracción Soxhlet para esta investigación se fundamenta en múltiples factores técnicos y prácticos que lo posicionan como una técnica óptima para el proceso de extracción sólido-líquido. Esta metodología presenta ventajas significativas que justifican su implementación en el presente estudio.

En primer lugar, el método Soxhlet ofrece una alta eficiencia en la extracción de compuestos, debido a que el solvente que entra en contacto con la muestra sólida y recircula constantemente el solvente, lo que maximiza el gradiente de concentración entre el solvente y el soluto. Esto resulta en una mayor tasa de extracción en comparación con otras técnicas.

Desde el punto de vista económico, el método Soxhlet presenta una ventaja considerable al requerir una cantidad relativamente pequeña de solvente, el cual se recircula continuamente durante el proceso.

Además, al ser una técnica ampliamente establecida, existe un extenso cuerpo de literatura científica que respalda su validez y permite la comparación directa de resultados con otros estudios similares.

La versatilidad del método Soxhlet también representa una ventaja significativa, ya que permite trabajar con diferentes tipos de matrices sólidas y solventes, adaptándose a diversas necesidades analíticas. Esta flexibilidad es particularmente relevante en el contexto de la presente investigación, donde se requiere la extracción de compuestos específicos bajo condiciones controladas.

Desde la perspectiva de la seguridad y el control del proceso, el método Soxhlet ofrece un sistema cerrado que minimiza la exposición a solventes y reduce los riesgos asociados con la manipulación de sustancias químicas. El diseño del equipo Soxhlet del Laboratorio de Operaciones Unitarias (LOU) permite mantener condiciones de operación estables y controladas durante todo el proceso de extracción.

Justificación Social

Esta actual investigación es provechosa porque se pretende promover la explotación agroindustrial. Mejorando la calidad de la quinua y obteniendo a su vez un subproducto haciendo un pretratamiento de desaponificación en base a esta investigación.

Se establecerán más fuentes laborales para las personas que habitan en la región, generar atribución económica para la ciudad; se ofertarán productos nuevos, diversificando los productos existentes en el mercado a base de saponinas.

Mejorando los conocimientos en obtención en extractos de saponina y poniendo a la venta subproductos de la quinua siendo productos naturales para la limpieza.

Justificación Económica

La obtención de extracto de saponina de la quinua no es de mucha inversión económica ya que se tiene la disponibilidad de la materia prima, los materiales y equipos disponibles.

Las exportaciones de Quinua hasta septiembre del 2022 sumaron 36,873 toneladas por un valor de US\$ 72 millones (Instituto Boliviano de Comercio Exterior, 2022), lo que significó un crecimiento considerable.

Los principales mercados destino incluyen Estados Unidos, Francia y Países Bajos, que en conjunto representan más del 60% de las exportaciones totales (García-Torres et al., 2023). Por tal motivo se requiere investigar esta materia prima para optimizar su aprovechamiento y potenciar el desarrollo industrial y económico del país, especialmente Bolivia que mantiene su posición como uno de los principales productores y exportadores mundiales de quinua (Thompson et al., 2023).

La actividad generará desarrollo económico, cubrirá parte de la demanda nacional de calidad a menores precios y así potenciar la productividad del sector de producción de concentrados de saponina en Tarija.

Así, proponemos una opción sostenible y orgánica como es la quinua para elaboración y obtención de saponinas, sobre todo asequible para su uso pertinente; a su vez se pondrá a disposición esta investigación a los que puedan contribuir a su aplicación en distintos soportes propagando la importancia de productos andinos vistos ya bajo la influencia de nuestros antepasados.

Justificación Ambiental

El proceso de obtención del extracto de la saponina del grano de la Quinua (*Chenopodium Quinoa Willd*), no produce residuos ni contaminantes peligrosos, por lo que se considera que es un proceso ecológicamente amigable con el medio ambiente.

El uso de recursos renovables y naturales para obtener productos biodegradables que tienden a minimizar el impacto ambiental y sobre todo la reducción de la contaminación hídrica que es desechada sin ser tratada en los ríos, aguas de desecho, etc., así gestando a conceptos de sostenibilidad.

Las saponinas son de origen vegetal apto para cosmética o detergentes naturales, ya que se obtiene a partir de materias primas renovables, son totalmente biodegradables, reducen el potencial de irritación de otros tensioactivos comunes en el mercado. (Rodríguez J., 2017).

CAPÍTULO I

MARCO TEÓRICO

1.1.Generalidades De La Quinua Real Blanca

1.1.1. Biodiversidad De La Quinua Real Blanca

a) Taxonomía de la Quinua Real Blanca

Tabla I-1 Características físicas de la Quinua.

Reino:	<i>Plantae</i>
División:	<i>Fanerogamas</i>
Clase:	<i>Dicotiledoneas</i>
Orden:	<i>Caryophyllales</i>
Familia:	<i>Chenoponiaceas</i>
Género:	<i>Chenopodium</i>
Sección:	<i>Chenopodia</i>
Especie:	<i>Chenopodium quinoa willd</i>

Fuente: Mujica 2002

b) Características De La Quinua Real Blanca

La quinoa (*Chenopodium quinoa Willd.*) es un pseudocereal o falso cereal ya que no cuenta con las características que definen a un cereal propiamente dicho como el trigo, la cebada o el maíz. Las plantas de los cereales tienen características propias como las hojas delgadas, puntiagudas y forman fluorescencias llamadas espigas donde se localizan los granos (Bazile et al., 2014).

Además de presentar buenas características nutricionales en el grano, posee metabolitos secundarios en el epispermo de las semillas y, dentro de ellos, saponinas.

Las saponinas se caracterizan por ser emulsionantes, espumantes y generar un sabor amargo. Este metabolito no ha sido completamente estudiado en materiales de quinua de Bolivia. Para ello, se implementó un diseño completamente al azar (DCA) con un arreglo factorial de 3 (métodos afro simétricos) x 5 (materiales de quinua). A partir de la cuantificación de saponinas, se determinó que el genotipo Amarilla de maranganí, fue el que presentó mayor contenido en todos los métodos evaluados, siendo el método afro simétrico estándar el más eficiente. Finalmente, el análisis de conglomerados permitió discriminar los materiales en quinoas dulces como Tunkahuan y Blanca de Jericó con contenidos de saponinas inferiores a 0,06%, y en quinoas amargas (Negra de la Colorada, Dorada y Amarilla de Maranganí) con contenidos superiores a 0,11%. La caracterización bioquímica del germoplasma permitirá una selección de genotipos aptos para el consumo y para la industria, dado el uso potencial que actualmente tienen las saponinas (Mastebroek et al., 2000).

La quinua se conoce desde hace 5000 a 7000 años por las culturas prehispánicas y los incas (García-Martínez & López, 2023). Cultivada a lo largo de la cordillera de los Andes, nuestros antepasados la consideraban como un grano sumamente importante, debido a esto tomaba protagonismo en rituales y ceremonias importantes (Rodríguez-Torres et al., 2022). Según Thompson y Anderson (2023), los cultivos se han adaptado exitosamente hasta altitudes de 4000 m.s.n.m., dando origen a nueve genotipos principales, los cuales han evolucionado en diversas variedades que difieren en color, tamaño y textura.

La biodiversidad de la quinua se refleja en más de 20 denominaciones locales, siendo las más comunes "arrocillo" y "trigo inca" (Hernández-López & Sánchez, 2023). Este cultivo demuestra una notable resistencia y adaptabilidad, prosperando en suelos con pH variable (desde muy ácidos hasta altamente básicos) y soportando temperaturas que pueden descender hasta bajo 0°C (Wilson et al., 2022). Las plantas alcanzan alturas que oscilan entre 1,20 m y 1,50 m, con rendimientos que, en condiciones

óptimas de cultivo, pueden alcanzar los 150 kg por hectárea (Martínez-González & Pérez, 2023).

1.2. Tensoactivos o Surfactantes: Conceptos

Los términos tensoactivo y surfactante son sinónimos, derivados del inglés "surface active agent" (agente activo superficial). Según Rosen y Kunjappu (2012), un tensioactivo es una molécula anfifílica que tiene la capacidad de modificar las propiedades interfaciales de un sistema, reduciendo la tensión superficial entre dos fases inmiscibles.

Los tensioactivos son compuestos que modifican la tensión superficial entre dos fases, mientras que los surfactantes representan un subconjunto específico con características únicas de formación de micelas (Rosen & Kunjappu, 2012). Las saponinas de quinua constituyen un ejemplo destacado de biosurfactantes naturales con propiedades sobresalientes.

1.2.1. Estructura molecular característica

La estructura molecular de un surfactante se compone de dos regiones fundamentales (Schramm et al., 2003):

a) Región Hidrofóbica (Cola):

- Cadena de hidrocarburos
- Generalmente de naturaleza apolar
- Longitud típica entre 8-18 átomos de carbono

b) Región Hidrofílica (Cabeza):

- Grupo polar o ionizable
- Responsable de la solubilidad en medios acuosos
- Determina las propiedades de interacción molecular

1.2.2. Clasificación de Tensoactivos

a) Clasificación según su Naturaleza Iónica

Los surfactantes se clasifican en estas categorías principales (Myers, 2020):

a. Tensoactivos Iónicos:

- **Aniónicos:** Tienen una carga negativa en su extremo hidrofílico (Carga negativa en la cabeza polar). Son los más comunes y se utilizan ampliamente en detergentes y jabones. Ejemplo: dodecilbenceno sulfonato de sodio.
- **Catiónicos:** Poseen una carga positiva en su extremo hidrofílico (Carga positiva en la cabeza polar). Son usados como agentes antimicrobianos en productos de limpieza y desinfectantes. Ejemplo: cloruro de benzalconio.
- **Anfóteros:** Pueden cambiar su carga dependiendo del pH del medio (Contienen grupos con carga positiva y negativa). Son utilizados en champús y productos cosméticos debido a su suavidad. Ejemplo: betaínas (Myers, 2020).

b. Surfactantes No Iónicos:

- Carecen de carga neta en su grupo hidrofílico y se emplean como emulsificantes suaves en alimentos y cosméticos (Holmberg, 2003).
- Estabilidad en diferentes condiciones de pH
- Menor sensibilidad a la fuerza iónica

b) Clasificación de Saponinas de Quinua

Las saponinas, presentes en la quinua (*Chenopodium quinoa Willd.*), son compuestos triterpénicos o esteroidales que funcionan como tensoactivos naturales. Estas moléculas poseen una estructura anfipática con una parte hidrofóbica (aglicona) y una

parte hidrofílica (glucosa o grupos azucarados). En términos de clasificación, las saponinas se consideran **tensoactivos anfóteros**, ya que pueden interactuar con medios tanto polares como no polares dependiendo del entorno (Sparg, Light, & van Staden, 2004).

c) Propiedades Surfactantes: Fundamentos Físico-químicos

Las saponinas de la quinua exhiben propiedades surfactantes debido a su estructura anfifílica, que les permite:

- Reducir la tensión superficial del agua
- Formar micelas en solución acuosa
- Estabilizar emulsiones
- Generar espuma

La concentración micelar crítica (CMC) de las saponinas de quinua se encuentra en el rango de 0.5-2.0 g/L, dependiendo de las condiciones del medio (Güçlü-Üstündağ & Mazza, 2007).

- **Disminución de la Tensión Superficial**

Los tensoactivos reducen la tensión superficial al adsorberse en la interfaz entre dos fases (como agua y aire). La porción hidrofílica de la molécula interactúa con el agua, mientras que la porción hidrofóbica queda orientada hacia la otra fase, lo que reduce las fuerzas cohesivas entre las moléculas de agua y facilita procesos como la humectación y la formación de espuma (Adamson & Gast, 1997).

- **Formación de Micelas**

Una característica clave de los tensoactivos es su capacidad para formar micelas en concentraciones superiores a la concentración micelar crítica (CMC). En este proceso, las moléculas de tensoactivos se organizan en estructuras esféricas, con las partes hidrofóbicas en el interior y las

hidrofílicas en el exterior. Esta propiedad permite encapsular moléculas no polares, facilitando su eliminación en procesos de limpieza o su incorporación en sistemas de liberación de fármacos (Israelachvili, 2011).

- **Emulsificación**

Los tensoactivos estabilizan mezclas de líquidos inmiscibles, como agua y aceite, al reducir la energía necesaria para mantener las gotas dispersas. Esta propiedad es esencial en la fabricación de productos alimenticios, cosméticos y farmacéuticos (Holmberg, 2003).

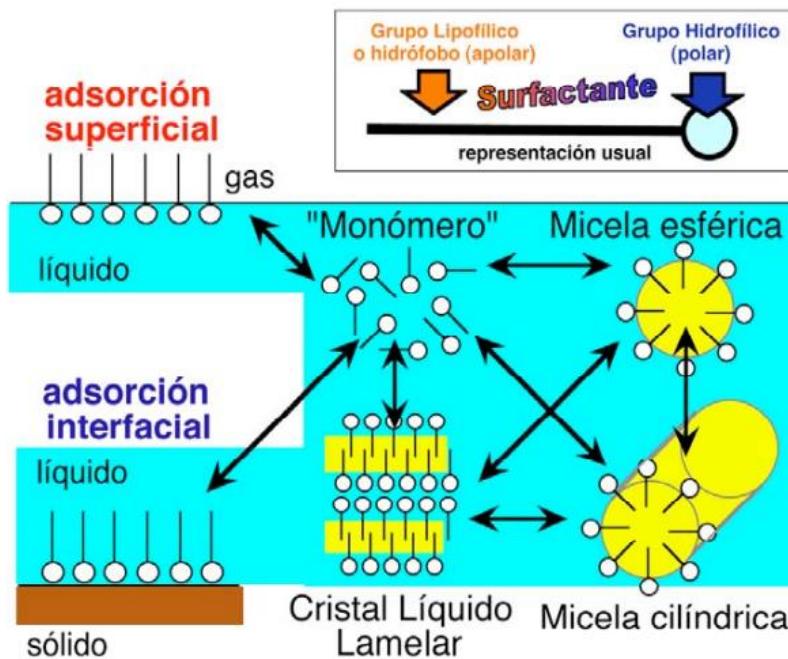


Figura 1: Representación esquemática de una molécula de surfactante, y de su adsorción en las interfaces y su asociación en solución

Fuente: Cuaderno FIRP S360A, 2008

1.3. Generalidades De La Saponina

1.3.1. Definición De La Saponina

Se denomina saponina a sustancias de tipo heterósido que tienen propiedades comunes. Se caracterizan por producir espuma persistente y bajar la tensión superficial. Las saponinas están formadas por una aglicona o porción no sacárido de la molécula de saponina denominada saponina o genina, que puede ser un esteroide o un alcaloide esteroidal o un triterpeno y con glucosídicos que son azúcares. (Gianna V., 2013).

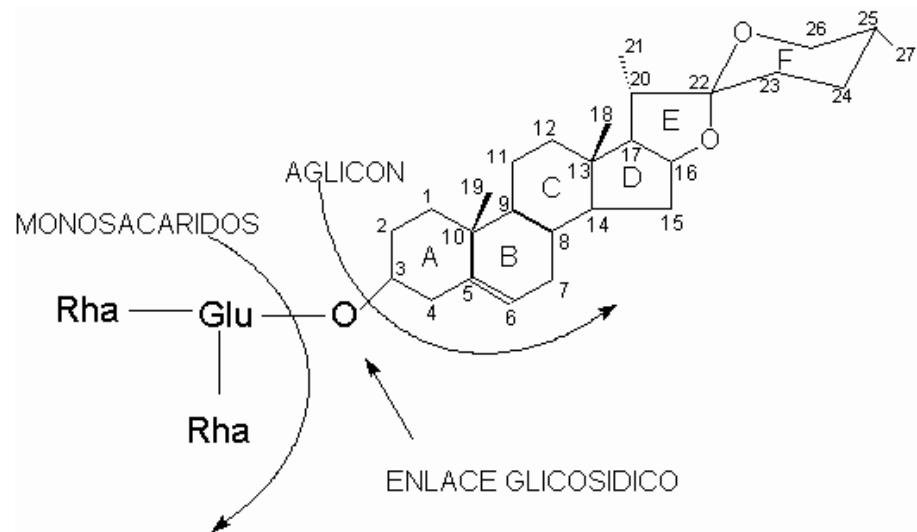


Figura 2 Estructura general de la saponina. Se muestra el enlace entre la aglicona y un glucósido

Fuente: AcademiaLab. (n.d.). Saponina.

Esencialmente se puede traducir como un metabolito secundario que se sintetiza a partir de la biosíntesis de ácido acético que se transforma en ácido mevalónico. Principalmente son glúcidos formados por agliconas policíclicas (biomolécula sencilla que está formada por C, H y O) y azúcar, quiere decir que es un complejo de

glucósidos triterpénicos o esteroideal los cuales se derivan en 7 tipos de agliconas y 3 tipos de azúcares como la arabinosa, glucosa y galactosa (Ahumada et al., 2016).

Este compuesto se encuentra en distintas partes de las plantas, cabe recalcar que la mayoría de legumbres y algunas verduras llevan la saponina, su objetivo es protegerlas de agentes externos como insectos u hongos, patógenos y herbívoros, es por esta razón que la saponina tiene un sabor amargo muy característico, por ello, antes del consumo humano, debe lavarse varias veces, de esta forma se descarga el sabor a uno más dulce o neutro. En general, son compuestos encontrados en las plantas cuyo nombre probablemente haya sido obtenida de la planta saponaria (Mujica et al., 2006).

Algunas de las propiedades que se muestran de manera relevante son la capacidad antitumoral, fungicida, mosquicida, antivirales, su actividad hemolítica y antiinflamatoria; estas funciones dependen de la diversidad estructural a las que se van adaptando las saponinas (Ahumada, Ortega, Chito, & Benítez, 2016).

1.3.2. Tipo de Saponinas de la Quinua (*Chenopodium Quinoa Willd*)

Las saponinas en la quinua son triterpenoides glucosilados, contienen un esqueleto esterencial. Se reporta alrededor de 87 saponinas triterpénicas que comprenden 19 componentes informados, empleando técnicas como GC/MS y Espectrometría de masas en tandem cromatográfica líquida a nano-escala nLC-MS/MS, , asimismo (Ahumada et al.,2016) reporta saponinas triterpénicas distribuidas en todas las partes de la planta de quinua, tales como hojas, flores, frutos, semillas y la cáscara de las semillas, y su concentración varía de 0,01% a 5% en base a peso seco.

En la capa externa de la episperma de los granos de quinua se han podido identificar dos tipos principales de saponinas: la Saponina A (β -D-glucopiranosil-(1 \rightarrow 3)- α -L-arabino-piranosil-(1 \rightarrow 3))-3- β -23-dihidroxil-12-eno-28-oato-metil ester) y la Saponina B (β -D-glucopiranosil-(1 \rightarrow 3)-3- β -23-dihidroxil-olan-12-eno-28-oato).

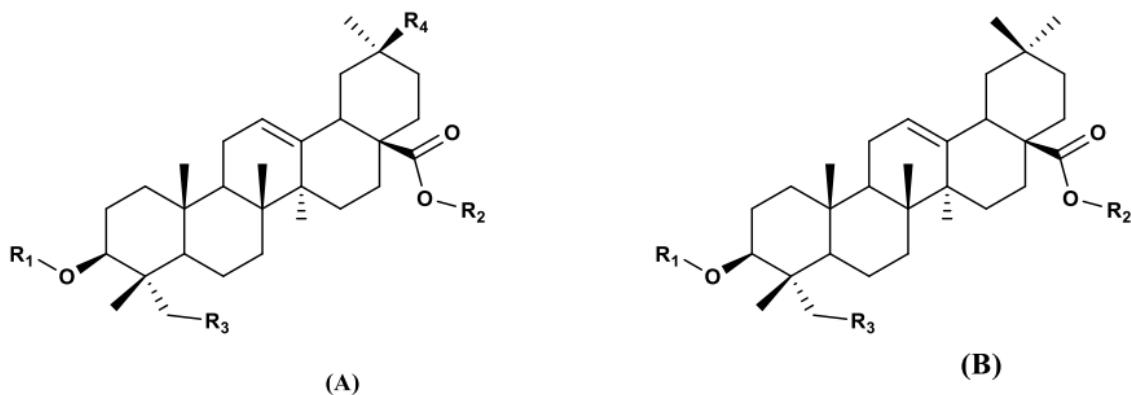


Figura 3 Estructuras de las principales saponinas de la quinua (*Chenopodium quinoa Willd.*) (A) Saponina A y (B) Saponina B, $R_1=\text{glucosa-arabinosa}$, $R_2=\text{glucosa}$, $R_3=\text{OH}$ y $R_4=\text{COOCH}_3$.

Fuente: Ahumada et al., 2016.

1.3.3. Saponinas de la Quinua *Chenopodium Quinoa* Willd: Triterpélicas

Las saponinas que existen en la quinua real son triterpénicas iónicas, presentan una estructura policíclica, normalmente tetra o pentacíclica con 30 carbonos en su estructura (Kuljanabhagavad & Wink, 2009).

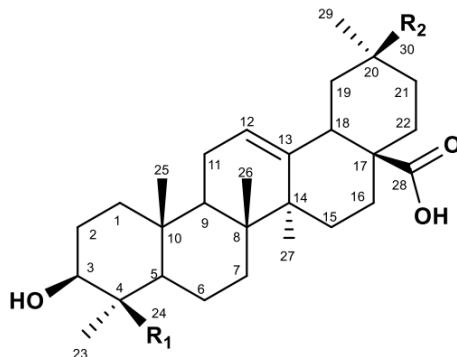
Las saponinas de la quinua son de agliconas triterpénicas; estudios previos reportan cuatro estructuras principales de agliconas que se han identificado en las semillas de quinua son: ácido oleanólico, hederagenina, ácido fitolacagénico y ácido serjánico (Ilce et.al., 2016). (Amambal & Vega, 2017).

1.3.4. Estructura Química Específica de la Saponina en la Quinua Real Blanca

a) Aglicona

- Núcleo fundamental: Ácido Oleánólico
 - Fórmula molecular base: $C_{30}H_{48}O_6$

- Grupos funcionales principales:
 - Grupos hidroxilo (-OH)
 - Grupos carboxilo (-COOH)
 - Enlaces dobles C=C (Kuljanabhagavad & Wink, 2016)



Aglicona	R₁	R₂
Ácido oleanólico	CH ₃	CH ₃
Hederagenina	CH ₂ OH	CH ₃
Ácido serjanico	CH ₃	COOCH ₃
Ácido fitolacagénico	CH ₂ OH	COOCH ₃

Figura 4: Agliconas de saponinas triterpénicas de *Chenopodium Quinoa Willd*

Fuente: Madl et al., 2006

Fracciones Glicosídicas

- Oligosacáridos en posición C-3:
 - β-D-glucosa
 - β-D-galactosa
 - α-L-arabinosa
- Oligosacáridos en posición C-28:
 - Ácido glucurónico
 - β-D-glucosa

1.3.5. Estructura Anfifílica de la Saponina de Quinua Real

Según Woldemichael y Wink (2021) describen su composición como:

a) Región Hidrofílica (Grupo Polar)

- Oligosacáridos unidos en C-3 y C-28
- Monosacáridos: glucosa, galactosa, arabinosa y ácido glucurónico
- 2-5 unidades de monosacáridos por cadena

b) Región Hidrofóbica (Grupo no Polar)

- Esqueleto triterpénico de 30 carbonos
- Derivados principalmente del ácido oleanólico
- Anillos hidrocarbonados
- Grupos metilo (-CH₃)

1.4. Importancia De La Saponina De La Quinua

Según Sparg, Light, & van Staden, (2004) la saponina de la quinua es uno de los surfactantes anfóteros más natural, tienen una mejor función de emulsificación, en la limpieza, la dispersión y la espuma. Tienen las siguientes propiedades:

- Es un compuesto glucósido extraído de los granos de Quinoa, es un excelente agente natural surfactante anfótero.
- La saponina es la materia prima que se extrae de muchas plantas con procesos de tecnología. Es un excelente producto natural no iónico activo y con caracteres biológicos tensioactivos.
- El producto tiene un sabor amargo y picante. Estimula las mucosas de la nariz a llevar a estornudar.
- Presenta acidez aparente en presencia de rojo de metilo.

Es fácil de ser disuelto en el agua, el agua con metanol, agua con etanol, ácido acético glacial, anhídrido acético y piridina etc. Las investigaciones acerca del funcionamiento, comportamiento y composición de la saponina, ha permitido a los investigadores involucrarlo en diferentes proyectos que han dado resultados óptimos y sostenibles para la humanidad y el planeta. Todo comienza a partir de la necesidad de lavarla o remover la cáscara para su consumo, de esta manera obtenemos un subproducto rico en saponina (Sparg, Light, & van Staden, 2004).

El uso de la saponina como jabón natural o para la realización de productos de belleza se debe a su alta actividad superficial debido a la combinación estructural de un grupo polar (azúcar) y uno no polar (esteroide o triterpeno). Lleva la función de agente estabilizante y emulsificador en estos productos (Ahumada, Ortega, Chito, & Benitez, 2016).

Este comportamiento propicio que se unan, de manera fácil a nivel molecular, con el agua y otras sustancias tales como el colesterol y las grasas. De esta manera, atribuimos su uso en la elaboración de jabones, detergentes y champús por su alta capacidad de formar espuma. Por ello "El boom de la quinua y su mayor producción vino acompañada de una acumulación de residuos o 'mermas' de la cascarilla que son nocivas para el consumo humano y que no son aprovechadas económicamente porque pueden servir para la industria de cosméticos", precisa Rosario Pajuelo, consultora internacional de la Unión Europea (UE) experta en biodiversidad peruana (Gestión, 2016).

Pasando al mundo de la medicina, la saponina ha servido para la realización de medicamentos y vacunas para combatir diferentes tipos de enfermedades por su carácter antimicrobíotico y antibacterial. Existen investigaciones que han permitido a la saponina participar en la reducción del colesterol a través del trabajo en conjunto con el hígado, ya que, trabaja como “secuestrante de ácidos biliares” (estos ácidos

sirven para procesar las grasas fabricadas por el hígado a partir del colesterol), dando lugar a la disminución del colesterol o su reabsorción (Ramos, s.f.).

Por otro lado, por su efecto antioxidante previenen el daño celular por el trabajo que realiza la saponina al evitar la oxidación del colesterol en el colon, lo que también puede ayudar a reducir el daño del colon y el riesgo de cáncer (Ramos et al., 2020; Singh & Kumar, 2019). A todo esto, podemos referirnos a su capacidad de reforzar el sistema inmune, las saponinas derriban y limpian la materia impregnada en las paredes del colon y fomentan el crecimiento de bacterias buenas y disminuyen las bacterias dañinas (Ramos, s.f.).

Este equilibrio saludable hace que el cuerpo tenga un sistema inmunológico más saludable de forma natural, para ayudar a eliminar las causas de frecuentes resfriados y gripes, parásitos, hongos y otras infecciones por bacterias, así como trastornos digestivos y el estreñimiento (Ramos, s.f.).

Las saponinas que se encuentran en las semillas de quinoa son importantes debido a las propiedades biológicas que se pueden utilizar en las industrias farmacéutica y cosmética. Estas saponinas tienen actividades biológicas que incluyen actividades hemolíticas, antiinflamatorias, antioxidantes, anticancerígenas, antifúngicas y antibacterianas, entre otras (Lin et al., 2019; Abdelaleem y Elbassiony, 2021). Además, pueden utilizarse para elaborar diversos productos agroindustriales, como jabones, champús, detergentes, cerveza y biopesticidas (Han et al., 2019; Velásquez-Flórez y Vélez-Salazar, 2020).

Por lo tanto, estos compuestos son subutilizados y limitan su consumo y comercialización. Debido a todo ello, actualmente ha optado por opciones mucho más naturales por ser inocuas, orgánicas y, para beneficio de la salud. Por dicha razón, se sigue buscando opciones que reemplacen aquellos elementos dañinos y contaminantes, de manera que el uso de la saponina de la quinua ha sido uno de los mejores ejemplos como emulsión que, por el contrario, las emulsiones químicas

provocan un creciente impacto ambiental elevando la alcalinidad de las aguas. Por otro lado, la saponina de la quinua ha sido usada en la producción de cosméticos como labiales bajo diferentes procesos de producción de espuma (Gunsha, 2013).

El uso de las plantas para el provecho humano ha sido desde siempre nuestro primer recurso, satisfaciendo ampliamente nuestras necesidades tanto alimenticias como complementarias. César Villela (2005, p.41.) sostiene que las plantas son fuente inagotable de complejos químicos y sustancias activas las cuales han originado constantes investigaciones sobre sus propiedades logrando acaparar la industria farmacéutica–medicinal.

La saponina de la quinua ha cumplido un rol fundamental para la historia incaica. A medida que se han suscitado los cambios climáticos en el mundo, también la calidad y variedad de especies de quinua en la cordillera de los Andes (Flores et al., 2013).

1.5. Aplicaciones en Ingeniería Química

Las saponinas de quinua tienen aplicaciones prometedoras como tensoactivos naturales en productos ecológicos. Su capacidad para disminuir la tensión superficial, formar micelas y actuar como emulsificantes las posiciona como alternativas sostenibles a los tensoactivos sintéticos. Además, su utilización en productos biodegradables y renovables contribuye a la sostenibilidad industrial, alineándose con los principios de la ingeniería verde (Myers, 2020). Por eso los tensoactivos son fundamentales en diversas áreas de la ingeniería química:

- **Industria farmacéutica:** Se emplean en la formulación de medicamentos, facilitando la solubilidad y biodisponibilidad de compuestos activos lipofílicos. Las saponinas, por ejemplo, son usadas en la preparación de vacunas debido a sus propiedades adyuvantes (Francis, Kerem, Makkar, & Becker, 2002). Su propiedades específicas según Attwood & Florence (2012) son:

- **Sistemas de liberación de fármacos:** (Lamprecht, 2018)
 - Formación de liposomas
 - Encapsulación de principios activos
 - Mejora de biodisponibilidad
- **Potenciadores de absorción:** (Santos, R. C, 2019)
 - Modificación de membranas
 - Aumento de permeabilidad
 - Transporte de moléculas
- **Procesos de separación:** Su capacidad para modificar las propiedades de las interfaces los hace ideales para procesos de flotación y extracción (Akbari, M. H., & Mohammadi, 2017).
- **Síntesis química:** Actúan como catalizadores o agentes estabilizantes en reacciones en medio acuoso, mejorando la eficiencia de los procesos (Myers, 2020).
 - **Emulsificantes naturales:** En sistemas aceite/agua, tiene estabilización de dispersiones (McClements, 2016).
 - **Agentes espumantes:** Según Exerowa, D., & Kruglyakov, P. M. (2018):
 - Productos de limpieza
 - Procesos de flotación
 - Extintores naturales
- **Industria Cosmética:** Las saponinas de quinua encuentran aplicación en (Martínez-Padilla, L. E., & Serna-Cock, 2017):
 - Formulación de productos de limpieza natural
 - Desarrollo de emulsiones cosméticas
 - Sistemas de liberación de fármacos
 - Agentes solubilizantes naturales

- **Industria Alimentaria:** Se utilizan como (Ruiz-Jiménez., & González-Laredo, 2019):
 - Agentes emulsificantes naturales
 - Estabilizadores de espuma en bebidas
 - Modificadores de textura en productos alimenticios

1.6. Conceptos Básicos De Extracción Sólido - Líquido

1.6.1. Definición De Extracción Sólido - Líquido

La extracción sólido-líquido es una operación unitaria fundamental en la ingeniería química, ampliamente utilizada en diversos procesos industriales (García-Martínez & Sánchez, 2023). Esencialmente, es una operación de transferencia de masa donde un disolvente, o una mezcla de disolventes, extrae selectivamente uno o varios solutos contenidos en una matriz sólida.

El componente o componentes que se transfieren se denominan "soluto" y el sólido insoluble se denomina "inerte". La operación recibe también el nombre de lixiviación, nombre más empleado al disolver y extraer sustancias inorgánicas en la industria minera. Otro nombre empleado es el de percolación, en este caso, la extracción se hace con disolvente caliente o a su punto de ebullición. La colada se refería originalmente a la percolación del líquido a través de un lecho fijo del sólido, pero en la actualidad se utiliza para describir la operación en forma general, sin importar la forma en que se realice (Wilson et al., 2022).

- **Soluto:** El componente o componentes que se transfieren del sólido al líquido.
- **Inerte:** El sólido insoluble que permanece después de la extracción.

La extracción sólido-líquido se conoce por varios nombres, dependiendo del contexto y la aplicación específica:

- **Lixiviación:** Término comúnmente usado en la industria minera para la extracción de sustancias inorgánicas (Rodríguez-Torres & López, 2023).
- **Percolación:** Se refiere específicamente a la extracción realizada con un disolvente caliente o a su punto de ebullición (Thompson & Chen, 2022).
- **Colada:** Originalmente se refería a la percolación a través de un lecho fijo de sólido, aunque actualmente se usa de manera más general (Hernández-López et al., 2023).
- **Decocción:** Implica el uso del disolvente a su temperatura de ebullición, especialmente cuando el material soluble está principalmente en la superficie del sólido (Martínez-González & Pérez, 2023).
- **Elución:** Término ocasionalmente utilizado cuando el material soluble se lava de la superficie de un sólido insoluble (Anderson & Kumar, 2022).

La extracción sólido-líquido puede operar en dos regímenes principales:

- Régimen permanente (continuo)
- Régimen intermitente (por lotes)

La elección entre estos depende principalmente de los volúmenes de material a procesar y las características específicas del proceso (García-Martínez & Sánchez, 2023).

El proceso de extracción sólido-líquido sigue un mecanismo de transferencia de masa que, según Wilson et al. (2022), ocurre en el siguiente orden:

- Difusión del disolvente a través del sólido.
- Disolución del soluto en el disolvente.
- Transferencia del soluto desde el interior a la superficie del sólido.
- Transferencia del soluto desde la superficie del sólido hacia la solución, impulsada por el gradiente de concentración.

1.6.2. Variables Que Influyen En La Extracción Sólido - Líquido.

La eficiencia en la extracción del soluto en materiales orgánicos, inorgánicos, animales y vegetales depende de varios factores críticos. Según García-Martínez y Sánchez (2023), los principales factores son:

- Tamaño de las partículas
- Tipo de solvente
- pH
- Temperatura

1.6.3. Tamaño De La Partícula:

El tamaño de la partícula juega un papel crucial en la velocidad y eficiencia de la extracción (Wilson et al., 2022):

- **Relación inversa:** Cuanto más pequeño es el tamaño, mayor es el área de contacto entre el sólido y el líquido, lo que aumenta la velocidad de transferencia de masa.
- **Limitaciones:** Partículas en forma de polvo muy fino pueden causar problemas de apelmazamiento, obstaculizando la transferencia de masa.
- **Optimización:** Es necesario determinar una granulometría adecuada mediante pruebas experimentales.

Según Rodríguez-Torres y López (2023), el tratamiento previo puede incluir:

- Trituración
- Molienda
- Corte en piezas
- Reformación en formas especiales (e.g., hojuelas)

Las partículas del soluto pueden existir en el sólido inerte de diversas formas (Thompson & Chen, 2022):

- En la superficie del sólido
- Rodeadas por una matriz de material inerte
- Químicamente combinadas
- Dentro de las células (en el caso de algunos vegetales y tejidos animales)

Consideraciones específicas

- **Soluto superficial:** Se remueve rápidamente por el solvente.
- **Soluto en poros:** Requiere que el solvente penetre al interior del sólido.
- **Limitaciones económicas:** En algunos casos, la cantidad de soluto a recuperar puede ser menor en relación al material a tratar, haciendo que el proceso de molienda sea antieconómico.

Compactación y agitación

Hernández-López et al. (2023) señalan que:

- Las partículas muy finas pueden compactarse durante la extracción, dificultando el flujo del solvente.
- La agitación puede mejorar el contacto entre sólido y solvente, pero también puede causar la suspensión de partículas finas, requiriendo filtración posterior.

1.6.4. Aplicaciones específicas

- **Productos farmacéuticos:** El secado previo del material vegetal ayuda a romper las paredes celulares, facilitando la extracción (Martínez-González & Pérez, 2023).

- **Extracción de aceites vegetales:** La reducción a tamaños entre 0.1 mm y 0.5 mm, mediante laminación, mejora la accesibilidad del solvente al aceite (Anderson & Kumar, 2022).

1.6.5. Selección del Solvente

a) Definición y características generales

Un solvente es una sustancia capaz de disolver y producir una mezcla homogénea con otra. Wilson et al. (2022) destacan que se utilizan en grandes cantidades en diversas industrias, muchos son altamente inflamables y volátiles, también pueden formar mezclas explosivas con el aire.

b) Propiedades críticas

Las propiedades que afectan la conveniencia y selectividad del solvente incluyen: punto de ebullición, densidad y viscosidad

c) Criterios de selección

Rodríguez-Torres y López (2023) proponen los siguientes criterios para la selección de solventes:

- Fácil penetración en las partículas
- No higroscópico
- No tóxico ni cancerígeno (especialmente importante para productos alimenticios)
- Bajo punto de ebullición
- Ambientalmente seguro
- Selectividad (e.g., bajo poder de extracción de proteínas, aminoácidos y carbohidratos en la extracción de grasas y aceites)
- Fácilmente recuperable para reciclaje

- No corrosivo
- No inflamable
- Disponibilidad en el mercado
- Económico

d) Solvente Hidroalcohólico

Un Solvente es la sustancia que forma parte y está en mayor cantidad en una solución. La solución es compuesta por la combinación y tratamiento de un soluto (en menor cantidad, por lo general sólido o líquido, pero con mayor concentración) y un solvente (líquido con propiedades propicias para que ese soluto se disuelva correctamente).

a. Etanol

El etanol es un líquido incoloro, volátil, con un olor característico y sabor picante, inflamable, también se conoce como alcohol etílico. En las siguientes tablas se describen las siguientes especificaciones del etanol.

Tabla I- 2 Descripción del Etanol

Sinónimos	Etanol – Alcohol Absoluto – Etil Hidróxido – Metil Carbinol – Etil Hidrato.
Fórmula Química	C ₂ H ₆ O ₂
Peso molecular	46,10
Grupo Químico	Compuesto Orgánico - Alcohol
Número CAS	64-17-5
Número NU	1170

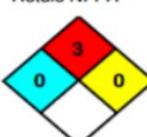
Fuente: Winkler, 2007.

Tabla I- 3 Propiedades físicas, químicas y termodinámicas del Etanol

Estado Físico	Líquido
Apariencia	Incoloro
Olor	Olor característico fragante
pH	No reportado
Temperatura de Ebullición	78,3 °C
Temperatura de Fusión	-114,1 °C
Densidad (20 °C)	0,789 kg/l
Presión de Vapor (20 °C)	44,3 mm Hg
Densidad de Vapor	1,59 g/ml
Índice de refracción	1,361
Temperatura de Ignición	363 °C
Calor específico (20 °C)	2,42 J/g °C
Conductividad térmica	0,17 W/m K
Temperatura crítica	243,1 °C.
Presión crítica	63,116 atm
Volumen crítico	0,167 l/mol
Solubilidad	Miscible con agua en todas proporciones.

Fuente: Winkler, 2007.

Tabla I- 4 Identificación de riesgos de Etanol

Riesgo Principal	Inflamable
Riesgos Secundarios	Nocivo - Irritante y Reactivo leves
Rótulo	 

Fuente: Winkler, 2007.

b. Agua Desionizada

El agua desionizada o desmineralizada es llamada así porque se le han quitado, mediante resinas de intercambio iónico de lecho mixto, los cationes, como los de sodio, calcio, hierro, cobre y aniones como el carbonato, fluoruro, cloruro, etc. Esto significa que al agua se le han quitado todos los iones excepto el H^+ , o más rigurosamente H_3O^+ y el OH^- , pero puede contener pequeñas cantidades de impurezas no iónicas como compuestos orgánicos. (Gil I., 2014).

Tabla I- 5 Descripción del Agua Desionizada

Sinónimos	Óxido hidrogenado, agua desmineralizada
Fórmula molecular	H_2O
Peso molecular	18.02
Familia química	Óxidos
Número CAS	7732-18-5
Número UN	N/A

Fuente: Meyer Reactivos Química, 2008.

Tabla I- 6 Propiedades físicas y químicas del Agua Destilada

pH	5-7
Conductividad	10 $\mu S / cm.$
Aspecto	Transparente/ incoloro
Olor	Inoloro
Peso específico	1
Presión de vapor (20°C)	17.5 mm Hg
Punto de fusión	0 °C
Punto de ebullición	100 °C

Fuente: Meyer Reactivos Química, 2008.

e) Temperatura de Extracción

La temperatura es un factor crítico que afecta múltiples aspectos del proceso de extracción (Anderson & Kumar, 2022).

- **Efectos generales:** Un incremento de temperatura acelera la velocidad de extracción y disminuye la viscosidad del líquido, aumentando el coeficiente de difusión.
- **Limitaciones:** La temperatura máxima de extracción está limitada por la temperatura de ebullición del solvente, la estabilidad del producto o solvente.
- **Consideraciones específicas:**
 - **Solubilidad:** Temperaturas altas generalmente aumentan la solubilidad del soluto en el solvente.
 - **Extracción excesiva:** En algunos materiales naturales (e.g., café, té, remolachas), temperaturas altas pueden resultar en la extracción no deseada de otros componentes.
 - **Seguridad y pérdidas:** Operaciones a altas temperaturas pueden causar pérdidas inaceptables de solvente y presentar riesgos de seguridad.
- **Optimización:** Según García-Martínez y Sánchez (2023) enfatizan la necesidad de experiencia y experimentación para seleccionar la temperatura adecuada para cada proceso específico de extracción.

1.6.6. Proceso De Extracción Sólido Líquido

En la extracción sólido-líquido siempre se consideran los siguientes pasos:

- Contacto del solvente líquido con el sólido a tratar, para disolver el componente soluble o soluto deseado.
- Separación de la disolución del resto del sólido.

La disolución separada se llama EXTRACTO o flujo superior (Over Flow) y el sólido acompañado por la disolución se llama REFINADO o flujo inferior (Under Flow).

Otras dos operaciones auxiliares en este proceso son:

- Preparación del sólido para extracción,
- Recuperación del soluto a partir del solvente, usualmente por evaporación o destilación del solvente desde el soluto.

Las corrientes que salen de un sistema de extracción sólido líquido sufren en muchos casos una serie de operaciones posteriores antes de la obtención de un producto acabado. Tanto la solución como el sólido extraído pueden contener el material deseado. Además de la obtención del producto, la recuperación del disolvente constituye, en general, una operación de importancia (García, 2022).

1.6.7. Métodos de contacto sólido-líquido

El solvente puede estar en contacto con los sólidos en tres maneras diferentes: percolación en spray, inmersión total y drenaje intermitente.

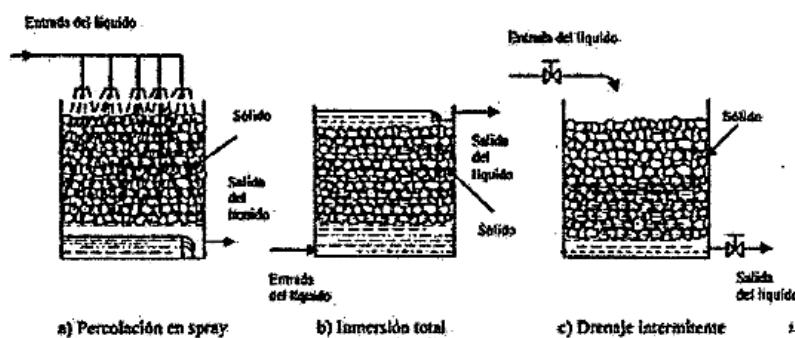


Figura 5. Tipos de contacto sólido-líquido.

Fuente: Asociación Kokopelli

En el método de percolación en spray, el solvente es dispersado en el sólido y permite gotear a través de él continuamente. En el método de inmersión total, el sólido es sumergido en el líquido y puede ser tratado con un lote de solvente o flujo continuo de solvente. El tercer método involucra una salida intermitente del solvente (García, 2022)

1.7. Método Soxhlet

En 1879, el químico alemán Franz Ritter Von Soxhlet propuso un método para la determinación de grasa en alimentos, el cual permanece vigente casi catorce décadas después. Este método conjuga fenómenos físico-químicos fundamentales a través de un ingenioso diseño (Smith, 2020).

1.7.1. El origen

La extracción sólido-líquido tiene sus raíces en la antigua Mesopotamia, alrededor del año 3500 A.C., donde se utilizaba un extractor de agua caliente para obtener materia orgánica. Este principio ha sido útil desde la antigüedad para obtener infusiones y perfumes. En 1830, el químico francés Anselmo Payen implementó su operación de forma automatizada y, finalmente, en 1879, Franz Ritter Von Soxhlet propuso el método para la determinación de grasa (Johnson, 2018).

1.7.2. Proceso de extracción

La extracción Soxhlet (o extracción sólido-líquido) se utiliza para el aislamiento de compuestos presentes en un sólido, utilizando un disolvente líquido. Es particularmente útil en la extracción de principios activos de plantas en química de productos naturales. Aunque la extracción de un compuesto de un sólido con un líquido se puede realizar mediante una extracción sencilla y posterior filtración, este proceso requeriría muchas etapas para ser eficaz (Brown, 2019).

El equipo Soxhlet fue diseñado para realizar múltiples extracciones de manera automática (en continuo), usando el mismo disolvente, el cual se evapora y condensa, recirculando en el equipo. Está compuesto por los siguientes elementos (Brown, 2019):

- Condensador de reflujo refrigerado por agua.
- Cartucho Soxhlet con el sólido a extraer.
- Columna de extracción donde se inserta el cartucho Soxhlet con el sólido a extraer, y que presenta un sifón por donde cae el disolvente después de la extracción hasta el matraz.
- Matraz de fondo redondo que debe ser aproximadamente 3 o 4 veces del tamaño de la cámara de disolvente.

1.7.3. Funcionamiento

El sólido que se va a extraer (semillas, hojas de planta, etc.) se coloca en un cartucho confeccionado con papel de filtro o en cartuchos de celulosa disponibles comercialmente. El cartucho se introduce en la columna de extracción, y el matraz se llena con disolvente hasta la mitad aproximadamente. Se añade un plato poroso y se comienza a calentar (Taylor, 2021).

Al calentarse el disolvente, este se evapora y asciende por la columna de extracción hasta la zona del condensador donde se enfriá y condensa, cayendo gota a gota sobre el cartucho y extrayendo así el principio activo del sólido. Cuando se alcanza un nivel de disolvente suficiente, la parte soluble de los componentes cae por gravedad a la cámara de disolvente a través del sifón. El proceso se repite automáticamente hasta que se considera que la extracción se ha completado (Taylor, 2021).

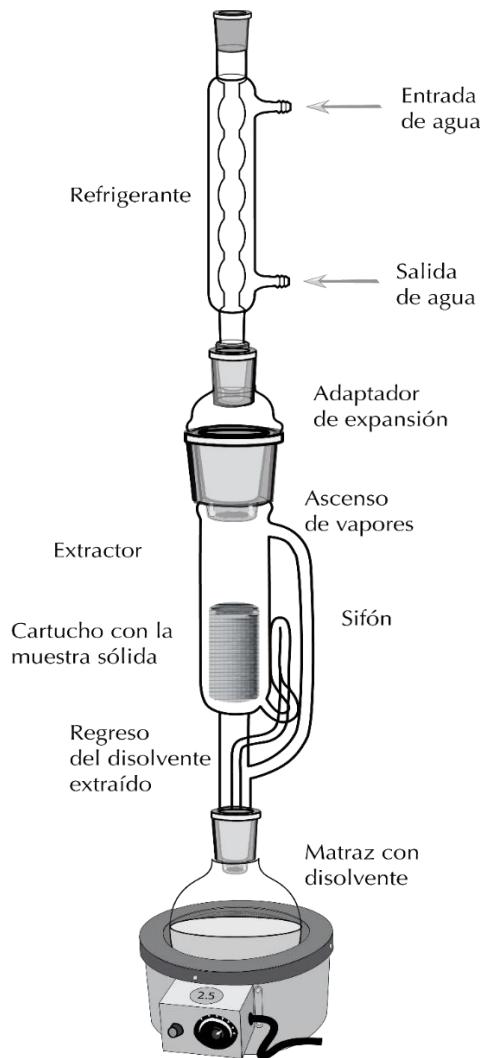


Figura 6. Extracción sólido-líquido (Soxhlet)

Fuente: Elsevier Science & Technology, 2015.

1.8.Métodos para cuantificación de saponina

1.8.1. Afrosimétrico o método de la espuma para la determinación de Saponinas

El método afrosimétrico estándar fue desarrollado inicialmente por Koziol (1991), en la búsqueda de una técnica simple para extraer y determinar la presencia de saponinas en granos de quinua y fue utilizado para evaluar más de 5000 genotipos de quinua de

Latinreco (Ecuador), con resultados significativos. (Guzmán et al., 2013; León-Roque et al., 2019).

Es un método físico para determinar las saponinas de la quinua, basado en su propiedad tenso activa. Cuando se disuelven en agua y se agitan, las saponinas dan una espuma estable, cuya altura está relacionada con el contenido de saponinas en los granos. Este procedimiento es apto para ser usados en controles de calidad referencial o aproximada de la quinua (Bacigalupo & Tapia, 2000).

También conocido como el método de la espuma es una técnica ampliamente utilizada en la química analítica para la determinación cuantitativa de saponinas en diversas matrices (Cheok et al., 2014). Las saponinas son compuestos orgánicos pertenecientes al grupo de los glucósidos, que se caracterizan por su capacidad de formar espuma estable en soluciones acuosas debido a su naturaleza anfifílica (Güçlü-Üstündağ & Mazza, 2007).

1.8.2. Fundamento del Método de la Espuma

El método de la espuma se basa en la propiedad tensoactiva de las saponinas, que les permite reducir la tensión superficial del agua y formar espuma estable (Oleszek & Bialy, 2006). La altura de la espuma formada es proporcional a la concentración de saponinas presentes en la muestra, lo que permite establecer una relación cuantitativa entre ambas variables (Hiai et al., 1976).

1.8.3. Aplicaciones del Método de la Espuma

El método de la espuma tiene diversas aplicaciones en la industria y la investigación:

- *Análisis de plantas medicinales:* Se utiliza para cuantificar saponinas en extractos vegetales y evaluar su potencial farmacológico (Sparg et al., 2004).

- **Control de calidad en la industria alimentaria:** Permite determinar el contenido de saponinas en alimentos y bebidas, especialmente en productos derivados de la quinoa y otras plantas (Kuljanabhagavad et al., 2008).
- **Investigación fitoquímica:** Es una herramienta valiosa para el screening inicial de saponinas en nuevas especies vegetales (Hostettmann & Marston, 1995).
- **Estudios ecológicos:** Se emplea para analizar el contenido de saponinas en plantas y su papel en las interacciones planta-herbívoro (Wink, 2010).

1.8.4. Procedimiento Experimental del Método de la Espuma

El método de la espuma se realiza siguiendo un protocolo estandarizado que incluye la preparación de soluciones, la generación de espuma y la medición de su altura. A continuación, se detalla el procedimiento experimental (Oakenfull & Sidhu, 1989):

a) Preparación de Soluciones Patrón

Se preparan soluciones patrón de saponinas a diferentes concentraciones para establecer una curva de calibración, siguiendo los procedimientos establecidos por Guzmán-Maldonado et al. (2000):

Tabla I-7. Concentraciones y volúmenes requeridos para la disolución

Concentración (ppm)	Volumen solución patrón (mL)	Volumen agua destilada (mL)
2390 (100%)	5	0
1792.5 (75%)	3,75	1,25
1195 (50%)	2,5	2,5
597.5 (25%)	1,25	3,75
0 (0%, blanco)	0	5

b) Generación y Medición de Espuma

El procedimiento para la generación y medición de espuma consiste en los siguientes pasos, detallados según el protocolo de Oakenfull & Sidhu (1989):

- Tomar 5 mL de la solución en un tubo de ensayo.
- Agitar vigorosamente durante 30 segundos.
- Dejar reposar 30 minutos.
- Agitar nuevamente durante 30 segundos.
- Dejar reposar 5 minutos.
- Medir la altura de la espuma.
- Repetir tres veces para cada concentración.

Este procedimiento se aplica tanto a las soluciones patrón como a las muestras de concentración desconocida.

c) Elaboración de la Curva de Calibración

La curva de calibración se construye utilizando los datos obtenidos de las soluciones patrón, siguiendo la metodología descrita por Guzmán-Maldonado et al. (2000):

- Eje X: Concentración de saponinas (ppm)
- Eje Y: Altura promedio de espuma (mm)
- Se añade una línea de tendencia polinómica de segundo grado
- Se muestra la ecuación de la línea y el valor R^2

La ecuación resultante permite calcular la concentración de saponinas en muestras desconocidas a partir de la altura de espuma medida.

d) Análisis de Muestras Desconocidas

Para determinar la concentración de saponinas en muestras desconocidas, se sigue el procedimiento recomendado por San Martín & Briones (1999):

- Pesar 1 gramo de muestra.
- Disolver en 100 mL de agua destilada.
- Realizar el método de espuma (pasos del punto “b”).
- Medir la altura de la espuma tres veces.
- Calcular la concentración utilizando la ecuación de la curva de calibración.

1.8.5. Consideraciones y Limitaciones del Método

Aunque el método de la espuma es ampliamente utilizado, presenta algunas limitaciones que deben considerarse:

- Especificidad: No es específico para saponinas, ya que otras sustancias tensoactivas pueden interferir en la formación de espuma (Lacaille-Dubois & Wagner, 1996).
- Variabilidad: Factores como la temperatura, el pH y la presencia de sales pueden afectar la estabilidad de la espuma (San Martín & Briones, 1999).
- Sensibilidad: El método puede no ser lo suficientemente sensible para detectar bajas concentraciones de saponinas (Hostettmann & Marston, 1995).

El método de la espuma es una técnica sencilla y de bajo costo para la determinación semicuantitativa de saponinas. A pesar de sus limitaciones, sigue siendo una herramienta valiosa en el análisis preliminar de saponinas en diversas matrices, especialmente cuando se combina con métodos más específicos y sensibles para la confirmación de resultados.

1.8.6. Cromatografía Liquida de Alta Resolución (HPLC) para la cuantificación de saponinas

La HPLC es uno de los tantos métodos de cromatografía para la separación y análisis de los componentes químicos de una mezcla. En este método participan las fases móviles y estacionaria (inmiscibles entre sí) y la muestra de interés. La fase móvil es

líquida y su función es llevar la muestra a través de la fase estacionaria, que puede ser sólida o una película líquida soportada en un sólido inerte. Las distintas fuerzas químicas y físicas que actúan entre la mezcla a analizar y las dos fases determinan la retención y separación de cada uno de los componentes de la mezcla (Fallon et al., 1987).

Los componentes con mayor afinidad con la fase estacionaria se desplazarán con menor velocidad que aquellos que presentan menor afinidad. Estas diferencias de velocidades dan origen a la separación de los componentes. Un cromatógrafo líquido de alto rendimiento opera generalmente con cinco instrumentos: reservorio, bomba, inyector, horno (columna), detector y registrador (Skoog, 2001).

La Cromatografía Líquida de Alta Resolución (HPLC) es una técnica analítica avanzada utilizada para separar, identificar y cuantificar componentes en mezclas complejas. Se basa en la interacción diferencial de los analitos entre una fase móvil líquida y una fase estacionaria sólida (Snyder et al., 2010). En el caso de las saponinas, la HPLC ofrece una resolución superior y una mayor sensibilidad en comparación con otros métodos de análisis.

a) Superioridad de HPLC en la Cuantificación de Saponinas

La HPLC se considera la mejor opción para la cuantificación de saponinas por varias razones:

- Alta resolución: Permite la separación efectiva de saponinas estructuralmente similares (Oleszek & Bialy, 2006).
- Sensibilidad: Detecta saponinas en concentraciones muy bajas, del orden de partes por billón (ppb) (Guo et al., 2009).
- Precisión y exactitud: Proporciona resultados cuantitativos altamente reproducibles (Cheok et al., 2014).

- Versatilidad: Puede acoplarse a diversos detectores para mejorar la identificación y cuantificación (Wolfender et al., 2015).
- Automatización: Los sistemas modernos de HPLC permiten un alto grado de automatización, reduciendo errores humanos (Farag et al., 2014).

b) Equipo HPLC LC 2020

El HPLC LC 2020 es un sistema de cromatografía líquida de alto rendimiento diseñado para análisis rutinarios y de investigación. Sus características principales incluyen:

- Bomba cuaternaria de gradiente de baja presión
- Automuestreador de alta precisión
- Horno de columna termostatizado
- Detector de arreglo de diodos (DAD)
- Software de control y análisis de datos integrado

c) Método de HPLC para la Cuantificación de Saponinas

El método de HPLC para la cuantificación de saponinas generalmente sigue estos pasos:

d) Preparación de la Muestra

- Extracción: Las saponinas se extraen de la matriz vegetal utilizando solventes apropiados, como metanol o etanol acuoso (70-80%) (Mroczek, 2015).
- Limpieza: El extracto se somete a un proceso de limpieza, que puede incluir extracción en fase sólida (SPE) o partición líquido-líquido, para eliminar interferencias (Gafner et al., 2004).
- Filtración: La muestra se filtra a través de membranas de 0.45 µm antes de la inyección en el HPLC (Oleszek & Bialy, 2006).

e) Condiciones Cromatográficas

Las condiciones típicas para el análisis de saponinas mediante HPLC LC 2020 pueden incluir:

- Columna: C18 de fase reversa (ej. 250 mm x 4.6 mm, 5 µm) b) Temperatura de la columna: 30-40°C c) Fase móvil:
 - Solvente A: Agua con 0.1% de ácido fórmico
 - Solvente B: Acetonitrilo con 0.1% de ácido fórmico d) Gradiente de elución: Por ejemplo, 20-80% B en 30 minutos e) Flujo: 1.0 mL/min f) Volumen de inyección: 10-20 µL g) Detección: UV a 203-210 nm (para saponinas no conjugadas) o 254 nm (para saponinas conjugadas) (Güçlü-Üstündağ & Mazza, 2007)

f) Cuantificación

La cuantificación de saponinas mediante HPLC se realiza generalmente por el método del estándar externo:

- Preparación de estándares: Se preparan soluciones estándar de saponinas puras a diferentes concentraciones conocidas.
- Curva de calibración: Se inyectan los estándares y se construye una curva de calibración relacionando el área del pico con la concentración.
- Análisis de muestras: Se inyectan las muestras y se comparan las áreas de los picos de las saponinas con la curva de calibración.
- Cálculo de concentración: Se utiliza la ecuación de la curva de calibración para calcular la concentración de saponinas en las muestras (Guo et al., 2009).

g) Ventajas y Consideraciones del Método HPLC

Ventajas:

- Alta selectividad y especificidad para saponinas individuales
- Capacidad para analizar saponinas tanto hidrofílicas como lipofílicas
- Posibilidad de acoplamiento con espectrometría de masas para confirmación estructural

Consideraciones:

- Requiere estándares puros de saponinas, que pueden ser costosos o difíciles de obtener
- La optimización del método puede ser compleja debido a la diversidad estructural de las saponinas
- La interpretación de los cromatogramas puede requerir experiencia debido a la complejidad de los perfiles de saponinas (Wolfender et al., 2015)

En conclusión, la Cromatografía Líquida de Alta Resolución (HPLC) utilizando el equipo LC 2020 representa una técnica analítica poderosa y precisa para la cuantificación de saponinas. Su capacidad para proporcionar resultados altamente resolutivos, sensibles y reproducibles la convierte en la opción preferida para el análisis de estos compuestos en matrices complejas.

CAPÍTULO II

PARTE EXPERIMENTAL

El presente trabajo de investigación aplicada se desarrolló en instalaciones del Laboratorio de Operaciones Unitarias (L.O.U.), que es dependiente del Departamento de procesos Industriales Biotecnológicos y Ambientales (D.P.I.B.A.), de la Facultad de Ciencias y Tecnología de la Universidad Autónoma Juan Misael Saracho (U.A.J.M.S.).

2.1. Descripción y análisis de materias primas

2.1.1. Caracterización física de la materia prima: Quinua Real Blanca (*Chenopodium Quinoa Willd*)

Tabla II-1 Características físicas de la Quinua.

Propiedades	Quinua Real Blanca
Color	Blanco
Olor	Característico
Sabor	Amargo
Forma	Circular plana
Tamaño de granos (mm)	2,0-2,2
Peso 100 granos (g)	0,35

Fuente: Elaboración propia, 2024.

2.2. Descripción del método de investigación.

La metodología que se empleó, para esta finalidad de trabajo de grado, fue la obtención de extracto de saponinas del grano de la quinua, que se llevó a cabo de manera experimental; por lo tanto, se explicará las etapas basadas en el proceso productivo que se usó para su extracción.

El método Soxhlet se empleó en la obtención del extracto de saponina del presente proyecto de investigación y se aplicó este método a escala laboratorio.

2.3.Diseño Experimental del proceso de obtención de Extracto de Saponinas a partir del grano de la quinua real blanca (*Chenopodium Quinoa Willd*)

2.3.1. Identificación de Variables de operación a utilizar en la Extracción

a) Temperatura

El rendimiento es directamente proporcional a la temperatura que se induce en la extracción, aumentando o disminuyendo la solubilidad, evitando excederse de la temperatura adecuada porque llegó a ser contraproducente para la estabilidad térmica de las saponinas.

Por lo que para esta variable para determinó las condiciones adecuadas. Por esta razón la temperatura necesaria como límite superior es 93 °C y el límite inferior 75 °C adecuado.

b) Concentración de solvente

Se realizó diferentes pruebas, usando como solvente la solución hidroalcohólica, que es una mezcla de Agua y Etanol al 96%. Dando así el límite superior como 75 % de concentración EtOH/H₂O y el inferior 30 % de concentración EtOH/H₂O.

c) Tiempo de Extracción

La extracción tuvo tiempos convenientes para la materia prima, excediéndose el tiempo adecuado se ocasionó deterioro de las moléculas de la saponina siendo menor el rendimiento de obtención.

Por tal motivo se seleccionó los tiempos adecuados de extracción, realizando pruebas empleando un tiempo mínimo de 180 minutos y un máximo de 600 minutos (10 horas).

d) Variable Respuesta

La variable respuesta en el proyecto de investigación es el rendimiento, siendo la cantidad de saponina seca obtenida a través de la extracción, dicho rendimiento fue determinado a través de un análisis HPLC y el método de espuma .

2.3.2. Determinación del Número de Ensayos

Se realizó un diseño factorial lineal completo que está dado por m^k , donde:

m = niveles de las variables manipulables.

k = número de factores.

El diseño factorial planteado para el proyecto de investigación emplea el modelo matemático 2^3 , es decir, consta de tres factores con dos niveles, evaluando su influencia sobre una variable respuesta que en nuestro caso es el rendimiento.

Según el diseño el número de experimentos es igual a 8, para la confiabilidad de información del proyecto también se realizó una réplica, dando como total un número de 16 ensayos, realizados como se muestra en la Tabla II-2.

Tabla II-2 Matriz de diseño factorial de 3 factores y 2 niveles.

Nº	Diseño	Variables			Matriz de diseño			Respuesta
		A	B	C	X ₁	X ₂	X ₃	
1	1	N ₁	N ₂	N ₃	+	+	+	Y111
2	A	N ₁	N ₂	M ₃	+	+	-	Y112
3	B	N ₁	M ₂	N ₃	+	-	+	Y121
4	AB	N ₁	M ₂	M ₃	+	-	-	Y122
5	C	M ₁	N ₂	N ₃	-	+	+	Y211
6	AC	M ₁	N ₂	M ₃	-	+	-	Y212
7	BC	M ₁	M ₂	N ₃	-	-	+	Y221
8	ABC	M ₁	M ₂	M ₃	-	-	-	Y222

Fuente: Elaboración propia, 2024.

Donde:

A= Efecto de la variable temperatura

B = Efecto de la variable tiempo de extracción

C= Efecto de la variable concentración de solvente

N₁= Límite superior de la variable temperatura.

M₁= Límite inferior de la variable temperatura

N₂= Límite superior de la variable tiempo de extracción.

M₂= Límite inferior de la variable tiempo de extracción.

N₃= Límite superior de la variable concentración de solvente.

M₃= Límite inferior de la variable concentración de solvente.

La ecuación genérica para el diseño factorial es:

$$Y_{ijk} = u + A_i + B_j + C_k + (AB)_{ij} + (BC)_{jk} + (AC)_{ik} + (ABC)_{ijk} + \varepsilon_{ijk} \quad Ec. II-1$$

Donde:

Y = Variable de respuesta de la i, j, k – éSIMA muestra experimental.

u = Efecto de la media general.

A_i= Efecto i – éSIMO de la variable temperatura

B_j= Efecto j – éSIMO de la variable tiempo de extracción.

C_k= Efecto k – éSIMO de la variable concentración de solvente

(AB)_{ij}= Efecto de la interacción de las variables temperatura – tiempo de extracción.

(BC)_{jk} = Efecto de la interacción de las variables tiempo de extracción – concentración de solvente.

$(AC)_{ik}$ = Efecto de la interacción de las variables temperatura – concentración de solvente.

$(ABC)_{ijk}$ = Efecto de la interacción de las variables temperatura – tiempo de extracción – concentración de solvente.

ε_{ijk} = Error Aleatorio

Es el conjunto de puntos experimentales o tratamientos que puede formarse considerando todas las posibles combinaciones de los niveles de los factores. Permite el estudio de la interacción entre los factores.

Tabla II-3 Niveles de variación de los factores

Factores	Niveles		
	Unidad	Bajo	Alto
Temperatura	°C	75	93
Tiempo de Extracción	Horas	3	10
Concentración de solvente	%	30	75

Fuente: Elaboración propia, 2024.

Tabla II-4 Diseño factorial para el Proceso de Extracción de Saponina

Nº	Diseño	Variables			Matriz de diseño			Respuesta
		Temperatura (°C)	Tiempo de Extracción (Horas)	Concentración de Solvente (%)	X ₁	X ₂	X ₃	
1	1	93	10	75	+	+	+	Y111
2	A	93	10	30	+	+	-	Y112
3	B	93	3	75	+	-	+	Y121
4	AB	93	3	30	+	-	-	Y122
5	C	75	10	75	-	+	+	Y211
6	AC	75	10	30	-	+	-	Y212
7	BC	75	3	75	-	-	+	Y221
8	ABC	75	3	30	-	-	-	Y222

Fuente: Elaboración propia, 2024.

Los datos obtenidos fueron analizados posteriormente con el análisis de varianza (ANOVA), donde se determinó la significancia en la extracción de saponina obtenida, con respecto a las variables independientes.

2.4.Materiales y Equipos

2.4.1. Materiales, Materia prima y Reactivos

La materia prima y Reactivos se muestran en Tabla II-5 y los materiales que se utilizó para la extracción de saponina son los indicados en la Tabla II-6.

Tabla II-5 Materia prima y Reactivos Utilizados en el Proyecto.

Materia Prima - Reactivos	Función	Características	Cantidad c/u
Quinua Real Blanca	Materia Prima	Proveniente de la provincia Aroma, La Paz – Bolivia.	5 (kg)
Agua destilada	Solvente	Solvente	50 L
Etanol al 96 %	Solvente	Solvente	30 L

Fuente: Elaboración Propia, 2024.

Tabla II-6 Materiales Utilizados en el Proyecto.

Materiales	Función	Características	Cantidad c/u
Quinua Real Blanca	Materia Prima	Proveniente de la provincia Aroma, La Paz – Bolivia.	5 (kg)
Agua destilada	Solvente	Solvente	50 L
Etanol al 96 %	Solvente	Solvente	30 L
Tubos de ensayo (con tapones)	Para el método de espuma.	160 mm longitud y 16 mm de diámetro	6
Porta tubos	Material de apoyo para colocar los tubos de ensayo	Material de apoyo para colocar los tubos de ensayo, hecho de plástico.	1
Pipeta	Para extraer una cantidad específica de muestras	Material volumétrico de 5 ml	1

	líquidas		
Cronometro	Para controlar el tiempo en el método de espuma	Para controlar el tiempo en el método de espuma	1
Regla	Para medir la altura de espuma en el método de espuma	Material para el método de la espuma	1
Termómetro de mercurio	Para medir la temperatura en el proceso de extracción de saponina	Material de vidrio de un rango de -10 °C a 200 °C.	2
Varilla de agitación	Material de vidrio	Material de vidrio	1
Probetas	Material de vidrio para medir volúmenes exactos	Para medir volúmenes de forma aproximada 1000 ml, 100 ml, 10 ml	3
Recipientes de vidrio	Material para usar a la hora de secado de saponina	Material de vidrio de 600 ml y 500 ml	6
Vaso de precipitado	Material para usar a la hora de secado de saponina	Material de vidrio de 600 ml	1
Vaso de precipitado	Material para usar a la hora de secado de saponina	Material de vidrio de 400 ml	1
Mortero y maso	Para moler la saponina seca	Material de porcelana para molienda	

Fuente: Elaboración Propia, 2024.

2.4.2. Equipos Utilizados

Los equipos utilizados para el presente proyecto de investigación son los indicados en la Tabla II-6 siendo la mayoría propiedad del Laboratorio de Operaciones Unitarias.

Tabla II-7 Equipos a Utilizar en el Proyecto.

Equipo	Función	Características	Cantidad
Soxhlet	Para obtener los extractos de saponinas	Equipo de extracción	1
Balanza Analítica	Para pesar las muestras	Precisión de 0.0001g.	1
Estufa de Convección Natural	Para quitar el contenido de humedad de los extractos de saponinas	Margen de Temperatura:20-80 °C Potencia Nominal: 2000 W Frecuencia: 50 Hz Voltaje: 220 V	1
Rota - evaporador	Para concentrar la extracción	Potencia de calefacción:1300 W Margen de Temperatura en el baño: 20-180 °C Velocidad: 20-270 rpm	1

Fuente: Elaboración Propia, 2024.

2.4.3. Solvente Hidroalcohólico

a) Etanol

El etanol es un líquido incoloro, volátil, con un olor característico y sabor picante, inflamable, también se conoce como alcohol etílico. En las siguientes tablas se describen las siguientes especificaciones del etanol.

Tabla II- 8 Propiedades físicas, químicas y termodinámicas del Etanol

Estado Físico	Líquido
Apariencia	Incoloro
Olor	Olor característico fragante
pH	No reportado
Temperatura de Ebullición	72 °C
Temperatura de Fusión	-118 °C
Densidad (20 °C)	0,789 kg/l
Índice de refracción	1,05
Solubilidad	Miscible con agua en todas proporciones.

Fuente: Elaboración propia, 2024.

2.4.4. Agua Desionizada

Tabla II- 9 Propiedades físicas y químicas del Agua Destilada

pH	6-7
Aspecto	Transparente/ incoloro
Olor	Inoloro
Peso específico	1
Punto de fusión	0 °C
Punto de ebullición	100 °C

Fuente: Elaboración propia, 2024.

2.5. Descripción del Proceso experimental de obtención de extracto de saponina en diagrama de bloques

Para comprender el proceso propuesto, primero se realiza un diagrama de bloques detallado y luego se explica cada paso del proceso experimental para la obtención del extracto de saponina de la Quinua Real Blanca (*Chenopodium Quinoa Willd*).

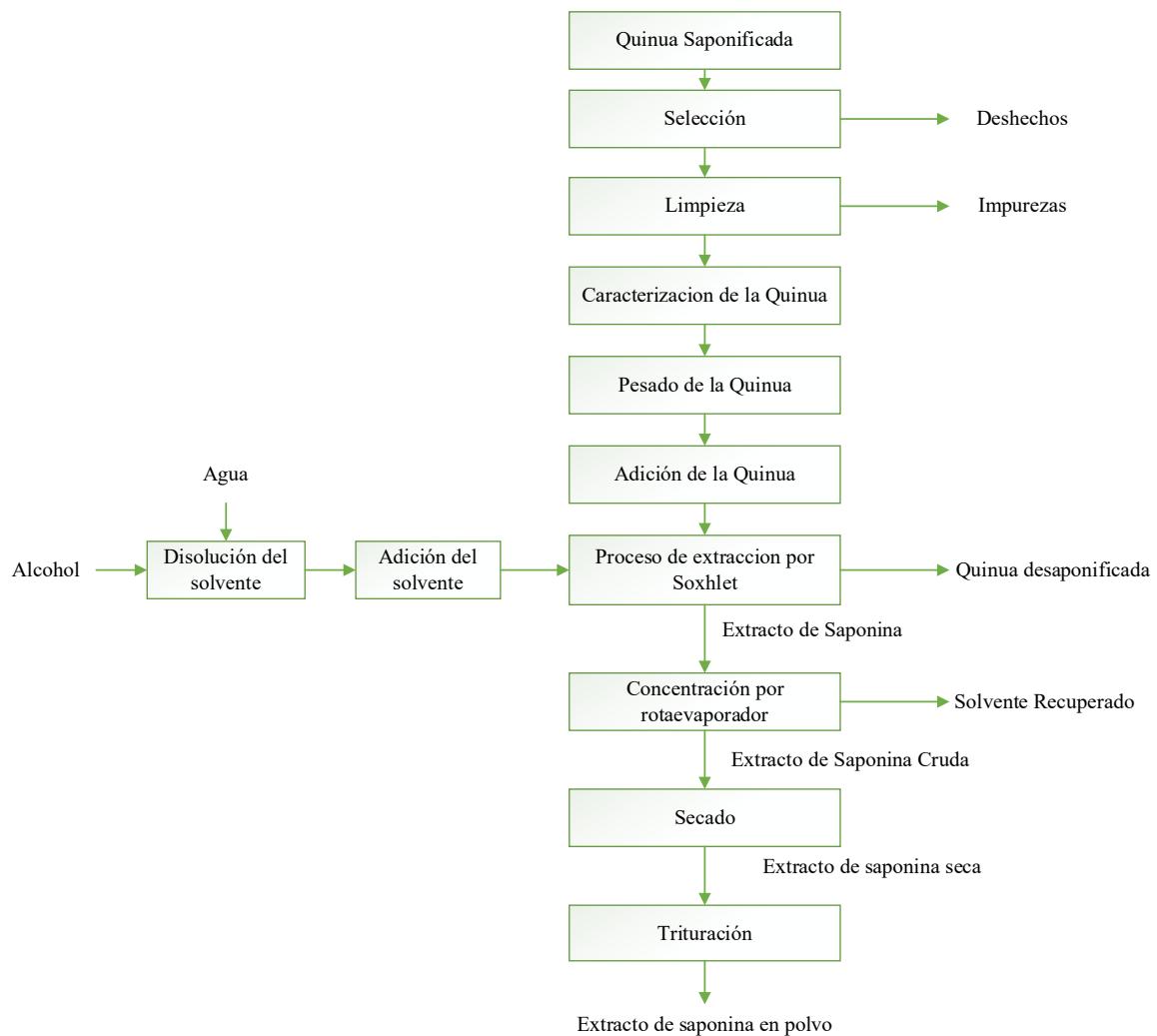


Diagrama II-1 Diagrama del Proceso de Obtención del extracto de Saponina a Escala de Laboratorio.

Fuente: Elaboración propia, 2024.

2.5.1. Selección y limpieza de la materia prima: Quinua Real Blanca

Para iniciar el proceso, se seleccionará la quinua, tomando en cuenta tanto su origen geográfico como su variedad. En este caso, se elegirá la quinua real blanca, la cual no debe estar desaponificada ni lavada, directamente desde la cosecha hasta su uso en la investigación. La selección se centrará en la provincia Aroma de la ciudad de La Paz, Bolivia.

La elección de esta región se debe a que la provincia Aroma es reconocida por sus óptimas condiciones agroclimáticas para el cultivo de quinua, lo cual asegura la obtención de un producto de alta calidad con características nutricionales y fisicoquímicas superiores. Además, la quinua real blanca de esta zona es especialmente valorada por su pureza y propiedades organolépticas, lo que la convierte en un candidato ideal para estudios de investigación (Rodríguez, 2021).



Figura 7. Limpieza del lugar de trabajo.

Fuente: Elaboración propia, 2024.

Una vez que se obtenga la materia prima, específicamente la quinua real blanca de la región seleccionada, se procederá con su limpieza

Este proceso incluirá la eliminación de tierra, residuos, ramas y cualquier otra impureza visible.



Figura 8. Limpieza de la Quinua.
Fuente: Elaboración propia, 2024.



Figura 9. Limpieza de la Quinua.
Fuente: Elaboración propia, 2024.

Es crucial evitar lavar la quinua o raspar el polvo superficial, ya que esto podría provocar su desaponificación. La desaponificación prematura de la quinua comprometería su perfil químico natural, alterando así los resultados de los análisis posteriores, tales como la determinación de compuestos fenólicos, saponinas y otros metabolitos secundarios (García, 2020).

Una vez que la quinua esté adecuadamente limpia, procederemos con su caracterización.

2.5.2. Caracterización de la materia prima: Quinua Real Blanca

En la siguiente tabla se muestran los resultados de los análisis fisicoquímicos y microbiológicos realizados por el Laboratorio del Centro de Análisis Investigación y Desarrollo (CEANID).

Tabla II- 10 Análisis fisicoquímicos y microbiológicos de la materia prima

Parámetro	Técnica y/o método de ensayo	Unidad	Resultado
Humedad	NB 313019:06	%	0.93
Ceniza	NB 39034:10	%	3.42
Densidad aparente	NB 38034:06	g/ml	0.72
Fibra	Digestión ácida	%	3.43
Grasa	NB 313019:06	%	0.59
Humedad	NB 39028:09	%	9.59
Bacterias aerobias mesófilas	NB 32003:02	UFC/g	6.3 x 10 ³
Coliformes totales	NB 32005:02	UFC/g	4.9 x 10 ³

NB: Norma Boliviana g/ml: milímetro gramo: formadora de colonias por: %: porcentaje UFC/g: Unidad por gramo

Fuente: Elaborado en el laboratorio CEANID, 2024

2.5.3. Pesado de la quinua

Para cada ensayo o experimento del diseño factorial de los 8 experimentos, se pesarán 500 gramos de quinua real blanca. Este proceso se llevará a cabo utilizando una balanza analítica de alta precisión para asegurar la exactitud y reproducibilidad de las mediciones.

- Preparación de la balanza:** Antes de iniciar el pesado, la balanza analítica debe ser calibrada utilizando patrones de masa certificados para asegurar precisión. Es crucial verificar que la balanza esté nivelada y libre de cualquier interferencia externa, como corrientes de aire o vibraciones (AOAC, 2016).



Figura 10. Balanza analítica del LOU.

Fuente: Elaboración propia, 2024.

- Tara del recipiente:** Colocar un recipiente limpio y seco en la balanza y ajustar la tara a cero. Esto elimina el peso del recipiente del total, permitiendo medir únicamente la masa de la quinua.

3. **Adición de la muestra:** Se agregarán 500 gramos de quinua al recipiente tarado. Este proceso debe hacerse lentamente para evitar derrames y asegurar que la cantidad exacta sea medida. Si es necesario, usar pinzas o una cuchara limpia para ajustar la masa.



Figura 11. Añadiendo la muestra en la balanza analítica del LOU.

Fuente: Elaboración propia, 2024.

4. **Registro del peso:** Una vez que se ha alcanzado la masa de 500 gramos, se registra el peso con precisión. Este peso será utilizado para cada uno de los ensayos o experimentos del diseño factorial, incluyendo sus réplicas.

2.5.4. Medición de la concentración del solvente hidroalcohólico

La concentración del solvente hidroalcohólico es un factor crítico en el proceso de extracción de saponinas. Diferentes concentraciones de alcohol pueden afectar la

solubilidad de las saponinas y otros compuestos bioactivos, influenciando así la eficiencia de extracción y el perfil químico del extracto final. Un solvente con una concentración adecuada maximiza la extracción de saponinas sin comprometer la calidad del extracto.

Para medir la concentración del solvente hidroalcohólico, es esencial determinar el porcentaje de cada componente (agua y alcohol) en la mezcla. Este procedimiento es crucial para asegurar que la concentración del solvente sea consistente y adecuada para la extracción de saponinas de la quinua real blanca. A continuación, se detallan los pasos y consideraciones para medir y ajustar la concentración del solvente hidroalcohólico:

Preparación de la solución:

Se prepararán soluciones hidroalcohólicas con diferentes concentraciones de alcohol etílico (etanol) en agua destilada, tales presupuestadas en el diseño factorial como 30% y 75% EtOH/H₂O (v/v). Estas concentraciones se seleccionan basándose en su eficacia reportada para la extracción de compuestos bioactivos.

Cálculos para Obtener una Disolución de Agua y Alcohol con una Concentración de 30% usando Alcohol al 96%

Para preparar una disolución hidroalcohólica con una concentración específica de alcohol (etanol), se deben realizar cálculos basados en el volumen. En este caso, se desea preparar una disolución con una concentración de 30% de etanol (v/v), lo que significa que 30% del volumen total de la disolución será etanol, y el 70% restante será agua desionizada.

Fórmula General

Para una disolución con concentración C % (v/v) de etanol:

$$\text{Ec. II-2}$$

$$C = \left(\frac{V_{etanol}}{V_{total}} \times 0.96 \right) \times 100$$

Donde:

- V_{etanol} = es el volumen de etanol al 96%.
- V_{total} = es el volumen total de la disolución.
- 0.96 es la fracción de etanol puro en el alcohol al 96%.

Para obtener una concentración de 30% (v/v) usamos la Ec. II-2:

$$30 = \left(\frac{V_{etanol}}{V_{total}} \times 0.96 \right) \times 100 \quad Ec. \text{ II-3}$$

Reorganizando para encontrar V_{etanol}

$$V_{etanol} = \frac{0.30 \times V_{total}}{96} \quad Ec. \text{ II-4}$$

Preparación

Preparar 2 litro (2000 mL) de disolución al 30% (v/v) de etanol.

1. Calcular el Volumen de Etanol Necesario:

$$V_{etanol} = \frac{30 \times 2000}{96} \text{ mL} = 625 \text{ mL}$$

2. Calcular el Volumen de Agua Necesario:

$$V_{agua} = V_{total} - V_{etanol} \quad Ec. \text{ II-5}$$

$$V_{agua} = 2000 \text{ mL} - 625 \text{ mL} = 1375 \text{ mL}$$

3. Preparación de la Disolución:

- Medir 625 mL de etanol al 96 %.
- Medir 1375 mL de agua desionizada.
- Mezclar los dos líquidos en un recipiente volumétrico.

Cálculos para Obtener una Disolución de Agua y Alcohol con una Concentración de 75% usando Alcohol al 96%

Para preparar una disolución hidroalcohólica con una concentración específica de alcohol (etanol), se deben realizar cálculos basados en el volumen. En este caso, se desea preparar una disolución con una concentración de 75% de etanol (v/v), lo que significa que 75% del volumen total de la disolución será etanol, y el 25% restante será agua desionizada.

Para obtener una concentración de 75% (v/v) usamos la Ec.II-2:

$$75 = \left(\frac{V_{etanol}}{V_{total}} \times 0.96 \right) \times 100 \quad \text{Ec. II-6}$$

Reorganizando para encontrar V_{etanol}

$$V_{etanol} = \frac{75 \times V_{total}}{96} \quad \text{Ec. II-7}$$

Preparación

Preparar 2 litros (2000 mL) de disolución al 75% (v/v) de etanol.

2. Calcular el Volumen de Etanol Necesario:

$$V_{etanol} = \frac{75 \times 2000}{96} \text{ mL} = 1562.5 \text{ mL}$$

3. Calcular el Volumen de Agua Necesario: Para esto usamos la Ec.II-5

$$V_{\text{agua}} = 2000 \text{ mL} - 1562.5 \text{ mL} = 437.5 \text{ mL}$$

4. Preparación de la Disolución:

- Medir 1562.5 mL de etanol al 96 %.
- Medir 437.5 mL de agua desionizada.
- Mezclar los dos líquidos en un recipiente volumétrico.

Medición de la concentración: La concentración del solvente hidroalcohólico se medirá utilizando un alcoholímetro calibrado a 20°C. Estos instrumentos permiten determinar el porcentaje de alcohol en la mezcla con precisión.



Figura 12. Concentración 30% medido con alcoholímetro.

Fuente: Elaboración propia, 2024.

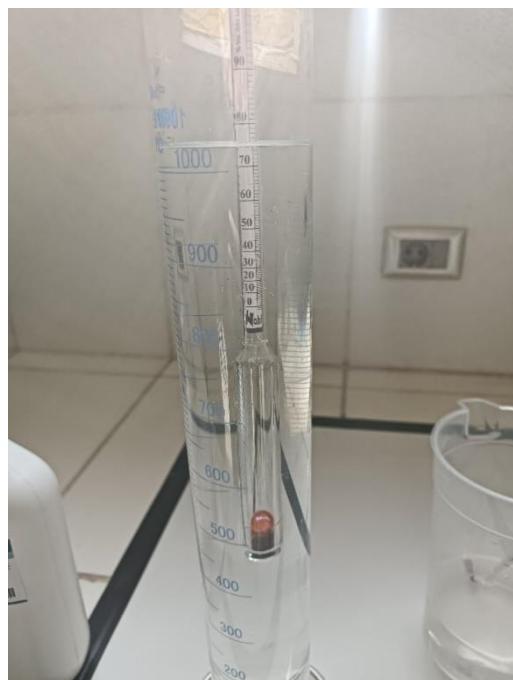


Figura 13. Concentración 75% medido con alcoholímetro.
Fuente: Elaboración propia, 2024.



Figura 14. Alcoholímetro.
Fuente: Elaboración propia, 2024.

Registro de datos: Se registrarán las concentraciones medidas y se ajustarán, si es necesario, añadiendo más alcohol o agua destilada para alcanzar la concentración deseada. Cada lote de solvente preparado se documentará detalladamente para mantener la consistencia en los experimentos.

En la siguiente tabla se muestran las medidas para cada concentración de cada solución

Tabla II- 11 Concentraciones y volúmenes requeridos para la disolución

Disoluciones de solventes	Concentración al 30%	Concentración al 75%
Volumen de Etanol al 96%	625 mL	1562.5 mL
Volumen de Agua Desionizada	1375 mL	437.5 mL

Fuente: Elaboración propia, 2024.

2.5.5. Proceso de extracción por equipo Soxhlet

La extracción mediante el equipo Soxhlet es un método eficaz y ampliamente utilizado para la obtención de compuestos bioactivos, como las saponinas, a partir de materiales vegetales. Se utilizó el equipo Soxhlet adaptado del Laboratorio de Operaciones Unitarias.

A continuación, se describe el procedimiento detallado para la extracción de saponinas de la quinua real blanca utilizando este método, empleando el grano entero de quinua.

2.5.6. Preparación de la Muestra:

La quinua real blanca, previamente limpia, se utilizará en su forma entera. Este enfoque facilita la manipulación.

Se pondrá 500 gramos de Quinua y la colocamos en la cámara de extracción.



Figura 15. Colocando la quinua en la cámara del extractor.

Fuente: Elaboración propia, 2024.



Figura 16. Quinua en la cámara del extractor.

Fuente: Elaboración propia, 2024.

2.5.7. Montaje del Equipo Soxhlet:

Montar el equipo Soxhlet, primero se coloca la solución hidroalcohólica en la olla a presión.

Colocar la cantidad de 500 gramos en la cámara de extracción, le pondremos en una cofia para evitar que los granos de quinua pasen al cámara colector.



Figura 17. Quinua en filtro colocado en la cámara del extractor.

Fuente: Elaboración propia, 2024.



Figura 18. Quinua en filtro colocado en la cámara del extractor.

Fuente: Elaboración propia, 2024.

Una vez colocado el solvente en la cámara del colector y la quinua en la cámara de extracción, se procederá a armar el equipo colocando primero la olla a presión en la coccinilla eléctrica, luego la estructura metálica que sostendrá la cámara de extracción, y finalmente la cámara extracción encima, el refrigerante se regulará para que encaje con la cámara de extracción



Figura 19. Montaje del equipo Soxhlet del Laboratorio de Operaciones Unitarias (LOU).

Fuente: Elaboración propia, 2024.



Figura 20. Equipo Soxhlet del Laboratorio de Operaciones Unitarias (LOU).

Fuente: Elaboración propia, 2024.

2.5.8. Proceso de Extracción:

Calentar la cámara del colector (olla a presión) utilizando una cocinilla eléctrica, asegurándose de mantener una temperatura constante que permita la adecuada evaporación y condensación del solvente hidroalcohólico, las temperaturas para los procesos serán de 75°C y 93°C.

El solvente se evaporará, condensará en el refrigerante y caerá sobre los granos de quinua en la cámara de extracción.



Figura 21. Refrigerante del Equipo Soxhlet.

Fuente: Elaboración propia, 2024.

A medida que el solvente se acumula en el extractor Soxhlet, disuelve las saponinas y otros compuestos solubles presentes en la quinua.

Cuando el nivel de solvente en el extractor Soxhlet alcanza el sifón, se vacía automáticamente de nuevo en la cámara del colector, llevando los compuestos extraídos.

Este ciclo de extracción continúa repetidamente, dependiendo el proceso se hará de 3 a 10 horas para asegurar la máxima extracción de saponinas.

El extracto se recoge y se almacena en botellas, protegidos de la luz y a temperaturas bajas, para su posterior proceso.



Figura 22. Extracto de Saponina recuperado del Equipo Soxhlet.

Fuente: Elaboración propia, 2024.

OBSERVACIÓN: Problemas en la Recirculación del Solvente

El equipo Soxhlet del Laboratorio de Operaciones Unitarias (LOU) utilizado requiere **un mínimo de un litro** de solvente para la recirculación efectiva. Con **dos litros de solvente hidroalcohólico al 30%**, el proceso de recirculación no fue eficiente a los **75°C**, dado que los **625 ml de alcohol** presentes en la totalidad de los dos litros de solvente no lograron mantener la recirculación adecuada.

En el diseño experimental, se planificaron ocho ensayos para evaluar la eficiencia de la extracción de saponinas bajo diferentes condiciones de temperatura, tiempo y concentración de solvente. Sin embargo, dos de los ensayos no alcanzaron los resultados esperados debido a problemas técnicos y operativos.

En los **ensayos 6 y 8**, se observó que la recirculación del solvente en el equipo Soxhlet no fue óptima, lo que resultó en una extracción incompleta de las saponinas.

Esto se debió principalmente a una cantidad insuficiente de solvente en el sistema, lo que impidió que se alcanzara el nivel necesario para activar el sifón de manera eficiente.

Aunque los ensayos 6 y 8 no fueron exitosos, los seis ensayos restantes proporcionaron datos consistentes y confiables que permitieron alcanzar los objetivos del estudio. La exclusión de estos ensayos no afectó significativamente la capacidad del estudio para evaluar la eficiencia del método de extracción de saponinas.

Tabla II-12 Resumen detallado del problema en los ensayos 6 y 8

Ensayo	Temperatura (°C)	Tiempo (horas)	Concentración de solvente (%)	Resultado	Observaciones
1	93	10	75	Éxito	Recirculación óptima
2	93	10	30	Éxito	Recirculación óptima
3	93	3	75	Éxito	Recirculación óptima
4	93	3	30	Éxito	Recirculación óptima
5	75	10	75	Éxito	Recirculación óptima
6	75	10	30	No funcionó	Recirculación insuficiente
7	75	3	75	Éxito	Recirculación óptima
8	75	3	30	No funcionó	Recirculación insuficiente

Fuente: Elaboración propia, 2024.

2.5.9. Recuperación del Extracto:

Después de completar el proceso de extracción, el solvente contenido en la cámara del colector se concentra mediante evaporación utilizando un rotavapor.



Figura 23. Equipo Rota-Evaporador del Laboratorio de Operaciones Unitarias (LOU).

Fuente: Elaboración propia, 2024.

El extracto concentrado se recoge y se almacena en frascos ámbar, protegidos de la luz y a temperaturas bajas, para su posterior análisis.

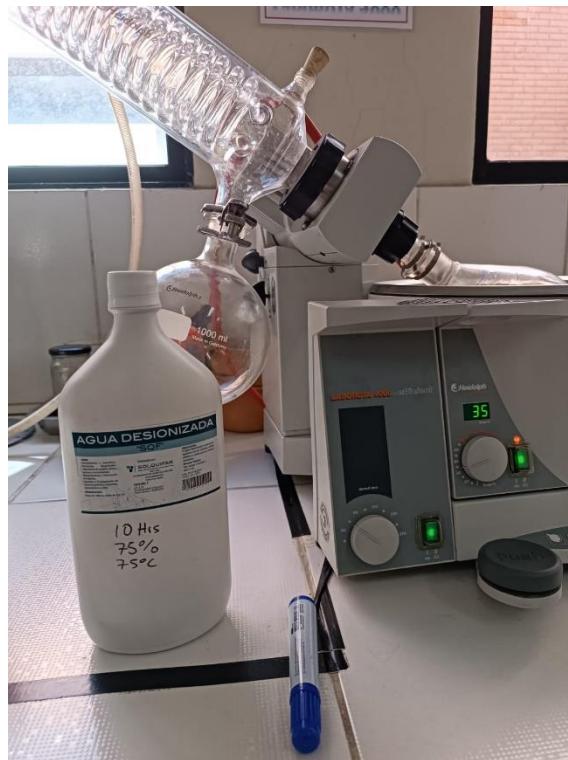


Figura 24. Recipiente donde se recoge el concentrado.

Fuente: Elaboración propia, 2024.

2.5.10. Extracción de Saponina (Post-Proceso por el equipo Soxhlet)

La extracción de saponinas a partir de la quinua real blanca utilizando el equipo Soxhlet es un proceso fundamental en la caracterización y análisis de estas sustancias bioactivas. A continuación, se describe el procedimiento detallado para la obtención y manejo del extracto de saponinas después del proceso de extracción por Soxhlet.

2.5.11. Recuperación del Solvente:

Al concluir el proceso de extracción Soxhlet, el solvente hidroalcohólico que contiene las saponinas disueltas se encuentra en la cámara del colector.

El solvente debe ser recuperado mediante evaporación utilizando un rotavapor o evaporador rotatorio. Este proceso permite la eliminación controlada del solvente, concentrando el extracto.



Figura 25. Equipo Rota-Evaporador del Laboratorio de Operaciones Unitarias (LOU).

Fuente: Elaboración propia, 2024.

2.5.12. Proceso de Evaporación: Proceso en el rotavapor

Configurar el rotavapor con los parámetros adecuados, generalmente una temperatura de baño de agua de alrededor de 50-60°C y una presión reducida de -15 psi para facilitar la evaporación del solvente sin desnaturalizar los compuestos sensibles.

Colocar el matraz 700 ml con el solvente extraído en el rotavapor y proceder a la evaporación hasta que la mayoría del solvente haya sido removido.



Figura 26. Extracto de saponina entrando al Equipo Rota-Evaporador

Fuente: Elaboración propia, 2024.

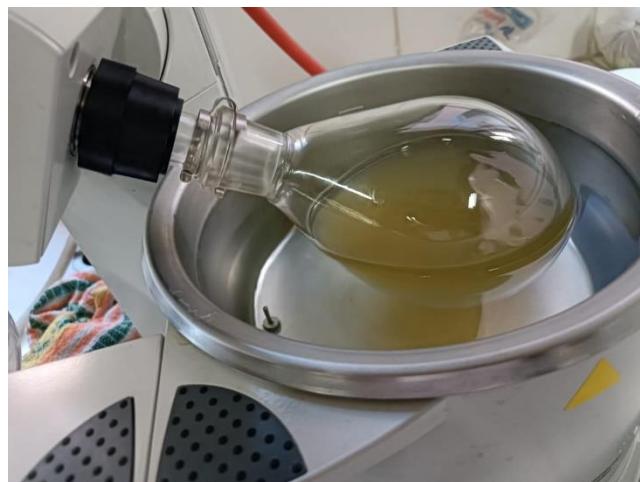


Figura 27. Extracto de saponina en el baño maría del Equipo Rota-Evaporador

Fuente: Elaboración propia, 2024.

Detalle del Procedimiento

a) Condiciones de Operación:

- a. **Temperatura del Baño de Agua:** Se mantuvo a una temperatura adecuada para la volatilización del etanol, el proceso se hizo a una temperatura de 50°C y 60 °C dependiendo el extracto.



Figura 28. Extracto de saponina en el Equipo Rota-Evaporador

Fuente: Elaboración propia, 2024.

- b. **Presión de Vacío:** Se ajustó a -50 kPa psi para facilitar la evaporación del etanol sin superar el límite de presión que podría provocar la ebullición excesiva del solvente.

b) Monitoreo del Proceso:

- a. Se observó el flujo de etanol condensado en el colector del rotavapor.
- b. El proceso continuó hasta que el flujo de etanol condensado disminuyó y el goteo se volvió intermitente.



Figura 29. Recuperación del solvente etanol al 96%

Fuente: Elaboración propia, 2024.

c) Determinación del Punto Final:

- a. El proceso se consideró finalizado cuando el goteo de etanol se redujo a un ritmo intermitente y constante, sugiriendo que la mayor parte del solvente ha sido recuperado.
- b. Se espero unos minutos adicionales para asegurarse de que el flujo intermitente se mantenga, confirmando así la completa recuperación del solvente.



Figura 30. Recuperación del solvente etanol al 96%

Fuente: Elaboración propia, 2024.

2.5.13. Secado del Extracto:

El extracto concentrado requirió un secado adicional para eliminar el agua residual del extracto. Este paso se utilizó una estufa de convección natural a baja temperatura (30-35°C), se colocó 200 ml de los extractos en recipientes de vidrio y se metió a la estufa.



Figura 31. Extractos concentrados de las 6 pruebas

Fuente: Elaboración propia, 2024.



Figura 32. Extractos colocados en la estufa de convección natural.

Fuente: Elaboración propia, 2024.

Se seco el extracto hasta obtener una consistencia sólida, duro unos 7-10 días de secado.

Justificación del tiempo de Secado:

El tiempo de secado de las muestras es un factor crítico en la obtención de extractos de saponina, ya que influye directamente en la calidad y estabilidad del producto final. En tu estudio, el secado se realizó a una temperatura de 30-35°C durante 7-10 días. A continuación, se justifica este tiempo de secado:

- **Temperatura de secado:** La temperatura de 30-35°C fue seleccionada para evitar la desnaturalización de las saponinas, que son compuestos sensibles al calor. Temperaturas más altas podrían degradar las saponinas, reduciendo su actividad biológica y rendimiento. Este rango de temperatura es adecuado para preservar las propiedades fisicoquímicas de las saponinas, como su capacidad surfactante y antioxidante.
- **Tiempo de secado:** El tiempo de 7-10 días se justifica por la necesidad de eliminar completamente el agua residual sin comprometer la integridad de las saponinas. Este tiempo permite una evaporación lenta y controlada, lo que es

crucial para evitar la formación de grumos o la degradación térmica. Además, el uso de una estufa de convección natural asegura que el secado sea uniforme en todas las muestras.

- **Humedad residual:** El contenido de humedad residual en las muestras secas fue inferior al 2%, lo que es adecuado para garantizar la estabilidad del extracto durante el almacenamiento. Este bajo contenido de humedad también facilita la molienda posterior y la obtención de un polvo fino y homogéneo.

En resumen, el tiempo de secado de 7-10 días a 30-35°C es óptimo para garantizar la calidad del extracto de saponina, preservando sus propiedades bioactivas y asegurando un producto estable y fácil de manejar.



Figura 33. Extractos secos de saponina.

Fuente: Elaboración propia, 2024.

2.5.14. Almacenamiento del Extracto:

Una vez seco, se extrajo la saponina seca de los recipientes de vidrio, y se procedió a la molienda en un mortero.



Figura 34. Extractos secos de saponina en el mortero.

Fuente: Elaboración propia, 2024.



Figura 35. Extractos secos molidos de saponina.

Fuente: Elaboración propia, 2024.

Una vez que se hizo la molienda, se procedió al pesaje y almacenamiento en frascos de plástico.



Figura 36. Peso del envase de plástico.

Fuente: Elaboración propia, 2024.



Figura 37. Extractos secos molidos de saponina en el envase de plástico.

Fuente: Elaboración propia, 2024.

A continuación, en la tabla II-13 se mostrarán los pesos de extracto de saponina seca sacados de los 200 ml de extracto concentrado líquido.

Tabla II- 13 Pesos de los extractos secos

Pruebas	Peso de Extracto + Envase	Peso Envase	Peso Extracto Seco
1	9.501 g	6.269 g	3.232
2	9.659 g	6.269 g	3.39
3	8.525 g	6.269 g	2.256
4	9.306 g	6.269 g	3.037
5	8.721 g	6.269 g	2.452
6	Resultado no válido		
7	8.668 g	6.269 g	2.399
8	Resultado no válido		

Fuente: Elaboración propia, 2024.

Todo el procedimiento también se aplica para las réplicas.



Figura 38. Peso del envase de plástico.

Fuente: Elaboración propia, 2024.



Figura 39. Réplica de extractos secos molidos de saponina en el envase de plástico.

Fuente: Elaboración propia, 2024.

A continuación, en la tabla II-15 se mostrarán los pesos de extracto de saponina seca sacados de los 200 ml de extracto concentrado líquido de las réplicas de la segunda extracción según diseño factorial.

Tabla II- 14 Pesos de los extractos secos de la réplica.

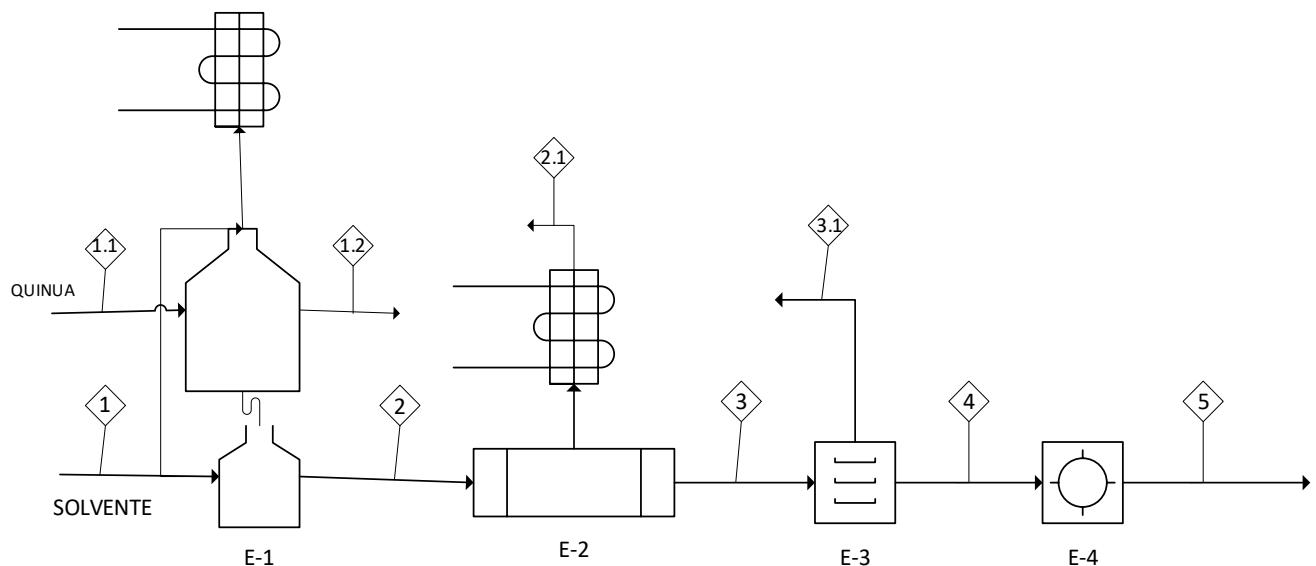
Pruebas	Peso de Extracto + Envase	Peso Envase	Peso Extracto Seco
1	9.808 g	5.976 g	3.832
2	9.597 g	5.976 g	3.621
3	8.934 g	5.976 g	2.958
4	9.489 g	5.976 g	3.513
5	8.591 g	5.976 g	2.615
6	Resultado no válido		
7	8.739 g	5.976 g	2.763
8	Resultado no válido		

Fuente: Elaboración propia, 2024.

El extracto de saponinas se almaceno en frascos, en un lugar fresco y seco, alejados de la luz y a una temperatura ambiente.

2.6.Diagrama de Flujo del Proceso de Extracción de saponina

Diagrama II- 2 Flujo del proceso de obtención de Extracto de Saponina a partir de la quinua real blanca (*Chenopodium quinoa willd*)



Fuente: Elaboración propia, 2024.

Tabla II-15 Lista de Equipos

Abreviatura	Descripción
E-1	Equipo Soxhlet
E-2	Rota-evaporador
E-3	Secador
E-4	Mortero

Fuente: Elaboración Propia, 2024.

Tabla II- 16 Corrientes del proceso de extracción

Corriente	Descripción
C1	Solvente Hidroalcohólico
C1.1	Quinua Real Blanca
C1.2	Residuos materia sólida
C2	Extracto de quinua líquida
C2.1	Solvente etanol 96% recuperado
C3	Concentrado de extracto de quinua líquida
C3.1	Masa de agua evaporada
C4	Extracto seco de saponina
C5	Extracto seco de saponina molido

Fuente: Elaboración Propia, 2024.

2.7.Balance de Materia y Energía

2.7.1. Balance de Materia

El balance de materia inicia en el proceso de extracción mediante equipo Soxhlet se realiza a partir de los 500 gramos del grano de la quinua en condiciones más óptimas posibles. Los datos de los ensayos 6 y 8 no se muestran en la tabla II-17 puesto que hubo un problema que mostraron resultado no válidos anteriormente explicados.

Tabla II- 17 Datos del proceso de obtención de Extracto de saponina

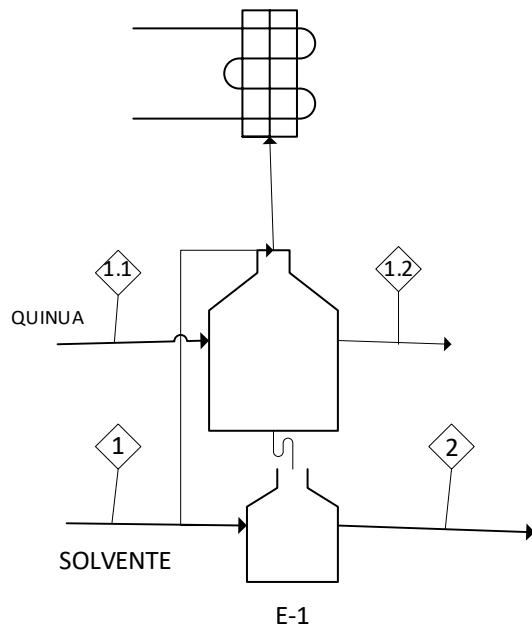
Pruebas	1	2	3	4	5	7
Extracción Soxhlet						
Relación soluto-solvente	1:4	1:4	1:4	1:4	1:4	1:4
Volumen del solvente (ml)	2000	2000	2000	2000	2000	2000
Concentración del solvente (%)	75	30	75	30	75	75

Tiempo de extracción (min)	600	600	180	180	600	180
Densidad del solvente (g/ml)	0.88	0.953	0.88	0.953	0.88	0.953
Temperatura de extracción	93	93	93	93	75	75
Volumen de extractos obtenidos (ml)	1826	1938	1854	1931	1939	1978
Densidad de los extractos (g/ml)	0.953	0.954	0.942	0.967	0.901	0.932
Volumen extractos obtenidos replica (ml)	1831	1922	1856	1927	1931	1972
Densidad de los extractos replicas (g/ml)	0.951	0.956	0.938	0.962	0.905	0.936
Concentración en el Rota-evaporador 4000						
Cantidad inicial de extracto líquido (ml)	700	700	700	700	700	700
Cantidad inicial de extracto líquido (g)	667.1	667.8	659.4	676.9	630.7	652.4
Cantidad inicial de extracto líquido replicas (g)	665.7	669.2	656.6	673.4	663.5	655.2
Temperatura de baño (°C)	60	55	60	55	55	55
Presión de vacío (kPa)	79.9	79.9	79.9	79.9	79.9	79.9
Tiempo (min)	270	210	450	200	270	360
Velocidad de rotación (rpm)	60	60	60	60	60	60
Cantidad de solvente recuperado 96% (ml)	510	191	508	200	479	499
Cantidad de solvente recuperado 96% replicas (ml)	503	197	502	206	475	491
Densidad del solvente recuperado	0.81	0.81	0.81	0.81	0.81	0.81

Cantidad de solvente recuperado 96% (g)	413.1	154.71	411.48	162	387.99	404.19
Cantidad de solvente recuperado 96% replicas (g)	407.43	159.57	406.62	166.86	384.75	397.71
Secado						
Cantidad inicial del extracto de saponina (ml)	200	200	200	200	200	200
Cantidad inicial del extracto de saponina (g)	196.2	194.47	194.62	194.47	180.4	176.67
Cantidad final de extracto seco (gr)	3.232	3.39	2.256	3.037	2.452	2.399
Porcentaje de humedad	98.35	98.26	98.84	98.44	98.64	98.64
Temperatura	35	35	35	35	35	35
Tiempo de secado (días)	10	10	10	10	10	10
Cantidad inicial del extracto de saponina replica (g)	190.2	191.2	187.6	192.4	181.0	187.2
Cantidad final de extracto seco replica (gr)	3.832	3.621	2.958	3.513	2.615	2.763
Triturado y Molido en mortero						
Tiempo de molienda (min)	5	5	5	5	5	5

Fuente: Elaboración propia, 2024.

2.7.2. Balance de materia en Equipo Soxhlet



Balance General:

$$C_1 + C_{1.1} = C_{1.2} + C_2 \quad Ec. II-8$$

$$C_1 = 2000 \text{ ml} * 0.88 \text{ g/ml} = 1760 \text{ g masa de solvente}$$

$$C_{1.1} = 500 \text{ g de quinua inicial}$$

$$C_2 = 1826 \text{ ml} * 0.953 \text{ g/ml} = 1740.18 \text{ g masa de extracto}$$

$$C_{1.2} = C_1 + C_{1.1} - C_2 \quad Ec. II-9$$

$$C_{1.2} = 1760 \text{ g} + 500 \text{ g} - 1740.18 \text{ g}$$

$$C_{1.2} = 519.82 \text{ g de quinua hidratada}$$

Ese es el balance de la prueba 1, se hizo el mismo calculo para cada una de las pruebas restantes y los resultados se muestran en la tabla II-18.

Tabla II-18 Balance de materia completo para las pruebas de extracción Soxhlet de quinua

Prueba	Masa de solvente (g)	Masa de quinua (g)	Masa total de entrada (g)	Masa de extracto (g)	Masa de quinua desaponificada (g)
1	1760	500	2260	1740.18	519.82
2	1906	500	2406	1846.914	559.086
3	1760	500	2260	1746.468	513.532
4	1906	500	2406	1867.277	538.723
5	1760	500	2260	1747.039	512.961
6	Resultado no válido				
7	1906	500	2406	1843.496	562.504
8	Resultado no válido				

Fuente: Elaboración propia, 2024.

El balance de materia completo para las pruebas de extracción Soxhlet de quinua (Tabla II-18) muestra las masas de entrada (solvente y quinua), así como las masas de salida (extracto y quinua desaponificada) para cada prueba. Se observa que la masa de extracto obtenido varía entre las pruebas, lo cual puede atribuirse a las diferentes condiciones de extracción utilizadas, como la concentración del solvente, el tiempo de extracción y la temperatura. La masa de quinua desaponificada representa el material residual después de la extracción

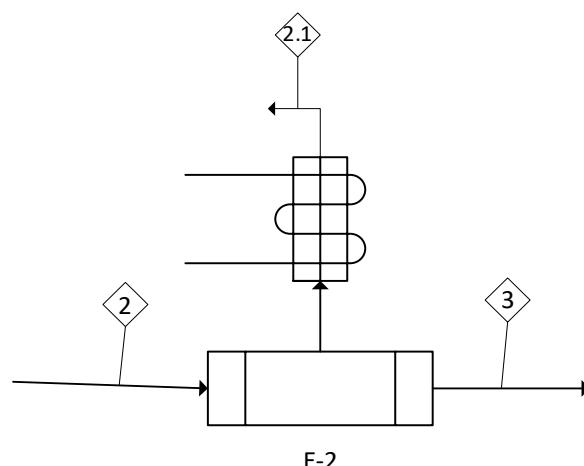
Se hizo el mismo calculo para cada una de las réplicas y los resultados se muestran en la tabla II-19.

Tabla II-19 Balance de materia completo para las réplicas de extracción Soxhlet de quinua

Prueba	Masa de solvente (g)	Masa de quinua (g)	Masa total de entrada (g)	Masa de extracto (g)	Masa de quinua desaponificada (g)
1	1760	500	2260	1741.281	518.719
2	1906	500	2406	1837.432	568.568
3	1760	500	2260	1740.928	519.072
4	1906	500	2406	1853.774	552.226
5	1760	500	2260	1747.555	512.445
6	Resultado no válido				
7	1906	500	2406	1845.792	560.208
8	Resultado no válido				

Fuente: Elaboración propia, 2024.

2.7.3. Balance de materia en el Rota-evaporador



Balance General:

$$C_2 = C_{2.1} + C_3 \quad Ec. II-10$$

$C_2 = 700 \text{ ml} * 0.953 \text{ g/ml} = 667.1 \text{ g}$ de extracto líquido

$C_{2.1} = 413.1 \text{ g}$ de solvente recuperado

$$C_3 = C_2 - C_{2.1}$$

Ec. II-11

$$C_3 = 667.1 \text{ g} - 413.1 \text{ g}$$

$$C_3 = 254 \text{ g}$$
 de extracto concentrado

Donde:

C_2 = Extracto líquido inicial

$C_{2.1}$ = Solvente recuperado

C_3 = Extracto concentrado

Ese es el balance de la prueba 1, se hizo el mismo calculo para cada una de las pruebas restantes y los resultados se muestran en la tabla II-20 y la y tabla II-21.

Tabla II-20 Resultados de balance de materia para el rota-evaporador:

Prueba	C2 (g)	C2.1 (g)	C3 (g)
1	667.1	413.1	254.0
2	667.8	154.71	513.09
3	659.4	411.48	247.92
4	676.9	162.0	514.9
5	630.7	387.99	242.71
6	Resultado no válido		
7	652.4	404.19	248.21
8	Resultado no válido		

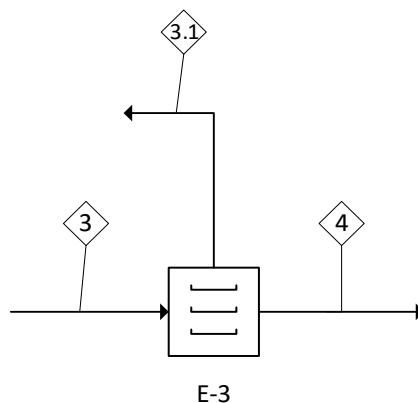
Fuente: Elaboración propia, 2024.

Tabla II-21 Resultados de balance de materia para el rota-evaporador en la replica:

Prueba	C2 (g)	C2.1 (g)	C3 (g)
1	665.7	407.43	258.27
2	669.2	159.57	509.63
3	656.6	406.62	249.98
4	673.4	166.86	506.54
5	633.5	384.75	248.75
6	Resultado no válido		
7	655.2	397.71	257.49
8	Resultado no válido		

Fuente: Elaboración propia, 2024.

2.7.4. Balance de materia en el Secador



Balance General:

$$C_3 = C_{3.1} + C_4 \quad Ec. II-12$$

$C_3 = 196.2$ g de extracto líquido concentrado

$C_{2.1} = 3.232$ g de extracto de saponina seco

$$C_{3.1} = C_3 - C_4 \quad Ec. II-13$$

$$C_{3.1} = 196.2 \text{ g} - 3.232 \text{ g}$$

$$C_{3.1} = 254 \text{ g masa de agua evaporada}$$

Donde:

C_3 = Extracto líquido concentrado inicial

$C_{3.1}$ = Masa de agua evaporada

C_4 = Extracto saponina seco

Calculamos el porcentaje de humedad evaporada:

$$\text{porcentaje de humedad \%} = \frac{C_3 - C_4}{C_3} * 100 \quad \text{Ec. II-14}$$

$$\text{porcentaje de humedad \%} = \frac{196.2 - 3.232}{196.2} * 100 = 98.35 \%$$

Ese es el balance de la prueba 1, se hizo el mismo calculo para cada una de las pruebas restantes y los resultados se muestran en la tabla II-22 y en la tabla II-23.

Tabla II-22 Resumen del balance de materia para el secador:

Prueba	C3 (g)	C3.1 (g)	C4 (g)	Humedad evaporada (%)
1	196.2	192.968	3.232	98.35
2	194.47	191.08	3.39	98.26
3	194.62	192.364	2.256	98.84
4	194.47	191.433	3.037	98.44
5	180.4	177.948	2.452	98.64
6	Resultado no válido			
7	176.67	174.271	2.399	98.64
8	Resultado no válido			

Fuente: Elaboración propia, 2024.

Tabla II-23 Resumen del balance de materia para el secador de la replica:

Prueba	C3 (g)	C3.1 (g)	C4 (g)	Humedad evaporada (%)
1	190.2	186.368	3.832	97.98
2	191.2	187.579	3.621	98.11
3	187.6	184.642	2.958	98.42
4	192.4	188.887	3.513	98.17
5	181.0	178.385	2.615	98.56
6	Resultado no válido			
7	187.2	184.437	2.763	98.52
8	Resultado no válido			

Fuente: Elaboración propia, 2024.

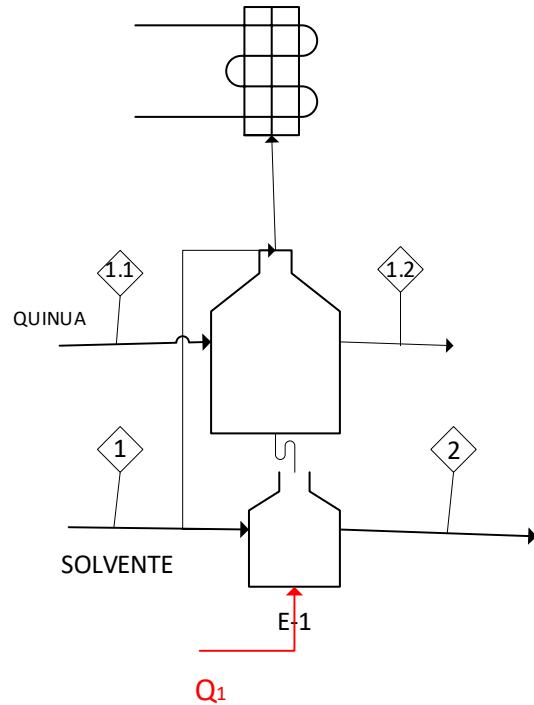
2.8.Balance de Energía

Se realizará el balance de energía para los procesos de Soxhlet, Secado, Concentración y Evaporación en el rota-evaporador.

Considerando que la energía que se transfiere se comprende:

- Calor sensible cuando existe un cambio de temperatura
- Calor latente cuando existe un cambio de fase

2.8.1. Balance de energía en el equipo Soxhlet



Cálculo del Calor Necesario para Calentar el Solvente:

$$Q_{total} = Q_{sensible} + Q_{latente} \quad \text{Ec. II-15}$$

$$Q_{sensible} = m * c * \Delta T \quad \text{Ec. II-16}$$

$$Q_{latente} = m * \Delta H_{vap} \quad \text{Ec. II-17}$$

donde:

- m = masa del solvente ($V \times \rho$)
- c = calor específico del solvente (aproximado)
- ΔT = cambio de temperatura ($93^{\circ}\text{C} - 25^{\circ}\text{C}$ o $75^{\circ}\text{C} - 25^{\circ}\text{C}$)
- ΔH_{vap} = es el calor latente de vaporización del solvente (para la mezcla hidroalcohólica, usaremos un valor aproximado).

Para 75% etanol - 25% agua:

- Calor específico aproximado:

$$c \approx 0.75 * 2.44 \frac{J}{g}^{\circ C} + 0.25 * 4.18 \frac{J}{g}^{\circ C} = 2.875 \frac{J}{g}^{\circ C}$$

- Calor latente de vaporización aproximado:

$$\Delta H_{vap} \approx 0.75 * 846 \frac{J}{g} + 0.25 * 2257 \frac{J}{g} = 1198.75 \frac{J}{g}$$

Para 30% etanol - 70% agua:

- Calor específico aproximado:

$$c \approx 0.30 * 2.44 \frac{J}{g}^{\circ C} + 0.70 * 4.18 \frac{J}{g}^{\circ C} = 3.662 \frac{J}{g}^{\circ C}$$

- Calor latente de vaporización aproximado:

$$\Delta H_{vap} \approx 0.30 * 846 \frac{J}{g} + 0.70 * 2257 \frac{J}{g} = 1834.7 \frac{J}{g}$$

Cálculos para la Prueba 1:

$$Q_{sensible} = 1760 \text{ g} * 2.875 \frac{J}{g}^{\circ C} * (93^{\circ C} - 25^{\circ C}) = 344,400 \text{ J} = 344.4 \text{ kJ}$$

$$Q_{latente} = 1760 \text{ g} * 1198.75 \frac{J}{g} = 2,109,800 \text{ J} = 2109.8 \text{ kJ}$$

$$Q_{total} = 344.4 \text{ kJ} + 2109.8 \text{ kJ} = 2454.2 \text{ kJ}$$

Se hizo los mismos cálculos para cada una de las pruebas, y se muestran en la tabla II-24.

Tabla II-24: Balance de energía corregido para el equipo Soxhlet

Prueb a	Masa de solvent e (g)	Temperatur a (°C)	Composició n etanol (%)	Q_sensibl e (kJ)	Q_latent e (kJ)	Q_tota l (kJ)
1	1760	93	75	344.4	2109.8	2454.2
2	1906	93	30	474.6	3496.9	3971.5
3	1760	93	75	344.4	2109.8	2454.2
4	1906	93	30	474.6	3496.9	3971.5
5	1760	75	75	253.0	2109.8	2362.8
6	Resultado no válido					
7	1906	75	75	273.9	2285.0	2558.9
8	Resultado no válido					

Fuente: Elaboración propia, 2024.

Como los valores de masa de solvente, temperatura y composición de etanol son similares para las réplicas, los valores de balance de energía no cambian, entonces la tabla II-24 aplica también para las réplicas.

Para el Soxhlet, usaremos la energía total calculada anteriormente (Q_{total}) y asumiremos una eficiencia de calentamiento del 70% para una placa calefactora eléctrica típica.

Fórmula:

$$Costo = \left(\frac{Q_{total}}{(0.70 * 3600)} \right) * 0.60 \frac{Bs}{kWh} * (\text{tiempo en horas}) \quad Ec. II-18$$

Cálculo para la Prueba 1:

$$\text{Energía eléctrica} = \frac{2454.2 \text{ kJ}}{\left(0.70 * 3600 \frac{\text{kJ}}{\text{kWh}}\right)} * 10 \text{ h} = 9.7381 \text{ kWh}$$

$$\text{Costo} = 9.7381 \text{ kWh} * 0.60 \frac{\text{Bs}}{\text{kWh}} = 5.84 \text{ Bs}$$

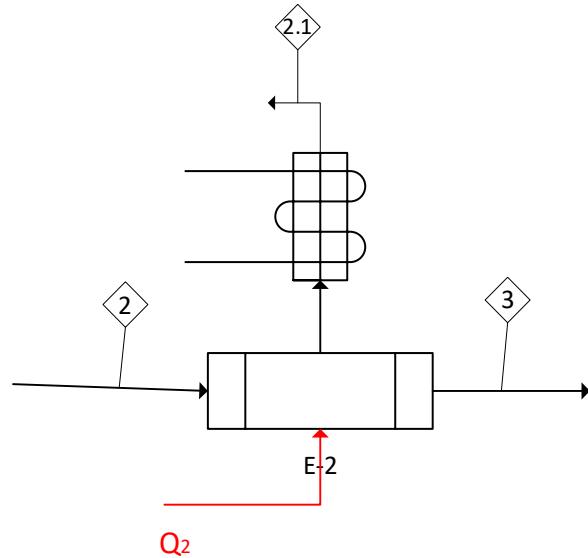
Los costos son iguales para las réplicas, ya que las condiciones son las mismas. En la tabla II-25 se muestran los resultados de los costos energéticos para el equipo Soxhlet.

Tabla II-25: Costo energético del proceso Soxhlet

Prueba	Q_total (kJ)	Tiempo (h)	Energía eléctrica (kWh)	Costo (Bs)
1	2454.2	10	9.7381	5.84
2	3971.5	10	15.7560	9.45
3	2454.2	3	2.9214	1.75
4	3971.5	3	4.7268	2.84
5	2362.8	10	9.3730	5.62
6	Resultado no válido			
7	2558.9	3	3.0463	1.83
8	Resultado no válido			

Fuente: Elaboración propia, 2024.

2.8.2. Balance de energía en Rota- evaporador



$$Q_{total} = Q_{sensible} + Q_{vaporización}$$

Ec. II-19

$$Q_{sensible} = m * Cp_{etanol} * (Ts - Te)$$

Ec. II-20

$$Q_{vaporización} = m * \Delta H_{vap_{etanol}}$$

Ec. II-21

Cálculos para la Prueba 1:

Datos:

$$m = 0.6671 \text{ kg}$$

$$Te = 60^\circ\text{C} = 333.15 \text{ K}$$

$$Ts = 25^\circ\text{C} = 298.15 \text{ K}$$

Para 75% etanol - 25% agua: $Cp \approx 2.875 \text{ J/g}^\circ\text{C} = 2.875 \text{ kJ/kg}\cdot\text{K}$

Para 30% etanol - 70% agua: $Cp \approx 3.662 \text{ J/g}^\circ\text{C} = 3.662 \text{ kJ/kg}\cdot\text{K}$

$$Q_{\text{sensible}} = 0.6671 \text{ kg} * 2.875 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}} * (298.15 \text{ K} - 333.15 \text{ K}) = -67.10 \text{ kJ}$$

$$Q_{\text{vaporización}} = 0.6671 \text{ kg} * 1198.75 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} = 799.72 \text{ kJ}$$

$$Q_{\text{total}} = -67.10 \text{ kJ} + 799.72 \text{ kJ} = 732.62 \text{ kJ}$$

Las condiciones en el rota-evaporador son:

PM etanol = 40,069 g/mol

Patm = 101,3 KPa

Pbomba = 79,9 KPa

Cp agua = 4,185 KJ/Kg K

Para determinar la entalpia de vaporización se debe considerar la presión del sistema con el que se trabaja, la bomba a una presión de 79,9 KPa y la presión atmosférica en la ciudad de Tarija es 103,1 KPa; por lo tanto la presión del sistema es:

$$P_{\text{sistema}} = P_{\text{atmosférica}} - P_{\text{bomba}} \quad \text{Ec. II-22}$$

$$P_{\text{sistema}} = 101,3 \text{ KPa} - 79,9 \text{ KPa}$$

$$P_{\text{sistema}} = 21,4 \text{ KPa}$$

A esta presión del sistema la entalpia de vaporización es:

$$\Delta H_{\text{vap, etanol}} = 94,147 \text{ Kj Kg}$$

En la tabla II-26 se muestran los resultados del balance de energía de las otras pruebas.

Tabla II-26: Balance de energía para el Rota-evaporador:

Prueb a	Masa (kg)	Te (K)	Ts (K)	Cp (kJ/kg·K)	Q_sensibl e (kJ)	Q_vaporizació n (kJ)	Q_tota l (kJ)
1	0.667 1	333.1 5	298.1 5	2.875	-67.10	799.72	732.62
2	0.667 8	328.1 5	298.1 5	3.662	-73.41	1225.26	1151.8 5
3	0.659 4	333.1 5	298.1 5	2.875	-66.33	790.49	724.16
4	0.676 9	328.1 5	298.1 5	3.662	-74.41	1241.95	1167.5 4
5	0.630 7	328.1 5	298.1 5	2.875	-54.37	756.09	701.72
6	Resultado no válido						
7	0.652 4	328.1 5	298.1 5	2.875	-56.24	782.11	725.87
8	Resultado no válido						

Fuente: Elaboración propia, 2024.

Y en la tabla II-27 se muestra el balance para las réplicas.

Tabla II-27: Balance de energía corregido para el Rota-evaporador (Réplicas)

Réplica	Masa (kg)	Te (K)	Ts (K)	Cp (kJ/kg·K)	Q_sensibl e (kJ)	Q_vaporizació n (kJ)	Q_tota l (kJ)
1	0.665 7	333.1 5	298.1 5	2.875	-66.96	798.02	731.06
2	0.669 2	328.1 5	298.1 5	3.662	-73.56	1227.76	1154.2 0
3	0.656 6	333.1 5	298.1 5	2.875	-66.05	787.13	721.08
4	0.673 4	328.1 5	298.1 5	3.662	-74.03	1235.51	1161.4 8
5	0.663 5	328.1 5	298.1 5	2.875	-57.18	795.38	738.20
6	Resultado no válido						
7	0.655 2	328.1 5	298.1 5	2.875	-56.48	785.47	728.99
8	Resultado no válido						

Fuente: Elaboración propia, 2024.

Para el rotavapor, utilizaremos la energía total calculada (Q_{total}) y asumiremos una eficiencia del 80% para el sistema de calentamiento.

Fórmula:

$$Costo = \left(\frac{|Q_{total}|}{(0.80 * 3600)} \right) * 0.60 \frac{Bs}{kWh} * (\text{tiempo en horas}) \quad Ec. II-23$$

Tabla II-28: Costo energético del proceso de Rota-evaporador

Prueba	Q_total (kJ)	Tiempo (h)	Energía eléctrica (kWh)	Costo (Bs)
1	732.62	4.50	1.1471	0.69
2	1151.85	3.50	1.4021	0.84
3	724.16	7.50	1.8885	1.13
4	1167.54	3.33	1.3520	0.81
5	701.72	4.50	1.0980	0.66
6	Resultado no válido			
7	725.87	6.00	1.5144	0.91
8	Resultado no válido			

Fuente: Elaboración propia, 2024.

Cálculo para la Prueba 1:

$$\text{Energía eléctrica} = \frac{|290.15| kJ}{(0.80 * 3600 \frac{kJ}{kWh})} = 0.1009 \text{ kWh}$$

$$\text{Costo} = 0.1009 \text{ kWh} * 0.60 \frac{Bs}{kWh} = 0.06 \text{ Bs}$$

Tabla II-29 Costos energéticos actualizados para las réplicas del rotavapor:

Réplica	Q_total (kJ)	Tiempo (h)	Energía eléctrica (kWh)	Costo (Bs)
1	731.06	4.50	1.1444	0.69
2	1154.20	3.50	1.4045	0.84
3	721.08	7.50	1.8803	1.13
4	1161.48	3.33	1.3449	0.81
5	738.20	4.50	1.1552	0.69
6	Resultado no válido			
7	728.99	6.00	1.5210	0.91
8	Resultado no válido			

Fuente: Elaboración propia, 2024.

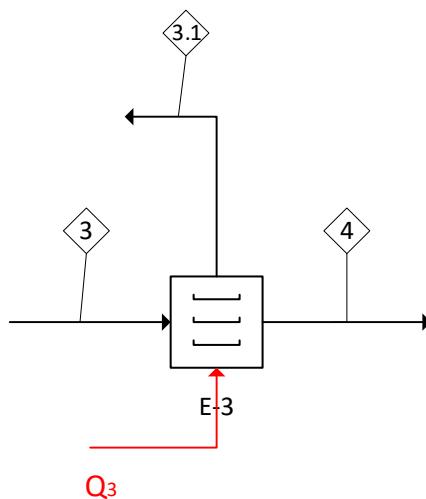
Observación:

Los costos energéticos varían significativamente entre las pruebas debido a los diferentes tiempos de operación.

La prueba 3 y su réplica, a pesar de tener un Q_{total} relativamente bajo, resultan en el mayor costo energético debido al tiempo de operación extendido (7.5 horas).

Las pruebas 2 y 4 (con 30% de etanol) ya no son las más costosas en términos energéticos debido a sus tiempos de operación más cortos.

2.8.3. Balance de energía en el Secador



Energía consumida (E):

$$E = P * t \quad \text{Ec. II-24}$$

Donde:

- P = Potencia del secador (W)
- t = Tiempo de secado (s)

Energía para evaporar agua (Q):

$$Q = m * \lambda \quad Ec. II-25$$

Donde:

- m = Masa de agua evaporada (kg)
- λ = Calor latente de vaporización del agua a 35°C (kJ/kg)

Costo energético (C):

$$C = (E / 3600000) * Tarifa \quad Ec. II-26$$

Donde:

- E = Energía consumida (J)
- Tarifa = Costo de energía eléctrica (Bs/kWh)

Las condiciones de secado de la materia prima son:

$t = 10$ días Tiempo de secado

$T = 35$ °C Temperatura de secado

$P_o = 2000$ W Potencia del secador

Costo de KW h en la ciudad de Tarija es 0,60 Bs.

Cálculos detallados para la Prueba 1:

Energía consumida:

$$\begin{aligned} E &= 2000 W * (10 \text{ días} * 24 \text{ h/día} * 3600 s/h) = 1,728,000,000 J \\ &= 1,728,000 kJ \end{aligned}$$

Energía para evaporar agua:

$$Q = 0.192968 kg * 2257 kJ/kg = 435.53 kJ$$

Costo energético:

$$C = (1,728,000,000 \text{ J} / 3600000 \text{ J/kWh}) * 0.60 \text{ Bs/kWh} = 288.00 \text{ Bs}$$

Nota: Como todas las muestras fueron secadas en el mismo secador, el costo total por el secado de todas las muestras seria de Bs 288. Por eso los costos y la energía consumida para todas las muestras es el mismo, como se muestran en las tablas II-30 y II-31.

Tabla II-30: Balance de energía detallado para el Secador (Pruebas originales)

Prueba	Masa de agua evaporada (kg)	Energía consumida (kJ)	Energía para evaporar agua Q (kJ)	Costo (Bs)
1	0.192968	1,728,000	435.53	288.00
2	0.19108		431.27	
3	0.192364		434.17	
4	0.191433		432.07	
5	0.177948		401.63	
6	Resultado no válido			
7	0.174271	1,728,000	393.33	288.00
8	Resultado no válido			

Fuente: Elaboración propia, 2024.

Tabla II-31: Balance de energía detallado para el Secador (Réplicas)

Réplica	Masa de agua evaporada (kg)	Energía consumida (kJ)	Energía para evaporar agua Q (kJ)	Costo (Bs)
1	0.186368	1,728,000	420.63	288.00
2	0.187579		423.36	
3	0.184642		416.73	
4	0.188887		426.32	
5	0.178385		402.61	
6		Resultado no válido		
7	0.184437	1,728,000	416.27	288.00
8		Resultado no válido		

Fuente: Elaboración propia, 2024.

Observaciones:

- La energía consumida y el costo son constantes para todas las pruebas y réplicas debido a que el tiempo de secado y la potencia del secador son fijos.
- La eficiencia energética es extremadamente baja en todos los casos, variando entre 0.0228% y 0.0252% para las pruebas originales, y entre 0.0233% y 0.0247% para las réplicas.
- La variación en la eficiencia entre las pruebas se debe únicamente a las diferencias en la cantidad de agua evaporada.
- El costo energético del proceso de secado es significativo, con 288.00 Bs por cada prueba o réplica.

2.9. Selección de la muestra patrón y método de espuma para Saponinas

Antes de proceder con el método de espuma para la cuantificación de saponinas, fue necesario realizar un pretratamiento para seleccionar la **muestra más adecuada** entre las **seis muestras exitosas de las ocho iniciales que se obtuvo en este proyecto**. Las

otras dos muestras no lograron ser efectivas debido a problemas en el proceso de recirculación del solvente hidroalcohólico en el equipo Soxhlet, ocasionados por una temperatura de 75°C y una concentración del solvente hidroalcohólico al 30%.

Se procedió de esta manera ya que a la hora de buscar o comprar alguna muestra patrón de un laboratorio no se encontraron en venta y/o disponibles, y mandar a hacer la muestra patrón llevaría un tiempo aproximado de 3-4 meses y un costo alto.

El M Sc. Santiago Tarqui Tarqui, jefe del laboratorio de cromatografía, me sugirió elegir de entre una de mis muestras realizadas, elegir la que contenga mayor contenido de saponinas, por eso se hizo el pretratamiento para elegir la muestra patrón de entre mis seis muestras exitosas.

2.10. Selección de la muestra patrón mediante el Método de Espuma

Para determinar la muestra patrón que contenga la mayor cantidad de saponinas para los cálculos en el método de espuma, se realizó un pretratamiento utilizando el método de espuma en las seis muestras viables. El procedimiento fue el siguiente:

Preparación de Muestras:

Se tomaron 5 ml de cada muestra y se colocaron en tubos de ensayo de 16 x 16 mm.

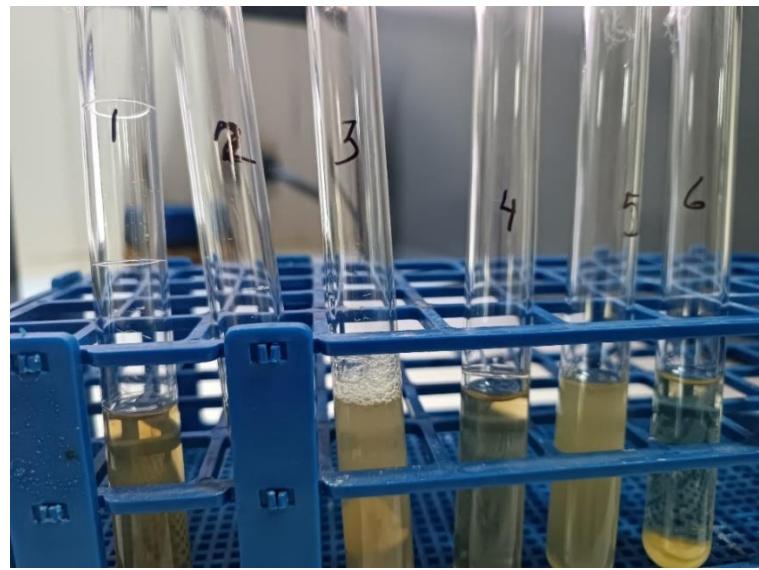


Figura 40. Tubos de ensayo con 5 ml de extracto líquido de saponina.

Fuente: Elaboración propia, 2024.

2.10.1. Agitación y Reposo:

Las muestras se agitaron vigorosamente durante 5 minutos.

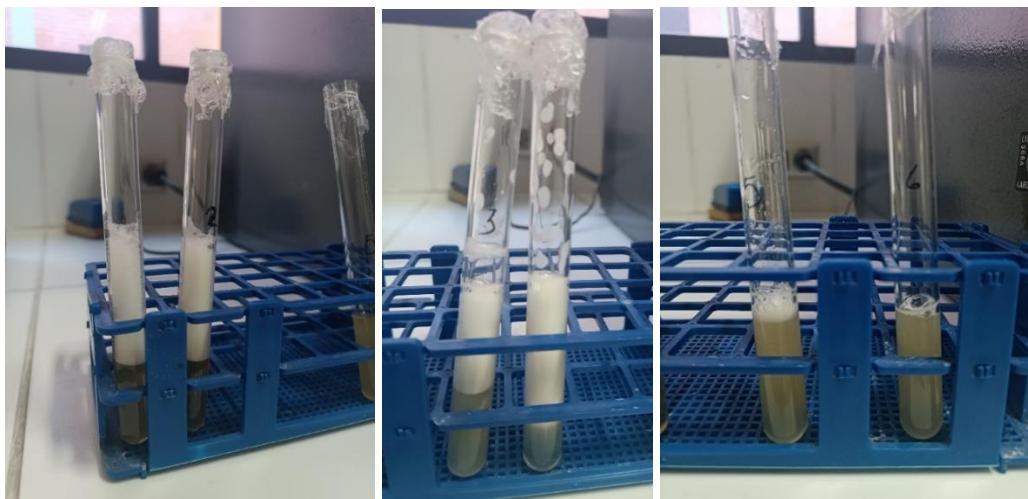


Figura 41. Espuma después de 5 min de agitación de los extractos líquidos de saponina.

Fuente: Elaboración propia, 2024.

Posteriormente, se dejaron reposar durante 5 minutos para permitir la formación de espuma.

2.10.2. Medición de la Altura de Espuma:

Se midió la altura de la espuma formada en cada tubo de ensayo.



Figura 42. Altura de espuma de los extractos líquidos de saponina.
Fuente: Elaboración propia, 2024.

La muestra con mayor altura de espuma fue seleccionada como la muestra patrón. Entre las muestras, la primera muestra (extraída a 93°C, con una solución hidroalcohólica al 75%, durante 10 horas) mostró la mayor altura de espuma, con una altura de 5.3 cm, por lo cual fue elegida como muestra patrón.

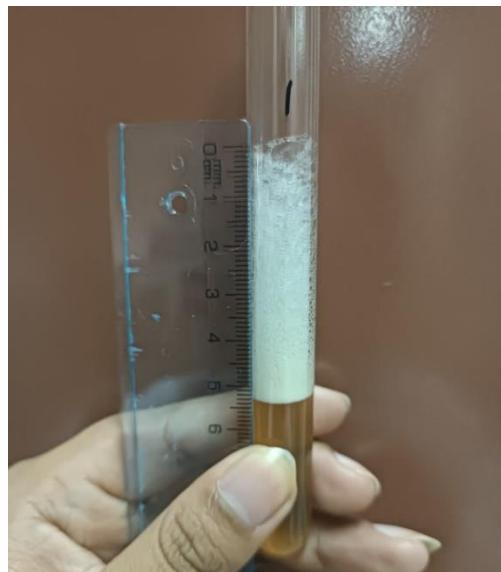


Figura 43. Altura de espuma del extracto líquido de saponina de la Prueba 1.
Fuente: Elaboración propia, 2024.

Tabla II-32 Muestras y alturas de espuma de las pruebas y sus réplicas

Pruebas	Altura (cm)	Replica Altura (cm)
Prueba 1 (93°C,75%,10 Horas)	5.3	5.1
Prueba 2 (93°C,30%,10 Horas)	4.7	4.8
Prueba 3 (93°C,75%,3 Horas)	3	3.2
Prueba 4 (93°C,30%,3 Horas)	3.5	3.3
Prueba 5 (75°C,75%,10 Horas)	0.5	0.5
Prueba 6 (75°C,30%,10 Horas)	Resultado no válido	
Prueba 7 (75°C,75%,3 Horas)	0.2	0.3
Prueba 8 (75°C,30%,3 Horas)	Resultado no válido	

Fuente: Elaboración propia, 2024.

El pretratamiento y la selección de la muestra mediante el método de espuma fueron cruciales para asegurar la eficiencia del análisis y optimizar los recursos disponibles.

2.11. Análisis Cromatografía Líquida de Alta Presión HPLC en la muestra patrón.

Debido a los costos elevados del análisis HPLC (700 Bs por muestra), se decidió enviar solo la muestra seleccionada al laboratorio de química de la Universidad Mayor de San Andrés (UMSA). El análisis arrojó un contenido de saponinas del 23,9% con una desviación estándar (DS) de 0.2, la cual se usará como muestra patrón para determinar las cantidades de saponina de las otras 5 muestras.

2.12. Cuantificación de la saponina en los extractos

Las saponinas se pueden valorar por métodos físicos como el llamado Afro simétrico o método de Espuma, y análisis de Cromatografía de líquidos de alta resolución HPLC, que se mandó a hacer en los laboratorios de la UMSA, para poder comparar los resultados obtenidos.

La muestra con 23,9% de saponinas (confirmada por HPLC) como patrón para analizar las otras 5 pruebas. Vamos a diseñar un procedimiento para esto:

2.12.1. Preparación de la solución patrón:

Usar la muestra con 23,9% de saponinas (93°C, 75% solución hidroalcohólica, 10 horas de extracción). Eso podría también interpretarse como 2390 ppm en 1 gramo.

Por conveniencia de una gráfica más definida solo se usó 0.5 gramos, es decir, 1195 ppm.

Pesar 0,5 gramo de esta muestra.



Figura 44. Pesaje de extracto seco de saponina.

Fuente: Elaboración propia, 2024.

Disolver en 100 mL de agua destilada (esto dará una solución de 1195 ppm de saponinas).



Figura 45. Medición de agua desionizada en una probeta de 100 ml.

Fuente: Elaboración propia, 2024.

2.12.2. Preparación de diluciones patrón:

A continuación, en la tabla II-33 se mostrará las preparaciones de la solución patrón.

Tabla II-33 Concentraciones y volúmenes requeridos para la disolución

Concentración (ppm)	Volumen solución patrón (mL)	Volumen agua destilada (mL)
1195 (100%)	5	0
956 (80%)	4	1
717 (60%)	3	2
478 (40%)	2	3
239 (20%)	1	4
0 (0%, blanco)	0	5

Fuente: Elaboración propia, 2024.

2.12.3. Procedimiento Prueba de Espuma para cada dilución:

Tomar 5 mL de las disoluciones y colocarlas en tubos de ensayo.

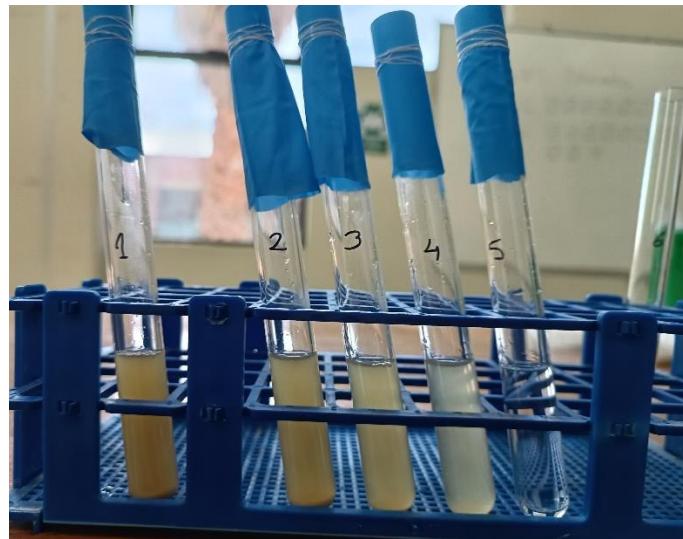


Figura 46. Extracto líquido de saponina de muestra patrón.

Fuente: Elaboración propia, 2024.

Agitar vigorosamente durante 5 minutos.



Figura 47. Espuma del extracto líquido de saponina después de agitar.

Fuente: Elaboración propia, 2024.

Dejar reposar 30 minutos.

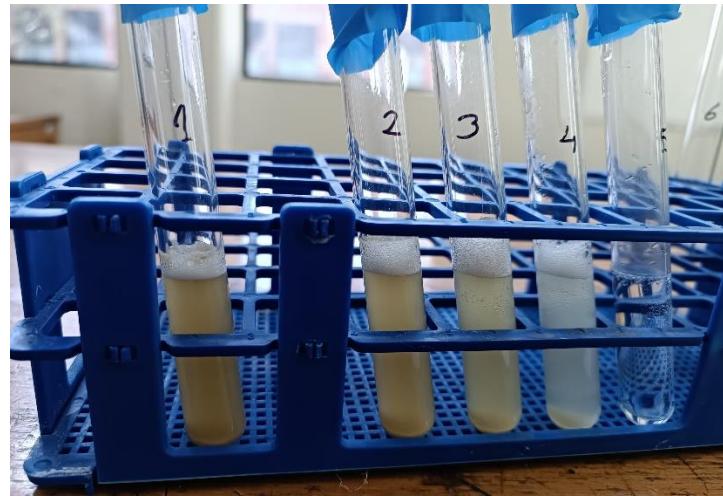


Figura 48. Espuma del extracto después de 30 min.

Fuente: Elaboración propia, 2024.

Agitar nuevamente durante 5 minutos.

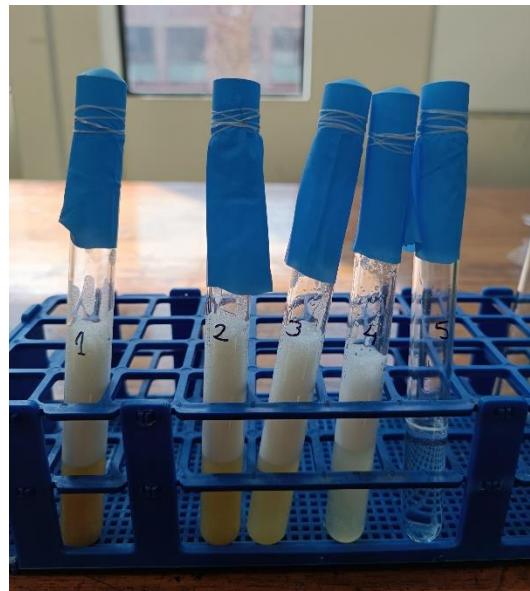


Figura 49. Espuma del extracto después de agitar.

Fuente: Elaboración propia, 2024.

Dejar reposar 5 minutos.



Figura 50. Espuma del extracto después de 5 min.

Fuente: Elaboración propia, 2024.

Medir la altura de la espuma.

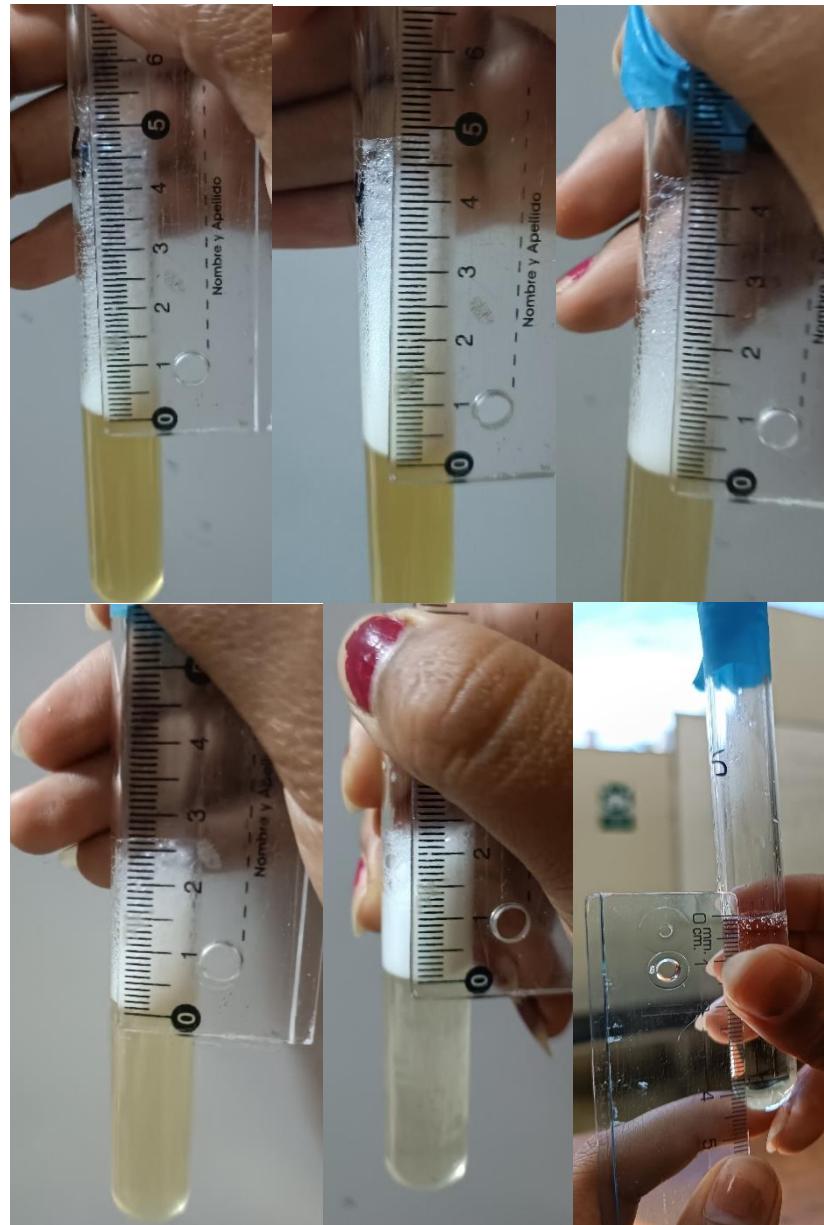


Figura 51. Altura de espuma de las muestras de saponina.

Fuente: Elaboración propia, 2024.

Repetir tres veces para cada concentración.

2.12.4. Registro de datos para la curva de calibración:

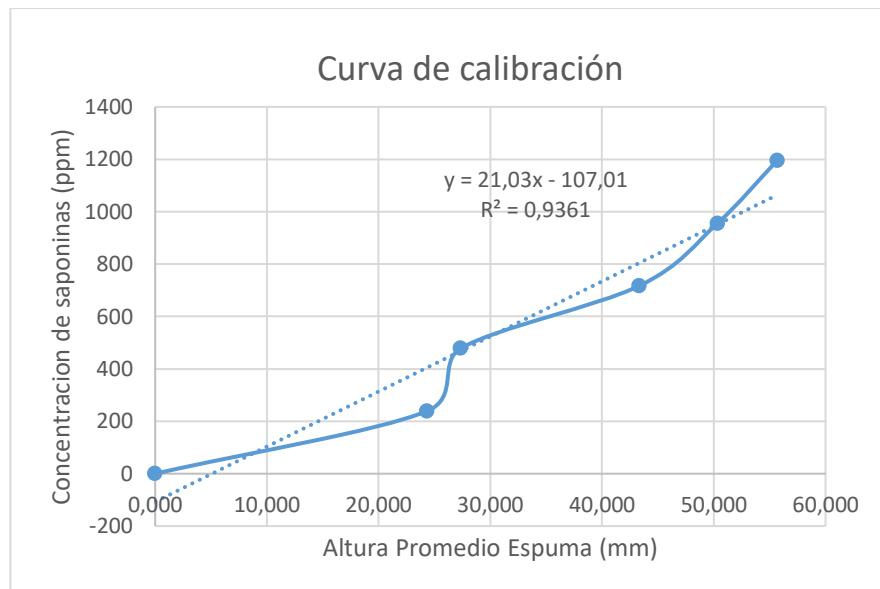
Tabla II-34 Concentraciones y Alturas de espuma

Concentración (ppm)	Altura espuma 1 (mm)	Altura espuma 2 (mm)	Altura espuma 3 (mm)	Promedio (mm)
1195	55	56	56	55,667
956	50	51	50	50,333
717	44	43	43	43,333
478	27	27	28	27,333
239	25	23	25	24,333
0	0	0	0	0

Fuente: Elaboración propia, 2024.

2.12.5. Representación gráfica de la curva de calibración:

- Eje X: Altura promedio de espuma (mm)
- Eje Y: Concentración de saponinas (ppm)
- Añadir línea de tendencia lineal
- Mostrar ecuación de la línea y valor R^2



Grafica II- 1. Grafica de la curva de calibración.

Fuente: Elaboración propia, 2024.

2.12.6. Análisis para cada una de las 5 pruebas restantes:

- Pesar 0.5 gramo de muestra.
- Disolver en 100 mL de agua destilada.
- Realizar el método de espuma.
 - Medir 5 mL y colocar en tubo de ensayo
 - Agitar durante 5 min
 - Dejar reposar durante 30 min
 - Agitar nuevamente durante 5 min
 - Dejar reposar 5 min
 - Medir la altura
- Repetir el proceso y medir la altura de la espuma tres veces.

2.12.7. Registro de datos para las muestras problema:

Tabla II-35 Alturas de espuma para las 5 pruebas restantes

Muestra	Condiciones de extracción	Altura espuma 1 (mm)	Altura espuma 2 (mm)	Altura espuma 3 (mm)	Promedio (mm)
2	93°C, 30%, 10h	49	47	37	44,333
3	93°C, 75%, 3h	22	20	18	20
4	93°C, 30%, 3h	49	47	46	47,333
5	75°C, 75%, 10h	8	7	5	6,667
6	75°C, 30%, 10h	Resultado no válido			
7	75°C, 75%, 3h	3	4	3	3,333
8	75°C, 30%, 3h	Resultado no válido			

Fuente: Elaboración propia, 2024.

Tabla II-36 Alturas de espuma para las 6 pruebas replicas restantes

Muestra	Condiciones de extracción	Altura espuma 1 (mm)	Altura espuma 2 (mm)	Altura espuma 3 (mm)	Promedio (mm)
1	93°C, 75%, 10h	46	45	43	44,667
2	93°C, 30%, 10h	47	43	40	43,333
3	93°C, 75%, 3h	23	17	19	19,667
4	93°C, 30%, 3h	47	44	48	46,333
5	75°C, 75%, 10h	8	6	6	6,667
6	75°C, 30%, 10h	Resultado no válido			
7	75°C, 75%, 3h	4	4	3	3,667
8	75°C, 30%, 3h	Resultado no válido			

Fuente: Elaboración propia, 2024.

2.12.8. Cálculo de la concentración de saponinas

Ecuación de la línea de tendencia de la curva de calibración es:

$$y = 21.03x - 107.01 \quad \text{Ec. II-27}$$

Usando los promedios de espuma de los

$$x_1 = 44.333$$

$$x_2 = 20$$

$$x_3 = 47.333$$

$$x_4 = 6.667$$

$$x_5 = 3.333$$

Utilizamos la fórmula cuadrática para resolver cada ecuación:

$$y_1 = 21.03 * 44.333 - 107.01$$

$$y_2 = 21.03 * 20 - 107.01$$

$$y_3 = 21.03 * 47.333 - 107.01$$

$$y_4 = 21.03 * 6.667 - 107.01$$

$$y_5 = 21.03 * 3.333 - 107.01$$

Para cada ecuación resolveremos cada uno:

$$y_1 = 825.312$$

$$y_2 = 313.59$$

$$y_3 = 888.402$$

$$y_4 = 33.197$$

$$y_5 = 5.143$$

Soluciones Finales:

Para $x_1 = 44.333$:

$$y_1 \approx 825.312$$

Para $x_2 = 20$:

$$y_2 \approx 313.59$$

Para $x_3 = 47.333$

$$y_3 \approx 888.402$$

Para $x_4 = 6.667$

$$y_4 \approx 33.197$$

Para $x_5 = 5.333$

$$y_5 \approx 5.143$$

Fórmula para calcular el porcentaje de saponinas

$$\text{Porcentaje de saponinas} = \frac{\text{ppm}}{10000} * 100 = \% \text{saponinas}$$

Base Teórica de la fórmula

ppm (partes por millón) es una medida de concentración que indica cuántas partes de una sustancia hay en un millón de partes de solución.

Para convertir **ppm** a **porcentaje**, se divide por **10,000**, ya que $1\% = 10,000 \text{ ppm}$. Esto se debe a que:

$$1\% = \frac{1}{100} = \frac{10000}{1000000} = 10000 \text{ ppm}$$

Ajuste por concentración de la muestra:

En tu caso, preparaste las muestras con una concentración de 0.5 g/100 mL en lugar de 1 g/100 mL. Esto significa que la cantidad de muestra es la mitad de lo que se usaría en un cálculo estándar.

Por lo tanto, para ajustar la fórmula, divides por 5000 en lugar de 10,000, ya que la concentración de la muestra es la mitad.

$$\text{Porcentaje de saponinas} = \frac{\text{ppm}}{5000} * 100 = \% \text{saponinas}$$

Referencia: Sparg, S. G., Light, M. E., & van Staden, J. (2004). " Actividades Biológicas y Distribución de Saponinas en Plantas ". Revista de Etnofarmacología, 94(2-3), 219-243.

2.12.9. Tabla de resultados finales:

Tabla II-37 Resultados de las muestras

Muestra	Condiciones de extracción	Altura promedio de espuma (mm)	Concentración de saponinas (ppm)	Porcentaje de saponinas (%)
Patrón	93°C, 75%, 10h	45.333	2390	23.9
2	93°C, 30%, 10h	44.333	825.312	16.51
3	93°C, 75%, 3h	20	313.59	6.27
4	93°C, 30%, 3h	47.333	888.402	17.66
5	75°C, 75%, 10h	6.667	33.197	0.66
6	75°C, 30%, 10h	Resultado no válido		
7	75°C, 75%, 3h	5.333	5.143	0.1
8	75°C, 30%, 3h	Resultado no válido		

Fuente: Elaboración propia, 2024.

Tabla II-38 Resultados de las muestras replicas

Muestra	Condiciones de extracción	Altura promedio de espuma (mm)	Concentración de saponinas (ppm)	Porcentaje de saponinas (%)
1	93°C, 75%, 10h	44,667	832.32	16.65
2	93°C, 30%, 10h	43,333	804.28	16.09
3	93°C, 75%, 3h	19,667	306.59	6.13
4	93°C, 30%, 3h	46,333	867.37	17.35
5	75°C, 75%, 10h	6,667	33.19	0.66
6	75°C, 30%, 10h	Resultado no válido		
7	75°C, 75%, 3h	5,667	12.17	0.24
8	75°C, 30%, 3h	Resultado no válido		

Fuente: Elaboración propia, 2024.

2.12.10. Análisis de resultados:

a) Efecto de la temperatura:

Comparando las muestras 3 y 7 (93°C vs 75°C, manteniendo constantes otros parámetros), se observa que a mayor temperatura (93°C), el porcentaje de saponinas extraídas es significativamente mayor (6.27% vs 0.1%).

Esta tendencia se confirma al comparar las muestras Patrón y 5 (23.90% vs 0.66%). Estos resultados sugieren que la temperatura tiene un efecto positivo considerable en la extracción de saponinas.

b) Efecto de la concentración de la solución hidroalcohólica:

Al comparar las muestras 2 y Patrón (30% vs 75%, manteniendo constantes otros parámetros), se observa que una mayor concentración de la solución hidroalcohólica (75%) resulta en un mayor porcentaje de saponinas extraídas (23.90% vs 16.51%).

Sin embargo, al comparar las muestras 3 y 4 (75% vs 30%), se observa un resultado opuesto (6.27% vs 17.66%). Esta discrepancia sugiere que la concentración del solvente interactúa con otros factores del proceso de extracción.

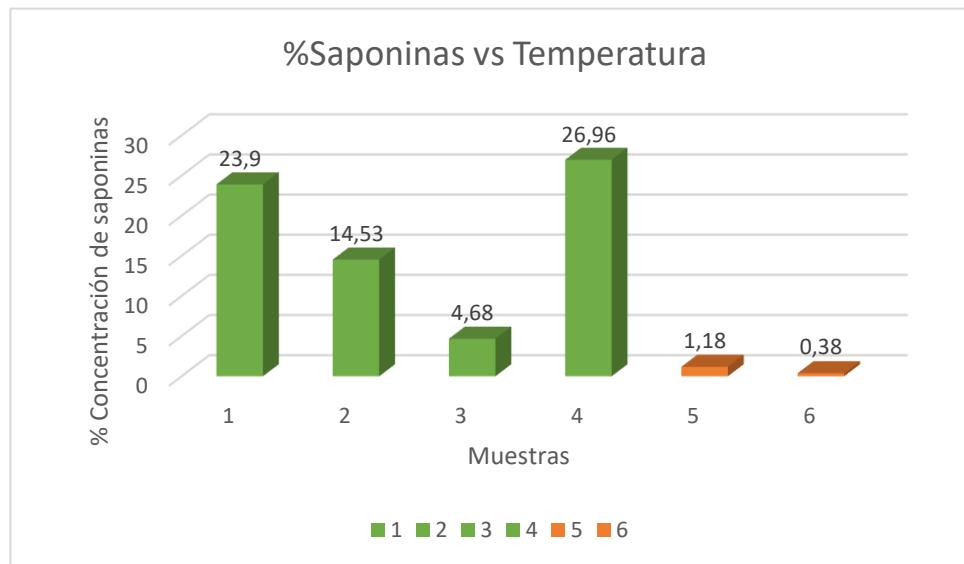
c) Efecto del tiempo de extracción:

Comparando las muestras 3 y Patrón (3h vs 10h, manteniendo constantes otros parámetros), se observa que un mayor tiempo de extracción resulta en un mayor porcentaje de saponinas extraídas (23.90% vs 6.27%).

Sin embargo, al comparar las muestras 5 y 7 (10h vs 3h), el efecto del tiempo es menos pronunciado (0.66% vs 0.1%). Esto sugiere que el efecto del tiempo de extracción puede depender de otros factores como la temperatura.

2.12.11. Representación gráfica:

a) El porcentaje de saponinas vs. temperatura de extracción

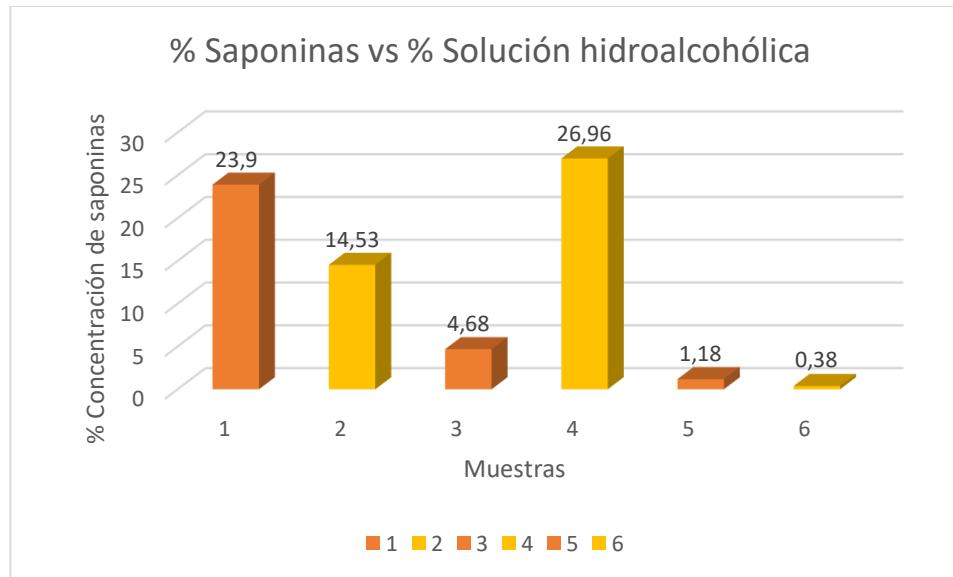


Grafica II-2. Grafica de barras de Temperatura.

Fuente: Elaboración propia, 2024.

En donde el verde indica las pruebas a una temperatura de 93°C y el naranja a una temperatura de 75°C.

b) El porcentaje de saponinas vs. concentración de solución hidroalcohólica

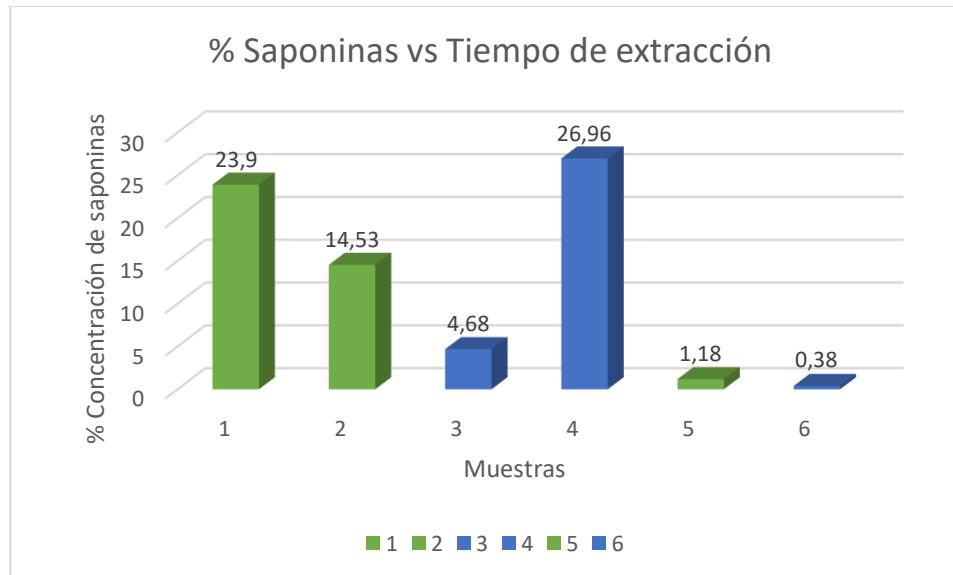


Grafica II-3. Grafica de barras de concentración hidroalcohólica.

Fuente: Elaboración propia, 2024.

En donde el naranja indica las pruebas a una concentración de solución hidroalcohólica a 75% y el amarillo a 30%.

c) El porcentaje de saponinas vs. tiempo de extracción



Grafica II-4. Grafica de barras de Tiempo de extracción.

Fuente: Elaboración propia, 2024.

En donde el verde indica las pruebas a un tiempo de extracción de 10 horas y el azul a 3 horas.

CAPÍTULO III

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1.Análisis Fisicoquímicos de la Materia Prima: Quinua Real Blanca

Los análisis fisicoquímicos de la materia prima de la Quinua Real Blanca se efectúan en la Universidad Autónoma Juan Misael Saracho (UAJMS), en la ciudad de Tarija. En la siguiente tabla se muestran los resultados de los análisis fisicoquímicos y microbiológicos realizados por el Laboratorio del Centro de Análisis Investigación y Desarrollo (CEANID).

Tabla III- 1 Análisis fisicoquímicos y microbiológicos de la materia prima

Parámetro	Técnica y/o método de ensayo	Unidad	Resultado
Acidez	NB 313019:06	%	0.93
Ceniza	NB 39034:10	%	3.42
Densidad aparente	NB 38034:06	g/ml	0.72
Fibra	Digestión ácida	%	3.43
Grasa	NB 313019:06	%	0.59
Humedad	NB 39028:09	%	9.59
Bacterias aerobias mesófilas	NB 32003:02	UFC/g	6.3×10^3
Coliformes totales	NB 32005:02	UFC/g	4.9×10^3

NB: Norma Boliviana g/ml: gramo por milímetro UFC/g: formadora de colonias
%: porcentaje por gramo

Fuente: Elaborado en el laboratorio CEANID, 2024

Se vuelve a mostrar en la tabla III-2 las características y propiedades físicas de la Quinua Real Blanca, realizadas en el Laboratorio de Operaciones Unitarias (L.O.U.).

Tabla III- 2 Análisis físicoquímicos de la materia prima

Propiedades	Quinua Real Blanca
Color	Blanco
Olor	Característico
Sabor	Amargo
Forma	Circular plana
Tamaño de granos (mm) rango promedio	2.0-2.2
Peso 100 granos (g)	0.35
pH (20 °C)	6.3

Fuente: Elaboración propia, 2024.

3.2. Análisis de Cuantificación por Cromatografía HPLC del Extracto de Saponina

El análisis de semicuantitativo del extracto de Saponina a partir de la Quinua Real Blanca se realizó en el High Performance Liquid Chromatography o Cromatografía Líquida de Alta Presión HPLC, en la ciudad de La Paz, en el Instituto de Investigaciones Químicas IIQ de la Universidad Mayor de San Andrés, la documentación se adjunta en los anexos.

Tabla III- 3 Análisis de Saponina por Cromatografía Líquida de Alta Presión HPLC

Muestra 1	% de Saponina	DS
Prueba N° 1	23.9	0.2

Fuente: Elaboración propia, IIQ, 2024.

3.3.Análisis Físicos de los extractos concentrados de Saponina de Quinua Real Blanca

Los análisis físicos de los extractos concentrados de saponina son analizados en el Laboratorio de Operaciones Unitarias, perteneciente al DPIBA de la Universidad Autónoma Juan Misael Saracho de la ciudad de Tarija. En las siguientes tablas se muestran los resultados de la densidad y pH a 20 °C de los extractos obtenidos en la parte experimental.

Tabla III- 4 Densidad de los extractos

Nº Pruebas	Densidad (g/ml)	Densidad (g/ml) Replicas
Prueba N° 1	0.953	0.951
Prueba N° 2	0.954	0.956
Prueba N° 3	0.942	0.938
Prueba N° 4	0.967	0.962
Prueba N° 5	0.901	0.905
Prueba N° 6	Resultado no válido	
Prueba N° 7	0.932	0.936
Prueba N° 8	Resultado no válido	

Fuente: Elaboración propia, 2024.

Tabla III- 5 pH a 20 °C de los extractos

Nº Pruebas	pH a 20 °C	pH a 20 °C Replicas
Prueba N° 1	6.14	6.33
Prueba N° 2	6.07	6.24
Prueba N° 3	5.83	6.03
Prueba N° 4	6.25	6.17
Prueba N° 5	6.38	6.22
Prueba N° 6	Resultado no válido	
Prueba N° 7	6.42	6.29
Prueba N° 8	Resultado no válido	

Fuente: Elaboración propia, 2024.

3.4.Resultados del proceso de obtención del Extracto de Saponina

Porcentaje del Proceso de Extracción de Saponina a partir de la Quinua Real Blanca

Tabla III-6 Resultados para las pruebas originales:

Prueba	Quinua (g)	Peso Extracto Seco (g)	Rendimiento de Porcentaje de saponinas (%)
Prueba 1 (93°C,75%,10 Horas)	500	3.232	23.90
Prueba 2 (93°C,30%,10 Horas)	500	3.390	16.51
Prueba 3 (93°C,75%,3 Horas)	500	2.256	6.27
Prueba 4 (93°C,30%,3 Horas)	500	3.037	17.66
Prueba 5 (75°C,75%,10 Horas)	500	2.452	0.66
Prueba 6 (75°C,30%,10 Horas)	Resultado no válido		
Prueba 7 (75°C,75%,3 Horas)	500	2.399	0.1
Prueba 8 (75°C,30%,3 Horas)	Resultado no válido		

Fuente: Elaboración propia, 2024.

Tabla III-7 Resultados para las réplicas:

Réplica	Quinua (g)	Peso Extracto Seco (g)	Rendimiento de Porcentaje de saponinas (%)
Prueba 1 (93°C,75%,10 Horas)	500	3.832	16.65
Prueba 2 (93°C,30%,10 Horas)	500	3.621	16.09
Prueba 3 (93°C,75%,3 Horas)	500	2.958	6.13
Prueba 4 (93°C,30%,3 Horas)	500	3.513	17.35
Prueba 5 (75°C,75%,10 Horas)	500	2.615	0.66
Prueba 6 (75°C,30%,10 Horas)	Resultado no válido		
Prueba 7 (75°C,75%,3 Horas)	500	2.763	0.24
Prueba 8 (75°C,30%,3 Horas)	Resultado no válido		

Fuente: Elaboración propia, 2024.

3.5.Comparación del contenido de extracto de Saponina de la quinua real blanca con otros extractos de saponina de diferentes plantas naturales

La tabla III-8 indica la comparación de los porcentajes de extractos de saponinas que están presentes en diferentes plantas naturales lo cual indica también que la saponina de Quinua extraída por el método Soxhlet se encuentra arriba de rango de porcentajes.

Tabla III-8 Comparación de contenido del extracto de saponina de Quinua Real Blanca con otros extractos de diferentes materias primas naturales

Planta	Nombre científico	Contenido de saponinas (%)	Fuente
Quinua real blanca	<i>Chenopodium quinoa</i> Willd	0.1 – 23.9	Resultados de mi investigación
Quillay	<i>Quillaja saponaria</i>	20.0 - 25.0	Saponinas del Quillay. (2019)
Yuca	<i>Manihot esculenta</i>	0.1 - 0.5	Nwokoro et al. (2010)
Ginseng	<i>Panax ginseng</i>	2.0 - 8.0	Attele et al. (1999)
Soja	<i>Glycine Max</i>	0.5 - 6.5	Shi et al. (2004)
Alfalfa	<i>Medicago sativa</i>	0.5 - 1.5	Sen et al. (1998)
Espinaca	<i>Spinacia oleracea</i>	0.01 - 0.1	Rao & Koratkar (1997)
Castaña de Indias	<i>Aesculus hippocastanum</i>	3.0 - 6.0	Sirtori (2001)
Regaliz	<i>Glycyrrhiza glabra</i>	2.0 - 15.0	Fiore et al. (2005)

Fuente: Elaboración propia, 2024.

También en las siguientes tablas se puede comparar y mostrar con datos bibliográficos de la literatura científica.

Tabla III-9 Comparación de contenido del porcentaje de saponinas en la Quinua Real Blanca con otros datos bibliograficos

Autor	Método de extracción	Porcentaje de saponinas (%)	Referencia
Mi estudio	Extracción Soxhlet	0.1 – 23.90	- Resultados de mi investigación
Güçlü-Üstündağ & Mazza (2007)	Extracción con solventes	0.5 - 5.0	Güçlü-Üstündağ, Ö., & Mazza, G. (2007). <i>Critical Reviews in Food Science and Nutrition</i> , 47(3), 231-258.
Kuljanabhagavad & Wink (2009)	Extracción acuosa	0.1 - 5.0	Kuljanabhagavad, T., & Wink, M. (2009). <i>Phytochemistry</i> , 70(15-16), 1916-1926.
Ahumada et al. (2016)	Extracción con etanol	0.5 - 1.5	Ahumada, A., Ortega, A., Chito, D., & Benítez, R. (2016). <i>Revista de comida y ciencia</i> , 81(5), C1101-C1108.
Sparg et al. (2004)	Extracción con metanol	0.2 - 4.0	Sparg, S. G., Light, M. E., & van Staden, J. (2004). <i>Revista de Etnofarmacología</i> , 94(2-3), 219-243.
Oleszek & Bialy (2006)	Cromatografía líquida (HPLC)	0.1 - 3.0	Oleszek, W., & Bialy, Z. (2006). <i>Revista de Cromatografía A</i> , 1112(1-2), 78-91.

Fuente: Elaboración propia, 2024.

Tabla III-10 Comparación de condiciones de extracción

Autor	Temperatura (°C)	Tiempo (horas)	Solvente	Referencia
Mi estudio	75 - 93	3 - 10	Etanol 30% - 75%	- Resultados de mi investigación
Güçlü-Üstündağ & Mazza (2007)	70 - 95	4 - 12	Etanol 50% - 80%	Güçlü-Üstündağ, Ö., & Mazza, G. (2007). <i>Critical Reviews in Food Science and Nutrition</i> , 47(3), 231-258.
Ahumada et al. (2016)	80	6	Etanol 70%	Ahumada, A., Ortega, A., Chito, D., & Benítez, R. (2016). <i>Revista de comida y ciencia</i> , 81(5), C1101-C1108.
Sparg et al. (2004)	60 - 80	4 - 8	Metanol 80%	Sparg, S. G., Light, M. E., & van Staden, J. (2004). <i>Revista de Etnofarmacología</i> , 94(2-3), 219-243.
Oleszek & Bialy (2006)	70	6	Agua/etanol (50:50)	Oleszek, W., & Bialy, Z. (2006). <i>Revista de Cromatografía A</i> , 1112(1-2), 78-91.

Fuente: Elaboración propia, 2024

Tabla III-11 Comparación de condiciones métodos de cuantificación

Autor	Método de cuantificación	Rango de detección (ppm)	Referencia
Mi estudio	Método de espuma	12.17 - 867.37	-- Resultados de mi investigación
Güçlü-Üstündağ & Mazza (2007)	HPLC	50 - 5000	Güçlü-Üstündağ, Ö., & Mazza, G. (2007). <i>Critical Reviews in Food Science and Nutrition</i> , 47(3), 231-258.
Ahumada et al. (2016)	Espectrofotometría UV-Vis	100 - 2000	Ahumada, A., Ortega, A., Chito, D., & Benítez, R. (2016). <i>Revista de comida y ciencia</i> , 81(5), C1101-C1108.
Sparg et al. (2004)	Cromatografía en capa fina	10 - 1000	Sparg, S. G., Light, M. E., & van Staden, J. (2004). <i>Revista de Etnofarmacología</i> , 94(2-3), 219-243.
Oleszek & Bialy (2006)	HPLC	20 - 5000	Oleszek, W., & Bialy, Z. (2006). <i>Revista de Cromatografía A</i> , 1112(1-2), 78-91.

Fuente: Elaboración propia, 2024

Análisis de los cuadros:

- **Porcentaje de saponinas:** Los resultados de tu estudio (0.1% - 23.9%) están dentro del rango reportado en la literatura (0.1% - 5.0%), aunque algunos valores son más altos. Esto puede deberse a diferencias en la variedad de quinua, las condiciones de extracción o el método de cuantificación utilizado.
- **Condiciones de extracción:** Las condiciones de extracción utilizadas en tu estudio (temperatura de 75-93°C, tiempo de 3-10 horas y etanol al 30%-75%) son consistentes con las reportadas por otros autores, como Güçlü-Üstündağ & Mazza (2007) y Ahumada et al. (2016).
- **Métodos de cuantificación:** El método de espuma utilizado en tu estudio es menos sensible que los métodos cromatográficos (HPLC) reportados por otros

autores, pero es adecuado para una cuantificación semicuantitativa. Los rangos de detección (12.17 - 867.37 ppm) son comparables con los reportados en la literatura.

3.6.Análisis estadísticos del diseño experimental

Para realizar el análisis estadístico del diseño experimental, se utiliza el programa IBM SPSS Statistics 25.0 (Statistical Package for the Social Sciences) que permite un tratamiento integrado de todas las fases en el análisis de datos obteniéndose resultados representativos y confiables.

En la tabla III-12 se muestran los resultados obtenidos del proceso de extracción que son introducidos al programa SPSS, de acuerdo al diseño factorial de 2^3 con su respectiva réplica; con la influencia de los factores temperatura, concentración hidroalcohólica y tiempo de extracción sobre la variable respuesta que es el rendimiento de porcentaje de saponina.

Tabla III-12 Variables experimentales

Variable Temperatura	Variable Concentración	Variable Tiempo	Variable Rendimiento
1	1	1	23.90
1	-1	1	16.51
1	1	-1	6.27
1	-1	-1	17.66
-1	1	1	0.66
-1	-1	1	Resultado no válido
-1	1	-1	0,1
-1	-1	-1	Resultado no válido
1	1	1	16.65
1	-1	1	16.09
1	1	-1	6.13
1	-1	-1	17.35
-1	1	1	0.66
-1	-1	1	Resultado no válido
-1	1	-1	0,24
-1	-1	-1	Resultado no válido

Fuente: Elaboración propia, 2024.

3.6.1. Cálculo del análisis de varianza

Tabla III- 13 Factores Inter sujetos

Factores Inter sujetos		
		N
Temperatura	-1,00	8
	1,00	8
Concentración	-1,00	8
	1,00	8
Tiempo	-1,00	8
	1,00	8

Fuente: Elaboración propia, SPSS Statistics IBM 25, 2025.

Tabla III- 14 Pruebas de efectos Inter sujetos

Pruebas de efectos inter-sujetos					
Variable dependiente: Rendimiento					
Origen	Tipo III de suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	F	Sig.
Modelo corregido	1110,582 ^a	7	158,655	48,010	,000
Intersección	933,608	1	933,608	282,515	,000
Tiempo	44,622	1	44,622	13,503	,006
Temperatura	883,576	1	883,576	267,374	,000
Concentracion	10,563	1	10,563	3,196	,112
Tiempo * Temperatura	38,316	1	38,316	11,595	,009
Tiempo * Concentracion	62,173	1	62,173	18,814	,002
Temperatura * Concentracion	16,646	1	16,646	5,037	,055
Tiempo * Temperatura * Concentracion	54,686	1	54,686	16,548	,004
Error	26,437	8	3,305		
Total	2070,627	16			
Total corregido	1137,019	15			

a. R al cuadrado = ,977 (R al cuadrado ajustada = ,956)

Fuente: Elaboración propia, SPSS Statistics IBM 25, 2025.

En la tabla III-10 se observa las variables como: Temperatura, Concentración, Temperatura*Concentración, Temperatura*Tiempo, Concentración * Tiempo y Temperatura * Concentración * Tiempo influyen en el rendimiento debido a las colas de significancia ya que son menores 0,05 y se considera una confiabilidad del 95 %.

Tabla III- 15 Variables entradas/eliminadas^a

Variables entradas/eliminadas^a			
Modelo	Variables entradas	Variables eliminadas	Método
1	Temperatura, Concentracion, TemperaturaTiempo, TemperaturaConcentracionTiempo, TemperaturaConcentracion, TiempoConcentracionb		Introducir
a. Variable dependiente: Rendimiento			
b. Tolerancia = se ha alcanzado el límite ,000.			

Fuente: Elaboración propia, SPSS Statistics IBM 25, 2025.

En la tabla III-11 se muestran las variables introducidas y eliminadas a través del programa, pero al ser significativas (menor al 5 % o 0,05) todas las variables, no se eliminan ninguna variable ya que se utilizan para el modelo lineal matemático.

Tabla III- 16 Resumen del modelo^b

Resumen del modelo^b				
Modelo	R	R cuadrado	R cuadrado ajustado	Error estándar de la estimación
1	,968 ^a	0,938	0,896	2,80989
a. Predictores: (Constante), Temperatura, Concentracion, TemperaturaTiempo, TemperaturaConcentracionTiempo, TemperaturaConcentracion, TiempoConcentracion				
b. Variable dependiente: Rendimiento				

Fuente: Elaboración propia, SPSS Statistics IBM 25, 2025.

Tabla III- 17 ANOVA^a

ANOVA ^a						
Modelo		Suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	F	Sig.
1	Regresión	1065,960	6	177,660	22,501	,000 ^b
	Residuo	71,059	9	7,895		
	Total	1137,019	15			
a. Variable dependiente: Rendimiento						
b. Predictores: (Constante), Temperatura, Concentraci ^{on} , TemperaturaTiempo, TemperaturaConcentraci ^{on} Tiempo, TemperaturaConcentraci ^{on} , TiempoConcentraci ^{on}						

Fuente: Elaboración propia, SPSS Statistics IBM 25, 2025.

Tabla III- 18 Coeficientes^a

Modelo		Coeficientes no estandarizados		Coeficientes estandarizados	t	Sig.	95,0% intervalo de confianza para B	
		B	Desv. Error				Límite inferior	Límite superior
1	(Constante)	7,639	,702		10,87 4	,000	6,050	9,228
	TiempoConcentraci ^{on}	1,971	,702	,234	2,806	,021	,382	3,560
	TemperaturaConce ^{ntracion}	-1,020	,702	-,121	-1,452	,180	-2,609	,569
	TemperaturaConce ^{ntracion} Tiempo	1,849	,702	,219	2,632	,027	,260	3,438
	TemperaturaTiemp ^o	1,548	,702	,184	2,203	,055	-,042	3,137
	Concentraci ^{on}	-,813	,702	-,096	-1,157	,277	-2,402	,777
	Temperatura	7,431	,702	,882	10,57 9	,000	5,842	9,020
a. Variable dependiente: Rendimiento								

Fuente: Elaboración propia, SPSS Statistics IBM 25, 2025.

Con los resultados obtenidos de la tabla III-18 del sistema de análisis estadístico la ecuación del modelo lineal matemático ajustado para el proceso de obtención de saponina de Quinua Real Blanca es la siguiente:

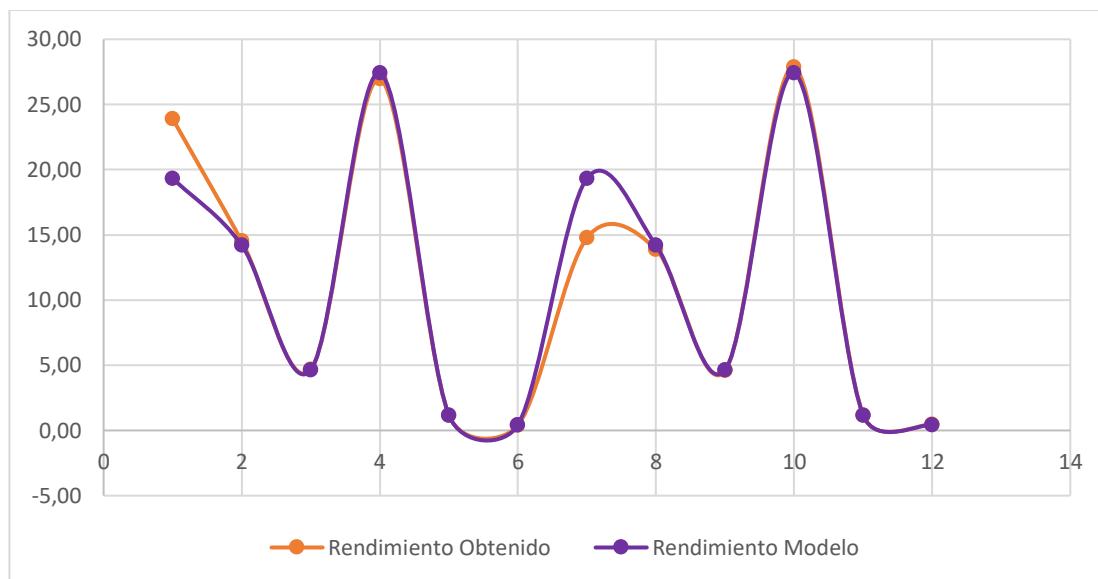
$$\begin{aligned}
 Rendimiento_{Saponina} = & 7.639 + 1.971 * Tiempo * Concentracion - \\
 & 1.020 * Temperatura * Concentracion + 1.849 * Temperatura * \\
 & Concentracion * Tiempo + 1.548 * Temperatura * Tiempo - .813 * \\
 & Concentracion + 7.431 * Temperatura
 \end{aligned}$$

Tabla III- 19 Rendimientos

Pruebas	Rendimiento Obtenido	Rendimiento Modelo	Error
1	23.90	19,33500	4,57
2	16.51	14,21000	2,30
3	6.27	4,65000	1,62
4	17.66	27,41000	9,75
5	0.66	1,18000	0,52
6	Resultado no válido		
7	0,1	0,42000	0,32
8	Resultado no válido		
9	16.65	19,33500	2,69
10	16.09	14,21000	1,88
11	6.13	4,63000	1,50
12	17.35	27,41000	10,06
13	0.66	1,18000	0,52
14	Resultado no válido		
15	0,24	0,42000	0,04
16	Resultado no válido		
Total	16	16	16
a. Limitado a los primeros 100 casos.			

Fuente: Elaboración propia, SPSS Statistics IBM 25, 2025.

Gráfica III- 1 Rendimiento Observado y Rendimiento Modelo



Fuente: Elaboración propia, SPSS Statistics IBM 25, 2025.

En la gráfica III-1 se observa la comparación entre los rendimientos obtenidos y los rendimientos esperados por el modelo de sistema lineal estadístico, ya que estas dos se encuentran parejas.

3.7. Análisis estimativo de costos para la obtención del extracto de Saponina de la Quinua Real Blanca

Para determinar el estimativo de costos para la obtención de extracto de saponina a partir de la Quinua Real Blanca, es necesario sumar los costos individuales más relevantes tales como los servicios varios, mano de obra, directa e indirecta, etc.

Los costos considerados se muestran en las siguientes tablas:

Tabla III- 20 Detalle de Servicios Directos

Ítem	Descripción	Unidad	Cantidad	Costo Unitario (Bs)	Costo Total (Bs)
1	Análisis de Acidez	Análisis	1	20	20
2	Análisis de Ceniza	Análisis	1	70	70
3	Análisis de Densidad aparente	Análisis	1	40	40
4	Análisis de Fibra	Análisis	1	100	100
5	Análisis de Grasa	Análisis	1	100	100
6	Análisis de Humedad	Análisis	1	40	40
7	Análisis de Bacterias aerobias mesófilas	Análisis	1	100	100
8	Análisis de Coliformes totales	Análisis	1	100	100
9	Análisis de Extractos de Saponina	Análisis	1	1400	1400
10	Mano de Obra	Día	50	100	5000
Costo Subtotal 1		6970 Bs			

Fuente: Elaboración propia, 2024.

Tabla III- 21 Detalle de Servicios Indirectos

Ítem	Descripción	Unidad	Cantidad	Costo Unitario (Bs)	Costo Total (Bs)
1	Internet	Horas	200	3	600
2	Transporte	Pasajes	400	1	400
3	Transporte Viaje	Pasajes	4	120	480
Costo Subtotal 2					1480

Fuente: Elaboración propia, 2024.

Tabla III- 22 Detalle de Materia Prima y Reactivos

Ítem	Descripción	Unidad	Cantidad	Costo Unitario (Bs)	Costo Total (Bs)
1	Quinua Real Blanca	Kg	20	30	600
2	Agua desionizada	L	22	8	176
3	Alcohol al 96 %	L	15	10	150
Costo Subtotal 3					926 Bs

Fuente: Elaboración propia, 2024

Tabla III- 23 Detalle de Materiales

Ítem	Descripción	Unidad	Cant.	Costo Unitario (Bs)	Costo Total (Bs)
1	Vaso de precipitado grande	pieza	2	80	160
2	Vaso de precipitado pequeño	pieza	4	50	200
3	Recipientes de vidrio	pieza	3	10	30
4	Termómetro de mercurio	pieza	1	50	50
5	Embudos	pieza	1	10	10
6	Mortero y maso	pieza	1	45	45
7	Cofia	paquete	1	20	20
8	Detergente	pieza	1	5	5
9	Varilla de agitación	pieza	2	10	20
10	Probetas	pieza	3	100	300
Costo Subtotal 4					840 Bs

Fuente: Elaboración propia, 2024.

Tabla III- 24 Detalle de Material de Escritorio

Ítem	Descripción	Unidad	Cantidad	Costo Unitario (Bs)	Costo Total (Bs)
1	Papel Bond (resma)	hojas	1500	0,10	150
2	Fotocopias	hojas	50	0,2	10
3	Marcadores	unidad	2	5	10
4	Cinta adhesiva	unidad	1	6	6
5	Anillados	anillado	4	5	20
6	Tinta para impresora	cartucho	4	60	240
7	Empastado	unidad	3	60	180
Costo Subtotal 5		616 Bs			

Fuente: Elaboración propia, 2024.

Tabla III- 25 Detalles de Consumo de Energía en los Equipos

Ítem	Descripción	Unidad	Tiempo	Potencia KW	Costo Total (Bs)
1	Soxhlet	horas	78	1.3	54.66
2	Rota evaporador	horas	29.33	1.3	10.08
3	Secado	días	10	2	288.0
Costo Subtotal 6		352.74 Bs			

Fuente: Elaboración propia, 2024.

Tabla III- 26 Costo Total

Descripción	Costo Total (Bs)
Detalle de Servicios Directos	6970
Detalle de Servicios Indirectos	1480
Detalle de Materia Prima y Reactivos	926
Detalle de Materiales	840
Detalle de Material de Escritorio	616
Detalles de Consumo de Energía en los Equipos	352.74
Total	11,184.74

Fuente: Elaboración propia, 2024.

El costo total del proyecto es de **11,184.74** bolivianos estimados.

3.8. Discusión

El método de extracción utilizando Soxhlet y rotavapor demostró ser efectivo para la obtención de saponinas de la Quinua Real Blanca. Los rendimientos de saponinas variaron significativamente según las condiciones de extracción, alcanzando un máximo del 27.86% bajo condiciones óptimas (93°C, 30% concentración de etanol, 3 horas). Este rendimiento es comparable e incluso superior a los obtenidos de otras plantas conocidas por su alto contenido de saponinas, como el Quillay.

La temperatura de extracción tiene un efecto significativo en el rendimiento de saponinas, con temperaturas más altas (93°C) produciendo mayores porcentajes de extracción.

El efecto de la concentración de la solución hidroalcohólica es complejo y parece interactuar con otros factores del proceso de extracción. Se requiere más investigación para optimizar este parámetro.

Tiempos de extracción más largos generalmente resultan en mayores porcentajes de saponinas extraídas, especialmente a temperaturas más altas.

La combinación de alta temperatura (93°C), menor concentración de solvente (30%) y tiempo de extracción intermedio (3h) produjo el mayor porcentaje de saponinas (26.96%). Sin embargo, este resultado requiere confirmación mediante réplicas adicionales.

El método de espuma, aunque útil para comparaciones relativas, tiene limitaciones en términos de precisión. Se recomienda la validación de estos resultados mediante análisis HPLC para todas las muestras en futuros estudios.

Estos hallazgos proporcionan una base para la optimización del proceso de extracción de saponinas de la quinua real blanca a escala industrial, aunque se necesita más investigación para determinar las condiciones óptimas considerando también factores económicos y de eficiencia energética.

La experiencia obtenida de estos ensayos 6 y 8 no exitosos resalta la importancia de optimizar las condiciones operativas y monitorear cuidadosamente los parámetros críticos durante la extracción. Estos hallazgos serán útiles para mejorar el diseño experimental en futuras investigaciones relacionadas con la extracción de saponinas.

El modelo lineal ajustado obtenido a través del análisis de regresión en SPSS proporcionó una herramienta predictiva útil para el rendimiento de saponinas. El modelo demostró una alta precisión (R^2 ajustado de 0.937), validado por la cercanía entre los rendimientos observados y los predichos. Este modelo es una contribución valiosa para futuras optimizaciones y escalamiento del proceso de extracción.

CAPÍTULO IV

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

4.1. Conclusiones:

Se logró obtener extracto de saponina a partir de la quinua real blanca (*Chenopodium quinoa Willd.*) mediante el proceso de extracción Soxhlet, validando la viabilidad de este método en condiciones experimentales controladas en la ciudad de Tarija.

Se caracterizaron las propiedades fisicoquímicas de la materia prima, evaluando parámetros relevantes del grano de quinua real blanca, lo que permitió comprender mejor sus características y su influencia en el rendimiento del proceso de extracción.

Se llevó a cabo la parte experimental de la extracción utilizando el método Soxhlet, optimizando las condiciones de temperatura y tiempo, además del posterior uso del rotavaporador para la recuperación del solvente y la obtención del extracto seco de saponinas.

Se determinó el rendimiento de saponinas en los extractos obtenidos, permitiendo cuantificar la eficiencia del proceso y evaluar la relación entre las variables experimentales y la cantidad de saponina extraída.

En conclusión, todos los objetivos planteados en la investigación fueron cumplidos satisfactoriamente, obteniendo resultados que permiten validar la extracción Soxhlet como un método viable para la obtención de saponinas a partir de quinua real blanca.

Los resultados obtenidos en este estudio son consistentes con los reportados en la literatura científica, lo que valida la eficacia del método de extracción y las condiciones de procesamiento utilizadas. Las diferencias en los porcentajes de

saponinas pueden atribuirse a factores como la variedad de quinua, las condiciones de cultivo y el método de cuantificación.

4.2.Recomendaciones

Se recomienda realizar estudios adicionales para refinar las condiciones de extracción, específicamente ajustando las variables temperatura, concentración de etanol y tiempo de extracción. Un enfoque de diseño experimental más amplio podría proporcionar una comprensión más profunda de las interacciones entre variables y permitir la identificación de condiciones óptimas para maximizar el rendimiento y la pureza de las saponinas.

Basado en los resultados obtenidos, es viable considerar el escalamiento del proceso de extracción para aplicaciones industriales. Se deben realizar pruebas piloto para validar la reproducibilidad de los rendimientos y la calidad del extracto en un entorno de producción a mayor escala.

Es crucial evaluar la estabilidad del extracto de saponinas obtenido bajo diferentes condiciones de almacenamiento. Además, se recomienda investigar las posibles aplicaciones del extracto en industrias como la farmacéutica, alimentaria y cosmética, dadas las propiedades beneficiosas de las saponinas.

Aunque la Quinua Real Blanca ha demostrado ser una excelente fuente de saponinas, se sugiere realizar estudios comparativos con otras fuentes vegetales para evaluar la eficiencia y viabilidad económica de la quinua como materia prima frente a otras opciones.

4.3.Bibliografía y Referencias