

UNIVERSIDAD NACIONAL DE JAÉN
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA DE INDUSTRIAS
ALIMENTARIAS



**UNIVERSIDAD NACIONAL
DE JAÉN**

**OPTIMIZACIÓN DE LAS CONDICIONES DE
EXTRACCIÓN ASISTIDA POR ULTRASONIDO DE
COMPUESTOS BIOACTIVOS Y DETERMINACIÓN DE LA
CAPACIDAD ANTIOXIDANTE DEL FRUTO *Solanum
pachyandrum***

**TESIS PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE INGENIERO
EN INDUSTRIAS ALIMENTARIAS**

Autora : Bach. Castillo Pintado Fiorela Elizeth
Asesor : Dr. Rivera Botonares Ralph Stein
Co-Asesor : Mg. Minchán Velayarce Hans Himbler

**LÍNEA DE INVESTIGACIÓN: CUANTIFICACIÓN Y CARACTERIZACIÓN DE
BIOMOLÉCULAS (Código LI_IIA_01)**

JAÉN – PERÚ, JUNIO, 2026

Fiorela Elizeth Castillo Pintado

OPTIMIZACIÓN DE LAS CONDICIONES DE EXTRACCIÓN ASISTIDA POR ULTRASONIDO DE COMPUESTOS BIOACTIVO...

 Quick Submit Quick Submit Universidad Nacional de Jaén

Detalles del documento

Identificador de la entrega

trn:oid:::1:3671189499

80 páginas

Fecha de entrega

6 oct 2026, 11:49 a.m. GMT-5

19.262 palabras

108.329 caracteres

Fecha de descarga

6 oct 2026, 11:54 a.m. GMT-5

Nombre del archivo

IFT_-_FIORELA_CASTILLO_FP.pdf

Tamaño del archivo

3.2 MB

 UNIVERSIDAD NACIONAL DE JAÉN

Dra. María Marleni Torres Cruz
Responsable de la Unidad de Investigación
de la Facultad de Ingeniería

6% Similitud general

El total combinado de todas las coincidencias, incluidas las fuentes superpuestas, para ca...

Filtrado desde el informe

- Bibliografía
- Texto citado
- Texto mencionado
- Coincidencias menores (menos de 15 palabras)

Fuentes principales

- 5%  Fuentes de Internet
- 3%  Publicaciones
- 4%  Trabajos entregados (trabajos del estudiante)

Marcas de integridad

N.º de alerta de integridad para revisión

-  **Caracteres reemplazados**
33 caracteres sospechosos en N.º de páginas
Las letras son intercambiadas por caracteres similares de otro alfabeto.

Los algoritmos de nuestro sistema analizan un documento en profundidad para buscar inconsistencias que permitirían distinguirlo de una entrega normal. Si advertimos algo extraño, lo marcamos como una alerta para que pueda revisarlo.

Una marca de alerta no es necesariamente un indicador de problemas. Sin embargo, recomendamos que preste atención y la revise.

 UNIVERSIDAD NACIONAL DE JAÉN



.....
Dra. María Marleni Torres Cruz
Responsable de la Unidad de Investigación
de la Facultad de Ingeniería



ACTA DE SUSTENTACIÓN

En la ciudad de Jaén, el día 17 de julio del año 2026, siendo las 10:00 horas, se reunieron de manera **presencial**, los integrantes del Jurado:

Presidente: Dr. Juan Dario Ríos Mera

Secretario: M.Sc. Andrea Fioreli Velarde Santoyo

Vocal: Dra. Eliana Milagros Cabrejos Barrios, para evaluar la Sustentación del:

() Informe de Plan de Trabajo de Investigación

(☒) Informe Final de Tesis

() Trabajo de Suficiencia Profesional

Titulado: "OPTIMIZACIÓN DE LAS CONDICIONES DE EXTRACCIÓN ASISTIDA POR ULTRASONIDO DE COMPUESTOS BIOACTIVOS Y DETERMINACIÓN DE LA CAPACIDAD ANTIOXIDANTE DEL FRUTO (*Solanum pachyandrum*)" presentado por la Bachiller Fiorela Elizeth Castillo Pintado, de la Escuela Profesional de Ingeniería de Industrias Alimentarias de la Universidad Nacional de Jaén.

Después de la sustentación y defensa, el Jurado acuerda:

(☒) Aprobar

() Desaprobar

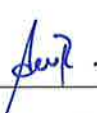
(☒) Unanimidad

() Mayoría

Con la siguiente mención:

- | | | |
|----------------|------------|---|
| a) Excelente | 18, 19, 20 | () |
| b) Muy bueno | 16, 17 | (☒) |
| c) Bueno | 14, 15 | () |
| d) Regular | 13 | () |
| e) Desaprobado | 12 ó menos | () |

Siendo las **11 horas** del mismo día, el Jurado concluye el acto de sustentación confirmado su participación con la suscripción de la presente.


Dr. Juan Dario Ríos Mera
Presidente de Jurado Evaluador


M.Sc. Andrea Fioreli Velarde Santoyo
Secretario de Jurado Evaluador


Dra. Eliana Milagros Cabrejos Barrios
Vocal de Jurado Evaluador

ANEXO N°06:

**DECLARACIÓN JURADA DE AUTENTICIDAD Y DE NO PLAGIO DE LA TESIS
O TRABAJO DE INVESTIGACIÓN (PREGRADO)**

Yo, Castillo Pintado Fiorela Elizeth, bachiller de la carrera profesional de Ingeniería de Industrias Alimentarias de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional de Jaén, identificado (a) con DNI 75589317.

Declaro bajo juramento que:

1. Soy Autora del trabajo titulado:

“Optimización de las condiciones de extracción asistida por ultrasonido de compuestos bioactivos y determinación de la capacidad antioxidante del fruto *Solanum pachyandrum*”.

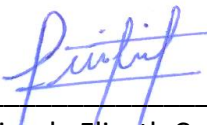
Asesorada por el Dr. Ralph Stein Rivera Botonares y el Mg. Hans Himbler Minchán Velayarce.

El mismo que presento bajo la modalidad de tesis para optar; el Título Profesional de Ingeniero en Industrias Alimentarias.

2. El texto de mi trabajo final respeta y no vulnera los derechos de terceros, incluidos los derechos de propiedad intelectual. En el sentido, el texto de mi trabajo final no ha sido plagiado total ni parcialmente, para la cual he respetado las normas internacionales de citas y referencias de las fuentes consultadas.
3. El texto del trabajo final que presento no ha sido publicado ni presentado antes en cualquier medio electrónico o físico.
4. La investigación, los resultados, datos, conclusiones y demás información presentada que atribuyo a mi autoría son veraces.
5. Declaro que mi trabajo final cumple con todas las normas de la Universidad Nacional de Jaén.
6. Soy consciente de que el hecho de no respetar los derechos de autor y hacer plagio, es objeto de sanciones universitarias y/o legales.

El incumplimiento de lo declarado da lugar a responsabilidad del declarante, en consecuencia; a través del presente documento asumo frente a terceros, la Universidad Nacional de Jaén y/o la Administración Pública toda responsabilidad que pueda derivarse por el trabajo final presentado. Lo señalado incluye responsabilidad pecuniaria, incluido el pago de multas u otros por los daños y perjuicios que se ocasionen.

Fecha: Jaén, 16 de octubre del 2026.


Fiorela Elizeth Castillo Pintado

ÍNDICE

I. INTRODUCCIÓN.....	9
II. MATERIAL Y MÉTODOS.....	14
2.1. Lugar de ejecución	14
2.2. Población, muestra y muestreo	15
2.2.1. Población	15
2.2.2. Muestra	15
2.2.3. Muestreo	15
2.3. Material	16
2.3.1. Reactivos	16
2.3.2. Material vegetal.....	16
2.4. Métodos, técnicas, procedimientos y técnicas de recolección de datos	16
2.4.1. Metodologías	16
2.4.2. Variables de estudio.....	27
2.4.3. Diseño experimental.....	28
2.4.4. Análisis estadísticos de datos.....	30
III. RESULTADOS	32
3.1. Análisis biométrico de frutos <i>S. pachyandrum</i>	32
3.2. Análisis fisicoquímico y proximal de frutos <i>S. pachyandrum</i>	32
3.2.1. Análisis fisicoquímicos.....	32
3.2.2. Análisis proximal de frutos maduros de <i>Solanum pachyandrum</i>	33
3.3. Cuantificación de compuestos bioactivos y capacidad antioxidante de frutos de <i>Solanum pachyandrum</i>	33
3.4. Optimización de parámetros de extracción mediante un diseño Box–Behnken por Metodología de Superficie de Respuesta (MSR)	34
3.4.1. Ajuste del modelo matemático.....	34
3.4.2. Análisis de varianza (ANOVA).....	35
3.4.3. Análisis de la superficie de respuesta.....	36
3.4.4. Optimización de las condiciones de extracción	39

3.4.5. Validación experimental	41
IV. DISCUSIÓN	42
4.1. Análisis biométrico de frutos <i>S. pachyandrum</i>	42
4.2. Análisis fisicoquímico y proximales de frutos <i>S. pachyandrum</i>	42
4.3. Cuantificación de compuestos bioactivos y capacidad antioxidante de frutos de <i>Solanum pachyandrum</i>	44
4.4. Optimización de parámetros de extracción mediante un diseño Box–Behnken por Metodología de Superficie de Respuesta (MSR)	46
4.4.1. Efecto de las variables de proceso sobre los compuestos fenólicos totales	46
4.4.2. Efecto de las variables de proceso sobre el contenido de carotenoides totales	46
4.4.3. Efecto de las variables de proceso sobre la capacidad antioxidante	47
4.4.4. Optimización de las condiciones de extracción y validación experimental	48
V. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	50
5.1. Conclusiones	50
5.2. Recomendaciones	51
VI. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	52
AGRADECIMIENTO	60
DEDICATORIA	61
ANEXOS	62

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Preparación de la curva patrón de ácido gálico a partir de una solución concentrada de 300 µg/ml	23
Tabla 2. Preparación de la curva patrón de β-caroteno a partir de una solución concentrada de 1000 µg/ml.....	24
Tabla 3. Preparación de la curva patrón de Trolox a partir de una solución concentrada de 500 µg/ml	26
Tabla 4. Factores y niveles de diseño para optimizar las condiciones de extracción.....	29
Tabla 5. Diseño estadístico de superficie-respuesta para evaluar las tres variables independientes: concentración de metanol, amplitud ultrasónica y tiempo	29
Tabla 6. Características biométricas del fruto <i>S. pachyandrum</i> en tres estados de madurez	32
Tabla 7. Características fisicoquímicas del fruto <i>S. pachyandrum</i>	33
Tabla 8. Características proximales de frutos maduros de <i>S. pachyandrum</i> (%)......	33
Tabla 9. Matriz experimental del diseño Box-Behnken y respuestas	34
Tabla 10. Validación del modelo con condiciones óptimas sobre el contenido de CPT y CCT	41

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Ubicación geográfica del sitio de recolección de frutos de <i>S. pachyandrum</i> en la provincia de San Ignacio, región Cajamarca, Perú.....	14
Figura 2. Flujograma para la obtención del extracto concentrado de los frutos <i>Solanum pachyandrum</i>	22
Figura 3. Flujo metodológico del diseño experimental para la optimización de la extracción asistida por ultrasonido de compuestos bioactivos y la evaluación de la capacidad antioxidante en frutos de <i>Solanum pachyandrum</i>	31
Figura 4. Gráficos de efectos principales y superficies de respuesta del diseño Box-Behnken para polifenoles totales	36
Figura 5. Gráficos de efectos principales y superficies de respuesta del diseño Box-Behnken para el contenido de carotenoides totales.....	37
Figura 6. Gráficos de efectos principales y superficies de respuesta del diseño Box Behnken para capacidad antioxidante	39
Figura 7. Superficie de deseabilidad compuesta (RSM).....	40

ÍNDICE DE ANEXOS

Anexo 1. Comprobante de herbario de <i>Solanum pachyandrum</i> . 2024.....	62
Anexo 2. Constancia de determinación botánica	63
Anexo 3. Frutos <i>Solanum pachyandrum</i> en diferentes estados de madurez.....	64
Anexo 4. Recolección de las muestras.	65
Anexo 5. Análisis biométrico de los frutos de <i>S. pachyandrum</i> en estado verde, pintón y maduro.	66
Anexo 6. Análisis fisicoquímico de los frutos de <i>S. pachyandrum</i> en estado verde, pintón y maduro.	67
Anexo 7. Análisis proximal (humedad y cenizas) de los frutos maduros de <i>S. pachyandrum</i>	68
Anexo 8. Extracción y análisis de los extractos de los frutos silvestres de <i>S. pachyandrum</i>	69
Anexo 9. Análisis de extractos.....	70
Anexo 10. Curva de calibración para determinación de polifenoles totales.....	71
Anexo 11. Curva de calibración para determinación de carotenoides totales	71
Anexo 12. Curva de calibración para determinación de capacidad antioxidante	72
Anexo 13. Análisis de vitamina C de los frutos silvestres de <i>S. pachyandrum</i> en estado pintón.....	73
Anexo 14. Análisis de vitamina C de los frutos silvestres de <i>S. pachyandrum</i> en estado verde	74
Anexo 15. Análisis de vitamina C de los frutos silvestres de <i>S. pachyandrum</i> en estado maduro	75
Anexo 16. Análisis proximal de frutos maduros de <i>S. pachyandrum</i>	76
Anexo 17. Análisis estadístico de polifenoles totales a través del programa Minitab vrs 22.	77
Anexo 18. Análisis estadístico de carotenoides totales a través del programa estadístico Minitab vrs. 22	78
Anexo 19. Análisis estadístico de capacidad antioxidante a través del programa estadístico Minitab vrs. 22	79
Anexo 20. Optimización de Múltiples Respuestas.....	80

RESUMEN

Solanum pachyandrum, conocida como bombona, endémica de los Andes peruanos, representa una especie de interés científico por su condición silvestre y ausencia de investigación sobre su composición química y nutricional. El objetivo fue caracterizar los frutos y optimizar las condiciones de extracción asistida por ultrasonido (EAU) de compuestos bioactivos y capacidad antioxidante. El estudio se desarrolló bajo el Diseño de Box-Behnken (DBB) y la Metodología de Superficies de Respuesta (RSM), siendo los factores independientes concentración de metanol (10 – 70%), amplitud ultrasónica (20 – 60%) y tiempo de sonicación (1 – 15 minutos). Según los resultados, los frutos maduros presentaron 14.42 ± 0.40 °Brix, pH 3.87 ± 0.03 , 81.60% de humedad, 2.51% de proteína y 5.60% de fibra. Los modelos de superficie de respuesta mostraron un ajuste adecuado para contenido de polifenoles totales (CPT, $R^2 = 91.85\%$) y contenido de carotenoides totales (CCT, $R^2 = 94.11\%$), sin embargo, la capacidad antioxidante (CA, $R^2 = 70.61$) mostró una eficacia predictiva limitada, por lo cual los parámetros óptimos se definieron en función de las respuestas de CPT y CCT. Bajo las condiciones óptimas (10% metanol, 60% amplitud, 15 min), los frutos maduros alcanzaron CPT de 90.27 ± 0.60 mg GAE/100 g de peso fresco (pf) y CCT de 269.13 ± 3.78 mg β -CE/100 g pf. En conclusión, los modelos optimizados demuestran que la EAU permite la extracción óptima de compuestos bioactivos de los frutos silvestres de *S. pachyandrum* y que estos constituyen una fuente de antioxidantes naturales.

Palabras clave: *Solanaceae* silvestre; compuestos antioxidantes; Box-Behnken; ultrasonido; pigmentos bioactivos.

ABSTRACT

Solanum pachyandrum, known as bombona, endemic to the Peruvian Andes, is of scientific interest due to its wild nature and the limited research on its chemical and nutritional composition. The objective was to characterize the fruits and optimize the conditions for ultrasound-assisted extraction (UAE) of bioactive compounds and antioxidant capacity. The study was conducted using a Box-Behnken design (BBD) and Response Surface Methodology (RSM), with methanol concentration (10–70%), ultrasonic amplitude (20–60%), and sonication time (1–15 minutes) as the independent factors. The results showed that the mature fruits had a Brix of 14.42 ± 0.40 °Brix, a pH of 3.87 ± 0.03 , 81.60% moisture, 2.51% protein, and 5.60% fiber. Response surface models showed a good fit for total polyphenol content (TPC, $R^2 = 91.85\%$) and total carotenoid content (TCC, $R^2 = 94.11\%$). However, antioxidant capacity (AC, $R^2 = 70.61\%$) showed limited predictive power, so the optimal parameters were defined based on the TPC and TCC responses. Under optimal conditions (10% methanol, 60% amplitude, 15 min), ripe fruits reached TPC of 90.27 ± 0.60 mg GAE/100 g fresh weight (fw) and TCC of 269.13 ± 3.78 mg β -CE/100 g fw. In conclusion, the optimized models demonstrate that EUA allows for the optimal extraction of bioactive compounds from wild *S. pachyandrum* fruits and that these constitute a source of natural antioxidants.

Keywords: Wild Solanaceae; antioxidant compounds; Box-Behnken; ultrasound; bioactive pigments.

I. INTRODUCCIÓN

El género *Solanum* L. se encuentra entre los diez más diversos de las angiospermas, con 2000 especies distribuidas en las regiones subtropicales y tropicales de todo el mundo, de las cuales 276 pertenecen al Perú. La mayor riqueza específica se registró en el departamento de Cajamarca, con 130 especies (Särkinen et al., 2015).

Las especies del género *Solanum* son ampliamente reconocidas por su importancia alimentaria, destacando cultivos como *S. lycopersicum* (tomate), *S. tuberosum* (patata), *S. melongena* (berenjena), *Capsicum annuum* (pimiento) (Ghatak et al., 2017) y frutas tropicales como *S. quitoense* y *S. sessiliflorum*, además, diversas investigaciones han evidenciado que este género contiene un complejo perfil de compuestos bioactivos, incluyendo antioxidantes, vitaminas y otros fitoquímicos asociados con beneficios para la salud (Añibarro et al., 2025; Cuéllar et al., 2025; Vargas et al., 2021). No obstante, muchas especies aún carecen de estudios científicos completos sobre su composición química y propiedades biológicas, pese a su relevancia etnobotánica y alimentaria en diversas culturas (Gafforov et al., 2024).

Solanum pachyandrum es una baya silvestre conocida como “bombona”, de 3 a 5 cm de diámetro, de color amarillo al madurar con un sabor agridulce (Clark & Knapp, 2014). Su distribución natural se extiende por las laderas occidentales de los Andes y la depresión de Huancabamba, abarcando zonas de Ecuador y del norte del Perú (Clark et al., 2016). Habita en bosques húmedos de ladera entre 200 y 1000 msnm (Särkinen et al., 2015; Clark et al., 2016). Desde el punto de vista etnobotánico, el fruto se consume tradicionalmente fresco por poblaciones locales, principalmente por niños (WFO, 2023). A la fecha, no posee valoración económica, presenta alto riesgo de extinción según la Lista Roja de la Unión Internacional para la Conservación de la Naturaleza (UICN) y de acuerdo con bases de datos como PubMed, Scopus, ScienceDirect y Google Académico, no hay reportes sobre investigación científica de los frutos, por lo que aún se desconoce ampliamente su potencial químico y nutricional.

Este contexto manifiesta la necesidad de desarrollar investigación orientada a la caracterización fisicoquímica y fitoquímica, así como a la evaluación de estrategias eficientes para la recuperación de compuestos de interés biológico de los frutos de *S. pachyandrum*. No se descarta que puedan constituir una matriz vegetal de interés como fuente de compuestos bioactivos con actividad biológica relevante para aplicaciones alimentarias y nutraceuticas, de manera que permita su valoración y conservación.

La composición química y funcional de los frutos está estrechamente influenciada por su estado de madurez, ya que durante el proceso de maduración ocurren cambios metabólicos que modifican la concentración y el perfil de compuestos bioactivos y otros metabolitos secundarios (Jia et al., 2024; Nakitto et al., 2023). En este contexto, la caracterización de los frutos en diferentes estados de maduración resulta fundamental para comprender las variaciones en su composición fitoquímica y en su capacidad antioxidante (Phan et al., 2022; Quispe-Sanchez et al., 2025). Asimismo, este tipo de evaluación contribuye a mejorar y optimizar los procesos productivos, asegurar la calidad del producto final, prolongar su vida útil y favorecer el aprovechamiento de subproductos con valor agregado (Añibarro et al., 2025; Cuéllar et al., 2025).

Por otro lado, el estudio de compuestos antioxidantes ha tomado gran relevancia gracias a su desempeño fundamental en la protección de las células frente al estrés oxidativo, fenómeno que se ha relacionado con el desarrollo y la progresión de enfermedades no transmisibles (Guija-Guerra & Guija-Poma, 2023; Reddy, 2023). En este sentido, numerosos estudios han evidenciado una relación inversa entre el consumo de frutas y verduras y el riesgo de padecer enfermedades crónicas, efecto atribuido principalmente a los fitoquímicos con actividad antioxidante presentes en estos alimentos (Muscolo et al., 2024).

El creciente interés por la obtención de compuestos con actividad antioxidante a partir de matrices vegetales ha impulsado el desarrollo de tecnologías de extracción más eficientes y sostenibles. Entre estas destaca la extracción asistida por ultrasonido (EAU), la cual ha demostrado mejorar la recuperación de compuestos fenólicos y otros metabolitos al generar fenómenos de cavitación que provocan la ruptura de las paredes celulares y facilitan la liberación de compuestos intracelulares hacia el solvente (Shawky et al., 2025; Kumar et al., 2021). En comparación con métodos convencionales, esta técnica puede reducir el tiempo de extracción, el consumo de solventes y aumentar el rendimiento de compuestos bioactivos (Otálora-Orrego & Martin, 2020). El proceso está influenciado por factores como tipo de solvente, concentración, temperatura, amplitud, ciclo y relación muestra-solvente, por lo que no puede aplicarse de manera universal, siendo crucial determinar condiciones óptimas específicas para cada matriz (Medina-Torres et al., 2017).

La metodología de superficie de respuesta (RSM) permite optimizar múltiples variables e interacciones minimizando experimentos requeridos, además de predecir condiciones óptimas para maximizar o minimizar respuestas simultáneamente. Además, el diseño Box-Behnken (BBD) presenta varias ventajas frente a otros diseños estadísticos, incluyendo

reducción del consumo de reactivos, menor número de corridas experimentales y evitación de combinaciones extremas de tratamiento (Montgomery, 2017).

Numerosas investigaciones han explorado las características fisicoquímicas y nutricionales de frutos similares a *S. pachyandrum*, como el estudio de Andrade-Cuvi et al. (2016), en el que se realizó un estudio sobre naranjilla (*Solanum quitoense*) en diferentes estados de madurez. Los resultados mostraron que la acidez titulable de la naranjilla inmadura fue de 13.71 meqH⁺/Kg, y fue de 12.51 y 9.93 meqH⁺/Kg para frutos maduros y sobremaduros, respectivamente. El mayor contenido de SST fue de 8.98% en las naranjillas maduras, seguidas de las frutas inmaduras (8.01%) y sobremaduras (7.37%). Además, en frutos sobremaduros se encontró el mayor contenido fenólico (7.61 mg/g), una capacidad antioxidante de 26.32 y 21.75 μ mol/g (ABTS y DPPH).

Sereno et al. (2018) estudiaron las características físicas y composición fisicoquímica de *Solanum sessiliflorum* Dunal. Según los resultados, las frutas tuvieron un peso promedio de 83.91 ± 20.47 g y 97% de porción comestible, el contenido de acidez titulable fue 1.77, pH 3.33 y Brix 6.0. La cocona también exhibió cantidades significativas de ácido ascórbico ($20.08 \text{ g } 100 \text{ g}^{-1}$) y carotenoides ($9.23 \mu\text{g/g}$). Los autores consideran que el conocimiento de la composición y el perfil mineral de la cocona impulsará su consumo.

Así también, Obregón & Lozano (2021) investigaron los compuestos nutricionales y bioactivos del quito quito (*Solanum quitoense* Lam.). Entre los resultados se reportó que el quitoquito tuvo un pH de 3.23, acidez titulable de 2.51, 10 °Brix, índice de madurez de 4.01; en cuanto a sus compuestos bioactivos presentó 0.74 mg β -caroteno/100 g, polifenoles totales 67.24 mg GAE/100 g y la actividad antioxidante mediante el DPPH (280 μ mol Trolox/100 g).

Por otro lado, diversos estudios evidencian la eficiencia de la extracción de compuestos fitoquímicos utilizando ultrasonido y metodología de superficie-respuesta. Ahmed et al. (2022b) optimizaron las condiciones de extracción de los compuestos bioactivos de *Spondias pinnata* por EAU mediante el uso de la RSM, los resultados de ANOVA revelaron que las variables de extracción de EAU tuvieron una influencia significativa ($p < 0,01$) en CPT, DPPH y FRAP. Los parámetros de extracción óptimos que maximizaron la extracción fueron $52.03 \text{ }^{\circ}\text{C}$, 30 min y 79.99 % de etanol. En condiciones óptimas, los valores experimentales para CPT, DPPH y FRAP fueron $370 \pm 26 \text{ mg GAE/100 g MS}$, $57 \pm 7\%$ y $7650 \pm 460 \text{ mg AAE/100 g MS}$, respectivamente.

Así mismo, Weremfo et al. (2022) evaluaron la obtención de antioxidantes fenólicos de frutos *Solanum torvum* usando EAU. Según los resultados, las condiciones óptimas para maximizar la extracción de CPT (192.3 mg GAE/g), DPPH (47.4 µg AA/g) y ABTS (116.2 µmol TE/g) fueron 56.7 % de etanol, 80 °C, tiempo 17.3 min. y relación disolvente-sólido de 49.7 ml/g. Concluyeron que los EAU pueden recuperar antioxidantes fenólicos más altos y en menos tiempo que el proceso convencional de extracción con solventes (CSE).

Silva et al. (2021) optimizaron las condiciones de EAU de compuestos fenólicos de la cáscara de *Spondias purpurea* usando MSR. Según los resultados, las condiciones ideales fueron amplitud ultrasónica = 100% (200 W) y un tiempo de 15 min. Además, al compararse con otras técnicas, la EAU mostró mejores resultados en cuanto a la extracción, rendimiento de compuestos fenólicos y alta actividad antioxidante (35.15 mg GAE/g, IC 50 = 0.19 mg/ml).

En el estudio de EAU de compuestos fenólicos de *Cornus officinalis* utilizando la MSR desarrollada por Dumitraşcu et al. (2019) se menciona que las condiciones óptimas de extracción para CPT fueron 30 °C, 60 % de etanol, 40 min y relación líquido/sólido de 10 ml/g. (3969.9 ± 87.5 mg GAE/100 g ps). Además, la extracción de CPT estuvo significativamente influenciada por la relación líquido/sólido; las temperaturas más bajas y el mayor tiempo de extracción favorecieron el aumento del rendimiento de CPT.

Kobus et al. (2025) optimizaron el tiempo, la concentración de etanol y la intensidad de ultrasonido para maximizar la extracción de compuestos bioactivos de los frutos de *Sorbus aucuparia* L.; además, aplicaron la MSR para optimizar. Los resultados mostraron que los modelos predictivos son de alta calidad. La concentración de etanol ejerció la mayor influencia en la eficiencia de extracción para la mayoría de los polifenoles estudiados, mientras que el tiempo de extracción no mostró un efecto significativo.

Gómez-López et al. (2021) realizaron un estudio sobre la optimización de la extracción de compuestos antioxidantes de *Opuntia stricta* var. *Dillenii*. Los resultados indican que el tiempo de extracción más eficiente fue de 5 min y la mejor combinación de parámetros de EAU fue 50% de amplitud, 15% de etanol en disolvente (etanol/agua, 15/85, v/v) y 20 °C de temperatura, obteniendo 10.06 ± 0.10 mg de betalaínas totales/g de peso seco, 2.32 ± 0.08 mg de ácido piscídico/g de peso seco y 0.38 ± 0.00 mg de flavonoides principales totales/g de peso seco.

En el estudio de Saini et al. (2025) se maximizó el rendimiento del extracto crudo (REC) del fruto *S. lasiocarpum* mediante ultrasonido y la metodología de superficie de respuesta (RSM). Según los resultados, las condiciones óptimas fueron un tiempo de extracción de 8.93 min, una amplitud ultrasónica del 57.00 % y una relación sólido-disolvente de 1:29.68 g/ml, lo que resultó en REC (45.32 ± 0.67 %), CPT (28.22 ± 0.86 mg GAE/g). Los hallazgos establecen a los frutos *S. lasiocarpum* como una fuente valiosa de compuestos fenólicos.

En este contexto, esta investigación tuvo como objetivo general optimizar las condiciones de extracción asistida por ultrasonido (EAU) de compuestos bioactivos y determinar la capacidad antioxidante del fruto silvestre *Solanum pachyandrum*. Para ello, se plantearon cinco objetivos específicos articulados metodológicamente: (i) determinar las características biométricas de los frutos en los estados verde, pintón y maduro; (ii) caracterizar las propiedades fisicoquímicas y proximales de los frutos en cada estado de maduración; (iii) cuantificar el contenido de fenoles totales, carotenoides totales y capacidad antioxidante por espectrofotometría UV-Vis a partir de los extractos obtenidos; y (iv) optimizar los parámetros de extracción mediante un diseño Box–Behnken por Metodología de Superficie de Respuesta (MSR), maximizando la recuperación simultánea de compuestos bioactivos.

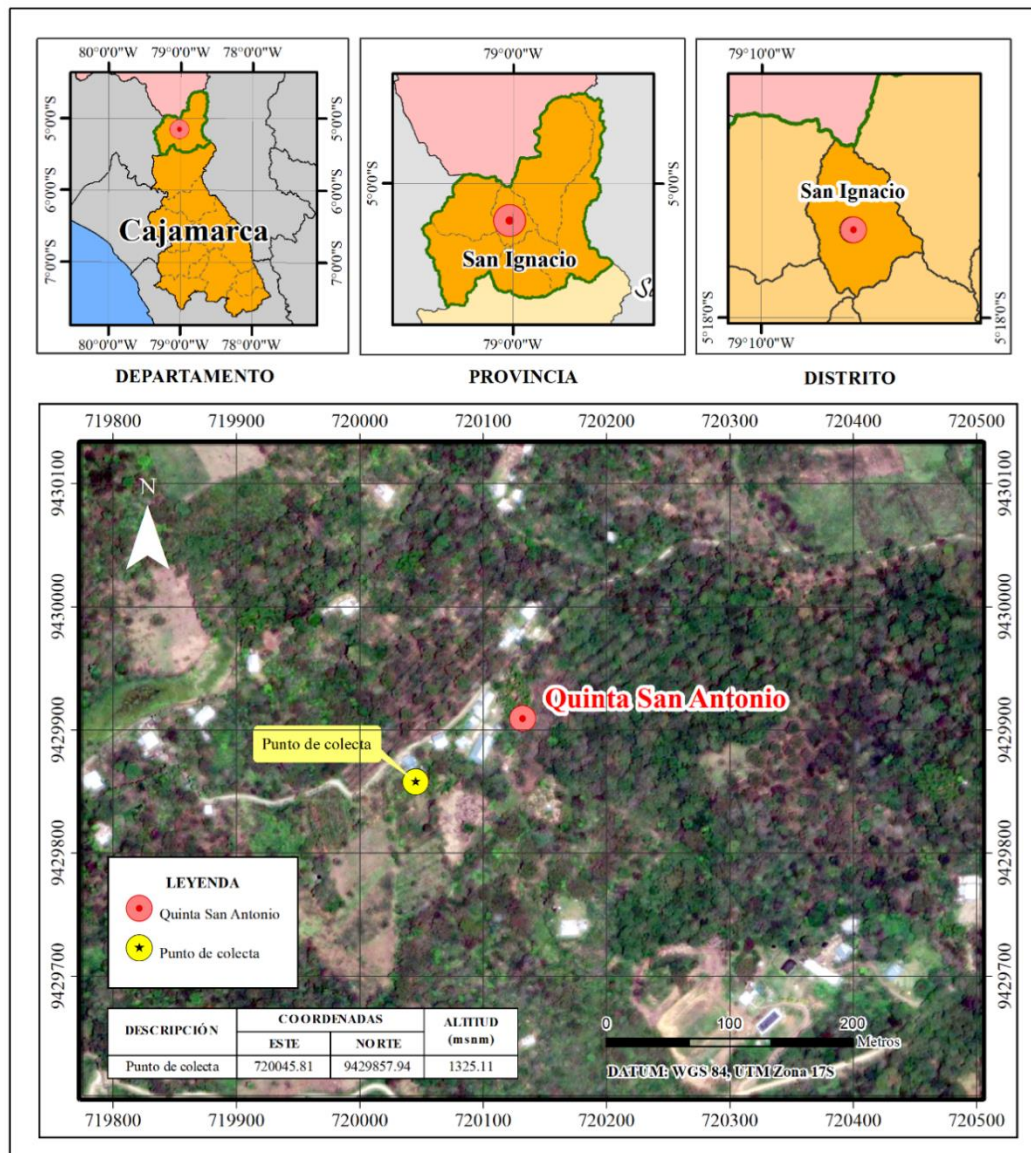
II. MATERIAL Y MÉTODOS

2.1. Lugar de ejecución

El material vegetal utilizado se recolectó de la finca “Quinta San Antonio”, San Ignacio, Cajamarca, Perú (UTM 72004581, 9429857.94, zona 17S) (Figura 1). El espécimen de referencia se identificó y depositó en el Herbario «Isidoro Sánchez Vega» (ISV) (Anexo 1) de la Universidad Nacional de Jaén bajo la constancia N.º 06-2024 (Anexo 2).

Figura 1

Ubicación geográfica del sitio de recolección de frutos de S. pachyandrum en la provincia de San Ignacio, región Cajamarca, Perú.



Los estudios biométricos, fisicoquímicos, de extracción y cuantificación de compuestos bioactivos de los frutos silvestres de *S. pachyandrum* se realizaron en los laboratorios del Instituto de Investigación Tecnológica Agroindustrial (IITA) de la Universidad Nacional del Santa-Chimbote.

El análisis proximal (fibra cruda, proteína cruda, grasas) y la determinación de vitamina C fueron realizados por el Instituto de Certificación, Inspección y Ensayos de la Universidad Nacional Agraria La Molina – Lima.

2.2. Población, muestra y muestreo

2.2.1. Población

La población por estudiar correspondió a los frutos de *Solanum pachyandrum* en estado verde, pintón y maduro provenientes de la finca Quinta San Antonio – San Ignacio, Cajamarca, Perú.

2.2.2. Muestra

Fueron aproximadamente 70 unidades de frutos, por estado de madurez, haciendo un total de 210 frutos.

2.2.3. Muestreo

La cosecha de los frutos se realizó en el mes de julio de 2025, mediante un muestreo no probabilístico de tipo intencional, aplicando criterios de selección previamente establecidos con la intención de asegurar la representatividad fenotípica y el adecuado estado sanitario del conjunto de muestras. En la fase de campo, se seleccionaron aleatoriamente árboles representativos dentro de las parcelas experimentales, recolectando frutos de acuerdo a su estado de madurez requerido, exentos de daños mecánicos y libres de enfermedades fúngicas visibles. Con el propósito de asegurar un nivel adecuado del índice de madurez de los frutos, la colecta se realizó tomando como referencia la tabla colorimétrica de los frutos de *Solanum quitoense* establecida en la Norma Técnica Colombiana NTC 5093 (Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación, 2002). El uso de esta norma fue justificado por la cercanía taxonómica y la similitud morfológica en la evolución del color en el pericarpio en el proceso de maduración entre las especies evaluadas. Los frutos se clasificaron en tres estados de madurez: verde (escala 0), pintón (escala 2) y maduro (escala 4), de acuerdo a los criterios visuales definidos con la escala colorimétrica para esta especie.

2.3. Material

2.3.1. Reactivos

Los reactivos utilizados en este estudio incluyeron Folin-Ciocalteu (99.5 %, Sigma-Aldrich-EE. UU), ácido gálico (Merck-Alemania), 2,2-difenil-1-picrilhidrazilo (Sigma-Aldrich-EE. UU), ácido ($\pm$)-6-hidroxi-2,5,7,8-tetrametilcroman-2-carboxílico (Trolox, Sigma-Aldrich-EE. UU), estándar de β -caroteno (97.0 %, Sigma-Aldrich-EE. UU), carbonato de sodio (Na_2CO_3 , J.T. Baker, EE. UU) y metanol (Sigma-Aldrich-EEUU). Todos los reactivos utilizados fueron de calidad analítica y se emplearon sin purificación adicional.

2.3.2. Material vegetal

El material vegetal utilizado corresponde a los frutos silvestres de *Solanum pachyandrum* en estado verde, pintón y maduro (Anexo 3).

2.4. Métodos, técnicas, procedimientos y técnicas de recolección de datos

2.4.1. Metodologías

2.4.1.1. Recolección y selección de los frutos

Los frutos fueron recolectados manualmente, seleccionándose únicamente frutos según su coloración externa característica de su estado de madurez y ausencia de daños visibles. El traslado hasta los laboratorios se realizó en coolers con packs de gel refrigerante, manteniendo una temperatura de 4 °C. Se recibieron los frutos en el laboratorio, se seleccionaron y clasificaron según calidad y estado de madurez, posteriormente se lavaron y desinfectaron con hipoclorito de sodio a 80 ppm por 2 minutos para reducir la carga microbiana, se enjuagaron con agua destilada para eliminar restos del desinfectante y se secaron a temperatura ambiente (Anexo 4).

2.4.1.2. Análisis biométrico

Se evaluaron las características biométricas (diámetro polar, diámetro ecuatorial y peso) de 150 frutos, de los cuales 50 fueron en estado verde, 50 en pintón y 50 en estado maduro; los análisis se desarrollaron a los tres días de la recolección de los frutos. El peso (g) se determinó con una balanza (Serie 321 LX, Precisa, Suiza) mientras que el diámetro polar y ecuatorial (mm) se midieron con un calibrador Vernier (Ver-6Px, Petrus, China) de 1/128" (Ramos et al., 2021) (Anexo 5).

2.4.1.3. Análisis fisicoquímico

La evaluación fisicoquímica se desarrolló mediante los procedimientos ya estandarizados por métodos oficiales de análisis de alimentos de la AOAC (2023). Se seleccionaron aleatoriamente 5 frutos por cada estado de madurez para la determinación de los análisis. Se cortaron longitudinalmente y la pulpa se trituró con un mortero.

Determinación de pH (AOAC-981.12:2023)

La determinación de pH se realizó mediante el método potenciométrico; en 5 g de pulpa de fruta triturada se introdujo el medidor de pH/mV de mesa con resolución de 0.01, HANNA HI2211-01 (HANNA, Italia). Una vez estabilizados los resultados, se registró el pH de la muestra (Anexo 6).

Acidez titulable (AOAC-942.15:2023)

Se valoró utilizando el método volumétrico; a partir de una mezcla preparada (5 g de pulpa de fruta triturada diluida en 45 ml de agua destilada) se neutralizó la acidez con NaOH N/10, usando 0.5 ml de fenolftaleína (Anexo 6). Cuando se alcanzó el valor de pH 8.2, se detuvo la valoración y se anotó el volumen de hidróxido de sodio (NaOH) gastado para finalmente introducir el valor en la ecuación (1).

$$\% \text{ de Acidez} = \frac{(V1 \times N \times \text{Peq})}{V2} \times 100 \quad (1)$$

Donde:

V1 = Volumen consumido de NaOH en la valoración

N = Normalidad de la solución de NaOH 0.1N

Peq = Valor del miliequivalente en gramos del ácido cítrico (0,064)

V2= Volumen de la muestra (mL)

Sólidos solubles (AOAC-932.12:2023)

Se determinó la concentración de sacarosa (en porcentaje de masa) por el método refractométrico. De 5 g de pulpa de fruta triturada se tomaron 2 ml y se colocaron en forma de gotas en el prisma del refractómetro óptico manual de 0 a 90% Brix con ATC (THE01505, Kusitest, Perú), la lectura se efectuó en grados Brix.

Índice de madurez

Se calculó a través de la ecuación (2), dividiendo sólidos solubles y la Acidez (g ácido cítrico/1000 cm³) siguiendo la metodología usada por Sing et al., (2023).

$$\text{Índice de madurez} = \frac{\text{Sólidos solubles}}{\% \text{ Acidez}} \quad (2)$$

Vitamina C (AOAC-967.21:2019)

Se añadieron 5 mL de una solución de ácido metafosfórico–ácido acético en matraces Erlenmeyer de 50 mL, a los cuales se incorporaron 2 mL de una solución estándar de ácido ascórbico. Posteriormente, el matraz se colocó bajo la bureta y se agregó lentamente la solución de indofenol hasta observar la aparición de un color rosa pálido. Se registró la lectura final de la bureta y se determinó el volumen de colorante consumido. Luego, se preparó un blanco utilizando 7 mL de la solución de ácido metafosfórico–ácido acético en un matraz Erlenmeyer, al que se le añadió agua destilada junto con el mismo volumen de colorante previamente utilizado, procediéndose a titular siguiendo el mismo procedimiento descrito. Para el análisis de la muestra, se pipetearon 5 mL de la solución de ácido metafosfórico–ácido acético junto con 2 mL de jugo de fruta previamente filtrado en un matraz Erlenmeyer de 50 mL. Luego, cada muestra se tituló con la solución de colorante de indofenol hasta lograr la persistencia de un color rosa pálido, pero claramente perceptible, durante más de 5 segundos. Se registraron las lecturas inicial y final de la bureta, y la diferencia entre ambas se utilizó para calcular el volumen de colorante consumido en cada titulación, empleando la ecuación (3).

$$\text{Vitamina C} \left(\frac{\text{mg}}{100\text{g o ml}} \right) = \frac{(V_{\text{ind}} - B) \times F \times V_{\text{total}}}{V_{\text{alicuota}} \times W} \times 100 \quad (3)$$

Donde:

V_{ind} = Volumen de la solución de 2,6-diclorofenolindofenol gastado en la titulación de la muestra.

B = Volumen de indofenol gastado en un blanco

F = Factor de equivalencia del indofenol

V_{total} = Volumen total del extracto preparado.

V_{alicuota} = Volumen de la muestra que realmente titulaste en el matraz.

W = Peso (g) o volumen (ml) de la muestra original analizada.

2.4.1.4. Análisis proximal

La evaluación proximal se desarrolló mediante los procedimientos ya estandarizados por métodos oficiales de análisis de alimentos (AOAC 2019, AOAC 2023, NTP 2011). Se seleccionaron aleatoriamente 5 frutos en estado maduro para la determinación de los análisis.

Humedad (AOAC-945.15:2023)

Se pesaron 3 g de pulpa de fruta triturada y se colocaron en la placa de un analizador de humedad (AND MX-50, A&D Weighing, Japón). Una vez finalizado el proceso, se anotó el resultado obtenido por el equipo (Anexo 7).

Cenizas (AOAC 923.03:2023)

Previamente, se colocaron los crisoles en la estufa (CLN 115, Pol-Eko, Alemania) a 105 ± 25 °C; luego se pasaron a un desecador y se enfriaron a temperatura ambiente. Esta operación se repitió hasta obtener el peso constante (W_1). Seguidamente, 5 g de pulpa de fruta triturada (W_2) se incineró en la mufla a 550 ± 25 °C durante 3 a 5 h, hasta observar cenizas blancas, ligeramente grises. Luego, se enfriaron en un desecador y, cuando alcanzaron la temperatura ambiente, se pesaron (W_3) (Anexo 7). El residuo como cenizas totales se calculó usando la ecuación (4):

$$\text{Cenizas totales (\%)} = \frac{W_3 - W_1}{W_2} * 100 \quad (4)$$

Proteínas (AOAC 954.01, 2019)

Se colocó 1 g de pulpa de fruta homogeneizada dentro de un matraz Kjeldahl. Luego se adicionó 0.7 g de óxido de mercurio, 10 g de sulfato de potasio y 20 ml de ácido sulfúrico concentrado. Posteriormente, se colocó el matraz en el equipo en posición inclinada y se elevó la temperatura suavemente hasta que cesó el espumeo. Se hirvió hasta que la solución se tornó clara y luego se hirvió 30 minutos más. Mientras la solución se enfriaba, se incorporaron gradualmente 90 mL de agua pura y se dejó alcanzar una temperatura de 25 °C. Una vez fría, se añadieron 25 mL de solución de sulfato de sodio; posteriormente, se agregaron 80 mL de solución de NaOH al 40% bajo agitación. El sistema se conectó al equipo de destilación, colocando la punta del condensador dentro de un matraz que contenía ácido estandarizado con tres gotas de indicador anaranjado de metilo. Se procedió a calentar hasta destilar completamente el NH_3 presente y, finalmente, se realizó la titulación con una solución estándar de ácido clorhídrico.

Cálculos:

A = Ácido clorhídrico usado en la titulación (ml)

B = Normalidad del ácido estándar

C = Peso de la muestra (g)

$$\text{Nitrógeno en la muestra (\%)} = 100\left[\left(\frac{A \times B}{C}\right) \times 0.014\right] \quad (5)$$

$$\text{Proteína cruda (\%)} = \text{Nitrógeno en la muestra} \times 6.25 \quad (6)$$

Grasas (AOAC-930.09, 2019)

Los vasos de aluminio a emplear se colocaron en una estufa a $103 \pm 2^\circ\text{C}$ durante 30 minutos; posteriormente, se trasladaron a un desecador hasta que alcanzaron la temperatura ambiente y se registró su peso (P2). Se pesaron 3 g de pulpa de fruta (P) en un cartucho de celulosa previamente tarado. Los cartuchos con la muestra se introdujeron en el extractor de grasa acoplado al soporte correspondiente, y se añadieron entre 50 y 60 mL de hexano en cada vaso de aluminio. Luego, se configuró el programa adecuado y se encendió el sistema de refrigeración para iniciar la determinación de grasa total. Finalizado el tiempo de extracción, los vasos se retiraron del equipo y se colocaron nuevamente en la estufa a $103 \pm 2^\circ\text{C}$ durante 2 a 3 horas, con el fin de eliminar residuos del solvente. Después, se trasladaron a un desecador con sílica gel hasta enfriarse a temperatura ambiente y se registró el peso final (P1). Finalmente, el porcentaje de grasa se calculó utilizando la ecuación (7).

$$\% \text{ Grasa o E.E.} = \frac{P1-P2}{P} \times 100 \quad (7)$$

Donde:

P1 = peso del vaso con el extracto etéreo o residuos de grasa de la muestra

P2 = peso del vaso vacío

P = es el peso de la muestra empleada.

Fibra cruda (NTP 205.003.1980)

Se obtuvieron 3 g de pulpa de fruta seca y desengrasada, para luego colocarla en un vaso precipitado adicionando 200 ml de ácido sulfúrico en ebullición, 3 gotas de antiespumante y 3 perlas de vidrio, dejando a ebullición por un tiempo de 30 min, adicionando agua destilada y removiendo habitualmente para evitar que las partículas se adhieran a las paredes. Se precalentó con agua hirviendo un embudo con papel filtro N° 542 y al hervir la solución, se retiró y dejó reposar por 1 min, finalmente se filtró. Posteriormente el residuo obtenido se transfirió a un matraz con 200 ml de disolución de NaOH hirviendo y se dejó a este punto por 30 min, seguidamente se precalentó un crisol con filtro utilizando agua en ebullición, y se filtró con lana de vidrio después de dejar sosegar la muestra por 1 min como en el paso 2.

Se lavará de nuevo el residuo con agua caliente, con la solución de HCl y con agua en ebullición nuevamente, para culminar con 3 lavados utilizando éter de petróleo. Se llevó el crisol a 105°C en un horno por 12 h, luego se retiró y se dejó enfriar a temperatura ambiente. Finalmente, los crisoles se pesaron incluyendo la muestra y se llevaron a una mufla a 550°C por 3 h, se retiraron y se dejaron enfriar en un desecador para luego pesar de nuevo. El porcentaje de fibra cruda se calculó usando la ecuación (8).

Cálculos

A = Peso del crisol con el residuo seco (g)

B = Peso del crisol con la ceniza (g)

C = Peso de la muestra (g)

$$\text{Contenido de fibra cruda (\%)} = 100 * \left(\frac{A - B}{C} \right) \quad (8)$$

Carbohidratos

Los carbohidratos disponibles se estimaron por diferencia de peso siguiendo la metodología usada por Añibarro et al. (2025).

2.4.1.5. Extracción asistida por ultrasonido (EAU)

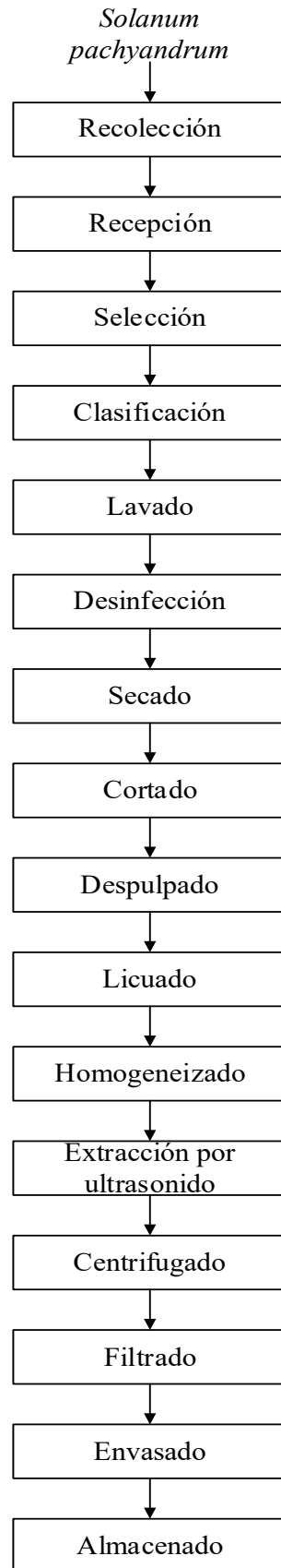
Para la optimización, se seleccionaron 5 frutos maduros de forma aleatoria. Con un cuchillo se realizó un corte transversal y se retiró la pulpa de la cáscara, la pulpa obtenida se licuó con un procesador comercial (Clatronic SM, Clatronic, Alemania), con una potencia nominal de 220 W, durante 30 s, hasta obtener una pasta, seguidamente se acondicionó en vasos precipitados de 40 ml adicionando metanol a diferentes concentraciones de 10 a 70 % (proporción de muestra: solvente de 1 g/5 ml) de acuerdo al diseño experimental señalado en la sección 2.4.3.

La EAU se realizó utilizando un homogeneizador de sonda ultrasónica (USCG series Infitek, China), equipado con una punta de sonotrodo de 18 mm de diámetro y una frecuencia de 24 kHz. Los experimentos se llevaron a cabo utilizando una amplitud de sonicación en un rango de 20 a 60 % por un tiempo de 1 a 15 min. Después de la sonicación, las muestras se centrifugaron a 4200 rpm (4-16KS, Sigma-Aldrich, Alemania) durante 15 min a 4 °C; para la eliminación de residuos se filtró el sobrenadante a través de papel Whatman N° 42 (Anexo 8). Finalmente, las muestras se almacenaron a -20 °C para su posterior análisis.

Los pasos completos y detallados desde la recolección hasta la obtención de los extractos se encuentran en la Figura 2.

Figura 2

*Flujograma para la obtención del extracto concentrado de los frutos *Solanum pachyandrum**



2.4.1.6. Análisis de extractos de los frutos de *Solanum pachyandrum*

A. Determinación del contenido de polifenoles totales

Formulación de la curva patrón

En primer lugar, se preparó una solución de ácido gálico de 300 µg/ml (solución concentrada o madre), a partir de esta se prepararon disoluciones diluidas de concentraciones crecientes de ácido gálico entre 0 y 300 µg/ml (Tabla 1).

Tabla 1

Preparación de la curva patrón de ácido gálico a partir de una solución concentrada de 300 µg/ml

Nº	Concentración µg/ml	Ácido gálico (µl)	Metanol (50%) (µl)	Total (µl)
1	0	0	500	500
2	60	100	400	500
3	120	200	300	500
4	180	300	200	500
5	240	400	100	500
6	270	450	50	500
7	300	500	0	500

Se prepararon siete microtubos tipo Eppendorf de 1.5 mL, previamente enumerados y rotulados, a los cuales se les añadió la cantidad correspondiente de ácido gálico y metanol al 50% según lo indicado en la Tabla 1. Posteriormente, se agitaron en vortex durante 10–15 s, obteniéndose así las soluciones estándar de ácido gálico. Para la preparación de las diluciones en concentraciones ascendentes, se tomaron 80 µL de cada solución estándar, a los que se añadieron 160 µL de reactivo de Folin-Ciocalteu diluido (1:10) y 640 µL de una solución saturada de carbonato de sodio al 7.5 % (p/v). La mezcla de reactivos se homogeneizó completamente mediante vortex durante 10–15 s y luego se incubó durante 1 hora en condiciones de oscuridad. Finalmente, se determinaron las concentraciones del patrón de ácido gálico midiendo la absorbancia a 765 nm con un espectrofotómetro UV/Visible (BioTek Synergy H1 Multimode Reader, Agilent, EE. UU.). Con estos datos se construyó la curva patrón de ácido gálico, obteniéndose un coeficiente de correlación $R^2 = 0,994$, considerado adecuado para el análisis de las muestras. A partir de los valores de

absorbancia de cada concentración se elaboró la recta de calibración, realizándose cada ensayo por triplicado.

Cuantificación de polifenoles totales

El contenido de CPT se determinó usando el método descrito por Naranjo-Durán et al. (2023) y Quispe-Sanchez et al. (2025) con algunas modificaciones sobre las cantidades de reactivos y muestra. A 40 μ L de cada extracto se añadieron 80 μ L de reactivo de Folin-Ciocalteu (99,5 %, Sigma-Aldrich-Estados Unidos), diluido (1:10), y 640 μ L de solución de Na_2CO_3 (75 g/L). Después de 1 hora de incubación a temperatura ambiente, sin luz, se midió la absorbancia a 765 nm utilizando un espectrofotómetro lector multimodal UV/Vis (BioTek Synergy H1 Multimode Reader, Agilent, EE. UU) (Anexo 9). Finalmente, cuantificamos los fenoles totales en los extractos de los frutos silvestres de *Solanum pachyandrum* con la ayuda de los datos de la recta patrón de ácido gálico (Anexo 10). El contenido fenólico total se expresó en mg de equivalentes de ácido gálico (GAE)/g de extracto en peso fresco (pf).

B. Determinación del contenido de carotenoides totales

Formulación de la curva patrón

Para realizar la curva de calibración se utilizó un estándar de β -caroteno de calidad analítica. Se realizó una solución patrón N° 1 utilizando 1 mg de estándar de β -caroteno por ml de metanol al 100%.

Los puntos de la curva fueron concentraciones que van desde 0 a 1000 μ g/ml (Tabla 2). Estos se obtuvieron tomando 100 μ L, 200 μ L, 300 μ L, 400 μ L, 500 μ L, 600 μ L, 700 μ L, 800 μ L, 900 μ L y 1 ml de la solución patrón N° 1 y diluyéndolos con metanol hasta un volumen final de 1 ml como se muestra en la Tabla 2.

Tabla 2

Preparación de la curva patrón de β -caroteno a partir de una solución concentrada de 1000 μ g/ml

N°	Concentración de β -caroteno (μ g/ml)	Solución madre (μ L)	Metanol (μ L)	Total (μ L)
1	0	0	1000	1000
2	100	100	900	1000
3	200	200	800	1000
4	300	300	700	1000
5	400	400	600	1000

6	500	500	500	1000
7	600	600	400	1000
8	700	700	300	1000
9	800	800	200	1000
10	900	900	100	1000
11	1000	1000	0	1000

Se prepararon once microtubos tipo Eppendorf de 1.5 ml enumerados y rotulados. Luego se añadió a cada tubo la cantidad correspondiente de solución concentrada de β -caroteno y la cantidad correspondiente de metanol al 100% según la Tabla 2, se agitó en vortex por 10-15 s. Las muestras se incubaron durante 10 min en oscuridad. Finalmente, se determinaron las concentraciones del patrón β -caroteno con una absorbancia de 450 nm usando un espectrofotómetro UV/Visible (BioTek Synergy H1 Multimode Reader, Agilent, EE. UU). De tal manera se concluyó la formulación de la curva patrón de β -caroteno, con una correlación del valor de $R^2 = 0.992$, aceptable para el análisis de las muestras. A partir de los valores de absorbancia obtenidos de cada concentración de β -caroteno se construyó la recta de patrón; cada ensayo se realizó por triplicado.

Cuantificación del contenido de carotenoides totales

El contenido de carotenoides totales se determinó mediante espectrofotometría utilizando las metodologías descritas por Naranjo-Durán et al. (2023) y Zhu et al. (2022) con algunas modificaciones sobre el tipo de solvente y cantidades de reactivo. El contenido de carotenoides totales se extrajo con metanol a diferentes concentraciones (10 a 70 %) siguiendo el flujograma de la Figura N° 2. Obtenido el sobrenadante, se llevó a lectura a 450 nm en un espectrofotómetro lector multimodal UV/Vis (BioTek Synergy H1, Agilent, EE. UU) (Anexo 9). El cálculo del contenido de carotenoides totales se realizó mediante comparación con la curva de calibración obtenida a partir del estándar de β -caroteno a concentraciones de 0 a 1000 μg de β -caroteno/ml (Anexo 11). La absorbancia medida a 450 nm puede incluir contribuciones de diferentes carotenoides presentes en el extracto; por lo tanto, los resultados se expresan como mg equivalentes de β -caroteno/100 g de pf.

C. Análisis de la capacidad antioxidante

Formulación de la curva patrón

Para la curva de calibración se preparó 0.004 g de reactivo DPPH en 10 ml de metanol (100%), se disolvió en vortex por 10 a 15 s y se midió la absorbancia a 515 nm hasta alcanzar

una lectura cercana a 0.800 abs. Asimismo, se preparó una solución concentrada de Trolox 0.0125 g en 50 ml de metanol (100%). Luego se prepararon concentraciones crecientes de 0 a 500 uM a partir de la solución concentrada de Trolox siguiendo la Tabla 3.

Tabla 3

Preparación de la curva patrón de Trolox a partir de una solución concentrada de 500 µg/ml

Estándar	Concentración Trolox (uM)	Volumen de solución de Trolox 1 mM (µL)	Volumen de metanol (µL)
8	500	2500	2500
7	400	2000	3000
6	200	1000	4000
5	100	500	4500
4	50	250	4750
3	25	125	4875
2	10	50	4950
1	5	25	4975
0	0	0	5000

Se prepararon ocho tubos tipo Eppendorf de 5 ml enumerados y rotulados, luego se añadió a cada tubo la cantidad correspondiente de solución concentrada de trolox y la cantidad correspondiente de metanol al 100% según la Tabla 3, se agitó en vortex por 10-15 s, de tal manera que quedaron preparados los estándares de patrón. Las concentraciones diluidas en forma ascendente se realizaron tomando 10 µL de cada disolución estándar de patrón de trolox, y 190 µL de solución DPPH preparada anteriormente en una microplaca de 96 pocillos. Las muestras se incubaron durante 30 min en oscuridad. Finalmente, se determinó el % de captación de radicales libres (DPPH) con una absorbancia de 515 nm usando un espectrofotómetro UV/Visible (BioTek Synergy H1 Multimode Reader, Agilent, EE. UU). De tal manera se concluyó la formulación de la curva patrón de DPPH, con una correlación del valor de $R^2 = 0.997$, aceptable para el análisis de las muestras. A partir de los valores de absorbancia obtenidos de cada concentración de DPPH, se construyó la recta de patrón; cada ensayo se realizó por triplicado.

Cuantificación de capacidad antioxidante

La capacidad antioxidante se determinó espectrofotométricamente mediante el monitoreo de la inhibición del radical 2,2-difenil-1-picrilhidrazilo (DPPH) utilizando la metodología descrita por Angeli et al. (2023) con algunas modificaciones sobre las cantidades de reactivo

usadas. Se preparó una serie de diluciones de cada extracto en microplacas de 96 pocillos, y se añadieron 10 µL del extracto diluido (1:5) a 190 µL de solución metanólica de DPPH con una absorbancia de 0.800 a 515 nm. Después de 30 minutos de incubación a temperatura ambiente, se determinó la inhibición de los radicales a 515 nm en un espectrofotómetro lector multimodal UV/Vis (BioTek Synergy H1, Agilent, EE. UU) (Anexo 9). Finalmente, cuantificamos la capacidad antioxidante en los extractos de los frutos silvestres de *Solanum pachyandrum* con la ayuda de los datos de la recta patrón (Anexo 12). Los resultados se expresaron en mg de equivalente de Trolox/g de pf.

2.4.2. Variables de estudio

Las variables de estudio se organizaron en función de las dos etapas experimentales de la investigación. En la primera etapa, orientada a la caracterización de la materia prima, se consideró como variable independiente el estado de madurez del fruto, debido a su influencia directa sobre las características biométricas, fisicoquímicas y composicionales. En la segunda etapa, enfocada en la optimización de la extracción asistida por ultrasonido, se evaluaron tres factores operacionales asociados al proceso extractivo, con el propósito de maximizar la recuperación de compuestos bioactivos y la capacidad antioxidante.

Etapas I. Caracterización de las materias primas

Variables independientes

Estado de madurez (verde, pintón, maduro)

Variables dependientes

Características biométricas (diámetro polar, diámetro ecuatorial, peso)

Características fisicoquímicas (Sólidos solubles, pH, acidez titulable, vitamina C, índice de madurez)

Características proximales (solo frutos maduros) (humedad, cenizas, extracto etéreo, proteína cruda, fibra cruda, carbohidratos)

Etapas II. Optimización de compuestos bioactivos y capacidad antioxidante

Variables independientes

Factor A: Concentración de metanol (10 – 70 %)

Factor B: Amplitud ultrasónica (20 – 60 %)

Factor C: Tiempo (1 – 15 min)

Variables dependientes

Polifenoles totales (mg GAE/100 g)

Contenido de carotenoides totales (mg β -CE mg/100 g)

Capacidad antioxidante (μ mol TE/100 g)

2.4.3. Diseño experimental

El estudio se desarrolló en dos etapas experimentales claramente diferenciadas.

Etapas I. Caracterización de las materias primas

La caracterización de los frutos de *S. pachyandrum* se realizó según el estado de madurez: verde, pintón y maduro. Para cada estado se evaluaron las características biométricas y fisicoquímicas de los frutos. Las variables biométricas incluyeron diámetro polar, diámetro ecuatorial y peso; mientras que las variables fisicoquímicas comprendieron sólidos solubles, pH, acidez titulable, vitamina C e índice de madurez.

Adicionalmente, la composición proximal se determinó únicamente en frutos maduros, considerando humedad, cenizas, extracto etéreo, proteína cruda, fibra cruda y carbohidratos.

Etapas II. Optimización de compuestos bioactivos y capacidad antioxidante

Para llevar a cabo la MSR se utilizó el diseño Box-Behnken a fin de optimizar las condiciones de extracción de compuestos bioactivos de frutos de *S. pachyandrum* mediante EAU y mejorar la extracción del contenido de polifenoles totales (CPT), contenido de carotenoides totales (CCT) y la capacidad antioxidante (CA). Las variables analizadas fueron concentración de metanol (%), amplitud ultrasónica (%) y tiempo de extracción (min) a diferentes niveles (Tabla 4). Se realizó un total de 15 tratamientos aleatorizados (Tabla 5). Las variables dependientes evaluadas en los diseños experimentales fueron CPT (Y_1 , mg de equivalentes de ácido gálico (GAE)/g de extracto en peso fresco (pf)), CCT (Y_2 , mg de equivalente de β -caroteno/100 g de pf) y capacidad antioxidante (Y_3 , μ mol trolox/100 g de pf).

Tabla 4*Factores y niveles de diseño para optimizar las condiciones de extracción.*

Factor (variables experimentales)	Unidad	Niveles	
		Bajo (-1)	Alto (1)
Metanol	%	10	70
Amplitud	%	20	60
Tiempo	min	1	15

Tabla 5*Diseño estadístico de superficie-respuesta para evaluar las tres variables independientes*

Factores Independientes					
Variables Codificadas			Variables reales		
X ₁	X ₂	X ₃	X ₁	X ₂	X ₃
(-1)	(-1)	0	10	20	8
(-1)	0	(-1)	10	40	1
(-1)	0	(+1)	10	40	15
(-1)	(+1)	0	10	60	8
0	(-1)	(-1)	40	20	1
0	(-1)	(+1)	40	20	15
0	0	0	40	40	8
0	0	0	40	40	8
0	0	0	40	40	8
0	(+1)	(-1)	40	60	1
0	(+1)	(+1)	40	60	15
(+1)	(-1)	0	70	20	8
(+1)	0	(-1)	70	40	1
(+1)	0	(+1)	70	40	15
(+1)	(+1)	0	70	60	8

Nota. X₁: concentración de metanol (%), X₂: amplitud ultrasónica (%), X₃: tiempo (min)

2.4.4. Análisis estadísticos de datos

Los datos de caracterización del fruto se analizaron mediante ANOVA de una vía, y las diferencias entre medias se determinaron con la prueba post hoc de Tukey al nivel de significancia $\alpha = 0.05$. Los resultados se expresan como media $\pm$ desviación estándar, y todos los análisis estadísticos se realizaron en Statgraphics Centurion y Minitab v22. Previo al análisis, se evaluaron los supuestos de normalidad de los residuos y homogeneidad de varianzas mediante las pruebas de Shapiro–Wilk y Levene, respectivamente. La homogeneidad de varianzas se cumplió para todas las variables analizadas ($p > 0.05$). Aunque algunas variables presentaron desviaciones de la normalidad, el diseño balanceado y la homogeneidad de varianzas permitieron la aplicación del ANOVA paramétrico, considerando la robustez del método frente a desviaciones moderadas de este supuesto.

La optimización mediante RSM se efectuó en Statgraphics Centurion XVI.I®, ajustando los datos por mínimos cuadrados a un modelo polinomial de segundo orden (Ecuación 9):

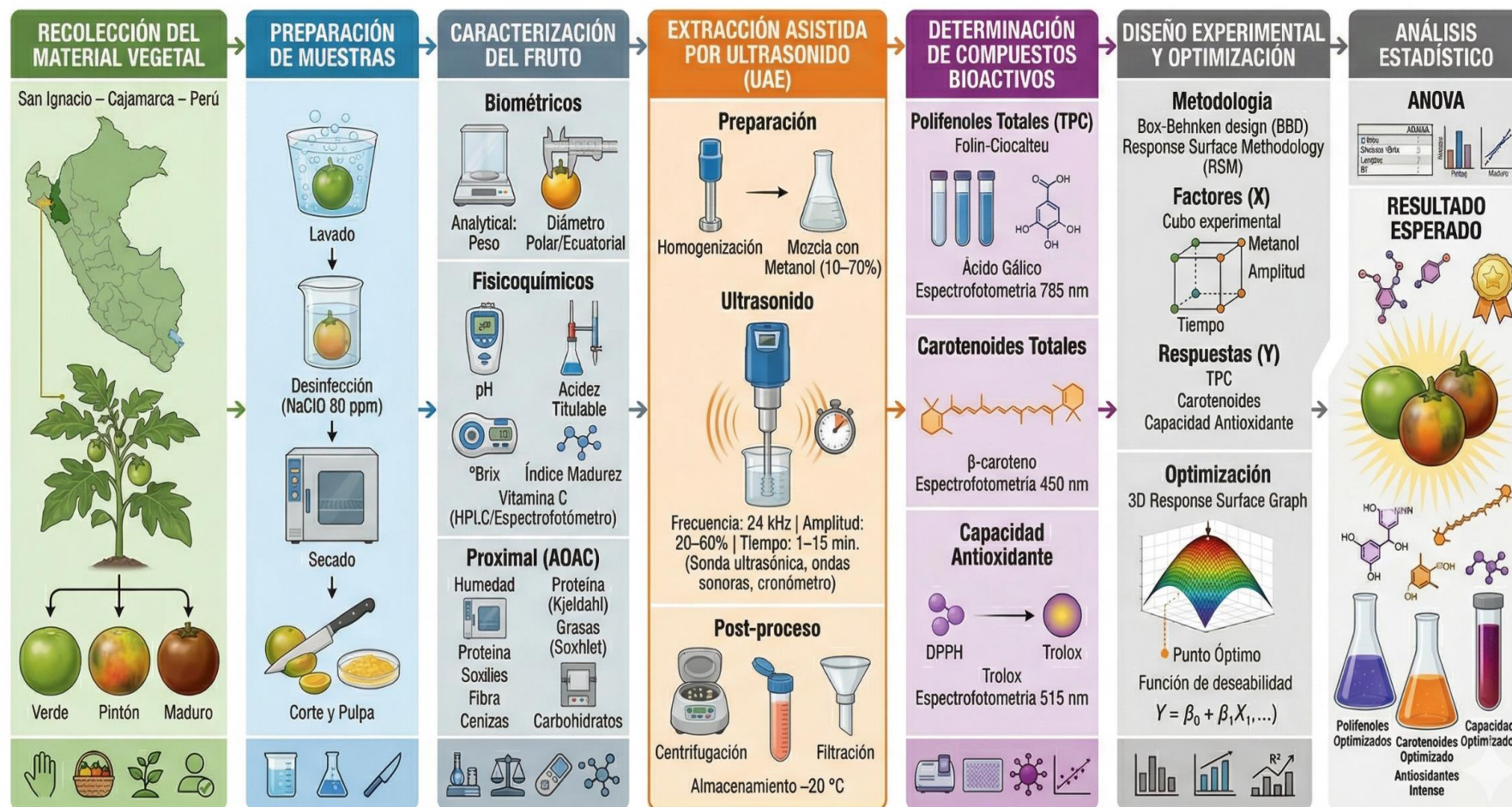
$$y = \beta_0 + \beta_A A + \beta_B B + \beta_C C + \beta_{AA} A^2 + \beta_{BB} B^2 + \beta_{CC} C^2 + \beta_{AB} AB + \beta_{AC} AC + \beta_{BC} BC \quad (9)$$

donde y es la respuesta predicha; A, B y C corresponden a la concentración de metanol, la amplitud ultrasónica y el tiempo de extracción, respectivamente. β_0 es el intercepto, y los términos β representan los coeficientes lineales, cuadráticos e interaccionales. La adecuación del modelo se evaluó mediante el coeficiente de determinación (R^2), considerándose valores aceptables de $R^2 \geq 0.75$ para describir adecuadamente la variabilidad de las respuestas.

Las condiciones óptimas se determinaron mediante la función de deseabilidad de Derringer–Suich, maximizando simultáneamente el contenido de polifenoles totales (CPT) y el contenido de carotenoides totales (CCT).

Figura 3

*Flujo metodológico del diseño experimental para la optimización de la extracción asistida por ultrasonido de compuestos bioactivos y la evaluación de la capacidad antioxidante en frutos de *Solanum pachyandrum**



Nota. Representación del flujo experimental desde la recolección del material vegetal hasta la optimización estadística mediante MSR (Box–Behnken). La imagen fue generada con apoyo de inteligencia artificial bajo dirección de la autora y se basa exclusivamente en el diseño metodológico original del estudio.

III. RESULTADOS

3.1. Análisis biométrico de frutos *S. pachyandrum*

Los frutos de *S. pachyandrum* recolectados en tres estados de madurez mostraron diferencias significativas ($p < 0.05$) en algunos parámetros biométricos evaluados (Tabla 6) aunque de baja magnitud biológica. El diámetro polar fue de 6.47 ± 0.26 (verde) a 6.40 ± 0.42 cm (maduro) ($p = 0.0204$). El diámetro ecuatorial se mantuvo sin cambios significativos ($p = 0.0547$) entre estados de madurez. El peso fresco tuvo un aumento del estado verde al pintón y posteriormente un descenso en el estado maduro.

Tabla 6

*Características biométricas del fruto *S. pachyandrum* en tres estados de madurez*

	Verde	Pintón	Maduro	CV
Características biométricas				
Diámetro polar	6.47 ± 0.26^{ab}	6.60 ± 1.00^a	6.40 ± 0.42^b	5.47
Diámetro ecuatorial	6.22 ± 0.32^a	6.39 ± 0.43^a	6.23 ± 0.40^a	6.17
Peso	126.44 ± 12.61^a	131.61 ± 29.07^a	108.90 ± 22.76^b	16.25

Nota. Comparación de medias mediante Tukey (0.05). CV: Coeficiente de variación. Los valores representan la media ($n=50$) $\pm$ SD.

3.2. Análisis fisicoquímico y proximal de frutos *S. pachyandrum*

3.2.1. Análisis fisicoquímicos

Según los resultados, los SST aumentan progresivamente desde 7.17 ± 0.29 °Brix (verde) hasta 11.00 ± 0.00 °Brix (maduro) ($p < 0.0001$) (Tabla 7). Paralelamente, el pH disminuye de 5.52 ± 0.02 (verde) a 4.24 ± 0.02 (maduro) ($p < 0.0001$), mientras que la acidez titulable incrementa de $0.35 \pm 0.03\%$ (verde) a $1.43 \pm 0.01\%$ de ácido cítrico equivalente (maduro) ($p < 0.0001$).

El índice de madurez (SST/acidez) disminuye drásticamente desde 20.84 ± 1.72 (verde) a 7.70 ± 0.04 (maduro) ($p < 0.0001$) (Tabla 7). La vitamina C exhibió un máximo intermedio de 35.21 ± 0.01 mg/100 g de peso fresco en estado pintón (Anexo 13), superior a verde (25.37 ± 0.01 mg/100 g) (Anexo 14) y maduro (24.01 ± 0.01 mg/100 g) (Anexo 15).

Tabla 7*Características fisicoquímicas del fruto *S. pachyandrum**

	Verde	Pintón	Maduro	CV
Características fisicoquímicas				
Vitamina C (mg/100 g PF)	25.37 ± 0.01 ^b	35.21 ± 0.01 ^a	24.01 ± 0.01 ^c	0.03
SST (°Brix)	7.17 ± 0.29 ^c	8.30 ± 0.17 ^b	11.00 ± 0.00 ^a	2.20
pH	5.52 ± 0.02 ^a	4.40 ± 0.03 ^b	4.24 ± 0.02 ^c	0.52
Acidez titulable (% ácido cítrico)	0.35 ± 0.03 ^c	1.08 ± 0.03 ^b	1.43 ± 0.01 ^a	2.94
Índice de madurez	20.84 ± 1.72 ^a	7.72 ± 0.09 ^b	7.70 ± 0.04 ^b	8.22

Nota. Comparación de medias mediante Tukey (0.05). CV: Coeficiente de variación. Valores representan la media (n=3) ± SD. SST: Sólidos solubles totales.

3.2.2. Análisis proximal de frutos maduros de *Solanum pachyandrum*

La tabla 8 resume la composición proximal de los frutos de *S. pachyandrum* en estado maduro. El contenido de humedad de la pulpa de los frutos encontrado en la presente investigación fue de 81.6%, y la concentración de cenizas de pulpa fue de 1.28%. Además, el análisis proximal de la pulpa de *S. pachyandrum* reveló un nivel bajo de grasa (0.17%) y un mayor contenido de fibra cruda (5.60%); presentó un contenido total de carbohidratos de 8.84% y de proteína de 2.5% (Anexo 16).

Tabla 8*Características proximales de frutos maduros de *S. pachyandrum* (%)*

Humedad	Cenizas	Grasas	Fibra cruda	Proteína cruda	Carbohidratos
81.60 ± 0.68	1.28 ± 0.22	0.17 ± 0.01	5.60 ± 0.02	2.51 ± 0.02	8.84 ± 0.79

Nota. Valores representan la media (n=3) ± desviación estándar.

3.3. Cuantificación de compuestos bioactivos y capacidad antioxidante de frutos de *Solanum pachyandrum*

La extracción de los compuestos fenólicos totales, carotenoides totales y capacidad antioxidante sobre la base del diseño Box-Behnken se presenta en la Tabla 9. El efecto del nivel de concentración de metanol, amplitud de ultrasonido y tiempo de sonicación ocasionó la liberación de compuestos fenólicos totales de 78.194 y 99.049 mg EAG/100 g en peso fresco (pf), contenido de carotenoides totales en un intervalo de 63.267 y

267.267 mg β -CE/100 g pf, y la capacidad antioxidante medida por DPPH se presentó en un intervalo de 88.44 y 316.55 μ mol Trolox/100 g pf.

Tabla 9

Matriz experimental del diseño Box-Behnken y respuestas

Variables independientes			Variables respuesta		
X ₁	X ₂	X ₃	CPT	CCT	CA
10 (-1)	20 (-1)	8 (0)	94.468 $\pm$ 0.72	183.266 $\pm$ 3.21	109.96 $\pm$ 22.77
10 (-1)	40 (0)	1 (-1)	85.218 $\pm$ 1.11	209.600 $\pm$ 6.93	128.23 $\pm$ 29.91
10 (-1)	40 (0)	15 (+1)	99.049 $\pm$ 0.53	160.600 $\pm$ 4.00	217.56 $\pm$ 11.39
10 (-1)	60 (+1)	8 (0)	89.625 $\pm$ 0.46	267.266 $\pm$ 5.69	88.44 $\pm$ 46.55
40 (0)	20 (-1)	1 (-1)	80.026 $\pm$ 0.79	63.266 $\pm$ 8.33	208.95 $\pm$ 28.22
40 (0)	20 (-1)	15 (+1)	88.578 $\pm$ 0.87	78.933 $\pm$ 10.12	264.90 $\pm$ 8.61
40 (0)	40 (0)	8 (0)	84.346 $\pm$ 0.35	63.600 $\pm$ 5.20	190.30 $\pm$ 23.70
40 (0)	40 (0)	8 (0)	82.644 $\pm$ 1.33	70.933 $\pm$ 0.58	171.66 $\pm$ 30.24
40 (0)	40 (0)	8 (0)	88.490 $\pm$ 2.30	64.933 $\pm$ 2.31	221.87 $\pm$ 0.00
40 (0)	60 (+1)	1 (-1)	87.443 $\pm$ 0.72	76.600 $\pm$ 8.89	177.73 $\pm$ 26.74
40 (0)	60 (+1)	15 (+1)	92.373 $\pm$ 0.62	161.266 $\pm$ 4.73	290.73 $\pm$ 32.49
70 (+1)	20 (-1)	8 (0)	78.194 $\pm$ 1.26	67.600 $\pm$ 5.20	200.080 $\pm$ 25.42
70 (+1)	40 (0)	1 (-1)	80.855 $\pm$ 0.15	69.933 $\pm$ 1.53	163.04 $\pm$ 41.36
70 (+1)	40 (0)	15 (+1)	91.457 $\pm$ 0.15	75.266 $\pm$ 2.52	207.12 $\pm$ 13.41
70 (+1)	60 (+1)	8 (0)	92.504 $\pm$ 1.05	86.933 $\pm$ 3.51	316.55 $\pm$ 19.72

Nota. X1: concentración de metanol (%); X2: amplitud ultrasónica (%); X3: tiempo de sonicación (min); CPT: Contenido polifenólico total (*mg EAG/100 g pf*); CCT: Contenido de carotenoides totales (*mg β -CE/100 g pf*); CA: Capacidad antioxidante (*μ mol Trolox/100 g pf*). Los resultados se presentan como media $\pm$ DE (n = 3).

3.4. Optimización de parámetros de extracción mediante un diseño Box–Behnken por Metodología de Superficie de Respuesta (MSR)

3.4.1. Ajuste del modelo matemático

Para cada variable de respuesta se ajustó un modelo cuadrático en variables codificadas A: concentración de metanol (%), B: amplitud ultrasónica (%), C: tiempo de sonicación (min), mediante mínimos cuadrados. Las ecuaciones (10)–(12), muestran las expresiones finales para CPT, CCT y CA, respectivamente.

$$\text{CPT} = 97.7848 - 0.642005A - 0.288052B + 0.698861C + 0.00309866A^2 + 0.0018724B^2 + 0.0244107C^2 + 0.00798097AB + 0.00384325AC - 0.00646607BC \quad (10)$$

$$\text{CCT} = 323.805 - 6.88212A - 3.75863B - 7.5017C + 0.0658951A^2 + 0.0636806B^2 + 0.0623583C^2 - 0.0269444AB + 0.0646825AC + 0.123214BC \quad (11)$$

$$\text{CA} = 246.309 + 3.19129A - 7.85728B - 6.75565C - 0.045408A^2 + 0.062542B^2 + 0.515226C^2 + 0.0574971AB - 0.0538802AC + 0.168258BC \quad (12)$$

3.4.2. Análisis de varianza (ANOVA)

Los datos experimentales obtenidos para el contenido total de fenoles (CTF), el contenido de carotenoides (CCT) y la capacidad antioxidante (CA) se ajustaron a modelos polinómicos de segundo orden utilizando la metodología de superficie de respuesta, lo que permitió la evaluación simultánea de los efectos lineales, cuadráticos y de interacción de las variables independientes.

Para CPT, el modelo cuadrático ajustado fue altamente significativo ($F = 39,85$, $p < 0,001$) y explicó el 91,1% de la variabilidad experimental total ($R^2 = 0,911$; $R^2_{\text{adj}} = 0,888$). El análisis de los términos individuales mostró que los efectos lineales de la concentración de metanol, la amplitud ultrasónica y el tiempo de sonicación afectaron significativamente la extracción fenólica ($p < 0,001$), además de algunos términos cuadráticos e interacciones. A pesar de la alta capacidad explicativa del modelo, la prueba de falta de ajuste fue significativa ($p = 0,002$) (Anexo 17).

Para el contenido de carotenoides totales (CCT), el modelo alcanzó $R^2 = 0.941$ y $R^2_{\text{aj}} = 0.925$, indicando ajuste robusto y alta capacidad predictiva. Los términos significativos incluyeron efectos lineales de metanol ($p < 0.001$), amplitud ($p < 0.05$) y curvatura A^2 ($p < 0.01$), coherentes con la forma de U de las superficies de respuesta. Todos los términos de interacción de dos factores (AB, AC y BC) contribuyeron significativamente al modelo ($p < 0.05$), lo que sugiere interacciones sinérgicas entre las variables de extracción. Sin embargo, también se detectó una falta de ajuste muy significativa ($p < 0,001$), lo que indica desviaciones residuales entre los valores predichos y observados a pesar del alto ajuste del modelo (Anexo 18).

En contraste, el modelo ajustado para CA mostró un rendimiento predictivo menor, aunque la regresión general se mantuvo estadísticamente significativa ($F = 9,45$, $p < 0,001$). El modelo explicó el 70,9% de la variabilidad total de la respuesta ($R^2 = 0,709$; $R^2_{\text{adj}} = 0,634$). La prueba de falta de ajuste fue altamente significativa ($F = 17,78$, $p <$

0,001), lo que confirma que la fiabilidad predictiva del modelo CA es limitada (Anexo 19).

3.4.3. Análisis de la superficie de respuesta

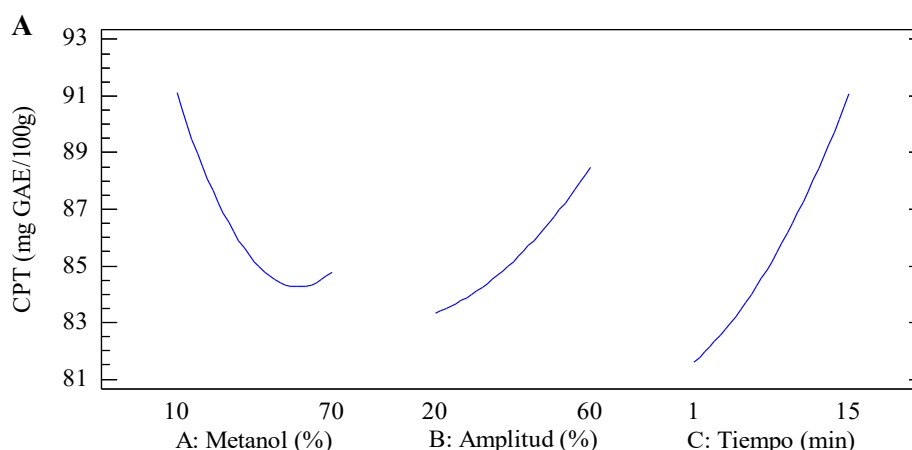
Las superficies de respuesta y los diagramas de contorno se generaron para visualizar el efecto combinado de las variables del proceso sobre la extracción de compuestos bioactivos.

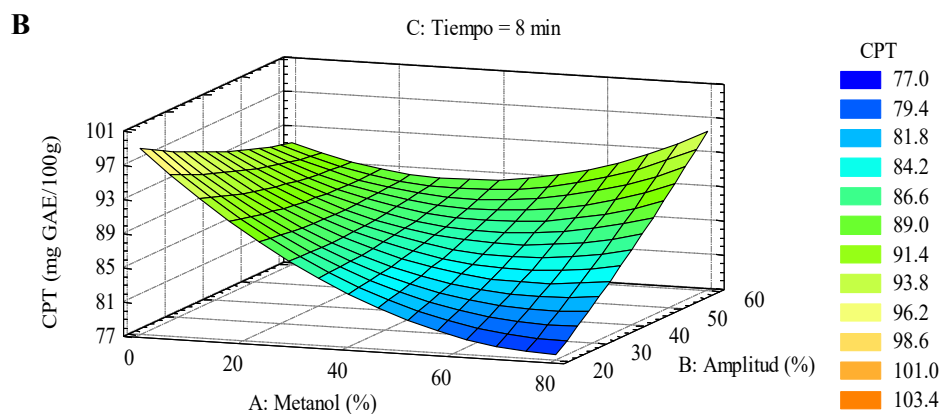
Efecto de las variables de proceso sobre los compuestos polifenólicos totales

El efecto de la concentración de metanol, amplitud ultrasónica y tiempo de sonicación para la extracción de CPT fue altamente significativo, presentando $p < 0.05$, como se muestra en el Anexo 16. En la Figura 4, en los gráficos a y b se muestra que el CPT disminuye inicialmente con el metanol (A) hasta cerca del 40-50% y luego vuelve a subir, sugiriendo que los extremos (concentraciones bajas o muy altas) favorecen su solubilidad. Tanto el aumento de la amplitud (B) como el tiempo (C) de extracción tienen un efecto positivo lineal y marcado sobre la recuperación de fenoles. La superficie de respuesta muestra que los valores de extracción más altos (>99 mg GAE/100 g) se logran con amplitudes altas (60%) combinadas con concentraciones de metanol en los extremos del rango evaluado.

Figura 4

Gráficos de efectos principales y superficies de respuesta del diseño Box-Behnken para polifenoles totales.





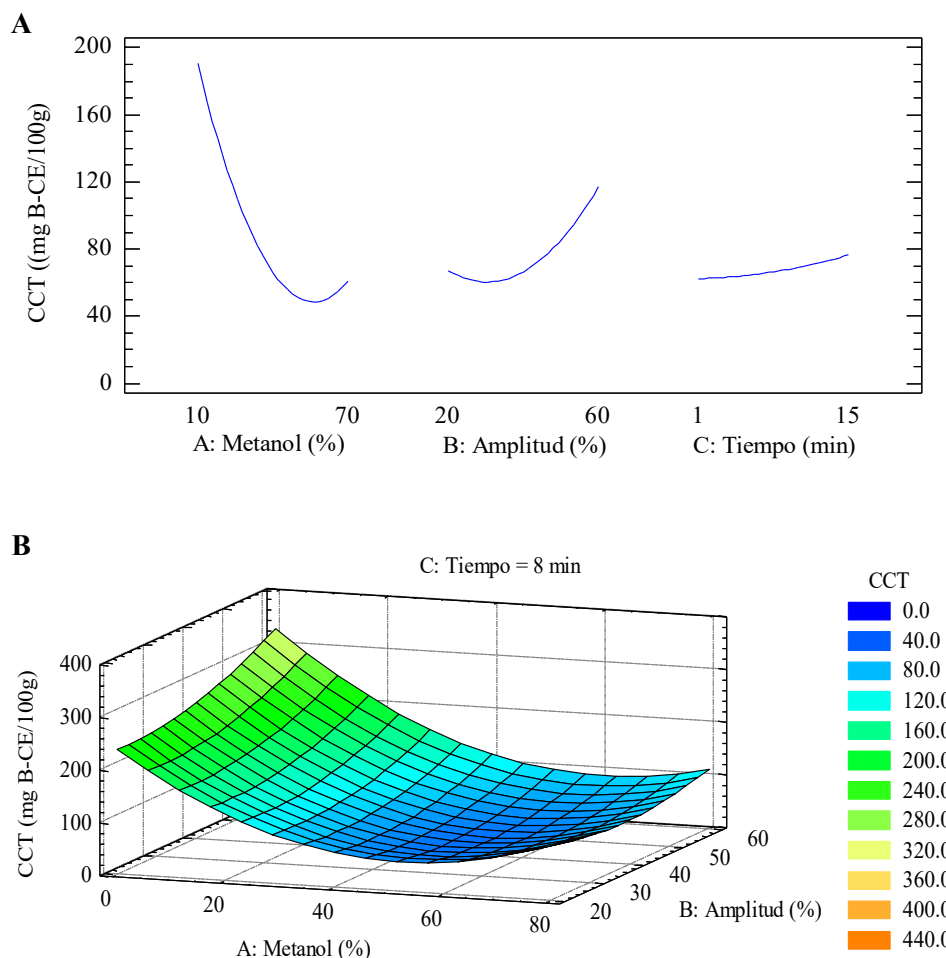
Nota. Perfiles de efectos principales (a) y superficies de respuesta (b) del diseño RSM para CPT (mg GAE/100 g) durante la extracción asistida por ultrasonido. Las curvas muestran la respuesta predicha frente a A: metanol (%), B: amplitud (%) y C: tiempo (min), manteniendo los demás factores en su nivel central; en las superficies, C = 8 min. Modelos cuadráticos en variables codificadas.

Efecto de las variables de proceso sobre el contenido de carotenoides totales

El efecto de la interacción entre la concentración de metanol y la amplitud ultrasónica fue significativo ($p < 0.05$) (Anexo 17). En la figura 5 (gráficos a y b), el contenido de carotenoides equivalentes a β -caroteno muestra una curva en forma de “U” respecto al metanol (A), indicando que una mezcla intermedia no es eficiente para este compuesto lipofílico. La amplitud (B) tiene un efecto parabólico, mientras que el tiempo (C) muestra una influencia positiva muy leve, casi constante. El rendimiento máximo (≈ 273.6 mg B-CE/100 g) se observa claramente cuando la concentración de metanol es mínima (10%).

Figura 5

Gráficos de efectos principales y superficies de respuesta del diseño Box Behnken para el contenido de carotenoides totales



Nota. Perfiles de efectos principales (a) y superficies de respuesta (b) del diseño RSM para el contenido de carotenoides totales (β -CE mg/100 g) durante la extracción asistida por ultrasonido. Las curvas muestran la respuesta predicha frente a A: metanol (%), B: amplitud (%) y C: tiempo (min), manteniendo los demás factores en su nivel central; en las superficies, C = 8 min. Modelos cuadráticos en variables codificadas.

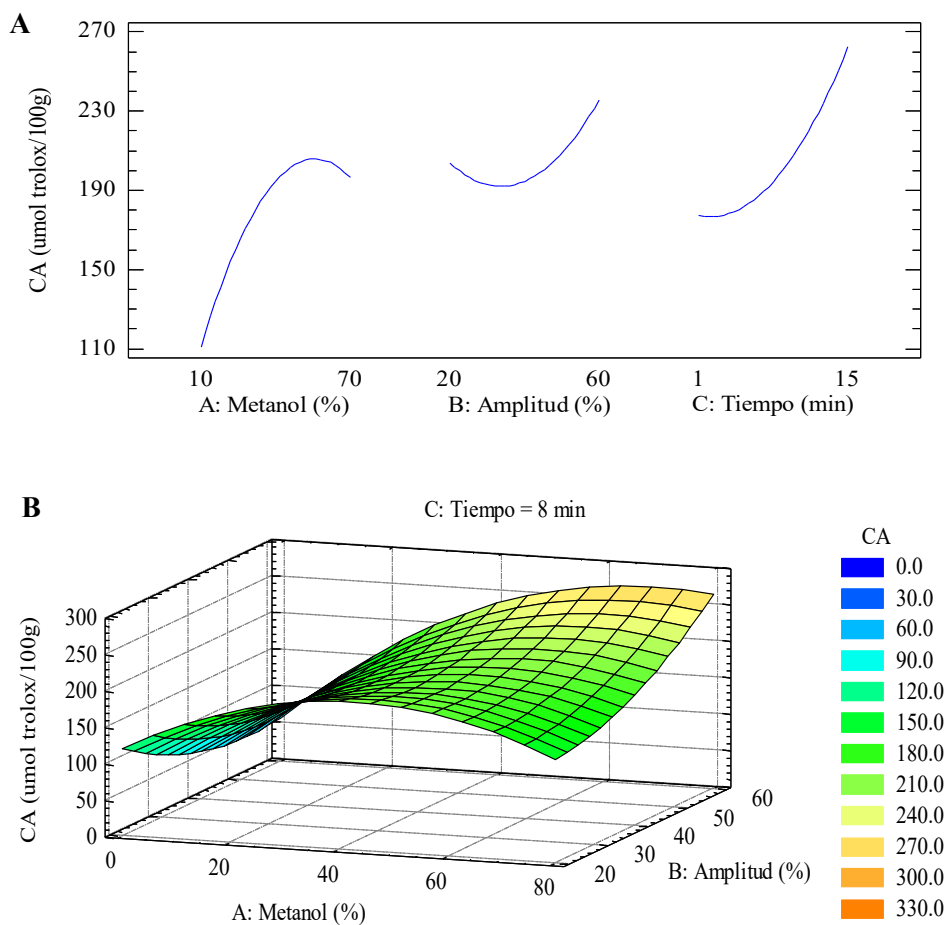
Efecto de las variables sobre la capacidad antioxidante

El efecto de las variables independientes sobre la capacidad antioxidante presentó una capacidad predictiva moderada ($R^2 = 0.709$) y una falta de ajuste significativa, por lo que el efecto de las variables de extracción sobre esta respuesta fue menos consistente que para CPT y CCT (Anexo 18). En la figura 6 (gráficos a y b), la capacidad antioxidante aumenta drásticamente con la concentración de metanol hasta un punto óptimo (≈ 40 -50%) y luego decae. El tiempo (C) es crítico aquí; se observa una pendiente ascendente pronunciada, lo que indica que a mayor exposición al ultrasonido (hasta 15

min), mayor es la capacidad antioxidante del extracto. Las amplitudes intermedias son menos favorables, mientras que las amplitudes bajas o altas producen mayores valores de CA.

Figura 6

Gráficos de efectos principales y superficies de respuesta del diseño Box-Behnken para capacidad antioxidante



Nota. Perfiles de efectos principales (a) y superficies de respuesta (b) del diseño RSM para capacidad antioxidante ($\mu\text{mol TE}/100\text{ g}$) durante la extracción asistida por ultrasonido. Las curvas muestran la respuesta predicha frente a A: metanol (%), B: amplitud (%) y C: tiempo (min), manteniendo los demás factores en su nivel central; en las superficies, C = 8 min. Modelos cuadráticos en variables codificadas.

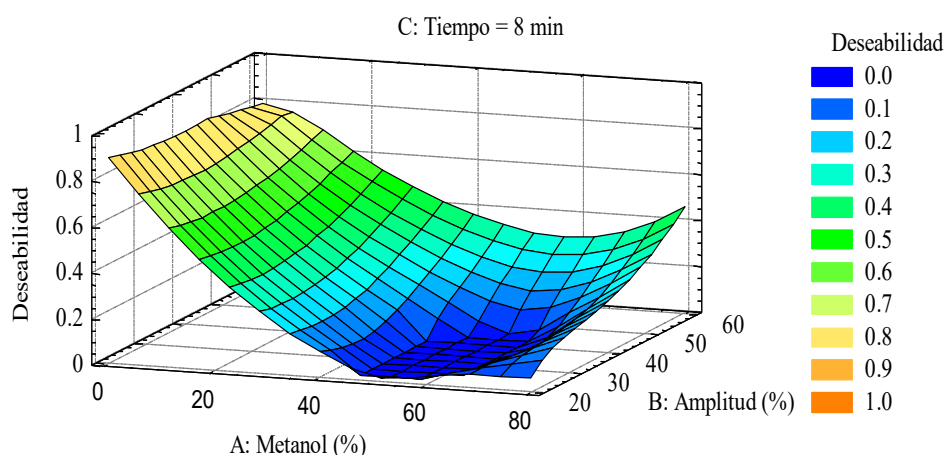
3.4.4. Optimización de las condiciones de extracción

Con base en el modelo desarrollado, se optimizaron simultáneamente las variables contenido de polifenoles totales y contenido de carotenoides totales para maximizar la

extracción. La CA no se incluyó en el proceso de optimización debido a su limitada capacidad predictiva, evidenciada por el bajo R^2 y la falta de ajuste significativo.

El óptimo global se alcanzó con Metanol = 10.0%, Amplitud = 60% y Tiempo = 15 min, con un índice de deseabilidad de 0.90 (Figura 7). En estas condiciones, las predicciones puntuales fueron: CPT = 95.50 mg GAE/100 g (IC95%: 92.83–98.17; deseabilidad parcial = 0.818), CCT = 271.2 mg/100 B-CE/100 g (IC95%: 247.0–295.5; deseabilidad $\approx$ 0.989) (Anexo 20).

Figura 7. Superficie de deseabilidad compuesta (RSM)



Nota. Superficie de deseabilidad compuesta (RSM) para la optimización multirrespuesta de CPT y CCT en la extracción asistida por ultrasonido, con C = 15 min. Ejes: A = concentración de metanol (%), B = amplitud ultrasónica (%). La escala indica la deseabilidad global (0–1).

La superficie de deseabilidad revela una marcada relación no lineal entre la concentración de metanol y la amplitud ultrasónica (Figura 7). Los valores de deseabilidad global más altos ($D > 0.80$) se lograron a bajas concentraciones de metanol (0–15%) combinadas con amplitudes ultrasónicas bajas a moderadas (10–30%), lo que indica una extracción simultánea favorable de compuestos fenólicos y carotenoides. Por el contrario, las concentraciones de metanol intermedias a altas (50–75%) junto con amplitudes moderadas dieron como resultado los valores de deseabilidad más bajos ($D < 0.20$), lo que sugiere condiciones de extracción subóptimas.

3.4.5. Validación experimental

La validación experimental bajo condiciones óptimas (10 % metanol, 60 % amplitud, 15 min; D-global = 0.90) mostró buena concordancia para CPT (CV = 3.98 %) y CCT (CV = 0.54 %) (Tabla 10). El bajo coeficiente de variación (CV) para CPT y CCT, confirma la robustez del modelo.

Tabla 10

Validación del modelo con condiciones óptimas sobre el contenido de CPT y CCT

Variable respuesta	Objetivo	Valor predicho	Valor Experimental	% CV
CPT (mg GAE/100 g pf)	Máximo	95.5	90.27	3.98%
CCT (mg β -CE/100 g pf)	Máximo	271.2	269.13	0.54%

Nota. CV: Coeficiente de variación; CPT: Contenido fenólico total; TC: Contenido de carotenoides total.

IV. DISCUSIÓN

4.1. Análisis biométrico de frutos *S. pachyandrum*

Las variables biométricas mostraron cambios limitados entre los estados de madurez. El diámetro polar y el peso fresco aumentaron hasta el estado pintón (131.61 g), seguidos de una reducción en la madurez plena (108.90 g), comportamiento atribuible a procesos de deshidratación y utilización de reservas metabólicas, en concordancia con lo reportado para *Solanum quitoense* por Andrade-Cuvi et al. (2016).

La disminución de la masa fresca en frutos maduros podría estar relacionada con una mayor concentración relativa de metabolitos secundarios, como ha sido descrito para especies del género *Solanum*, donde la madurez plena se asocia con mayores contenidos de polifenoles, flavonoides y capacidad antioxidante (Hu et al., 2023; Staveckienė et al., 2023)

Las variaciones biométricas observadas constituyen un criterio relevante para la selección de materia prima. Estudios en otros géneros han demostrado que la eficiencia de la extracción asistida por ultrasonido depende de las propiedades físicas del material vegetal (Ahmed et al., 2022; Silva et al., 2021). En este contexto, la estabilidad del diámetro ecuatorial frente a la variabilidad del peso sugiere modificaciones estructurales internas que podrían facilitar la liberación de compuestos de interés.

De acuerdo con lo señalado por Weremfo et al., (2022), el uso de ultrasonido podría favorecer la recuperación de antioxidantes fenólicos y pigmentos, especialmente en frutos maduros, potencialmente más susceptibles a disrupción celular. En conjunto, estos resultados confirman que el estado de madurez es un factor determinante para la valorización de *S. pachyandrum* como fuente de fitonutrientes, en línea con lo propuesto por Dumitraşcu et al. (2019).

4.2. Análisis fisicoquímico y proximales de frutos *S. pachyandrum*

La evolución de los parámetros fisicoquímicos de *S. pachyandrum* durante la maduración refleja cambios metabólicos asociados al desarrollo del fruto y de interés tecnológico. Los sólidos solubles totales (SST) aumentaron progresivamente, alcanzando 11.00 °Brix en el estado maduro, en concordancia con lo reportado para *Solanum quitoense*, donde la acumulación de azúcares se asocia al estado de madurez de consumo (Andrade-Cuvi

et al., 2016), así también, el aumento progresivo de los SST se asociaría a la hidrólisis de almidón a azúcares solubles durante la maduración (Chervin, 2020).

En contraste con otras especies del género *Solanum*, *S. pachyandrum* presentó un incremento sostenido de la acidez titulable durante la maduración (0.35 % a 1.43 %), acompañado por una disminución del pH. Este comportamiento difiere del observado por (Andrade-Cuvi et al., 2016) en *S. quitoense*, donde la acidez disminuyó progresivamente. Como consecuencia, el índice de madurez se redujo significativamente de 20.84 a 7.70, patrón inverso al descrito para frutos climatéricos convencionales.

Una acidez elevada en estados avanzados de madurez también ha sido reportada en frutos como el “quito quito” (Obregón & Lozano, 2021), así como en frutos silvestres como *Terminalia ferdinandiana*, donde el aumento simultáneo de SST y acidez, junto con la disminución del pH, caracteriza el proceso de maduración (Phan et al., 2022). Este tipo de dinámica fisicoquímica ha sido asociada con frutos de sabor intenso (Ramos et al., 2021) y con especies silvestres expuestas a condiciones ambientales variables, que favorecen la síntesis de metabolitos secundarios (Belayneh et al., 2024; Botella et al., 2024; Navarro et al., 2018; Vignesh et al., 2024).

El mayor contenido de vitamina C se registró en el estado pintón (35.21 mg/100 g), seguido de una disminución en el estado maduro, lo que sugiere una degradación asociada a procesos oxidativos en etapas avanzadas de maduración (Alós et al., 2021), en concordancia con lo descrito para *S. quitoense* por (Andrade et al., 2021).

La combinación de pH bajo, elevada acidez y contenidos apreciables de vitamina C configura a *S. pachyandrum* como una matriz potencialmente favorable para la extracción de compuestos fenólicos. Estudios previos han demostrado que matrices ácidas favorecen la estabilidad de polifenoles durante la extracción asistida por ultrasonido (Ahmed et al., 2022; Silva et al., 2021), y que el estado fisicoquímico inicial del fruto condiciona la eficiencia de recuperación de antioxidantes (Dumitraşcu et al., 2019; Weremfo et al., 2022), aspecto clave para su eventual valorización industrial como ingrediente funcional.

La caracterización proximal de los frutos maduros de *S. pachyandrum* evidencia un perfil nutricional dominado por un elevado contenido de humedad (81.60 %) y una fracción relevante de carbohidratos (8.84 %). Este comportamiento es consistente con especies de la familia Solanaceae, como *Solanum quitoense* y *Solanum sessiliflorum* Dunal, caracterizadas por altos contenidos de agua y azúcares solubles, los cuales influyen tanto

en la percepción de frescura como en su aptitud para el procesamiento agroindustrial (Añibarro et al., 2025; Sereno et al., 2018).

El contenido de fibra cruda (5.60%) resulta destacable para un fruto de estas características y podría estar relacionado con la estructura de la pared celular, en concordancia con los cambios biométricos observados durante la maduración, el valor obtenido se aproxima al rango de *S. quitoense* pulpa (4.5 g/100 g) (Añibarro et al., 2025), *S. Sessiliflorum* ecotipos CD1 y SRN9 (5.03- 4.76%) (Vargas et al., 2021). Asimismo, los valores de proteína cruda (2.51 %) son superiores a *S. quitoense* pulpa (1.22%) (Añibarro et al., 2025). El contenido de cenizas (1.28 %) indica una contribución apreciable de nitrógeno y minerales, superando los niveles comúnmente reportados para otras frutas tropicales como *S. quitoense* (Añibarro et al., 2025).

Esta composición proximal puede influir en la eficiencia de los procesos de extracción. Stanek-Wandzel et al. 2025 y Kabawa et al. (2026) señalaron que matrices ricas en fibra y azúcares requieren una disrupción celular eficiente para mejorar la recuperación de compuestos fenólicos y pigmentos, particularmente cuando se emplean tecnologías como el ultrasonido combinado con enzimas. De manera complementaria, Weremfo et al. (2022) destacan que parámetros como la relación solvente-sólido y la temperatura condicionan la difusión del solvente en matrices del género *Solanum*, proceso en el cual la composición proximal desempeña un rol determinante.

El bajo contenido de grasas (0.17 %), junto con un aporte moderado de carbohidratos, posiciona a *S. pachyandrum* como una matriz adecuada para la obtención de extractos ricos en antioxidantes. Estudios previos han demostrado que la eficiencia de la extracción de compuestos fenólicos mediante metodologías optimizadas, como RSM, depende de la interacción entre los parámetros del proceso y la composición química del fruto (Ahmed et al., 2022; Kobus et al., 2025; Silva et al., 2021). En este contexto, el uso de solventes hidroalcohólicos, como mezclas metanol/agua, ha sido propuesto para minimizar interferencias lipídicas y favorecer la recuperación de fitonutrientes de interés (Méndez et al., 2014)

4.3. Cuantificación de compuestos bioactivos y capacidad antioxidante de frutos de *Solanum pachyandrum*

La extracción asistida por ultrasonido (EAU) de *S. pachyandrum* mediante Metodología de Superficie de Respuesta (RSM) evidenció que la recuperación de compuestos

bioactivos está fuertemente condicionada por la interacción entre la concentración del solvente, la amplitud ultrasónica y el tiempo de extracción, más que por efectos individuales aislados, comportamiento característico de matrices vegetales complejas.

En el caso del contenido fenólico total (CPT), las superficies de respuesta mostraron que amplitudes elevadas y tiempos prolongados favorecen valores superiores a 99 mg GAE/100 g, especialmente en concentraciones bajas de metanol. Esta tendencia coincide con lo reportado por Silva et al. (2021) en cáscaras de *Spondias purpurea*, quienes atribuyen el incremento del CPT a la intensificación de la cavitación acústica y a una mayor disrupción de la pared celular. Asimismo, la respuesta no lineal frente a la concentración de metanol sugiere una selectividad diferencial de polifenoles según su polaridad, fenómeno previamente descrito por Méndez et al., (2014) en matrices frutales.

Para el contenido de carotenoides totales, los mayores rendimientos (≈ 273.6 mg B-CE/100 g pf) se obtuvieron a bajas concentraciones de metanol, confirmando la sensibilidad de los carotenoides al sistema solvente. Este comportamiento puede estar asociado con la mejor penetración de los sistemas de alcohol acuoso en los tejidos vegetales con alta humedad, lo que mejora la transferencia de masa y la solubilización de pigmentos durante la extracción asistida por ultrasonido. Se ha reportado casos similares como la pitahaya (*Opuntia stricta* var. *Dillenii*), el tiempo más eficiente de extracción de compuestos utilizando una amplitud del 50% y una baja concentración de etanol (15%) debido a la naturaleza hidrofílica de sus betalainas (Gómez-López et al., 2021).

En cuanto a la capacidad antioxidante, las máximas respuestas se alcanzaron con concentraciones de metanol intermedias/altas, amplitudes elevadas y un tiempo de extracción de 8 min. Sin embargo, debido a la limitada capacidad predictiva del modelo ($R^2 = 0.709$ y falta de ajuste significativa), estas tendencias deben interpretarse con cautela. Los resultados concuerdan con Ahmed et al., (2022), quienes destacan la necesidad de un ajuste fino del sistema solvente-energía para maximizar la liberación de compuestos con actividad sinérgica. De manera complementaria, Weremfo et al. (2022) demostraron en *Solanum torvum* que el tiempo de sonicación es un factor determinante para maximizar la recuperación de antioxidantes fenólicos mediante ultrasonido, superando métodos convencionales cuando se controlan adecuadamente las condiciones de operación.

4.4. Optimización de parámetros de extracción mediante un diseño Box–Behnken por Metodología de Superficie de Respuesta (MSR)

4.4.1. Efecto de las variables de proceso sobre los compuestos fenólicos totales

El CPT varió entre 78.19 y 99.05 mg GAE/100 g pf, alcanzando su máximo con 10% de metanol, 40% de amplitud y 15 min (Tabla 11). El análisis ANOVA confirmó la significancia del modelo cuadrático ($p < 0.05$; $R^2 = 92.9\%$). La falta de ajuste fue significativa para el modelo CPT; se sugiere que podría estar asociada con el bajo error puro obtenido a partir de réplicas de punto central altamente reproducibles (Passerine & Breitzkreitz, 2024), así también por factores como heterogeneidad de la muestra vegetal y factores no incluidos en el diseño experimental (Chemat et al., 2017).

La concentración de metanol presentó un efecto lineal negativo, indicando que proporciones intermedias metanol–agua optimizan la polaridad del solvente y la solubilización de fenoles con distinto grado de hidroxilación, tal como ha sido descrito en matrices vegetales similares (Saini et al., 2025; Gómez-López et al., 2021). La amplitud ultrasónica mostró un efecto cuadrático significativo, con un máximo entre 50–60%, atribuible a la intensificación de la cavitación acústica y la ruptura celular; amplitudes superiores tendieron a reducir el CPT, puede estar asociado a procesos de degradación térmica y oxidativa (Sanjaya et al., 2022)

Asimismo, un mayor tiempo de exposición al ultrasonido permite una interacción más prolongada entre solvente y matriz vegetal, favoreciendo la difusión de los compuestos fenólicos hacia el medio de extracción. Dentro del rango evaluado (1–15 min), el incremento del tiempo favoreció la extracción, sin embargo, es preciso tener en cuenta que tiempos excesivos pueden generar una reducción progresiva del CPT, probablemente asociada a la saturación del solvente y a la degradación de compuestos fenólicos lábiles (Weremfo et al., 2022). La validación experimental mediante la función de deseabilidad de Derringer–Suich mostró errores inferiores al 10%, lo que confirma la robustez predictiva del modelo RSM para esta respuesta.

4.4.2. Efecto de las variables de proceso sobre el contenido de carotenoides totales

El modelo cuadrático ajustado para contenido de carotenoides totales (CCT) fue significativo ($p < 0.05$; $R^2 = 0.94$), explicando el 94% de la variabilidad experimental. Los valores oscilaron entre 63.267 y 267.267 mg β -CE/100 g pf, alcanzando el máximo con 10% de metanol, 60% de amplitud y 8 min.

La concentración de metanol presentó un efecto lineal negativo altamente significativo ($p < 0.001$), mientras que la amplitud ultrasónica cuadrática mostró un efecto positivo significativo ($p < 0.05$), favoreciendo la liberación de carotenoides en medios más acuosos. Este comportamiento se explica por la baja solubilidad de los carotenoides en solventes polares y por el aumento de la cavitación acústica en mezclas hidrometanólicas con baja fracción orgánica, lo que reduce la viscosidad y la tensión superficial y facilita la disrupción de cromoplastos (Sanjaya et al., 2022; Shen et al., 2023). Los carotenoides son compuestos predominantemente lipofílicos, y su extracción suele verse favorecida por disolventes no polares como el hexano (Saini & Keum, 2018). En este estudio, se utilizó metanol como disolvente de compromiso para permitir la extracción simultánea de CPT, CCT y CA. No obstante, este método de extracción puede comprometer la selectividad de los carotenoides al facilitar la recuperación simultánea de otros pigmentos o componentes de la matriz con absorbancia en la misma región espectral (450 nm). Por lo tanto, los valores totales de carotenoides obtenidos en este estudio deben interpretarse como concentraciones aparentes bajo las condiciones de extracción seleccionadas, en lugar de contenidos absolutos de carotenoides. Esta limitación metodológica también puede explicar parcialmente la variabilidad observada en el modelo predictivo. En consecuencia, futuros estudios deberían explorar sistemas de solventes más selectivos o estrategias de extracción secuencial para mejorar la especificidad analítica y la precisión de la cuantificación de carotenoides.

La elevada amplitud ultrasónica genera colapsos de microburbujas y fuerzas de cizallamiento que promueven la ruptura celular y la liberación de pigmentos compartimentalizados (Kumar et al., 2021).

El tiempo de sonicación incrementó el contenido de carotenoides hasta el punto de saturación; exposiciones prolongadas o temperaturas superiores a 50 °C pueden reducir el rendimiento debido a la isomerización y a la oxidación térmica de los carotenoides (Linares & Rojas, 2022; Ahmed et al., 2022a). La interacción amplitud $\times$ concentración de metanol resultó significativa ($p = 0.003$), lo que evidencia una máxima eficiencia extractiva a bajas concentraciones de metanol.

4.4.3. Efecto de las variables de proceso sobre la capacidad antioxidante

La CA refleja la contribución sinérgica de fenoles, carotenoides y otros metabolitos con mecanismos de transferencia de hidrógeno (HAT) y de electrones (ET) (Guija-Guerra & Guija-Poma, 2023; Mejía-Reyes et al., 2022). El ensayo DPPH mide la capacidad de

donar electrones y neutralizar radicales a 517 nm (Mejía-Reyes et al., 2022). Los compuestos fenólicos actúan mediante donación de hidrógeno desde grupos OH, mientras los carotenoides capturan oxígeno singlete y radicales peróxidos gracias a su sistema conjugado (Mejía-Reyes et al., 2021; Guija-Guerra & Guija-Poma, 2023).

El incremento de metanol, que reduce CPT pero eleva CA, sugiere que solventes con mayor fracción orgánica extraen compuestos menos polares con alta capacidad reductora específica (Nawaz et al., 2020). El efecto marginal de la amplitud indica que la energía acústica mejora la liberación, pero no necesariamente la capacidad antioxidante global; a medida que el tiempo aumenta de 1 a 15 minutos, la capacidad antioxidante se incrementa de forma sostenida y pronunciada.

4.4.4. Optimización de las condiciones de extracción y validación experimental

La optimización multiobjetivo mediante función de deseabilidad de Derringer-Suich identificó condiciones óptimas en metanol 10%, amplitud 60% y tiempo 15 min, con deseabilidad global $D = 0.90$. Las deseabilidades parciales fueron $d_1 = 0.81$ (CPT) y $d_2 \approx 0.98$ (CCT), indicando que CCT alcanza prácticamente su máximo teórico mientras CPT representa compromiso necesario en la optimización multicriterio.

La combinación de variables maximiza el CPT y el TC bajo un equilibrio favorable entre la polaridad del solvente y la intensidad de la cavitación acústica, lo cual es consistente con la naturaleza no lineal del proceso y la necesidad de optimizar las variables conjuntamente en la EAU (Sanjaya et al., 2022).

La validación experimental mostró coeficientes de variación de 3.98% para CPT y 0.58% para CCT, en ambos casos, los valores experimentales se situaron dentro del intervalo de confianza del 95 %, con coeficientes de variación inferiores al 10 %, lo indica que el modelo se ajustó bien para la extracción de compuestos bioactivos de los frutos de *S. pachyandrum* en condiciones óptimas de EAU, y que el modelo diseñado fue adecuado para predecir las condiciones óptimas de extracción.

La optimización multirrespuesta permitió identificar las condiciones operativas que maximizaron de forma consistente la extracción de compuestos fenólicos totales (CFT) y carotenoides totales (CCT). Sin embargo, la falta de un modelo predictivo estadísticamente robusto para la actividad antioxidante constituyó una limitación del presente estudio, impidiendo su inclusión en el procedimiento de optimización. Por consiguiente, la aplicabilidad de la optimización se restringió a las respuestas con un rendimiento predictivo adecuado. Futuros estudios deberían centrarse en mejorar el

modelado de la actividad antioxidante o explorar diseños experimentales alternativos capaces de capturar mejor su comportamiento de respuesta, lo que permitiría una mejora más fiable de esta propiedad funcional.

V. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1. Conclusiones

Los frutos de *Solanum pachyandrum* presentan diferencias biométricas claras entre los estados verde, pintón y maduro, lo que evidencia cambios estructurales asociados al proceso de maduración. Estas variaciones permiten diferenciar objetivamente los estados de desarrollo y constituyen un criterio relevante para la selección de la materia prima.

La caracterización fisicoquímica y proximal demostró que *S. pachyandrum* exhibe un perfil composicional definido durante la maduración, caracterizado por el aumento de sólidos solubles totales, la acidificación sostenida y la disminución del pH e índice de madurez. Los frutos maduros presentan alto contenido de humedad, bajo contenido de grasas y aportes relevantes de fibra, carbohidratos, proteínas y minerales, confirmando su aptitud como matriz vegetal para la extracción de compuestos bioactivos.

La extracción asistida por ultrasonido (EAU) permitió la obtención eficiente de compuestos fenólicos y carotenoides, demostrando que la recuperación de estos metabolitos depende de la interacción entre el porcentaje de metanol, la amplitud ultrasónica y el tiempo de extracción. Bajas concentraciones de metanol favorecieron la extracción de carotenoides, mientras que amplitudes altas y tiempos prolongados dentro del rango estudiado optimizaron la recuperación de compuestos fenólicos.

La determinación por espectrofotometría UV-vis confirmó la presencia de polifenoles totales, carotenoides y capacidad antioxidante en los extractos de *S. pachyandrum*, estableciendo que la actividad antioxidante responde a la contribución conjunta de distintos metabolitos bioactivos y no mantiene una relación lineal directa con el contenido fenólico total.

La optimización mediante un diseño Box–Behnken de Metodología de Superficie de Respuesta identificó condiciones óptimas de extracción en 10% de metanol, 60% de amplitud ultrasónica y 15 minutos, con una deseabilidad global adecuada. El modelo presentó una alta capacidad predictiva para fenoles totales y carotenoides totales, mientras que la mayor variabilidad observada en la capacidad antioxidante se atribuye a la complejidad química y a la heterogeneidad inherentes de los frutos silvestres de *Solanum pachyandrum*.

En función de los resultados obtenidos, se concluye que los frutos de *Solanum pachyandrum* constituyen una fuente viable de compuestos bioactivos de interés para aplicación en el desarrollo de ingredientes funcionales y nutraceuticos, y que la aplicación de la EAU, bajo condiciones optimizadas, representa una alternativa técnicamente válida y reproducible bajo las condiciones evaluadas para su valorización fitoquímica.

5.2. Recomendaciones

Se recomienda la optimización de otras variables ligadas al proceso de extracción de compuestos bioactivos, como relación materia/solvente, pH y temperatura, siendo esta última crucial, ya que la cavitación acústica y el tiempo de exposición incrementan considerablemente la temperatura, afectando a compuestos termosensibles.

Se sugiere a futuros investigadores y grupos de investigación en ciencias agroalimentarias ampliar el estudio de *Solanum pachyandrum* incorporando diferentes zonas geográficas y ciclos de cosecha, con la finalidad de evaluar la influencia de la variabilidad genética y edafoclimática sobre las características biométricas, fisicoquímicas y el contenido de compuestos bioactivos.

Para investigadores especializados en análisis fitoquímico, complementar la caracterización de los extractos mediante técnicas cromatográficas (HPLC o UHPLC), a fin de identificar y cuantificar compuestos fenólicos y carotenoides individuales y fortalecer la correlación con la capacidad antioxidante observada.

Se propone a investigadores que trabajan en evaluación antioxidante y modelado estadístico incorporar ensayos antioxidantes adicionales basados en distintos mecanismos de reacción (ABTS, FRAP, ORAC), así como herramientas quimiométricas multivariadas, para describir de manera más integral la naturaleza multicomponente de la actividad antioxidante.

Para investigadores y desarrolladores de procesos sostenibles, evaluar el uso de solventes alternativos de bajo impacto ambiental, como solventes verdes o sistemas eutécticos naturales, en la extracción asistida por ultrasonido, comparando su eficiencia con los sistemas hidrometanólicos empleados.

Para la industria alimentaria y desarrolladores de ingredientes funcionales, la evaluación de la estabilidad de los extractos obtenidos y su incorporación en matrices alimentarias modelo, con el fin de determinar su viabilidad como antioxidantes naturales.

A las instituciones académicas y centros de investigación aplicada, profundicen en estudios de optimización integral del proceso, considerando simultáneamente el rendimiento extractivo, el consumo energético y la viabilidad técnica y económica, como paso previo a una eventual escalabilidad industrial.

VI. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Ahmed, T., Rana, M. R., Maisha, M. R., Sayem, A. S. M., Rahman, M., & Ara, R. (2022a). Optimization of ultrasound-assisted extraction of phenolic content & antioxidant activity of hog plum (*Spondias pinnata* L. f. Kurz) pulp by response surface methodology. *Heliyon*, 8(10), e11109. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2022.e11109>
- Ahmed, T., Rana, R., Maisha, M., Sayem, A., Rahman, M., & Ara, R. (2022b). Optimization of ultrasound-assisted extraction of phenolic content & antioxidant activity of hog plum (*Spondias pinnata* L. f. Kurz) pulp by response surface methodology. *Heliyon*, 8(10), e11109. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2022.e11109>
- Alós, E., Rey, F., Gil, J. V., Rodrigo, M. J., & Zacarias, L. (2021). Ascorbic Acid Content and Transcriptional Profiling of Genes Involved in Its Metabolism during Development of Petals, Leaves, and Fruits of Orange (*Citrus sinensis* cv. Valencia Late). *Plants*, 10(12), 2590. <https://doi.org/10.3390/plants10122590>
- Andrade, M. J., Guijarro, M., & Figueroa, J. L. (2021). *Evaluación fisicoquímica y antioxidante de naranjilla (Solanum quitoense Lam.) durante la maduración*. 22(2), 145-164.
- Andrade-Cuvi, M. J., Guijarro-Fuertes, M., & Figueroa, J. L. (2021). *Evaluación fisicoquímica y antioxidante de naranjilla (Solanum quitoense Lam.) durante la maduración*. 22, 145-164.
- Andrade-Cuvi, M., Moreno-Guerrero, C., Bravo-Vásquez, J., GuijarroFuertes, M., Monar-Bósquez, V., Cevallos-Navarrete, C., & Concellón, A. (2016). *Efecto del estado de madurez sobre la calidad de tres variedades de naranjilla (Solanum quitoense Lam.)*.
- Angeli, L., Morozova, K., & Scampicchio, M. (2023). A kinetic-based stopped-flow DPPH• method. *Scientific Reports*, 13(1), 7621. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-34382-7>
- Añibarro, M., Dias, M. I., Petrović, J., Pereira, A., Soković, M., Barros, L., & Pinela, J. (2025). Nutrients, Phytochemicals, and In Vitro Antioxidant and Antimicrobial Activities of Lulo (*Solanum quitoense* Lam.) Fruit Pulp, Peel, and Seeds. *Foods*, 14(12), 2083. <https://doi.org/10.3390/foods14122083>
- Belayneh, T., Getachew Tadesse, M., Beshah Tessema, F., Woldemichael Woldemariam, H., V. Chinchkar, A., Singh, A., Upadhyay, A., & Mehari, B. (2024). Ultrasonic-assisted extraction and UHPLC determination of ascorbic acid, polyphenols, and half-maximum effective concentration in *Citrus medica* and *Ziziphus spina-christi* fruits using multivariate experimental design. *Food Chemistry: X*, 22, 101310. <https://doi.org/10.1016/j.fochx.2024.101310>

- Botella, M. Á., Hellín, P., Hernández, V., Dabauza, M., Robledo, A., Sánchez, A., Fenoll, J., & Flores, P. (2024). Chemical Composition of Wild Collected and Cultivated Edible Plants (*Sonchus oleraceus* L. and *Sonchus tenerrimus* L.). *Plants*, *13*(2), 269. <https://doi.org/10.3390/plants13020269>
- Chemat, F., Rombaut, N., Sicaire, A.-G., Meullemiestre, A., Fabiano-Tixier, A.-S., & Abert-Vian, M. (2017). Ultrasound assisted extraction of food and natural products. Mechanisms, techniques, combinations, protocols and applications. A review. *Ultrasonics Sonochemistry*, *34*, 540-560. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2016.06.035>
- Chervin, C. (2020). Should Starch Metabolism Be a Key Point of the Climacteric vs. Non-climacteric Fruit Definition? *Frontiers in Plant Science*, *11*, 609189. <https://doi.org/10.3389/fpls.2020.609189>
- Clark, J. L., & Knapp, S. (2014). *Solanum pachyandrum*. *Solanaceae Source*. <https://solanaceaesource.myspecies.info/taxonomy/term/108750/descriptions>
- Clark, J. L., Nee, M., Bohs, L., & Knapp, S. (2016). A Revision of *Solanum* Section *Aculeigerum* (the *Solanum wendlandii* Group, Solanaceae). *Systematic Botany*, *40*(4), 1102-1136. <https://doi.org/10.1600/036364415X690148>
- Comisión de normalización y de fiscalización de barreras comerciales no arancelarias (INDECOPI). (2011). *Cereales y menestras. Determinación de fibra cruda*.
- Cuéllar, L. N., García-Chacón, J. M., Heredia, F. J., & González-Miret, M. L. (2025). Bioactive and agroindustrial potential of Amazonian fruit species: A review. *Cogent Food & Agriculture*, *11*(1), 2451062. <https://doi.org/10.1080/23311932.2025.2451062>
- Dumitraşcu, L., Enachi, E., Stănciuc, N., & Aprodu, I. (2019). Optimization of ultrasound assisted extraction of phenolic compounds from cornelian cherry fruits using response surface methodology. *CYTA - Journal of Food*, *17*(1), 814-823. <https://doi.org/10.1080/19476337.2019.1659418>
- Gafforov, Y., Raşeta, M., Zafar, M., Makhkamov, T., Yarasheva, M., Chen, J.-J., Zhumagul, M., Wang, M., Ghosh, S., Abbasi, A. M., Yuldashev, A., Mamarakhimov, O., Alosaimi, A. A., Berdieva, D., & Rapior, S. (2024). Exploring biodiversity and ethnobotanical significance of *Solanum* species in Uzbekistan: Unveiling the cultural wealth and ethnopharmacological uses. *Frontiers in Pharmacology*, *14*, 1287793. <https://doi.org/10.3389/fphar.2023.1287793>
- Ghatak, A., Chaturvedi, P., Paul, P., Agrawal, G. K., Rakwal, R., Kim, S. T., Weckwerth, W., & Gupta, R. (2017). Proteomics survey of Solanaceae family: Current status and challenges ahead. *Journal of Proteomics*, *169*, 41-57. <https://doi.org/10.1016/j.jprot.2017.05.016>

- Gómez-López, I., Lobo-Rodrigo, G., Portillo, M. P., & Cano, M. P. (2021). Ultrasound-Assisted “Green” Extraction (UAE) of Antioxidant Compounds (Betalains and Phenolics) from *Opuntia stricta* var. *Dillenii*’s Fruits: Optimization and Biological Activities. *Antioxidants*, 10(11), 1786. <https://doi.org/10.3390/antiox10111786>
- Guija-Guerra, H., & Guija-Poma, E. (2023). Radicales libres y sistema antioxidante. *Horizonte Médico (Lima)*, 23(2), e2158. <https://doi.org/10.24265/horizmed.2023.v23n2.12>
- Hu, C., Gao, X., Dou, K., Zhu, C., Zhou, Y., & Hu, Z. (2023). Physiological and Metabolic Changes in Tamarillo (*Solanum betaceum*) during Fruit Ripening. *Molecules*, 28(4), 1800. <https://doi.org/10.3390/molecules28041800>
- Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación. (2002). Norma Técnica Colombiana. NTC 5093. *ICONTEC. Frutas frescas. Lulo de Castilla. Especificaciones.*, *Frutas frescas. Lulo de Castilla. Especificaciones.*, 1-16.
- Jia, D., Liao, G., Ye, B., Zhong, M., Huang, C., & Xu, X. (2024). Changes in fruit quality, phenolic compounds, and antioxidant activity of kiwifruit (*Actinidia eriantha*) during on-vine ripening. *LWT*, 206, 116564. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2024.116564>
- Kabawa, B., Sampers, I., & Raes, K. (2026). Unveiling synergy in ultrasound-assisted enzymatic extraction: Role of treatment sequence and biomass complexity. *Ultrasonics Sonochemistry*, 125, 107749. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2026.107749>
- Kobus, Z., Krzywicka, M., Lakatošová, J., & Ivanišová, E. (2025). Optimization of Ultrasound-Assisted Extraction of Polyphenols from Rowan (*Sorbus aucuparia* L.): A Response Surface Methodology Approach. *Processes*, 13(9), 2778. <https://doi.org/10.3390/pr13092778>
- Kumar, K., Srivastav, S., & Sharanagat, V. S. (2021). Ultrasound assisted extraction (UAE) of bioactive compounds from fruit and vegetable processing by-products: A review. *Ultrasonics Sonochemistry*, 70, 105325. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2020.105325>
- Latimer, G. W. (Ed.). (2019). *Official methods of analysis of AOAC International. Vol. 3* (21st Edition). AOAC International.
- Latimer, G. W. (Ed.). (2023). *Official Methods of Analysis of AOAC INTERNATIONAL* (22.^a ed.). Oxford University Press. <https://doi.org/10.1093/9780197610145.001.0001>
- Linares, G., & Rojas, M. L. (2022). Ultrasound-Assisted Extraction of Natural Pigments From Food Processing By-Products: A Review. *Frontiers in Nutrition*, 9, 891462. <https://doi.org/10.3389/fnut.2022.891462>

- Medina-Torres, N., Ayora-Talavera, T., Espinosa-Andrews, H., Sánchez-Contreras, A., & Pacheco, N. (2017). Ultrasound Assisted Extraction for the Recovery of Phenolic Compounds from Vegetable Sources. *Agronomy*, 7(3), 47. <https://doi.org/10.3390/agronomy7030047>
- Mejía-Reyes, J. D., García-Cabrera, K. E., Velázquez-Ovalle, G., & Vázquez-Ovando, A. (2022). Capacidad antioxidante: Conceptos, métodos de cuantificación y su aplicación en la caracterización de frutos tropicales y productos derivados. *Revista Colombiana de Investigaciones Agroindustriales*, 9(1), 9-33. <https://doi.org/10.23850/24220582.4023>
- Méndez, S., Ettiene, G., Raga, J., & Pérez-Pérez, E. (2014). Optimización de un método de extracción para fenoles y flavonoides totales en pulpa de mango (*Mangifera indica* L.) asistida por ultrasonido. *Rev. Fac. Agron.*
- Montgomery, D. (2017). *Design and Analysis of Experiments*. Wiley.
- Muscolo, A., Mariateresa, O., Giulio, T., & Mariateresa, R. (2024). Oxidative Stress: The Role of Antioxidant Phytochemicals in the Prevention and Treatment of Diseases. *International Journal of Molecular Sciences*, 25(6), 3264. <https://doi.org/10.3390/ijms25063264>
- Nakitto, A. M. S., Byaruhanga, Y. B., Wagner, A. E., & Muyonga, J. H. (2023). Influence of ripeness stage on the bioactive compounds' contents and antioxidant activities of *Solanum anguivi* Lam. Fruits accessions. *Heliyon*, 9(11), e21614. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e21614>
- Naranjo-Durán, A. M., Quintero-Quiroz, J., Ciro-Gómez, G. L., Barona-Acevedo, M.-J., & Contreras-Calderón, J. D. C. (2023). Characterization of the antioxidant activity, carotenoid profile by HPLC-MS of exotic colombian fruits (goldenberry and purple passion fruit) and optimization of antioxidant activity of this fruit blend. *Heliyon*, 9(7), e17819. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e17819>
- Navarro, A. A., Guzmán Loayza, D., & Gonzales Mora, E. (2018). Influencia de las zonas de crecimiento en la composición físico-química del fruto de *Solanum betaceum* Cav. *Revista de la Sociedad Química del Perú*, 84(1), 68-76. <https://doi.org/10.37761/rsqp.v84i1.166>
- Nawaz, H., Shad, M. A., Rehman, N., Andaleeb, H., & Ullah, N. (2020). Effect of solvent polarity on extraction yield and antioxidant properties of phytochemicals from bean (*Phaseolus vulgaris*) seeds. *Brazilian Journal of Pharmaceutical Sciences*, 56, e17129. <https://doi.org/10.1590/s2175-97902019000417129>
- Obregón, A., & Lozano, G. (2021a). Compuestos nutricionales y bioactivos de tres frutas provenientes de la sierra y la selva de Perú como fuente potencial de nutrientes para la

- alimentación humana. *Ciencia y Tecnología Agropecuaria*, 22(2), 1835.
https://doi.org/https://doi.org/10.21930/rcta.vol22_num2_art:1835
- Obregón, A., & Lozano, G. A. (2021b). Compuestos nutricionales y bioactivos de tres frutas provenientes de la sierra y la selva de Perú como fuente potencial de nutrientes para la alimentación humana. *Ciencia & Tecnología Agropecuaria*, 22(2).
https://doi.org/10.21930/rcta.vol22_num2_art:1835
- Otálora-Orrego, D., & Martin, D. A. (2020). Técnicas emergentes de extracción de β -caroteno para la valorización de subproductos agroindustriales de la zanahoria (*Daucus carota* L.): Una revisión. *Informador Técnico*, 85(1). <https://doi.org/10.23850/22565035.2857>
- Passerine, B. F. G., & Breitreitz, M. C. (2024). Important Aspects of the Design of Experiments and Data Treatment in the Analytical Quality by Design Framework for Chromatographic Method Development. *Molecules*, 29(24), 6057.
<https://doi.org/10.3390/molecules29246057>
- Phan, A. D. T., Zhang, J., Seididamyeh, M., Srivarathan, S., Netzel, M. E., Sivakumar, D., & Sultanbawa, Y. (2022). Hydrolysable tannins, physicochemical properties, and antioxidant property of wild-harvested *Terminalia ferdinandiana* (exell) fruit at different maturity stages. *Frontiers in Nutrition*, 9, 961679.
<https://doi.org/10.3389/fnut.2022.961679>
- Quispe-Sanchez, L., Mena-Chacon, L. M., Hernandez-Diaz, E., Siche, R., Yoplac, I., Chuquilín-Goicochea, R., Vigo, C. N., Juarez-Contreras, L., & Oliva-Cruz, M. (2025). Physicochemical, functional, and sensory properties of berries at different maturity stages. *Applied Food Research*, 5(2), 101265.
<https://doi.org/10.1016/j.afres.2025.101265>
- Ramos, C. A. D. S., Soares, T. L., Barroso, N. S., & Pelacani, C. R. (2021). Influence of maturity stage on physical and chemical characteristics of fruit and physiological quality of seeds of *Physalis angulata* L. *Scientia Horticulturae*, 284, 110124.
<https://doi.org/10.1016/j.scienta.2021.110124>
- Reddy, V. P. (2023). Oxidative Stress in Health and Disease. *Biomedicines*, 11(11), 2925.
<https://doi.org/10.3390/biomedicines11112925>
- Saini, A., Benjamin, M. A. Z., Mohd Rosdan, M. D. E., Mohamad Rosdi, M. N., & Awang, M. A. (2025). Response surface methodology-based optimised ultrasound-assisted extraction of phenolics from *Solanum lasiocarpum* Dunal (terung asam) fruit: Anti-diabetic evaluation and ADMET study. *Biocatalysis and Agricultural Biotechnology*, 68, 103704.
<https://doi.org/10.1016/j.bcab.2025.103704>

- Saini, R. K., & Keum, Y.-S. (2018). Carotenoid extraction methods: A review of recent developments. *Food Chemistry*, 240, 90-103. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2017.07.099>
- Sanjaya, Y. A., Sampe Tola, P., & Rahmawati, R. (2022, noviembre 22). Ultrasound-assisted Extraction as a Potential Method to Enhanced Extraction of Bioactive Compound. *Nusantara Science and Technology Proceedings*. 3rd International Conference Eco-Innovation in Science, Engineering, and Technology. <https://doi.org/10.11594/nstp.2022.2729>
- Särkinen, T., Baden, M., Gonzáles, P., Cueva, M., Giacomini, L. L., Spooner, D. M., Simon, R., Juárez, H., Nina, P., Molina, J., & Knapp, S. (2015). Listado anotado de Solanum L. (Solanaceae) en el Perú. *Revista Peruana de Biología*, 22(1), 003-062. <https://doi.org/10.15381/rpb.v22i1.11121>
- Sereno, A. B., Bampi, M., Dos Santos, I. E., Ferreira, S. M. R., Bertin, R. L., & Krüger, C. C. H. (2018a). Mineral profile, carotenoids and composition of cocona (*Solanum sessiliflorum* Dunal), a wild Brazilian fruit. *Journal of Food Composition and Analysis*, 72, 32-38. <https://doi.org/10.1016/j.jfca.2018.06.001>
- Sereno, A. B., Bampi, M., Dos Santos, I. E., Ferreira, S. M. R., Bertin, R. L., & Krüger, C. C. H. (2018b). Mineral profile, carotenoids and composition of cocona (*Solanum sessiliflorum* Dunal), a wild Brazilian fruit. *Journal of Food Composition and Analysis*, 72, 32-38. <https://doi.org/10.1016/j.jfca.2018.06.001>
- Shawky, E., Nahar, L., Nassief, S. M., Sarker, S. D., & Ibrahim, R. S. (2025). A comprehensive review of large-scale extraction and purification of food-derived bioactive phenolic components. *Process Biochemistry*, 154, 196-219. <https://doi.org/10.1016/j.procbio.2025.04.027>
- Shen, L., Pang, S., Zhong, M., Sun, Y., Qayum, A., Liu, Y., Rashid, A., Xu, B., Liang, Q., Ma, H., & Ren, X. (2023). A comprehensive review of ultrasonic assisted extraction (UAE) for bioactive components: Principles, advantages, equipment, and combined technologies. *Ultrasonics Sonochemistry*, 101, 106646. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2023.106646>
- Silva, M., Araújo, M., Santana, A., Silva, F., & Maciel, M. (2021). *Ultrasound-assisted extraction of bioactive compounds from ciriguela (Spondias purpurea L.) peel: Optimization and comparison with conventional extraction and microwave*. <https://doi.org/10.1016/j.arabjc.2021.103260>
- Silva, M. E., Araújo, M. V. R. L., Santana, A. A., Silva, F. L. H., & Maciel, M. I. S. (2021). Ultrasound-assisted extraction of bioactive compounds from ciriguela (*Spondias*

- purpurea L.) peel: Optimization and comparison with conventional extraction and microwave. *Arabian Journal of Chemistry*, 14(8), 103260. <https://doi.org/10.1016/j.arabjc.2021.103260>
- Singh, N., Sharma, R. M., Dubey, A. K., Awasthi, O. P., Porat, R., Saha, S., Bharadwaj, C., Sevanthi, A. M., Kumar, A., Sharma, N., & Carmi, N. (2023). Harvesting Maturity Assessment of Newly Developed Citrus Hybrids (*Citrus maxima* Merr. × *Citrus sinensis* (L.) Osbeck) for Optimum Juice Quality. *Plants*, 12(23), 3978. <https://doi.org/10.3390/plants12233978>
- Stanek-Wandzel, N., Zarębska, M., Wasilewski, T., Hordyjewicz-Baran, Z., Krzyszowska, A., Gębura, K., & Tomaka, M. (2025). Enhancing Phenolic Compound Recovery from Grape Pomace Residue: Synergistic Approach of Ultrasound- and Enzyme-Assisted Extraction. *ACS Omega*, 10(22), 23129-23138. <https://doi.org/10.1021/acsomega.5c01321>
- Staveckienė, J., Kulaitienė, J., Levickienė, D., Vaitkevičienė, N., & Vaštakaitė-Kairienė, V. (2023). The Effect of Ripening Stages on the Accumulation of Polyphenols and Antioxidant Activity of the Fruit Extracts of *Solanum* Species. *Plants*, 12(14), 2672. <https://doi.org/10.3390/plants12142672>
- Vargas, G., Merino-Zegarra, C., Riquelme-Penaherrera, M., Nonato-Ramirez, L., Delgado-Wong, H., Pertino, M. W., Parra, C., & Simirgiotis, M. J. (2021). Antihyperlipidemic and Antioxidant Capacities, Nutritional Analysis and UHPLC-PDA-MS Characterization of Cocona Fruits (*Solanum sessiliflorum* Dunal) from the Peruvian Amazon. *Antioxidants*, 10(10), 1566. <https://doi.org/10.3390/antiox10101566>
- Vignesh, A., Amal, T. C., Sivalingam, R., Selvakumar, S., & Vasanth, K. (2024). Influence of ecological factors on the phytochemical composition and bioactivity of *Berberis tinctoria* Lesch. Wild edible fruits. *Biochemical Systematics and Ecology*, 112, 104771. <https://doi.org/10.1016/j.bse.2023.104771>
- Weremfo, A., Adulley, F., Dabie, K., Abassah, S., & Peprah, E. (2022). Optimization of ultrasound-assisted extraction of phenolic antioxidants from turkey berry (*Solanum torvum* Sw) fruits using response surface methodology. *Jarmap*, 30. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jarmap.2022.100387>
- Weremfo, A., Adulley, F., Dabie, K., Abassah-Oppong, S., & Peprah-Yamoah, E. (2022). Optimization of ultrasound-assisted extraction of phenolic antioxidants from turkey berry (*Solanum torvum* Sw) fruits using response surface methodology. *Journal of Applied Research on Medicinal and Aromatic Plants*, 30, 100387. <https://doi.org/10.1016/j.jarmap.2022.100387>

WFO. (2023). *Solanum pachyandrum* Bitter. *WFO: La flora mundial en linea*.
<https://stage.worldfloraonline.org/taxon/wfo-0001030155%3Bjsessionid%3DA2820DBA4D082C088D10A760BB7FF5AE?utm>

AGRADECIMIENTO

A Dios, por guiarme y brindarme la fortaleza necesaria para superar cada desafío a lo largo de esta travesía académica.

A mis padres y hermano, por su amor incondicional, su apoyo constante y sus innumerables sacrificios. Gracias por creer en mí y por ser mi fuente de inspiración y motivación.

A mis asesores de tesis, Mg. Ralph Stein Rivera Botonares y Mg. Hans Himbler Minchán Velayarce, por su orientación, acompañamiento y valiosos aportes académicos, los cuales fueron fundamentales para el desarrollo riguroso de este trabajo. Su disposición, paciencia y compromiso contribuyeron significativamente a mi formación académica y profesional.

Al Dr. Ives Yoplac, Dr. Segundo Chavez y a la Mg. Laydy Mena, investigadores de la Universidad Nacional Toribio Rodríguez de Mendoza de Amazonas, por el apoyo brindado, la orientación, sus observaciones y sugerencias, enriquecieron el contenido de esta investigación y fortalecieron su calidad científica.

Extiendo mi agradecimiento a la Universidad Nacional del Santa, a la Universidad Nacional Toribio Rodríguez de Mendoza de Amazonas y a la Universidad Nacional de Jaén, por brindar los espacios, recursos y conocimientos necesarios para la ejecución de este estudio. Asimismo, mi agradecimiento al Programa PROINTEC 2023 (Proyectos de Investigación, Innovación y Desarrollo Tecnológico) por el financiamiento otorgado para el desarrollo de esta investigación.

A la familia Arias Tocto y a Leticia Granda Rueda por su amable contribución con el material vegetal usado en esta investigación.

Finalmente, agradezco a Disbexy Huaman y Lucero Cruz, con su apoyo, colaboración y palabras de ánimo, hicieron más llevadero este camino académico.

A todos ellos, mi más profundo agradecimiento.

Fiorela Castillo

DEDICATORIA

“A Raúl Castillo y Nelly Pintado, mis amados padres, por su amor incondicional, su apoyo constante y por ser el pilar fundamental en mi formación personal y profesional. A mi querido hermano Alexander Castillo, por ser mi inspiración y motivo de superación”

ANEXOS

Anexo 1. Comprobante de herbario de *Solanum pachyandrum*. 2024



Nota. Ejemplar de herbario de *Solanum pachyandrum*, que muestra hojas, tallos y frutos, utilizados para la identificación taxonómica. Estos especímenes botánicos se recolectaron en agosto de 2024 de la finca Quinta “San Antonio”, San Ignacio, Cajamarca, Perú.

Anexo 2. Constancia de determinación botánica



"Año del Bicentenario, de la consolidación de
nuestra Independencia, y de la conmemoración de las
heroicas batallas de Junín y Ayacucho"



Jaén, 18 de septiembre de 2024.

Herbario ISV

ICNDMB Código de Autorización N° AUT-ICND-2023-004

CONSTANCIA DE DETERMINACIÓN BOTÁNICA N°06-2024

Por medio de la presente se da constancia de la identificación de 03 muestras botánicas, a solicitud de Fiorela Castillo Pintado, tesista de Ingeniería de Industrias Alimentarias de la Universidad Nacional de Jaén, en el marco del proyecto de investigación titulado "*Optimización de las condiciones de extracción asistida por ultrasonido de compuestos bioactivos y determinación de la capacidad antioxidante del fruto Solanum pachyandrum*". Las colectas fueron identificadas y depositadas en la colección del Herbario ISV de la Universidad Nacional de Jaén.

Las identificaciones corresponden:

DUP	CÓDIGO	FAMILIA	NOMBRE CIENTÍFICO
3	FC-01	SOLANACEAE	<i>Solanum pachyandrum</i> Bitter

Atentamente,

Dr. José Luis Marcelo Peña
Responsable del Laboratorio de Plantas Vasculares y
Herbario ISV
Universidad Nacional de Jaén

Herbario ISV (Isidoro Sánchez Vega)
Universidad Nacional de Jaén
Carretera Jaén-San Ignacio Km 24
herbario@unij.edu.pe

Nota. Constancia de identificación del espécimen *Solanum pachyandrum* otorgada por el herbario Isidoro Sánchez Vega de la Universidad Nacional de Jaén.

Anexo 3. Frutos *Solanum pachyandrum* en diferentes estados de madurez



A. Verde



B. Pintón



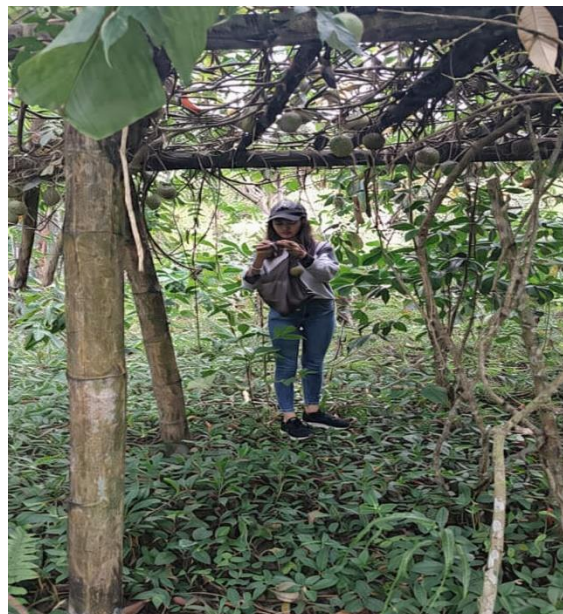
C. Maduro

Nota. Frutos de *Solanum pachayndrum*. A. Estado verde, B. Estado pintón con un 50 % del pericarpio de color amarillo, C. Estado maduro con el 100% del pericarpio amarillo.

Anexo 4. Recolección de las muestras.



A



B



C



D

Nota. **A.** Frutos de *S. pachyandrum* en estado verde. **B.** Recolección manual de los frutos en óptimas condiciones. **C.** Flor de *S. Pachyandrum*. **D.** Fruto de *S. pachyandrum* en estado maduro seleccionado para recolección.

Anexo 5. Análisis biométrico de los frutos de *S. pachyandrum* en estado verde, pintón y maduro.



A



B



C



D

Nota. A. Medición del diámetro ecuatorial con vernier de los frutos en estado maduro. B. Determinación del peso de los frutos usando una balanza. C. Medición del diámetro ecuatorial con vernier de los frutos en estado verde. D. Medición del diámetro polar con vernier de los frutos en estado maduro.

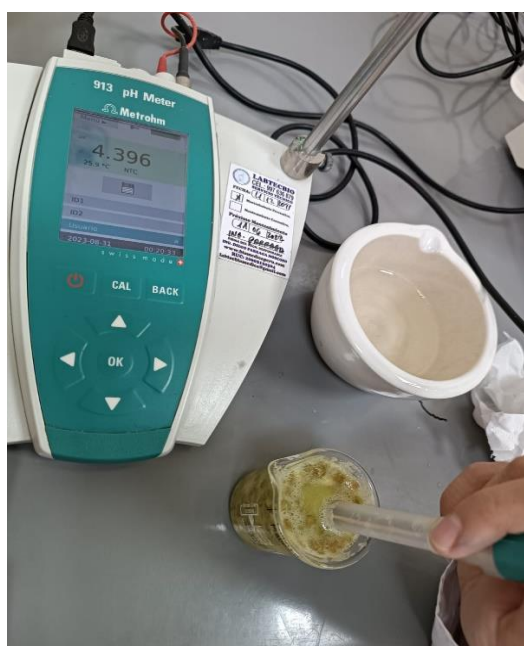
Anexo 6. Análisis físicoquímico de los frutos de *S. pachyandrum* en estado verde, pintón y maduro.



A



B



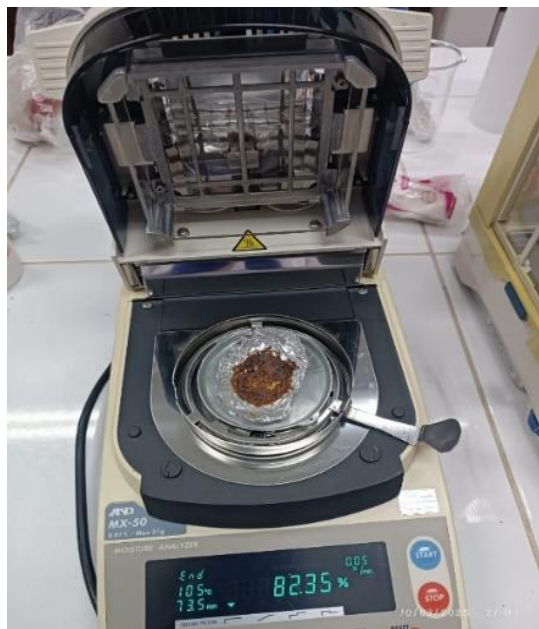
C



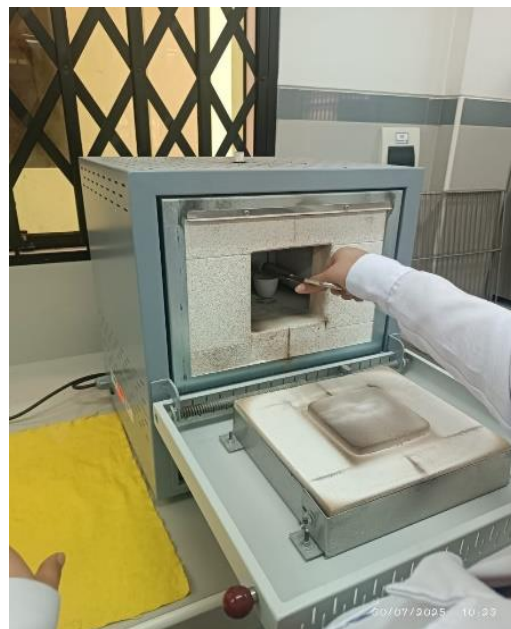
D

Nota. **A.** Triturado de la pulpa de los frutos *S. pachyandrum* en estado verde. **B.** Pulpa triturada de frutos en estado verde, pintón y maduro. **C.** Análisis de pH usando el pHmetro con electrodo. **D.** Análisis de acidez titulable usando NaOH y un agitador magnético.

Anexo 7. Análisis proximal (humedad y cenizas) de los frutos maduros de *S. pachyandrum*.



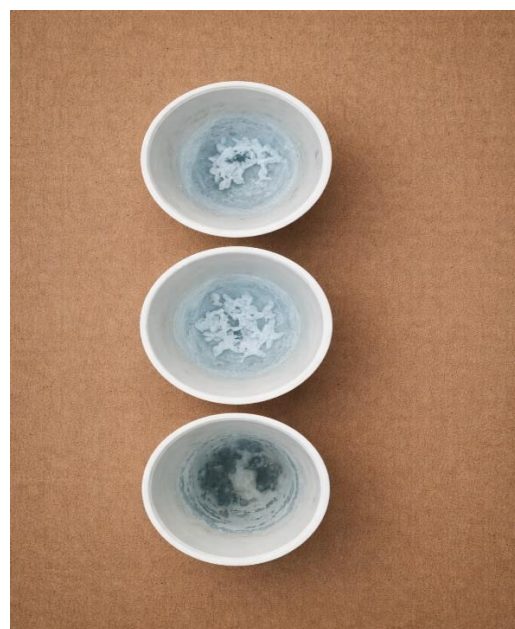
A



B



C



D

Nota. **A.** Analizador de humedad con una muestra de fruto de *S. pachyandrum*. **B.** Crisoles con muestra de *S. pachyandrum* en una mufla para determinación de cenizas. **C.** Crisoles en un desecador después de la incineración por ser pesados. **D.** Crisoles con cenizas de los frutos de *S. pachyandrum*.

Anexo 8. Extracción y análisis de los extractos de los frutos silvestres de *S. pachyandrum*.



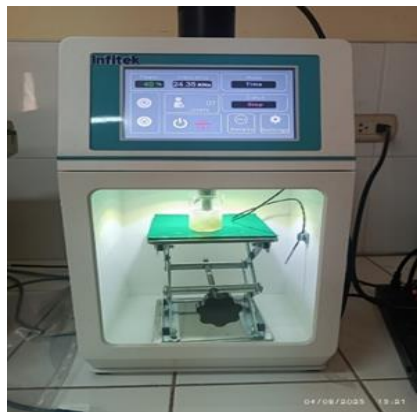
A



B



C



D



E



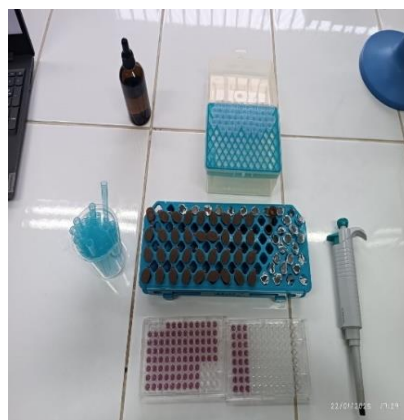
F

Nota. **A.** Lavado y desinfectado de los frutos *S. pachyandrum* en diferentes estados de madurez. **B.** Frutos cortados para extraer la pulpa. **C.** Pasta de frutos *S. pachyandrum* después de pasar por el procesador industrial. **D.** Sonda ultrasónica con muestra. **E.** Muestras en centrifuga. **F.** Filtrado del sobrenadante.

Anexo 9. Análisis de extractos



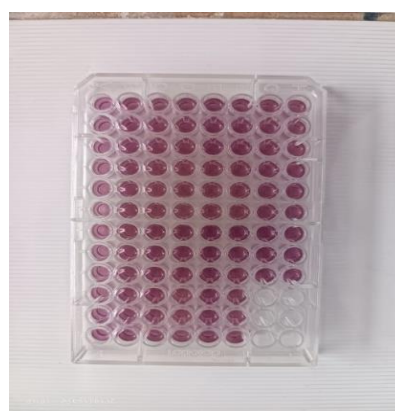
A



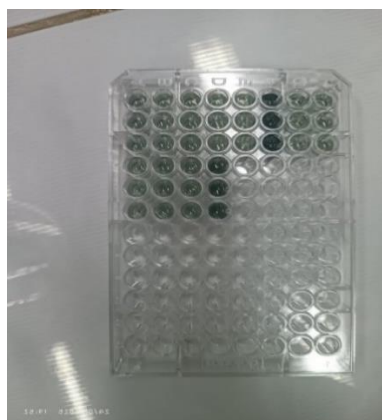
B



C



D



E

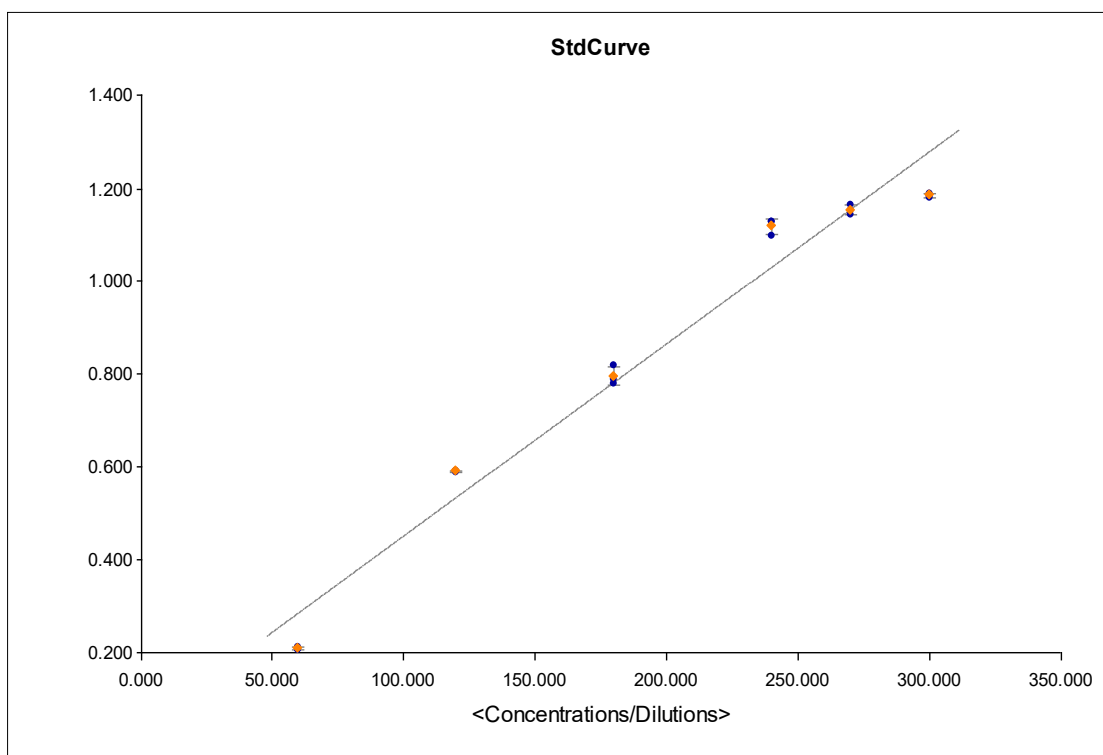


F

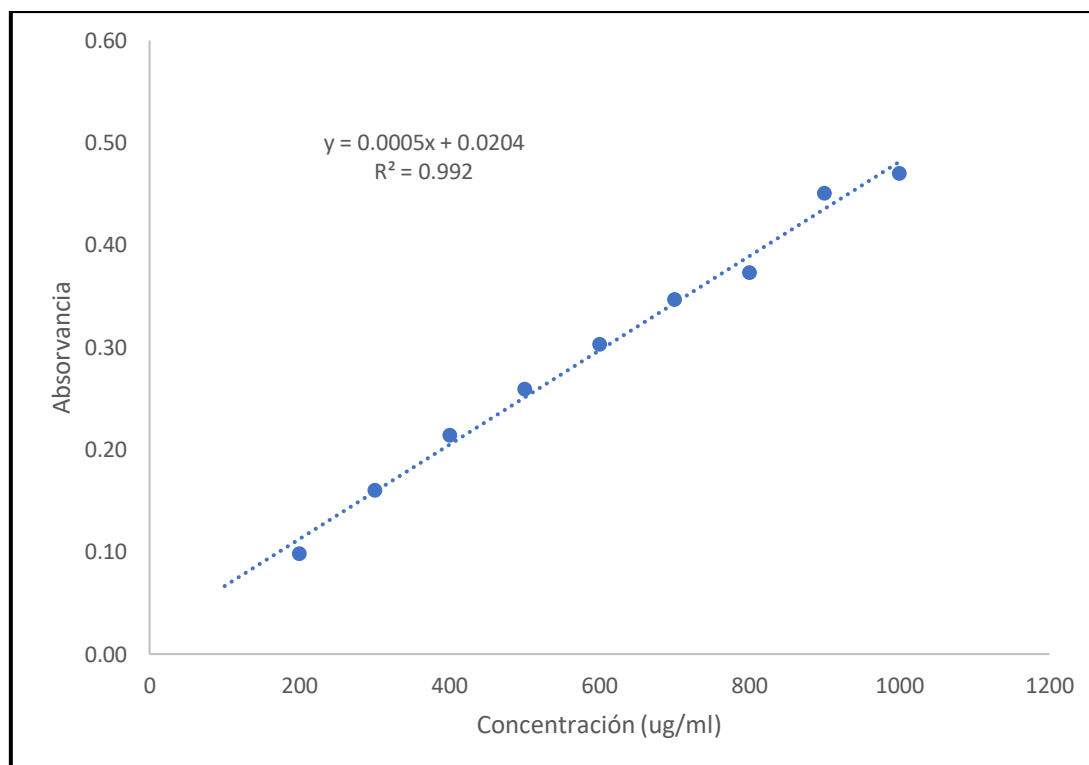
Nota. Preparación de reactivo Dpph, homogeneización a través de un agitador magnético. **B.** Microtubos con extracto para ser analizados. **C.** Homogeneización de extracto con reactivo usando vortex. **D.** Microplaca con extracto y reactivo Dpph. **E.** Microplaca con extracto y reactivo Folin-Ciocalteu. **F.** Espectrofotómetro lector multimodal UV/Vis analizando una muestra.

Anexo 10. Curva de calibración para determinación de polifenoles totales

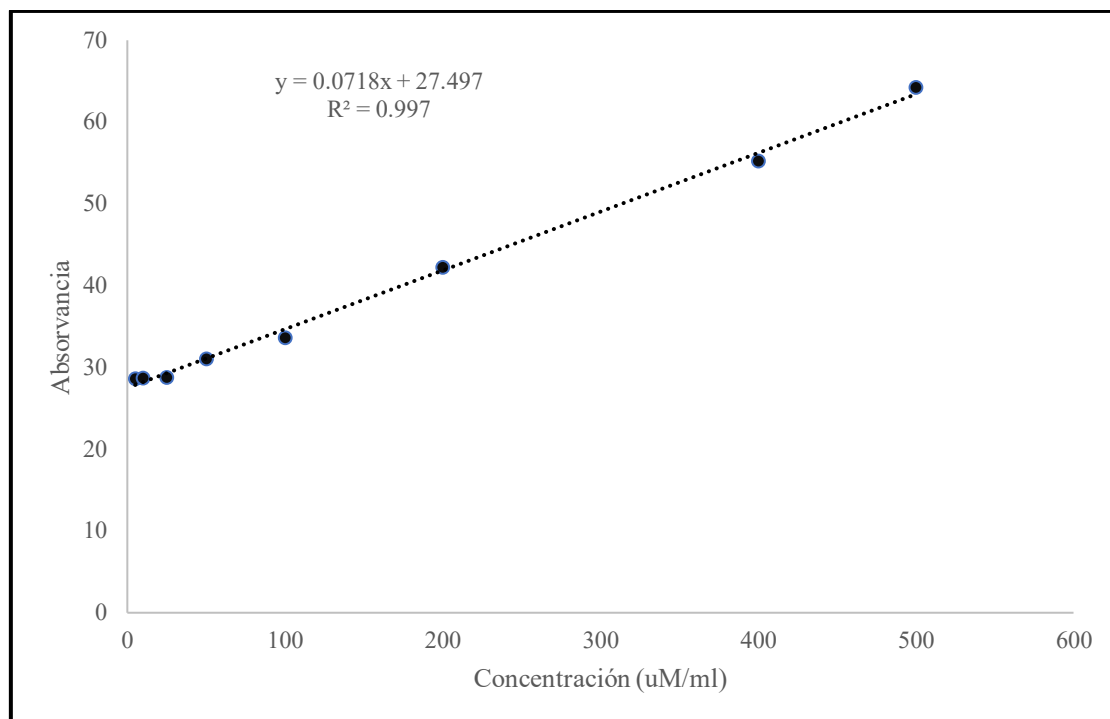
$Y=A*X+B$	0.00382	-0.0434	0.994
-----------	---------	---------	-------



Anexo 11. Curva de calibración para determinación de carotenoides totales



Anexo 12. Curva de calibración para determinación de capacidad antioxidante



Anexo 13. Análisis de vitamina C de los frutos silvestres de *S. pachyandrum* en estado pintón



LA MOLINA CALIDAD TOTAL LABORATORIOS
UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA LA MOLINA
Instituto de Certificación, Inspección y Ensayos



INFORME DE ENSAYOS
N° 004404-2023

SOLICITANTE DIRECCIÓN LEGAL PRODUCTO NUMERO DE MUESTRAS IDENTIFICACIÓN/MTRA CANTIDAD RECIBIDA MARCA(S) FORMA DE PRESENTACIÓN SOLICITUD DE SERVICIOS REFERENCIA FECHA DE RECEPCIÓN ENSAYOS SOLICITADOS PERÍODO DE CUSTODIA	: UNIVERSIDAD NACIONAL DE JAÉN : CAR.JAEN - SAN IGNACIO KM. 24 SEC. YANAYACU CAJAMARCA - JAEN - JAEN RUC : 20487463737 Teléfono : 941941957 : Fruta: Solanum pachyandrum : Uno : Pintón : 713,9 g (+envase) de muestra proporcionada por el solicitante. : S.M. : Envasado, la muestra ingresa en bolsa sellada, a temperatura ambiente. : S/S N°EN- 003353 -2023 : ACEPTACION TELEFONICA : 31/10/2023 : FÍSICO / QUÍMICO : No aplica
--	---

RESULTADOS:

ENSAYOS FÍSICOS / QUÍMICOS:
 ALCANCE: N.A.

ENSAYOS	PROMEDIO	RESULTADO 1	RESULTADO 2	RESULTADO 3	RESULTADO 4
1.- Vitamina C (mg/100 g de muestra original)	35,2	35,20	35,20	35,22	35,22

MÉTODOS UTILIZADOS EN EL LABORATORIO:
 1.- AOAC 967.21 Cap. 45, Pág. 21-22, 21st Edition 2019

FECHA DE EJECUCION DE ENSAYOS: Del 31/10/2023 Al 15/11/2023.

ADVERTENCIA:
 1.- El muestreo, las condiciones de muestreo, tratamiento y transporte de la muestra hasta su ingreso a La Molina Calidad Total - Laboratorios son de responsabilidad del Solicitante.
 2.- Se prohíbe la reproducción parcial o total del presente Informe sin la autorización de La Molina Calidad Total - Laboratorios.
 3.- Valido sólo para la cantidad recibida. No es un certificado de Conformidad ni Certificado del Sistema de Calidad de quien lo produce.

La Molina, 15 de Noviembre de 2023



LA MOLINA CALIDAD TOTAL LABORATORIOS - UNALM



Biol. Lourdes Margarita Barco Saldaña
 Directora Técnica (e)
 CBP - N° 01232

Pág. 1/1

Av. La Molina S/N (frente a la puerta principal de la Universidad Agraria) - La Molina - Lima - Perú
 Cel.: 998376789 - 998373909 - 926694322
 E-mail: lmcti.ventas.servicios@lamolina.edu.pe - Página Web: www.lamolina.edu.pe/calidadtotal
 la molina calidad total

Nota. Análisis de determinación de vitamina C en frutos pintones otorgado por el Instituto de Certificación, Inspección y Ensayo de la Universidad Nacional Agraria La Molina.

Anexo 14. Análisis de vitamina C de los frutos silvestres de *S. pachyandrum* en estado verde



LA MOLINA CALIDAD TOTAL LABORATORIOS
UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA LA MOLINA
Instituto de Certificación, Inspección y Ensayos



INFORME DE ENSAYOS
N° 004405-2023

SOLICITANTE : UNIVERSIDAD NACIONAL DE JAÉN
DIRECCIÓN LEGAL : CAR.JAEN - SAN IGNACIO KM. 24 SEC. YANAYACU CAJAMARCA - JAEN - JAEN
RUC : 20487463737 Teléfono : 941941957

PRODUCTO : Solanum pachyandrum
NUMERO DE MUESTRAS : Uno
IDENTIFICACIÓN/MTRA : Verde
CANTIDAD RECIBIDA : 602,1 g (+envase) de muestra proporcionada por el solicitante.
MARCA(S) : S.M.
FORMA DE PRESENTACIÓN : Envasado, la muestra ingresa en bolsa sellada, a temperatura ambiente.
SOLICITUD DE SERVICIOS : S/S N°EN- 003353 -2023
REFERENCIA : ACEPTACION TELEFONICA
FECHA DE RECEPCIÓN : 31/10/2023
ENSAYOS SOLICITADOS : FÍSICO / QUÍMICO
PERÍODO DE CUSTODIA : No aplica

RESULTADOS:

ENSAYOS FÍSICOS / QUÍMICOS:
ALCANCE: N.A.

ENSAYOS	PROMEDIO	RESULTADO 1	RESULTADO 2	RESULTADO 3	RESULTADO 4
1 - Vitamina C (mg/100 g de muestra original)	25,4	25,37	25,37	25,36	25,36

MÉTODOS UTILIZADOS EN EL LABORATORIO:
1.- AOAC 967.21 Cap. 45, Pág. 21-22, 21st Edition 2019

FECHA DE EJECUCION DE ENSAYOS: Del 31/10/2023 Al 15/11/2023.

ADVERTENCIA:
1.- El muestreo, las condiciones de muestreo, tratamiento y transporte de la muestra hasta su ingreso a La Molina Calidad Total - Laboratorios son de responsabilidad del Solicitante.
2.- Se prohíbe la reproducción parcial o total del presente Informe sin la autorización de La Molina Calidad Total - Laboratorios.
3.- Válido sólo para la cantidad recibida. No es un certificado de Conformidad ni Certificado del Sistema de Calidad de quien lo produce.

La Molina, 15 de Noviembre de 2023



LA MOLINA CALIDAD TOTAL LABORATORIOS - UNALM

Biol. Lourdes Margarita Barco Saldaña
Directora Técnica (e)
CBP - N° 01232

Pág. 1/1

Av. La Molina S/N (frente a la puerta principal de la Universidad Agraria) - La Molina - Lima - Perú
Cel.: 998376789 - 998373909 - 926694322
E-mail: lmctl.ventas.servicios@lamolina.edu.pe - Página Web: www.lamolina.edu.pe/calidadtotal
 la molina calidad total

Nota. Análisis de determinación de vitamina C en frutos verdes otorgado por el Instituto de Certificación, Inspección y Ensayo de la Universidad Nacional Agraria La Molina.

Anexo 15. Análisis de vitamina C de los frutos silvestres de *S. pachyandrum* en estado maduro



LA MOLINA CALIDAD TOTAL LABORATORIOS
UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA LA MOLINA
Instituto de Certificación, Inspección y Ensayos



INFORME DE ENSAYOS
N° 004406-2023

SOLICITANTE : UNIVERSIDAD NACIONAL DE JAÉN
DIRECCIÓN LEGAL : CAR.JAEN - SAN IGNACIO KM. 24 SEC. YANAYACU CAJAMARCA - JAEN - JAEN
RUC : 2048746373 **Teléfono :** 941941957

PRODUCTO : Fruta: Solanum pachyandrum
NUMERO DE MUESTRAS : Uno
IDENTIFICACIÓN/MTRA : Maduro
CANTIDAD RECIBIDA : 634,8 g (+envase) de muestra proporcionada por el solicitante.
MARCA(S) : S.M.
FORMA DE PRESENTACIÓN : Envasado, la muestra ingresa en bolsa sellada, a temperatura ambiente.
SOLICITUD DE SERVICIOS : S/S N°EN- 003353 -2023
REFERENCIA : ACEPTACION TELEFONICA
FECHA DE RECEPCIÓN : 31/10/2023
ENSAYOS SOLICITADOS : FÍSICO / QUÍMICO
PERÍODO DE CUSTODIA : No aplica

RESULTADOS:

ENSAYOS FÍSICOS / QUÍMICOS:
ALCANCE: N.A.

ENSAYOS	PROMEDIO	RESULTADO 1	RESULTADO 2	RESULTADO 3	RESULTADO 4
1.- Vitamina C (mg/100 g de muestra original)	24,0	24,00	24,00	24,01	24,01

MÉTODOS UTILIZADOS EN EL LABORATORIO:
1.- AOAC 967.21 Cap. 45, Pág. 21-22, 21st Edition 2019

FECHA DE EJECUCION DE ENSAYOS: Del 31/10/2023 Al 15/11/2023.

ADVERTENCIA:
1.- El muestreo, las condiciones de muestreo, tratamiento y transporte de la muestra hasta su ingreso a La Molina Calidad Total - Laboratorios son de responsabilidad del Solicitante.
2.- Se prohíbe la reproducción parcial o total del presente Informe sin la autorización de La Molina Calidad Total - Laboratorios.
3.- Válido solo para la cantidad recibida. No es un certificado de Conformidad ni Certificado del Sistema de Calidad de quien lo produce.

La Molina, 15 de Noviembre de 2023



LA MOLINA CALIDAD TOTAL LABORATORIOS - UNALM
[Firma]
Biol. Lourdes Margarita Barco Saldaña
Directora Técnica (e)
CBP - N° 01232

Pág. 1/1

Av. La Molina S/N (frente a la puerta principal de la Universidad Agraria) - La Molina - Lima - Perú
Cel.: 998376789 - 998373909 - 926694322
E-mail: lmctl.ventas.servicios@lamolina.edu.pe - Página Web: www.lamolina.edu.pe/calidadtotal
 la molina calidad total

Nota. Análisis de determinación de vitamina C en frutos maduros otorgado por el Instituto de Certificación, Inspección y Ensayo de la Universidad Nacional Agraria La Molina.

Anexo 16. Análisis proximal de frutos maduros de *S. pachyandrum*



LA MOLINA CALIDAD TOTAL LABORATORIOS
UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA LA MOLINA
Instituto de Certificación, Inspección y Ensayos



INFORME DE ENSAYOS
N° 004408-2023

SOLICITANTE : UNIVERSIDAD NACIONAL DE JAÉN
DIRECCIÓN LEGAL : CAR.JAEN - SAN IGNACIO KM. 24 SEC. YANAYACU CAJAMARCA - JAEN - JAEN
RUC : 20487463737 **Teléfono :** 941941957

PRODUCTO : Fruta: *Solanum pachyandrum*
NUMERO DE MUESTRAS : Uno
IDENTIFICACIÓN/MTRA : Maduro
CANTIDAD RECIBIDA : 488,8 g (+envase) de muestra proporcionada por el solicitante.
MARCA(S) : S.M.
FORMA DE PRESENTACIÓN : Envasado, la muestra ingresa en bolsa sellada, a temperatura ambiente.
SOLICITUD DE SERVICIOS : S/S N°EN- 003358 -2023
REFERENCIA : ACEPTACION TELEFONICA
FECHA DE RECEPCIÓN : 31/10/2023
ENSAYOS SOLICITADOS : FÍSICO / QUÍMICO
PERÍODO DE CUSTODIA : No aplica

RESULTADOS:

ENSAYOS FÍSICOS / QUÍMICOS:
ALCANCE: N.A.

ENSAYOS	PROMEDIO	RESULTADO 1	RESULTADO 2	RESULTADO 3	RESULTADO 4
1.- Fibra Cruda (g/100 g de muestra original)	5,6	5,60	5,58	5,62	5,59
2.- Proteína Cruda (g/100 g de muestra original) (Factor: 6.25)	2,5	2,49	2,53	2,50	2,51
3.- Grasa (g/100 g de muestra original)	0,2	0,16	0,16	0,18	0,18

MÉTODOS UTILIZADOS EN EL LABORATORIO:
1.- NTP 205.003.1980 (Revisada el 2011)
2.- AOAC 954.01 Cap. 4, Pág. 24, 21st Edition 2019
3.- AOAC 930.09 Cap. 3, Pág. 24, 21st Edition 2019

FECHA DE EJECUCION DE ENSAYOS: Del 31/10/2023 Al 15/11/2023.

ADVERTENCIA:
1.- El muestreo, las condiciones de muestreo, tratamiento y transporte de la muestra hasta su ingreso a La Molina Calidad Total - Laboratorios son de responsabilidad del Solicitante.
2.- Se prohíbe la reproducción parcial o total del presente Informe sin la autorización de La Molina Calidad Total - Laboratorios.
3.- Válido solo para la cantidad recibida. No es un certificado de Conformidad ni Certificado del Sistema de Calidad de quien lo produce.

La Molina, 15 de Noviembre de 2023



LA MOLINA CALIDAD TOTAL LABORATORIOS - UNALM

Biol. Lourdes Margarita Barco Saldaña
Directora Técnica (e)
CBP - N° 01232

Pág. 1/1

Av. La Molina S/N (frente a la puerta principal de la Universidad Agraria) - La Molina - Lima - Perú
Cel.: 998376789 - 998373909 - 926694322
E-mail: lmctl.ventas.servicios@lamolina.edu.pe - Página Web: www.lamolina.edu.pe/calidadtotal
 la molina calidad total

Nota. Análisis de determinación de fibra cruda, proteína cruda y grasa en frutos de *S. pachyandrum* maduros otorgado por el Instituto de Certificación, Inspección y Ensayo de la Universidad Nacional Agraria La Molina.

76

Anexo 17. Análisis estadístico de polifenoles totales a través del programa Minitab vrs 22.

Coefficientes codificados

Término	Coef	EE del coef.	Valor T	Valor p	FIV
Constante	85.160	0.642	132.55	0.000	
Metanol %	-3.169	0.393	-8.05	0.000	1.00
Amplitud %	2.585	0.393	6.57	0.000	1.00
Tiempo (min)	4.739	0.393	12.05	0.000	1.00
Metanol %*Metanol %	2.789	0.579	4.82	0.000	1.01
Amplitud %*Amplitud %	0.749	0.579	1.29	0.204	1.01
Tiempo (min)*Tiempo (min)	1.196	0.579	2.07	0.046	1.01
Metanol %*Amplitud %	4.788	0.556	8.61	0.000	1.00
Metanol %*Tiempo (min)	-0.807	0.556	-1.45	0.156	1.00
Amplitud %*Tiempo (min)	-0.905	0.556	-1.63	0.113	1.00

Resumen del modelo

S	R-cuadrado	R-cuadrado(ajustado)	R-cuadrado (pred)
1.92741	91.11%	88.82%	86.60%

Análisis de Varianza

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Modelo	9	1332.51	148.056	39.85	0.000
Lineal	3	940.41	313.471	84.38	0.000
Metanol %	1	240.97	240.965	64.86	0.000
Amplitud %	1	160.38	160.383	43.17	0.000
Tiempo (min)	1	539.07	539.065	145.11	0.000
Cuadrado	3	99.30	33.099	8.91	0.000
Metanol %*Metanol %	1	86.14	86.143	23.19	0.000
Amplitud %*Amplitud %	1	6.21	6.214	1.67	0.204
Tiempo (min)*Tiempo (min)	1	15.85	15.850	4.27	0.046
Interacción de 2 factores	3	292.80	97.599	26.27	0.000
Metanol %*Amplitud %	1	275.14	275.144	74.07	0.000
Metanol %*Tiempo (min)	1	7.82	7.818	2.10	0.156
Amplitud %*Tiempo (min)	1	9.84	9.835	2.65	0.113
Error	35	130.02	3.715		
Falta de ajuste	3	46.89	15.631	6.02	0.002
Error puro	32	83.13	2.598		
Total	44	1462.53			

Anexo 18. Análisis estadístico de carotenoides totales a través del programa estadístico Minitab vrs. 22

Coefficientes codificados

Término	Coef	EE del coef.	Valor T	Valor p	FIV
Constante	66.49	5.83	11.41	0.000	
Metanol %	-65.13	3.57	-18.25	0.000	1.00
Amplitud %	24.87	3.57	6.97	0.000	1.00
Tiempo (min)	7.08	3.57	1.98	0.055	1.00
Metanol %*Metanol %	59.31	5.25	11.29	0.000	1.01
Amplitud %*Amplitud %	25.47	5.25	4.85	0.000	1.01
Tiempo (min)*Tiempo (min)	3.06	5.25	0.58	0.565	1.01
Metanol %*Amplitud %	-16.17	5.05	-3.20	0.003	1.00
Metanol %*Tiempo (min)	13.58	5.05	2.69	0.011	1.00
Amplitud %*Tiempo (min)	17.25	5.05	3.42	0.002	1.00

Resumen del modelo

S	R-cuadrado	R-cuadrado(ajustado)	R-cuadrado (pred)
17.4852	94.10%	92.58%	89.56%

Análisis de Varianza

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Modelo	9	170698	18966	62.04	0.000
Lineal	3	117845	39282	128.48	0.000
Metanol %	1	101790	101790	332.94	0.000
Amplitud %	1	14850	14850	48.57	0.000
Tiempo (min)	1	1204	1204	3.94	0.055
Cuadrado	3	43932	14644	47.90	0.000
Metanol %*Metanol %	1	38959	38959	127.43	0.000
Amplitud %*Amplitud %	1	7187	7187	23.51	0.000
Tiempo (min)*Tiempo (min)	1	103	103	0.34	0.565
Interacción de 2 factores	3	8921	2974	9.73	0.000
Metanol %*Amplitud %	1	3136	3136	10.26	0.003
Metanol %*Tiempo (min)	1	2214	2214	7.24	0.011
Amplitud %*Tiempo (min)	1	3571	3571	11.68	0.002
Error	35	10701	306		
Falta de ajuste	3	9688	3229	102.10	0.000
Error puro	32	1012	32		
Total	44	181399			

Anexo 19. Análisis estadístico de capacidad antioxidante a través del programa estadístico Minitab vrs. 22

Coefficientes codificados

Término	Coef	EE del coef.	Valor T	Valor p	FIV
Constante	194.6	14.1	13.78	0.000	
Metanol %	42.82	8.65	4.95	0.000	1.00
Amplitud %	15.84	8.65	1.83	0.075	1.00
Tiempo (min)	42.44	8.65	4.91	0.000	1.00
Metanol %*Metanol %	-40.9	12.7	-3.21	0.003	1.01
Amplitud %*Amplitud %	25.0	12.7	1.97	0.057	1.01
Tiempo (min)*Tiempo (min)	25.2	12.7	1.98	0.055	1.01
Metanol %*Amplitud %	34.5	12.2	2.82	0.008	1.00
Metanol %*Tiempo (min)	-11.3	12.2	-0.93	0.361	1.00
Amplitud %*Tiempo (min)	23.6	12.2	1.93	0.062	1.00

Resumen del modelo

S	R-cuadrado	R-cuadrado(ajustado)	R-cuadrado (pred)
42.3607	70.61%	63.05%	49.38%

Análisis de Varianza

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Modelo	9	150874	16763.8	9.34	0.000
Lineal	3	93269	31089.6	17.33	0.000
Metanol %	1	44015	44015.2	24.53	0.000
Amplitud %	1	6022	6022.3	3.36	0.075
Tiempo (min)	1	43231	43231.2	24.09	0.000
Cuadrado	3	35129	11709.7	6.53	0.001
Metanol %*Metanol %	1	18500	18499.9	10.31	0.003
Amplitud %*Amplitud %	1	6932	6932.4	3.86	0.057
Tiempo (min)*Tiempo (min)	1	7060	7059.9	3.93	0.055
Interacción de 2 factores	3	22477	7492.2	4.18	0.013
Metanol %*Amplitud %	1	14282	14281.6	7.96	0.008
Metanol %*Tiempo (min)	1	1536	1536.3	0.86	0.361
Amplitud %*Tiempo (min)	1	6659	6658.7	3.71	0.062
Error	35	62805	1794.4		
Falta de ajuste	3	35861	11953.7	14.20	0.000
Error puro	32	26944	842.0		
Total	44	213679			

Anexo 20. Optimización de Múltiples Respuestas

Parámetros

Respuesta	Meta	Inferior	Objetivo	Superior	Ponderación
CAROTENOS TOTALES (mg B-CE/100g)	Máximo	56.6000	273.600		1
POLIFENOLES TOTALES (mg GAE/100)	Máximo	77.2775	99.529		1

Solución

Solución	Metanol %	Amplitud %	Tiempo (min)	CAROTENOS TOTALES (mg B-CE/100g) Ajuste	POLIFENOLES TOTALES (mg GAE/100) Ajuste	Deseabilidad compuesta
1	10	60	15	271.239	95.5003	0.900024

Predicción de respuesta múltiple

Variable	Valor de configuración
Metano %	10
Amplitud %	60
Tiempo (min)	15

Respuesta	Ajuste	EE de ajuste	IC de 95%	IP de 95%
CAROTENOS TOTALES (mg B-CE/100g)	271.2	11.9	(247.0; 295.5)	(228.3; 314.2)
POLIFENOLES TOTALES (mg GAE/100)	95.50	1.31	(92.83; 98.17)	(90.76; 100.24)