

UNIVERSIDAD NACIONAL DEL SANTA
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA AGROINDUSTRIAL



Aplicación de ultrasonido y su influencia en las propiedades físico-químicas, reológicas y funcionales de la pulpa de arándano (*Vaccinium myrtillus*)

Tesis para optar el título profesional de Ingeniero Agroindustrial

Autor:

Castillo Cerpa, Ghilbert Francisco
Código ORCID: 0009-0000-8154-0022

Asesor:

Dr. Castillo Martinez, Williams Esteward
Código ORCID: 0000-0001-6917-1009

Coasesor:

Ms. Gonzales Capcha, Jhon Kelby
Código ORCID: 0000-0001-7310-0502

Nuevo Chimbote – Perú
2026

**UNIVERSIDAD NACIONAL DEL SANTA
FACULTAD DE INGENIERIA
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERIA AGROINDUSTRIAL**



UNS
UNIVERSIDAD
NACIONAL DEL SANTA

CARTA DE CONFORMIDAD DEL ASESOR

Yo, **Dr. Williams Esteward Castillo Martínez**, mediante la presente certifico haber asesorado la tesis titulada: **"APLICACIÓN DE ULTRASONIDO Y SU INFLUENCIA EN LAS PROPIEDADES FÍSICO-QUÍMICAS, REOLÓGICAS Y FUNCIONALES DE LA PULPA DE ARÁNDANO (*Vaccinium myrtillus*)"**, presentada por el bachiller **Ghilbert Francisco Castillo Cerpa**, con código de alumno N.º **0202012031**.

La referida tesis ha sido revisada y desarrollada en cumplimiento del objetivo propuesto, reúne las condiciones formales y metodológicas correspondientes, y se encuentra enmarcada dentro de las áreas y líneas de investigación establecidas conforme al Reglamento General para obtener el Título Profesional en la Universidad Nacional del Santa, de acuerdo con la denominación siguiente:

Tesis para obtener el Título Profesional de Ingeniero Agroindustrial.

ASESOR

Dr. Williams Esteward Castillo Martínez

DNI 40169364

Código ORCID: 0000-0001-6917-1009

**UNIVERSIDAD NACIONAL DEL SANTA
FACULTAD DE INGENIERIA
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERIA AGROINDUSTRIAL**



UNS
UNIVERSIDAD
NACIONAL DEL SANTA

HOJA DE AVAL DEL JURADO EVALUADOR

El presente trabajo de tesis titulado "APLICACIÓN DE ULTRASONIDO Y SU INFLUENCIA EN LAS PROPIEDADES FÍSICO-QUÍMICAS, REOLÓGICAS Y FUNCIONALES DE LA PULPA DE ARÁNDANO (*Vaccinium myrtillus*)", para obtener el título profesional de Ingeniero Agroindustrial, presentado por el bachiller Ghilbert Francisco Castillo Cerpa, con código de alumno N.º 0202012031, quien tiene como asesor al Dr. Williams Esteward Castillo Martinez, designado mediante Resolución Decanal N.º 642-2024-UNS-FI, de fecha 14 de octubre de 2024.

Ha sido revisado y aprobado el día 26 de junio de 2026, por el siguiente jurado evaluador, designado mediante Resolución N.º 812-2025-UNS-CFI.

Revisado y aprobado por el Jurado Evaluador:

Dr. Jorge Marino Domínguez Castañeda
Presidente
Código ORCID: 0000-0003-0488-5726

Dra. Elza Berta Aguirre Vargas
Secretario
Código ORCID: 0000-0003-1659-9874

Dr. Williams Esteward Castillo Martinez
Integrante
Código ORCID: 0000-0001-6917-1009

ACTA DE SUSTENTACIÓN DE TESIS

Siendo las 11:00 horas del día veintiséis de junio del año dos mil veintiséis, se instalaron en el Pabellón Agroindustria, Aula Multimedia de la EPIA, el Jurado Evaluador, designado mediante T/Resolución N° 812-2025-UNS-CFI integrado por los docentes:

- **Dr. Jorge Marino Domínguez Castañeda** (Presidente)
- **Dra. Elza Berta Aguirre Vargas** (Secretario)
- **Dr. Williams Esteward Castillo Martínez** (Integrante)

Para dar inicio a la Sustentación del Informe Final de Tesis titulado: **APLICACIÓN DE ULTRASONIDO Y SU INFLUENCIA EN LAS PROPIEDADES FÍSICO-QUÍMICAS, REOLÓGICAS Y FUNCIONALES DE LA PULPA DE ARÁNDANO (*Vaccinium myrtillus*)**, elaborado por el Bachiller en Ingeniería Agroindustrial:

- **CASTILLO CERPA GHILBERT FRANCISCO**

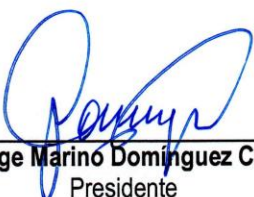
Asimismo, tienen como Asesor al docente: **Dr. Williams Esteward Castillo Martínez**

Finalizada la sustentación, las Tesisas respondieron las preguntas formuladas por los miembros del Jurado Evaluador. Acto seguido el Jurado después de deliberar sobre aspectos relacionados con el trabajo, contenido y sustentación del mismo, y con las sugerencias pertinentes en concordancia con el Artículo 107° del Reglamento de Grados y títulos de la Universidad Nacional del Santa, declaran:

NOMBRES Y APELLIDOS	NOTA VIGESIMAL	CONDICIÓN
GHILBERT FRANCISCO CASTILLO CERPA	<i>19</i>	<i>EXCELENTE</i>

Siendo las 12:30 horas del mismo día, se dio por terminada dicha sustentación, firmando en señal de conformidad el Jurado Evaluador.

Nuevo Chimbote, 26 de junio del 2026



Dr. Jorge Marino Domínguez Castañeda
Presidente



Dra. Elza Berta Aguirre Vargas
Secretario



Dr. Williams Esteward Castillo Martínez
Integrante



Recibo digital

Este recibo confirma que su trabajo ha sido recibido por **Turnitin**. A continuación podrá ver la información del recibo con respecto a su entrega.

La primera página de tus entregas se muestra abajo.

Autor de la entrega: Ghilbert Francisco CASTILLO CERPA
Título del ejercicio: Revision de Tesis y Proyectos 2026
Título de la entrega: CASTILLO CERPA GHILBERT FRANCISCO - FINAL LISTO.pdf
Nombre del archivo: CASTILLO_CERPA_GHILBERT_FRANCISCO_-_FINAL_LISTO.pdf
Tamaño del archivo: 2.15M
Total páginas: 124
Total de palabras: 25,997
Total de caracteres: 148,703
Fecha de entrega: 01-jul-2026 03:49p. m. (UTC-0500)
Identificador de la entrega: 2988390064

UNIVERSIDAD NACIONAL DEL SANTA
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA AGROINDUSTRIAL



Aplicación de ultrasonido y su influencia en las propiedades físico-químicas, reológicas y funcionales de la pulpa de arándano (*Vaccinium myrtillus*)

Tesis para optar el título profesional de Ingeniero Agroindustrial

Autor:

Castillo Cerpa, Ghilbert Francisco
Código ORCID: 0009-0009-8154-0022

Asesor:

Dr. Castillo Martínez, Williams Estuardo
Código ORCID: 0000-0001-6917-1009

Concesor:

Mrs. Gonzales Capcha, Ron Kelby
Código ORCID: 0000-0001-7310-0902

Nuevo Chimbote - Perú
2026

INFORME DE ORIGINALIDAD

8%

INDICE DE SIMILITUD

7%

FUENTES DE INTERNET

4%

PUBLICACIONES

4%

TRABAJS DEL ESTUDIANTE

FUENTES PRIMARIAS

1

repositorio.uns.edu.pe

Fuente de Internet

1%

2

Submitted to Universidad Nacional del Santa

Trabajo del estudiante

1%

3

repositorio.usm.cl

Fuente de Internet

<1%

4

repositorio.uss.edu.pe

Fuente de Internet

<1%

5

zagan.unizar.es

Fuente de Internet

<1%

6

cybertesis.unmsm.edu.pe

Fuente de Internet

<1%

7

Submitted to Universidad Cientifica del Sur

Trabajo del estudiante

<1%

8

repositorio.uta.edu.ec

Fuente de Internet

<1%

9

sedici.unlp.edu.ar

Fuente de Internet

<1%

10

ouci.dntb.gov.ua

Fuente de Internet

<1%

11

www.coursehero.com

Fuente de Internet

<1%

12

Submitted to Universidad Catolica de Avila

Trabajo del estudiante

<1%

13

repositorio.unisinucartagena.edu.co:8080

Fuente de Internet

<1%

14

Submitted to Universidad Andina del Cusco

Trabajo del estudiante

<1%

15

ctscafe.pe

Fuente de Internet

<1%

DEDICATORIA

Dedico este trabajo, con todo mi cariño y gratitud, a mis padres y hermano, por ser el pilar fundamental en cada etapa de mi vida. Su esfuerzo, paciencia y confianza incondicional me han motivado a seguir adelante incluso en los momentos más difíciles.

A mi familia, por su compañía constante, sus palabras de aliento y por enseñarme el valor del compromiso, la perseverancia y el amor por el conocimiento.

Dedico también esta tesis a Dios, por darme salud, sabiduría y fortaleza para culminar este importante logro. Sin su guía, nada de esto habría sido posible.

AGRADECIMIENTO

Quiero expresar mi más profundo agradecimiento a todas las personas que me apoyaron e impulsaron los cuales contribuyeron de alguna manera a la realización de esta tesis.

Agradezco sinceramente a mi asesor Williams Esteward Castillo Martinez y coasesor John Kelby Gonzales Capcha, por su orientación constante, sus valiosos comentarios y el tiempo dedicado al desarrollo de este trabajo. Su experiencia y exigencia académica fueron fundamentales para alcanzar los objetivos de esta investigación.

A los docentes de la Escuela Profesional de Ingeniería Agroindustrial, quienes a lo largo de mi formación profesional me brindaron conocimientos, inspiración y herramientas que me han permitido crecer tanto en el ámbito académico como personal.

A mis amigos Abigail Lezama y Jose Belisario, por su apoyo moral, colaboración en el laboratorio, y por compartir conmigo esta etapa de esfuerzo y aprendizaje. Su compañía hizo más llevadero el camino.

También agradezco al Ing. Lenin Adrianovich Palacios Ambrosio, por brindarme acceso a los equipos y facilitar el desarrollo experimental de este proyecto.

Finalmente, a todas aquellas personas que, de una u otra forma, aportaron con palabras de aliento, gestos de ayuda y apoyo silencioso. A todos ustedes, gracias por acompañarme en este camino.

Índice

RESUMEN.....	ix
ABSTRACT	x
I. INTRODUCCIÓN.....	1
II. MARCO TEÓRICO	5
2.1. Antecedentes	5
2.2. Marco Conceptual	9
2.2.1. Arándano	9
2.2.2. Pulpa de arándano	10
2.2.3. Ultrasonido aplicado en alimentos.....	11
a. Influencia en las propiedades reológicas.....	16
b. Influencia del ultrasonido en las propiedades físico-químicas de los alimentos	16
c. Influencia del ultrasonido en las propiedades funcionales de los alimentos.....	18
III. METODOLOGÍA	19
3.1. Método de Investigación	19
3.2. Estrategia del estudio.....	19
3.2.1. Tipo de investigación.....	19
3.2.2. Diseño de la investigación	19
3.3. Universo	21
3.3.1. Población.....	21
3.3.2. Muestra	21
3.3.3. Muestreo	21
3.3.4. Unidad de análisis	22
3.4. Diseño y características de la muestra	23
3.5. Técnicas e instrumentación de recolección de datos.....	23
3.5.1. Fichas de información bibliográfica	23
3.5.2. Técnicas.....	23

3.5.3. Instrumentos.....	34
3.5.4. Reactivos:	35
IV. RESULTADOS Y DISCUSIONES.....	36
4.1. Caracterización química – proximal de materia prima.	36
4.2. Caracterización fisicoquímica de la pulpa de arándano ultrasonificada	38
4.2.1. pH	38
4.2.2. °Brix.....	44
4.2.3. Acidez titulable	50
4.2.4. Densidad (g/cm ³).....	56
4.2.5. Índice de Madurez.....	62
4.3. Determinación de propiedades reológicas de la pulpa de arándano ultrasonificada.	69
4.3.1. Viscosidad	69
4.3.2. Comportamiento reológico de la pulpa de arándano.....	76
4.4. Actividad antioxidante de la pulpa de arándano ultrasonificada	87
V. CONCLUSIONES.....	94
VI. RECOMENDACIONES.....	95
VII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	96
VIII. ANEXOS.....	106

Índice de Figuras

Figura 1. Diagrama de Equipo de Ultrasonido.....	13
Figura 2. Efectos físico-químicos del ultrasonido.....	15
Figura 3. Diagrama de Flujo Experimental para la aplicación de ultrasonido en pulpa de arándano	24
Figura 4. Gráfica de interacción Tiempo – Frecuencia de pH	39
Figura 5. Gráfica de interacción Tiempo – Frecuencia de °Brix	45
Figura 6. Gráfica de interacción Tiempo – Frecuencia de Acidez (%).....	51
Figura 7. Gráfica de interacción Tiempo – Frecuencia de Densidad	57
Figura 8. Gráfica de interacción Tiempo – Frecuencia de Viscosidad	63
Figura 9. Gráfica de interacción Tiempo – Frecuencia de Viscosidad	70
Figura 10. Comportamiento reológico de la pulpa de arandano sonificado a 16 KHz en tiempos de 5, 10 y 15 minutos	78
Figura 11. Comportamiento reológico de la pulpa de arándano sonificado a 20 KHz en tiempos de 5, 10 y 15 minutos	79
Figura 12. Comportamiento reológico de la pulpa de arandano sonificado a 24 KHz en tiempos de 5, 10 y 15 minutos	80
Figura 13. Gráfica de interacciones de la actividad antioxidante.....	88

Índice de Tablas

Tabla 1. Composición químico proximal del arándano (100 g)	10
Tabla 2. Niveles de las variables independientes	19
Tabla 3. Representación del diseño experimental	21
Tabla 4. Matriz Experimental	23
Tabla 5. Composición químico - proximal de la pulpa de arándano en 100 gramos	36
Tabla 6. Valores de pH de la pulpa de arándano ultrasonificada.....	38
Tabla 7. Análisis estadístico del pH mediante ANOVA	40
Tabla 8. Valores de °Brix de la pulpa de arándano ultrasonificada.....	44
Tabla 9. Análisis estadístico de °Brix mediante ANOVA.....	46
Tabla 10. Valores de Acidez Titulable de la pulpa de arándano ultrasonificada	50
Tabla 11. Análisis estadístico de Acidez Titulable mediante ANOVA.....	52
Tabla 12. Valores de Densidad de la pulpa de arándano ultrasonificada.....	56
Tabla 13. Análisis estadístico de Densidad mediante ANOVA	58
Tabla 14. Valores de Índice de Madurez de la pulpa de arándano ultrasonificada	62
Tabla 15. Análisis estadístico de índice de madurez mediante ANOVA	64
Tabla 16. Valores de Viscosidad de la pulpa de arándano ultrasonificada	69
Tabla 17. Análisis estadístico de Viscosidad mediante ANOVA.....	71
Tabla 18. Comparaciones por parejas de Tukey para la Viscosidad: Frecuencia - Tiempo.....	72
Tabla 19. Resultados del esfuerzo cortante de la pulpa de arándano sometida a diferentes tratamientos ultrasónicos	76
Tabla 20. Parámetros del modelo de Ley de Potencia de la pulpa de arándano sometida a tratamiento ultrasónico.....	82
Tabla 21. Valores de la Actividad Antioxidante de la pulpa de arándano sonificada	87
Tabla 22. Análisis estadístico de Actividad Antioxidante mediante ANOVA	89
Tabla 23. Comparaciones por parejas de Tukey para la Actividad Antioxidante: Frecuencia - Tiempo	90

Anexos

Anexo 1. Muestra de arándano en la cocinilla.....	106
Anexo 2. Muestra puesta en la mufla.....	106
Anexo 3. Preparación de muestra para Soxleth	107
Anexo 4. Colocación de muestra en el equipo.....	107
Anexo 5. Etapa de digestibilidad	108
Anexo 6. Equipo Kjeldahl	108
Anexo 7. Peso del arandano.....	109
Anexo 8. Despulpado del arandano	109
Anexo 9. Configuración del equipo de ultrasonido	110
Anexo 10. Tratamiento de pulpa de arándano por ultrasonido.....	110
Anexo 11. Medición de pH de la pulpa sonificada.....	110
Anexo 12. Resultado de la medición de acidez	111
Anexo 13. Medición de densidad	111
Anexo 14. Colocación la muestra de pulpa de arándano en el reómetro.....	112
Anexo 15. Programación de los parámetros del equipo reómetro	112
Anexo 16. Certificado de prueba de Actividad Antioxidante.....	113
Anexo 17. Tabla de operacionalización de variables.....	114

RESUMEN

La presente investigación tuvo como objetivo evaluar el efecto del ultrasonido sobre las propiedades fisicoquímicas, reológicas y funcionales de la pulpa de arándano (*Vaccinium myrtillus*). Se empleó un diseño factorial 3×3 con frecuencias ultrasónicas de 16, 20 y 24 kHz y tiempos de tratamiento de 5, 10 y 15 min. Se analizaron las propiedades fisicoquímicas (pH, sólidos solubles, acidez titulable y densidad), las propiedades reológicas (viscosidad, índice de consistencia e índice de comportamiento de flujo) y la actividad antioxidante mediante el método DPPH. Los resultados mostraron que la frecuencia ultrasónica, el tiempo de tratamiento y su interacción no ejercieron una influencia significativa sobre las propiedades fisicoquímicas de la pulpa. En contraste, las propiedades reológicas y la actividad antioxidante fueron influenciadas significativamente por los factores evaluados. La viscosidad disminuyó conforme aumentaron la frecuencia y el tiempo de sonicación, mientras que la actividad antioxidante alcanzó su mayor valor en el tratamiento de 20 kHz durante 10 min (5.186 μmol Trolox/mL). Se concluyó que la aplicación de ultrasonido modificó las propiedades reológicas y funcionales de la pulpa de arándano sin alterar significativamente sus propiedades fisicoquímicas.

Palabras clave: Ultrasonido, pulpa de arándano, propiedades físico-químicas, reología, actividad antioxidante.

ABSTRACT

This research aimed to evaluate the effect of ultrasound on the physicochemical, rheological, and functional properties of blueberry (*Vaccinium myrtillus*) pulp. A 3×3 factorial design was used with ultrasonic frequencies of 16, 20, and 24 kHz and treatment times of 5, 10, and 15 min. Physicochemical properties (pH, soluble solids, titratable acidity, and density), rheological properties (viscosity, consistency index, and flow behavior index), and antioxidant activity were analyzed using the DPPH method. The results showed that ultrasonic frequency, treatment time, and their interaction did not significantly influence the physicochemical properties of the pulp. In contrast, rheological properties and antioxidant activity were significantly influenced by the evaluated factors. Viscosity decreased as sonication frequency and time increased, while antioxidant activity reached its highest value in the 20 kHz treatment for 10 min (5.186 µmol Trolox/mL). It was concluded that the application of ultrasound modified the rheological and functional properties of the blueberry pulp without significantly altering its physicochemical properties.

Keywords: Ultrasound, blueberry pulp, physicochemical properties, rheology, antioxidant activity.

I. INTRODUCCIÓN

El arándano (*Vaccinium myrtillus*), fruto ampliamente valorado por su alto contenido de compuestos bioactivos como antocianinas, pectina y otros polifenoles, presenta un comportamiento particular durante su procesamiento. Al ser triturado para la elaboración de jugos o pulpas, tiende a gelificarse de forma espontánea debido a su alto contenido de pectina, lo cual dificulta las operaciones industriales como el despulpado y la filtración.

Para evitar esta gelificación, comúnmente se aplica un escaldado térmico previo que, si bien mejora la fluidez del producto, genera una degradación significativa de la pectina y de las antocianinas, pigmentos naturales sensibles al calor y al oxígeno, afectando negativamente el color, la capacidad antioxidante y el valor nutricional del producto final (Liu et al., 2020; Zhang et al., 2022; Wu et al., 2024).

Este problema evidencia una contradicción crítica: por un lado, es necesario modificar la estructura de la pectina para evitar la gelificación indeseada durante el procesamiento, pero, por otro lado, las técnicas térmicas utilizadas para lograrlo comprometen la integridad de los compuestos funcionales y sensoriales que hacen del arándano un fruto altamente valorado desde el punto de vista nutricional y comercial (Hotchkiss Jr et al., 2021; Ge et al., 2025). Además, investigaciones recientes han mostrado que las antocianinas pueden estar unidas a la pectina en la pared celular del arándano, por lo que cualquier modificación térmica de esta estructura puede afectar la estabilidad de ambos compuestos simultáneamente (Koh et al., 2020; Wu et al., 2021). Frente a este desafío, surge la necesidad de investigar nuevas tecnologías de procesamiento que eviten el uso de altas temperaturas y permitan mantener o incluso mejorar la calidad fisicoquímica, reológica y funcional del producto. En este contexto, el ultrasonido se presenta como una tecnología no térmica prometedora. Diversos

estudios han demostrado que el ultrasonido puede modificar las propiedades estructurales de las pectinas, mejorar la extracción de compuestos fenólicos y preservar pigmentos termolábiles como las antocianinas, sin comprometer la calidad sensorial del producto. Sin embargo, aún existe una brecha en el conocimiento respecto a cómo esta tecnología afecta integralmente la pulpa de arándano (Ma et al., 2026), especialmente en términos de sus propiedades fisicoquímicas, reológicas y funcionales.

Por ello se plantea el siguiente problema de investigación:

¿Cuál es el efecto de la aplicación de ultrasonido sobre las propiedades fisicoquímicas (pH, acidez, °Brix y densidad), las propiedades reológicas (viscosidad, ¿índice de consistencia e índice de comportamiento de flujo) y la actividad antioxidante (propiedad funcional) de la pulpa de arándano?

En base al problema planteado, se plantearon cuatro objetivos orientados a cubrir cada etapa del estudio: en primer lugar, realizar la caracterización químico-proximal de la pulpa antes del tratamiento ultrasónico; posteriormente, determinar el efecto del tiempo de exposición y de la frecuencia ultrasónica sobre las propiedades físico-químicas de la pulpa tras la sonicación; además, analizar el comportamiento reológico de la pulpa procesada con el fin de identificar posibles cambios en la viscosidad y en el índice de flujo; y finalmente, evaluar la capacidad antioxidante de la pulpa sometida al tratamiento ultrasónico. Estos objetivos permitieron abordar integralmente la incidencia del ultrasonido en la calidad y funcionalidad del producto estudiado.

Bajo este enfoque, se plantea la siguiente hipótesis: La aplicación de ultrasonido en la pulpa de arándano (*Vaccinium myrtillus*) modifica significativamente sus propiedades fisicoquímicas (pH, acidez, °Brix y densidad), las propiedades reológicas (viscosidad, índice de consistencia e índice de comportamiento de flujo) y la actividad antioxidante (propiedad funcional).

Esta investigación se realiza con el motivo de conocer y aprovechar la tecnología de ultrasonido en el procesamiento de la pulpa de arándano, la cual a su vez se justifica en el hecho de ser una solución innovadora para mejorar la calidad de este producto sin comprometer sus propiedades nutricionales y sensoriales. Estudios como los de Zhou et al. (2024) y Pandiselvam et al. (2023) han demostrado que el ultrasonido, al ser una tecnología no térmica, preserva compuestos bioactivos clave, como las antocianinas, mejora la textura y la capacidad antioxidante, lo que es crucial para un fruto como el arándano, cuyos compuestos se degradan fácilmente con métodos térmicos convencionales.

El ultrasonido está considerado como una tecnología novedosa, no térmica la cual ofrece alternativas saludables, ecológicas y seguras a comparación de métodos convencionales como es el caso del escaldado u otros procesos térmicos como el escaldado, los cuales pueden alterar el valor nutricional y la textura de alimentos termosensibles (Zang et al., 2023; Singla y Sit, 2021).

La tecnología de ultrasonido se ha demostrado que tiene efectos positivos en cuanto a la preservación de biocompuestos como son las antocianinas y la pectina que es parte de la fibra dietética, afectando tanto la mejora de propiedades nutricionales y fisicoquímicas, así como las propiedades reológicas del arándano de forma positiva, a comparación de los métodos convencionales de procesos térmicos, a sí mismo en la industria alimentaria los complejos de antocianina y pectina ofrecen diversos beneficios tecnológicos en los alimentos así como para la salud (Koh et al., 2020; Liu et al., 2020; Wu et al., 2021).

Asimismo, desde una perspectiva de salud pública, el consumo de productos derivados del arándano está asociado con la prevención de enfermedades cardiovasculares y neurodegenerativas, por lo que el uso de ultrasonido no solo permite preservar estas

propiedades beneficiosas, sino que también asegura que lleguen al consumidor en su máxima calidad (Olmedo et al., 2025).

La importancia de esta investigación se basa en la contribución al avance del conocimiento científico en el campo de la tecnología alimentaria, generando nuevos estudios sobre los efectos del ultrasonido en las propiedades físico-químicas, reológicas y funcional de productos sensibles al calor como el arándano, lo que podría aplicarse a otras frutas y alimentos con características similares, mejorando así la oferta de productos saludables y funcionales en el mercado. De igual manera este nuevo conocimiento se espera que ayude específicamente a la industria agrícola de frutas y hortalizas; principalmente de las empresas productoras de néctares o pulpas de frutas, siendo que esta nueva tecnología se está utilizando cada vez más en diversos productos como jugos de kiwi, guayaba, naranja, zamahoria y mezclas de diversas frutas (Yıkmış, 2024).

II. MARCO TEÓRICO

2.1. Antecedentes

Yildiz y Aadil (2020), evaluaron el efecto del tratamiento térmico HTST (High Temperature, Short Time) y del ultrasonido sobre la estabilidad fisicoquímica y funcional del jugo de fresa durante el almacenamiento. La metodología empleada consistió en someter las muestras a un tratamiento HTST de 72 °C durante 15 s y a tratamientos ultrasónicos a una frecuencia de 20 kHz y 100 % de amplitud durante 5, 10 y 15 minutos. Posteriormente, las muestras fueron almacenadas durante 14 días y analizadas en función de parámetros de color, contenido de fenoles totales, capacidad antioxidante, ácido ascórbico y carga microbiana. Los resultados evidenciaron que el incremento del tiempo de sonicación produjo un aumento significativo en el contenido de compuestos fenólicos, capacidad antioxidante y ácido ascórbico, destacando el tratamiento de 15 minutos como el más efectivo. Asimismo, los jugos tratados con ultrasonido presentaron mayores valores de luminosidad en comparación con el tratamiento térmico HTST (). Los autores concluyeron que el ultrasonido constituye una tecnología no térmica eficiente para preservar y mejorar la calidad fitoquímica y funcional del jugo de fresa durante el almacenamiento.

Chen et al. (2020), investigaron los efectos del ultrasonido de alta potencia (20 kHz, 242–968 W/cm², 2 – 16 min, 0 – 45 °C) en las propiedades reológicas de la pulpa de fresa, encontrando que este tratamiento incrementó la viscosidad aparente, el módulo de almacenamiento (G') y el módulo de pérdida (G''). Se observó una reducción significativa en el grado de esterificación, el peso molecular y el tamaño de partícula de la pectina soluble en agua (WSP), aunque no hubo cambios en el contenido de ácido galacturónico y el potencial zeta, a pesar de la reducción

máxima del 22.6% en la actividad de la pectina metilesterasa (PME) tras el tratamiento, esta enzima mostró resistencia al HPU, además el ultrasonido también disminuyó el contenido de Ca^{2+} libre en un 52.01%, lo que favoreció la formación de una red de pectina poco metilada y Ca^{2+} , responsable del aumento en la viscosidad del sistema.

Trusińska et al. (2022), evaluaron cómo el tratamiento con ultrasonido influye en las propiedades fisicoquímicas de rodajas de manzana sometidas a impregnación al vacío. Para ello, se aplicaron frecuencias ultrasónicas de 25 y 45 kHz durante diferentes tiempos (10, 20 y 30 minutos) antes del proceso de impregnación. Los resultados demostraron que el ultrasonido no solo mejoró la eficiencia del proceso, sino que también ayudó a preservar mejor los compuestos bioactivos de la fruta, como la vitamina C y los compuestos fenólicos totales, en comparación con las muestras que no recibieron este pretratamiento. En particular, el uso de 45 kHz por 20 o 30 minutos permitió mantener los niveles de vitamina C y reducir en menor medida los compuestos fenólicos. Estos hallazgos respaldan el uso del ultrasonido como una herramienta útil en el procesamiento de frutas, siempre que se seleccionen adecuadamente los parámetros de operación, ya que puede mejorar la calidad del producto final sin alterar negativamente sus propiedades.

Guanwen Suo et al. (2022), evaluaron el efecto del tratamiento ultrasónico sobre las propiedades fisicoquímicas, reológicas y antioxidantes del jugo de calabaza (*Cucurbita moschata* D.) durante el almacenamiento. La metodología consistió en someter el jugo fresco a ultrasonido a una frecuencia de 25 kHz durante 10 minutos, utilizando diferentes niveles de potencia (200, 400 y 600 W), y almacenar las muestras a 4 °C por 12 días. Los resultados mostraron que el tratamiento ultrasónico a 400 W/10 min permitió preservar mejor las propiedades

fisicoquímicas y compuestos bioactivos del jugo durante el almacenamiento. Asimismo, el ultrasonido produjo cambios significativos en las propiedades reológicas, disminuyendo el esfuerzo cortante y la viscosidad aparente del jugo, especialmente en los tratamientos de 400 y 600 W. Los autores atribuyeron esta reducción de viscosidad a la fragmentación de estructuras poliméricas como la pectina debido al efecto de cavitación ultrasónica. Además, el tratamiento contribuyó a preservar compuestos bioactivos y la actividad antioxidante, destacando el potencial del ultrasonido para mejorar la estabilidad y calidad funcional del jugo de calabaza.

Tan et al. (2023), Evaluaron el efecto del ultrasonido sobre las propiedades fisicoquímicas y funcionales del jugo de pitahaya roja, aplicando un pretratamiento ultrasónico a 600 W y 37 kHz durante 20, 40 y 60 minutos antes de la extracción del jugo. Los resultados mostraron que el ultrasonido incrementó significativamente los compuestos fenólicos, antocianinas y la capacidad antioxidante, especialmente a los 60 minutos, sin alterar el pH, la acidez titulable ni los sólidos solubles totales. Los autores concluyeron que el pretratamiento ultrasónico mejora la calidad funcional y antioxidante del jugo de pitahaya roja.

Sousa et al. (2025), evaluaron el efecto del ultrasonido de alta intensidad (20 kHz, 160–640 W, 3 min) en la pulpa de arándano utilizada para enriquecer yogur tipo skyr, analizando propiedades fisicoquímicas, reológicas y funcionales del producto final. Los resultados mostraron que el tratamiento con ultrasonido, especialmente a potencias intermedias (320 y 480 W), mejoró la retención de agua y la consistencia del yogur, incrementando la viscosidad y reduciendo la sinéresis en comparación con la pasteurización convencional; asimismo, se evidenció una mayor preservación de compuestos bioactivos como fenoles y antocianinas,

destacando que a 640 W se logró una mejor retención de antocianinas monoméricas; además, el skyr enriquecido con pulpa tratada por ultrasonido presentó una capacidad antioxidante hasta un 129% mayor, así como perfiles de compuestos volátiles comparables a los obtenidos por pasteurización, lo que indica que el ultrasonido no solo mejora la estabilidad y calidad sensorial del producto, sino que también permite optimizar la funcionalidad dependiendo de las condiciones de procesamiento.

Mulweli et al. (2026), evaluaron el efecto de tratamientos térmicos y no térmicos sobre la calidad del jugo de marula (*Sclerocarya birrea*). La metodología consistió en dividir las frutas en cuatro lotes: escaldado, cocción al vapor, ultrasonido (20 kHz, 5 W, 5 min a 25 °C) y control sin tratamiento. Posteriormente, se analizaron el rendimiento del jugo, las propiedades fisicoquímicas, el contenido mineral y la actividad antioxidante, los resultados mostraron que el tratamiento ultrasónico incrementó significativamente el rendimiento de extracción del jugo (22,81 %) respecto al control (17,50 %), además de mejorar el contenido de vitamina C, compuestos fenólicos y capacidad antioxidante; concluyendo que, la sonicación es una tecnología eficiente para optimizar la extracción y preservar la calidad nutricional y funcional del jugo de marula.

2.2. Marco Conceptual

2.2.1. Arándano

El arándano es uno de los frutos más saludables en el mundo, lo cual ha despertado gran interés en cuanto a sus propiedades como un prebiótico fitogénico, esto sumado a su delicioso sabor y diversos nutrientes bioactivos como ácidos orgánicos, fenólicos, minerales y vitaminas, además de sus propiedades terapéuticas como antioxidantes, antiinflamatorias, anticancerígenas y neuro protectoras, convierten al arándano en un fruto atractivo (Duan et al., 2024; Ktenioudaki et al., 2021; Rashidinejad, 2020). El consumo de arándano posee efectos beneficiosos en cuanto a la salud cardiovascular, evitando la disfunción endotelial y endurecimiento arterial, al mejorar el óxido nítrico, estrés oxidativo y actividad antiinflamatoria (Woolf et al., 2023; Pico et al., 2022; Ntemiri et al., 2020).

El arándano es conocido por su alto contenido de compuestos antioxidantes, lo que le confiere propiedades que pueden promover la salud, asimismo la abundancia de fitoquímicos en el arándano podría tener efectos beneficiosos en la salud intestinal al modular el microbiota intestinal, el arándano es una fuente significativa de carbohidratos, que representan el 9,7% de su peso, proporcionando energía esencial para la fermentación microbiana en el intestino distal (Kalt et al., 2020).

Tabla 1.*Composición químico proximal del arándano (100 g)*

Componente	Cuantificación
Energía (KJ)	192
Humedad (%)	84
Hidratos de carbono (%)	9.7
Proteínas (%)	0.6
Grasas (%)	0.4
Ceniza (%)	0.2
Fibra (%)	3 – 3.5
Ácido Ascórbico (mg)	10 – 15

Nota. Tomado de Rashidinejad (2020), “Nutritional Composition and Antioxidant Properties of Fruits and Vegetables”

2.2.2. Pulpa de arándano

Los arándanos frescos a pesar de seguir siendo el mercado principal conllevan un enorme problema de disponibilidad como consecuencia de su estacionalidad y tiempo de almacenamiento limitado, sumado a su alta tasa de deterioro, por lo cual elaborar productos como mermeladas o su preservación mediante el jugo representan formas viables de consumir esta fruta (Jaouhari et al., 2024; Silva et al., 2020).

La cadena de procesamiento del arándano produce grandes cantidades de orujo que incluye pulpa, piel y semillas, las cuales son ricas en nutrientes y compuestos bioactivos con potencial de uso en varios sectores industriales, por lo cual los residuos de arándano han sido objeto de numerosos estudios debido a su elevado contenido de antioxidantes

naturales y fibra dietética (Bas-Bellver et al., 2020; Dermengiu et al., 2022).

La pulpa contiene aproximadamente solo el 10% de compuestos fenólicos totales, mientras que la piel y semillas contienen entre el 28 y 35% y el 60 y 70%, lo cual promueve la producción de subproductos de arándanos (Piechowiak et al., 2021).

Los compuestos principales en la pulpa de arándano son las antocianinas, siendo que este fruto posee aproximadamente 20 de las antocianinas conocidas, aunque la mayoría de variedades de este fruto poseen en sus perfiles de antocianinas peonidina, delfidinina, cianidina, petuniadina y maldivina, los cuales son compuestos termolábiles y altamente reactivos con el oxígeno por ser antioxidantes naturales, así como su propiedad de conferir color a la pulpa, por lo cual un gran inconveniente en la industria alimentaria son los procesos térmicos como la pasteurización, los cuales afectan negativamente en el color y por ende las antocianinas presentes en la pulpa (Zhang et al., 2024; Khosravi et al., 2020).

2.2.3. Ultrasonido aplicado en alimentos

La tecnología de ultrasonido se considera no térmica, siendo esta característica la que ha llamado la atención de la industria alimentaria, el procesamiento ultrasónico reduce los tiempos de procesamiento, costos operativos, mayor ahorro energético, exige un menor esfuerzo y ofrece un mayor rendimiento a comparación con las tecnologías industriales convencionales, además de mejorar la calidad y vida de anaquel de los productos alimentarios (Nonglait et al., 2022; Chavan et al., 2022).

Debido a estos beneficios el ultrasonido es considerado como una técnica verde, convirtiéndose así en una tecnología necesaria sus aplicaciones en cuanto al campo de la biomedicina y alimentaria han demostrado ser eficientes (Cloutier et al., 2022); puesto que los métodos extractivos o de procesamiento como son el Soxhlet, destilación por arrastre de vapor, extracción de disolventes, procesamientos térmicos de alta intensidad o a alta presión, requieren de un elevado gasto energético y tiempo, además de dar como resultados una baja tasa de separación, por lo cual el ultrasonido destaca por ser un método extractivo y de procesamiento eficiente y respetuoso con el medio ambiente (Hernández-Hernández et al., 2024).

El ultrasonido en el campo alimentario tiene diversos usos como acelerar la tasa de transferencia de masa, mejorar la textura, y el valor nutricional (Zhou et al., 2024). Esta técnica se basa en el resultado de las ondas mecánicas que resuenan con sólidos, líquidos y gases, el cual es catalogada como una tecnología no térmica (Pandiselvam et al., 2023).

El ultrasonido es por ende una onda sonora que supera el rango de frecuencias del oído humano, convirtiendo la energía eléctrica del instrumento en energía de vibración (mecánica), haciéndola óptima para la penetración de materiales, produciendo efectos térmicos, químicos, mecánicos y de cavitación, la cantidad de calor producida depende de la intensidad del ultrasonido, su duración y absorción del medio (Qiu et al., 2020).

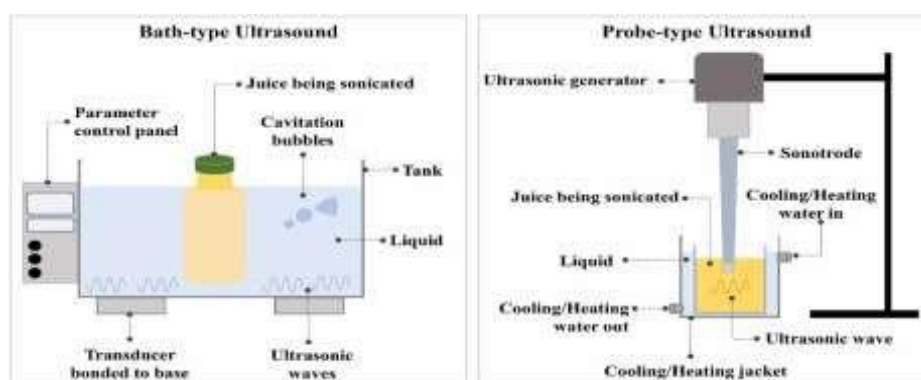
El sistema de ultrasonido por lo general cuenta con tres partes principales un generador, transductor y emisor, la función del generador es convertir

la señal eléctrica en una frecuencia determinada, el transductor permite transformar la señal eléctrica de alta frecuencia en perturbaciones mecánicas (vibraciones) y finalmente el emisor permite irradiar estas perturbaciones (Mehta et al., 2022). El funcionamiento del equipo se fundamenta por ende en la producción y emisión de ondas de sonido a alta intensidad y frecuencia, por lo general a baja potencia 1 W/cm^2 (100 kHz o más) y alta potencia (mayores a 1 W/cm^2) lo cual ocupa el rango de frecuencias desde 20 a 100 kHz (More et al., 2022).

Como se puede apreciar en la siguiente Figura 1, el cual muestra un diagrama comparativo de dos configuraciones empleadas en el procesamiento de jugos mediante tecnología de ultrasonido: el ultrasonido tipo baño y el ultrasonido tipo sonda. Esta tecnología emergente se ha consolidado como una alternativa no térmica para mejorar la calidad nutricional y funcional de alimentos líquidos, aprovechando la cavitación acústica generada por ondas ultrasónicas para inducir cambios fisicoquímicos en los productos tratados.

Figura 1.

Diagrama de Equipo de Ultrasonido



Nota. Tomado de Lepaus et al. (2023), “Impact of ultrasound processing on the nutritional components of fruit and vegetable juices”

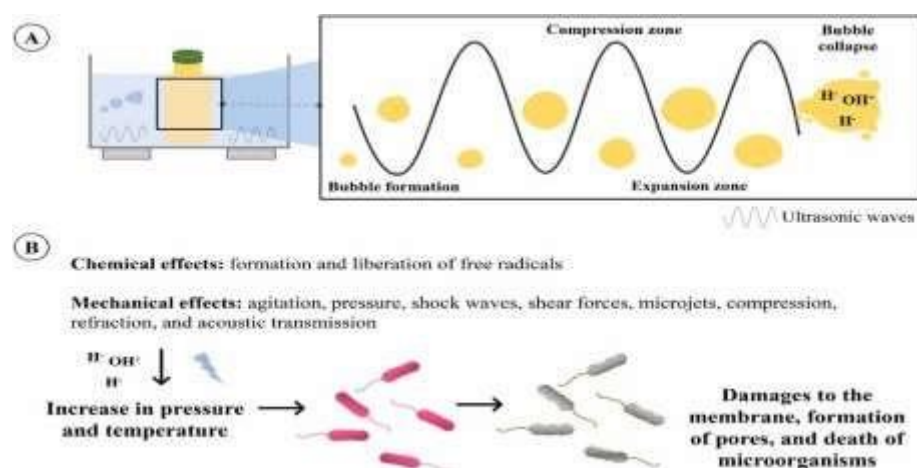
Como se observa en la Figura 1, el sistema de ultrasonido tipo baño funciona mediante la inmersión del recipiente con jugo en un tanque lleno de líquido, donde un transductor emite ondas ultrasónicas que generan cavitación de manera indirecta; este método ofrece una aplicación más homogénea pero menos intensa. En contraste, el sistema tipo sonda emplea un sonotrodo que se introduce directamente en el jugo, transmitiendo ondas ultrasónicas de forma directa y localizada, lo que genera una cavitación más intensa, pero requiere mayor control térmico mediante una chaqueta de enfriamiento o calentamiento. Ambos sistemas permiten modificar las propiedades del jugo, pero difieren en eficiencia energética, intensidad de tratamiento y aplicabilidad según la escala de producción.

Además, existe la generación de calor de alrededor de 5500 °C y una presión de 50 MPa sobre ciertos puntos especificados, generalmente denominados como puntos calientes, esto surge como consecuencia de los choques inducidos por el colapso de las burbujas generadas por las ondas ultrasónicas, lo cual provoca la formación de radicales libres como H^+ y OH^- , los cuales se transportan en las burbujas y son liberadas al colapsar (Bermudez-Aguirre y Niemira, 2022), otros fenómenos físico-químicos causados por esta tecnología suelen ser oscilaciones, fuerzas de corte, micro chorros, compresión, expansión y transmisión acústica, los cuales afectan beneficiosamente el tiempo de procesamiento, además de la inactivación enzimática, microbiológica y estabilidad de los compuestos alimenticios durante el almacenamiento, preservando así sus propiedades nutricionales (Bernardi et al., 2021)

La Figura 2 ilustra los efectos físico-químicos generados por el tratamiento con ultrasonido, centrándose en el proceso de cavitación acústica y su impacto sobre los microorganismos presentes en líquidos como los jugos. Esta tecnología, considerada una alternativa no térmica, aprovecha las ondas ultrasónicas para inducir fenómenos que pueden modificar la estructura celular y promover la inactivación microbiana sin comprometer significativamente la calidad nutricional del producto.

Figura 2.

Efectos físico-químicos del ultrasonido



Nota. Tomado de Lepaus et al. (2023), "Impact of ultrasound processing on the nutritional components of fruit and vegetable juices", (A): Proceso de cavitación, (B): Inactivación microbiológica debido a efectos químico-mecánicos.

En la parte (A), se representa la formación, expansión y colapso de burbujas inducidas por ondas ultrasónicas, fenómeno conocido como cavitación. Este proceso genera zonas de compresión y expansión que culminan en el colapso violento de las burbujas, liberando radicales libres como $H^{\bullet}$ y $OH^{\bullet}$. En la parte (B), se detalla cómo estos efectos químicos, junto con efectos mecánicos como la presión, ondas de choque

y fuerzas de corte, provocan un aumento localizado de presión y temperatura, lo que daña las membranas celulares, genera poros y lleva a la muerte de los microorganismos. Esto resalta el potencial del ultrasonido como método eficaz de higienización sin recurrir a tratamientos térmicos intensivos.

a. Influencia en las propiedades reológicas

Los tratamientos ultrasónicos tienen mejoras en cuantos a las pulpas de frutas en cuanto a la preservación de compuestos bioactivos, capacidad antioxidante y color (Fernandes de Araújo et al., 2021). Las propiedades reológicas de las pulpas de frutas están íntimamente relacionadas con el tipo de procesamiento, así como la composición estructural del fruto, lo cual incluye parámetros como pH, fuerza iónica y pectina soluble, en cuanto al tratamiento ultrasónico se ha comprobado que existe un efecto en cuanto a las propiedades reológicas como consecuencia de las modificaciones en la estructura de las matrices alimentarias, las cuales variaron desde sustancias moleculares intracelulares hasta grandes fragmentos celulares, lo que provoca cambios en las propiedades reológicas de la suspensión. (Carvalho et al., 2024; Liu et al., 2024)

b. Influencia del ultrasonido en las propiedades físico-químicas de los alimentos

El ultrasonido en cuanto a su influencia sobre las propiedades físico-químicas como son sólidos solubles totales (SST), pH, acidez titulable, no las afecta significativamente, sin embargo en cuanto a otras propiedades como son el color se ven afectadas por su relación

que existe entre la actividad antioxidante y el aumento de compuestos bioactivos, además de ofrecer una mayor solidez en cuanto a la mezcla de jugos o pulpas, lo cual indica que el tratamiento ultrasónico representa una tecnología útil y viable, puesto que aumenta la estabilidad, a la par que preserva las propiedades bioactivas y de calidad de los productos alimenticios (Zhang et al., 2024).

Sin embargo, se ha demostrado que el tratamiento ultrasónico tiene efectos sobre otras propiedades físico-químicas como son el aumento de tamaño de partículas de pectina, lo cual disminuye la viscosidad aparente de los cítricos, además esta pectina modificada influye en la eliminación de radicales DPPH (2,2-difenil-1-picrilhidrazilo), además de obtener partículas mucho más uniformes y con formas de cadena semiflexibles (Du et al., 2022).

A sí mismo, tiene efectos en cuanto a las propiedades físicas, estructurales y funcionales de los alimentos, como son la reducción de tamaño, reología y conductividad eléctrica, siendo que estos cambios se deben debido a la hidrofobicidad, solubilidad y emulsión que se genera por parte de la modificación de las proteínas vegetales, debido a que el fenómeno de cavitación causa cambios que afectan en la calidad nutricional, física y estructural, como consecuencia del cizallamiento producido (Rahman y Lamsal, 2021; Rivera-Tobar et al., 2025).

c. Influencia del ultrasonido en las propiedades funcionales de los alimentos

La baja tasa de disolución de nutrientes durante exprimidos mecánicos y la alta tasa de degeneración de compuestos bioactivos, como consecuencia de los tratamientos térmicos, son los desafíos que enfrentan los procesos tradicionales de despulpado (Liu et al., 2023), por lo cual los tratamientos ultrasónicos se han vuelto una excelente opción debido a su procesamiento físico no térmico, el cual mantiene el sabor, frescura y nutrientes de la materia prima a un costo energético bajo (Kavindya et al., 2026), además de ser una opción viable para el aumentar el contenido de compuestos bioactivos como polisacáridos, proteínas, polifenoles y la actividad antioxidante en los jugos de frutas mejorando así al calidad del producto (Wang et al., 2020; Umair et al., 2025).

El efecto del ultrasonido en las pulpas de frutas y verduras tiene un efecto significativo en cuanto al aumento en el contenido de compuestos bioactivos, así como en su calidad sensorial y aceptabilidad, debido al efecto mecánico y químico que provoca el tratamiento ultrasónico en las estructuras de los alimentos, siendo un método prometedor para extraer y procesar productos alimenticios altamente sensibles o con una alta tasa de degradación en cuanto a sus propiedades funcionales (Lepaus et al., 2023; Tovar-Pérez et al., 2020).

III. METODOLOGÍA

3.1. Método de Investigación

El presente proyecto utilizará el método de investigación experimental y aplicada, debido a los parámetros controlados de Frecuencia Ultrasónica y Tiempo, para evaluar su efecto en las propiedades de la pulpa de arándano.

Tabla 2.

Niveles de las variables independientes

Variables Independientes	Niveles		
Tiempo (min)	5 min	10 min	15 min
Frecuencia Ultrasónica (kHz)	16 kHz	20 kHz	24 kHz

Nota. Se muestran los niveles establecidos para las variables independientes del estudio.

3.2. Estrategia del estudio

3.2.1. Tipo de investigación.

Este estudio es de tipo aplicado, ya que involucra la aplicación de un tratamiento de ultrasonido en la pulpa de arándano y la medición de sus efectos sobre ciertas propiedades. Se utilizarán diversas combinaciones de frecuencia ultrasónica y tiempo de tratamiento para observar cómo cada variable y su interacción influyen en las propiedades finales de la pulpa.

3.2.2. Diseño de la investigación

Este estudio sigue un enfoque cuantitativo experimental puro debido a la alteración de la pulpa de arándano por medio de ultrasonido controlando y cuantificando las variables: tiempo de ultrasonificación y la frecuencia ultrasónica, con el objetivo de entender cómo afectan dichos parámetros las propiedades de la pulpa de arándano. Para ello, se utilizará un diseño

factorial 3x3, ANOVA y prueba de comparación múltiple de tukey, lo que nos permitirá analizar tanto los efectos individuales como la interacción entre los tratamientos.

A lo largo del proceso, mediremos variables como el pH, los °Brix, la acidez titulable, la densidad, el índice de fluidez, el esfuerzo cortante, la velocidad de deformación y la actividad antioxidante.

- Obtención de la pulpa de arándano.
- El arándano será seleccionado por estado de deterioro y posteriormente lavado y desinfectado con 50 ppm de NaClO por 5 minutos, para después pelar, cortar y pulpear el arándano.
- Se realizará un análisis químico – proximal de la pulpa de arándano seleccionada.
- Las muestras se estandarizarán de 200 mL, para someter al proceso de ultrasonificación a diferentes frecuencias y tiempos.
- Se obtendrá pulpa de arándano ultrasonificado de la cual resultarán 18 tratamientos, para el diseño factorial.
- Se analizará las propiedades fisicoquímicas como pH, °Brix, acidez titulable y densidad, en cuanto a las propiedades reológicas se determinará el índice de fluidez, consistencia, esfuerzo cortante, velocidad de deformación y la actividad antioxidante basada $\mu\text{mol/mL}$ de Trolox, para propiedad funcional.
- Los experimentos serán efectuados aplicando ANOVA y prueba de comparación múltiple de tukey, con un diseño factorial de dos factores: Tiempo (5, 10, 15 minutos) y frecuencia (20, 24, 30 kHz).

Tabla 3.

Representación del diseño experimental

Tratamiento	Frecuencia Ultrasónica (kHz)	Tiempo (min)
T1	16	5
T2	16	10
T3	16	15
T4	20	5
T5	20	10
T6	20	15
T7	24	5
T8	24	10
T9	24	15

Nota. Se presentan los tratamientos evaluados según la combinación de frecuencia ultrasónica y tiempo de exposición.

3.3. Universo

El universo es la pulpa de los arándanos producidos en la región de Ancash.

3.3.1. Población

La población abarca el arándano (*Vaccinium myrtillus*) proveniente de la empresa ISUMOS Y SERVICIOS MAQUILAK S.A.C. proveniente de Lima.

3.3.2. Muestra

Se trabajará con una muestra de pulpa de arándano seleccionada para los ensayos, aproximadamente de 36.5 kg. Las características específicas de la muestra incluyen el contenido inicial de propiedades físico-químicas, reológicas y funcional.

3.3.3. Muestreo

El tipo de muestreo empleado será no probabilístico por conveniencia, ya que la selección de la pulpa de arándano dependerá de la empresa ISUMOS Y SERVICIOS MAQUILAK S.A.C. y su posterior procesamiento en el laboratorio. Se elegirán muestras que cumplan con los criterios de calidad establecidos, asegurando que presenten las

características necesarias para los análisis fisicoquímicos, reológicos y funcionales del estudio.

3.3.4. Unidad de análisis

La unidad de análisis estará conformada por los 18 tratamientos de la pulpa de arándano sometidos a tratamiento ultrasónico, cada uno con un volumen estándar de 200 mL por experimento, de los cuales serán sometidos a tres tipos de frecuencia ultrasónica 16, 20 y 24 kHz además de tres tiempos de ultrasonificación de 5, 10 y 15 minutos. Se evaluarán sus propiedades fisicoquímicas (°Brix, pH, acidez titulable y densidad), propiedades reológicas (esfuerzo cortante, velocidad de deformación, índice de consistencia e índice de comportamiento de flujo) y propiedad funcional ($\mu\text{mol Trolox/mL}$).

La siguiente matriz experimental se diseñó para evaluar el efecto combinado de la frecuencia ultrasónica y el tiempo de tratamiento sobre la pulpa de arándano, para ello, se consideraron tres niveles de frecuencia (16, 20 y 24 kHz) y tres tiempos de aplicación (5, 10 y 15 min), distribuidos en 18 corridas experimentales con réplicas.

Tabla 4.*Matriz Experimental*

Corridas	Frecuencia Ultrasónica (kHz)	Tiempo (min)
1	24	5
2	20	15
3	24	10
4	20	15
5	24	5
6	24	10
7	16	10
8	20	5
9	20	5
10	16	15
11	24	15
12	16	10
13	20	10
14	16	15
15	16	5
16	16	5
17	24	15
18	20	10

Nota. La tabla muestra la matriz experimental utilizada, con las corridas distribuidas según las combinaciones de frecuencia ultrasónica y tiempo de tratamiento.

3.4. Diseño y características de la muestra

La pulpa de arándano contiene diversos compuestos antioxidantes como vitamina C, antocianinas y fenoles, además de poseer un índice de calidad aceptable, la pulpa será obtenida a partir de la variedad (*Vaccinium myrtillus*).

3.5. Técnicas e instrumentación de recolección de datos

3.5.1. Fichas de información bibliográfica

La información bibliográfica se tomará a partir de trabajos de investigación, fichas técnicas y/o publicaciones en revistas científicas indexadas.

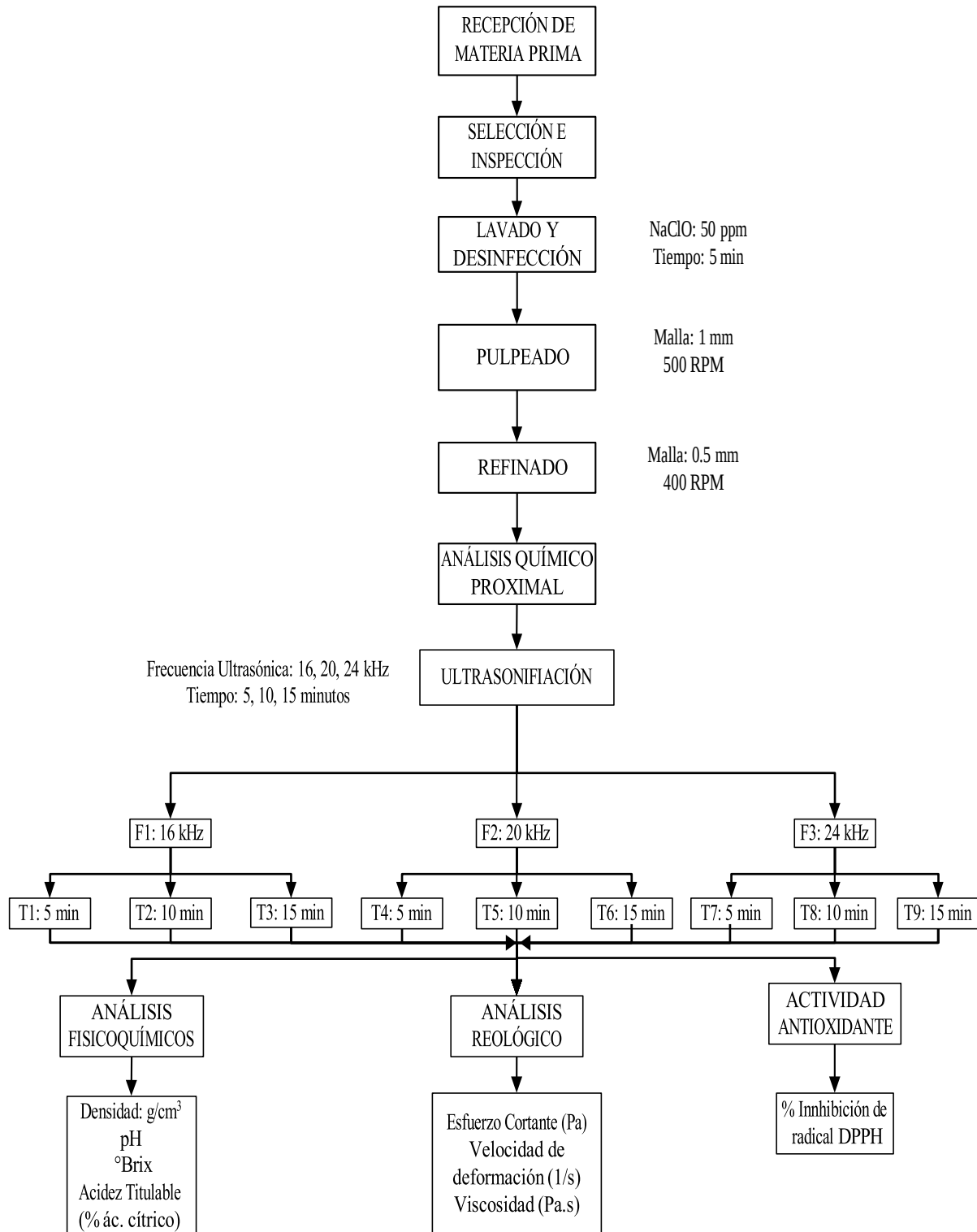
3.5.2. Técnicas

a. Diagrama de Flujo Experimental

A continuación, se describe los pasos experimentales en el siguiente diagrama de flujo:

Figura 3.

Diagrama de Flujo Experimental para la aplicación de ultrasonido en pulpa de arándano



1. Recepción de materia prima:

Se recibe el arándano como materia prima inicial, asegurando su integridad y frescura para el procesamiento posterior.

2. Selección e inspección

Los frutos son inspeccionados visualmente y manualmente para descartar aquellos que estén dañados, en mal estado o que no cumplan con los criterios de calidad establecidos.

3. Lavado y desinfección:

Los arándanos seleccionados se lavan con agua potable y se desinfectan en una solución de hipoclorito de sodio (NaClO) a 50 ppm durante 5 minutos, con el fin de eliminar suciedad, microorganismos y residuos externos.

4. Pulpeado:

En este paso, los arándanos son triturados o desintegrados para obtener una pulpa gruesa. Condiciones: Se utiliza una malla con un tamaño de poro de 1 mm y una velocidad de operación de 500 RPM (revoluciones por minuto).

5. Refinado

La pulpa gruesa pasa por un refinador para eliminar semillas, cáscaras grandes y otras partículas gruesas, obteniendo una pulpa más uniforme y suave.

Condiciones: Se utiliza una malla con un tamaño de poro de 0.5 mm y una velocidad de operación de 400 RPM

6. Análisis Químico – Proximal:

Determinación de los principales componentes nutricionales de la pulpa, como humedad, proteínas, grasas, cenizas y carbohidratos.

7. Ultrasonificación:

La pulpa obtenida es sometida a tratamiento con ultrasonido a tres frecuencias diferentes (16, 20 y 24 kHz) y tres tiempos distintos (5, 10 y 15 minutos), generando

un total de 18 tratamientos experimentales. El proceso se estandariza con un volumen de muestra de 200 mL por corrida. Este tratamiento busca modificar las características fisicoquímicas y funcionales de la pulpa mediante cavitación inducida.

8. Análisis posteriores al tratamiento:

Fisicoquímico: Se vuelven a medir la densidad, pH, grados brix y acidez titulable de las muestras tratadas para identificar cambios significativos ocasionados por el ultrasonido.

Reológico: Se obtienen curvas de flujo y se determinan parámetros como viscosidad, índice de consistencia e índice de comportamiento de flujo para evaluar el comportamiento del producto ante fuerzas externas.

Actividad antioxidante: Se analiza la capacidad antioxidante de las muestras mediante el método DPPH, midiendo en $\mu\text{mol Trolox/mL}$.

b. Composición Químico Proximal de la Materia Prima

- Humedad (Método AOAC 925.10, 2005)

Se pesaron aproximadamente 5 g de muestra homogénea en una cápsula de aluminio previamente tarada. La muestra se secó en una estufa de aire forzado a 105 °C durante 4 horas o hasta alcanzar peso constante. Posteriormente, se dejó enfriar en un desecador y se registró el peso final.

$$\text{Humedad}(\%) = \left(\frac{P_i - P_f}{P_i} \right) \times 100$$

Pi: Peso inicial de la muestra (g).

Pf: Peso final después del secado (g).

- Proteínas (Método Kjeldahl – AOAC 2001.11)

Se utilizó el método Kjeldahl, el cual consta de tres etapas: digestión, destilación y titulación. Una porción seca y molida de la muestra se digirió con ácido sulfúrico concentrado (H_2SO_4) en presencia de un catalizador (mezcla de sulfato

de potasio y sulfato de cobre), lo cual convierte el nitrógeno orgánico en ion amonio (NH_4^+). Posteriormente, se añadió hidróxido de sodio (NaOH) para liberar el amoníaco (NH_3), que se destiló y fue capturado en una solución de ácido bórico. Finalmente, el amoníaco retenido fue valorado mediante titulación con una solución estándar de ácido (HCl o H_2SO_4). El contenido de nitrógeno obtenido se multiplicó por un factor de conversión (6.25) para obtener el porcentaje de proteína total:

$$P(\%) = \left(\frac{[V_{\text{muestra}} - V_{\text{blanco}}] \times N \times 14.007}{\text{Peso de la muestra (mg)}} \right) \times 6.25 \times 1000$$

Donde:

- P (%): Proteína en porcentaje
- V_{muestra} : Volumen de ácido consumido en la titulación de la muestra (en mL)
- V_{blanco} : Volumen de ácido consumido en la titulación del blanco (en mL)
- N: Normalidad del ácido (HCl o H_2SO_4)
- 14.007: Peso atómico del nitrógeno (mg/mmol)
- 1000: Factor para convertir miligramos a gramos
- 6.25: Factor de conversión de nitrógeno a proteína (varía según el alimento)
- **Grasas (Método Soxhlet – AOAC 920.39, 2005)**

Se pesaron entre 3–5 g de muestra seca envuelta en papel filtro y se colocaron en un cartucho de extracción. Se realizó la extracción con éter de petróleo en un sistema Soxhlet durante al menos 6 horas. Luego se evaporó el disolvente, se secó el matraz a 105 °C y se pesó el residuo graso.

$$\text{Grasa (\%)} = \left(\frac{P_g}{P_m} \right) \times 100$$

Donde:

- P_g : Peso del residuo graso (g).

- Pm: Peso de la muestra (g).

- **Cenizas**

Se pesaron 2–3 g de muestra en un crisol ignífugo previamente tarado. La muestra se incineró en una mufla a 550 °C durante 4 a 6 horas, hasta obtener cenizas blancas o gris claro. El crisol se dejó enfriar en un desecador y luego se pesó.

$$\text{Cenizas (\%)} = \left(\frac{\text{Pr}}{\text{Pm}} \right) \times 100$$

Donde

- Pr: Peso del residuo ceniciente (g).
- Pm: Peso de la muestra (g).

- **Carbohidratos (Método AOAC, 2005)**

Los carbohidratos se estimaron indirectamente como el porcentaje restante tras la determinación de los otros componentes principales: humedad, proteínas, grasas y cenizas.

$$\text{Carbohidratos (\%)} = 100 - (H + P + G + C)$$

Donde:

- H: Humedad (%).
- P: Proteínas (%).
- G: Grasas (%).
- C: Cenizas (%).

c. Propiedades fisicoquímicas

- **Determinación de pH (Método A.O.A.C. 945.27, 2005):**

Preparación de la muestra: Se utiliza una muestra líquida o diluida, dependiendo del tipo de muestra. Es importante homogenizar la muestra para asegurar una medición uniforme.

Medición: El equipo utilizado, en este caso, un medidor de pH y conductividad Thermo Scientific, modelo Orion, requiere una calibración previa. Se suele calibrar el potenciómetro con soluciones de buffer estándar, generalmente de pH 4, 7 y 10, para obtener un rango confiable de medición.

Procedimiento:

- Se introduce el electrodo en la muestra previamente calibrada, asegurándose de que esté completamente sumergido.
- Se espera a que el valor se estabilice y se registra el pH.
- La medición se realiza por triplicado para obtener un valor promedio, lo que asegura mayor precisión.

- **Determinación de acidez (AOAC, 1995):**

Preparación de la muestra: La muestra generalmente se diluye en agua destilada para facilitar el proceso de titulación, especialmente si se trata de alimentos concentrados o de alta acidez.

Procedimiento:

- Se coloca un volumen conocido de la muestra en un vaso de precipitados.
- Se añaden unas gotas de un indicador de pH, como fenolftaleína, que cambia de color al final de la titulación.
- Se titula la muestra con una solución estándar de hidróxido de sodio (NaOH) de concentración conocida (por ejemplo, 0.1 N) hasta alcanzar el punto final de coloración.
- La acidez se calcula en función del volumen de NaOH necesario para neutralizar los ácidos presentes en la muestra y se expresa en términos de ácido predominante.
- Las mediciones se realizan por triplicado para asegurar precisión.

- **Determinación de Densidad (Método Gravimétrico Peso–Volumen)**

Preparación de la muestra: Se utiliza una muestra líquida previamente homogeneizada para asegurar una distribución uniforme de los componentes. Antes de la medición, se evita la presencia de burbujas, decantando o agitando suavemente la muestra.

Medición: El equipo utilizado es una balanza analítica y un material volumétrico de volumen conocido (por ejemplo, pipeta o probeta aforada). Es importante verificar la calibración de la balanza (tara y funcionamiento correcto) y emplear material volumétrico limpio y seco para asegurar precisión.

Procedimiento:

- Se pesa el recipiente vacío y seco, registrando la masa.
- Se introduce en el recipiente un volumen conocido de la muestra (aforada mediante pipeta, probeta o matraz), asegurando que el volumen corresponda al valor nominal del material volumétrico.
- Se pesa nuevamente el recipiente con la muestra.
- La densidad se calcula a partir de la diferencia de masas dividida entre el volumen aforado ($\rho = \text{masa}/\text{volumen}$).
- La medición se repite por triplicado, promediando los valores para obtener mayor precisión.

- **Determinación de Grados Brix (Reflectometría)**

Principio: Medición del porcentaje de sólidos solubles (principalmente azúcares) en una solución mediante el índice de refracción. Se expresa en grados Brix (°Bx), que aproximan el % de sacarosa en solución (g/100 g).

Preparación de la muestra: Usar muestra líquida o una muestra diluida homogénea (si la pulpa es muy espesa, filtrar o centrifugar ligeramente y tomar

el sobrenadante). Evitar burbujas y partículas que interfieran con la medida; si es necesario decantar o filtrar con una gasa fina. Llevar la muestra a la temperatura de trabajo o anotar la temperatura exacta (la lectura varía con la temperatura).

Equipo y calibración:

Equipo típico: refractómetro de bancada (digital o analógico). Muchos refractómetros digitales incorporan compensación automática de temperatura (ATC).

Calibrar antes de medir: limpiar prismas y usar agua destilada (lectura 0 °Bx) o una solución patrón de Brix conocida para verificar escala. Para control más preciso, usar soluciones patrón de sacarosa (por ejemplo 10 °Bx, 20 °Bx) según rango de trabajo.

Asegurarse de que el sensor/prisma esté limpio y sin residuos.

Procedimiento:

- Calibrar el refractómetro según instrucciones del fabricante (agua destilada → 0 °Bx o solución patrón).
- Aplicar una pequeña cantidad de muestra (unas gotas) sobre el prisma, cubriendo completamente la superficie.
- Cerrar la tapa (si aplica) para eliminar luz parásita y burbujas.
- Esperar a que la lectura se estabilice y registrar el valor en °Bx.
- Repetir la medición por triplicado con nuevas alícuotas de la misma muestra y calcular el promedio y la desviación estándar.
- Limpiar el prisma con agua destilada y secar entre medidas / muestras para evitar contaminación cruzada.

d. Propiedades reológicas

Configuración de Parámetros en el Reómetro cilindros concéntricos

BROKERFIELD (R/S-CC):

- Establecer un rango de velocidad de rotación para el husillo en función de las características reológicas de la muestra. La velocidad de rotación se convertirá en velocidad de deformación.
- Configurar el equipo para medir a velocidades de deformación (o tasas de cizallamiento) específicas en s^{-1} , ajustando el rango en función del comportamiento esperado de la muestra.

Medición del Esfuerzo Cortante (Pa):

- Inicia la rotación del husillo y permite que el reómetro aplique un esfuerzo de corte a la muestra.
- A medida que el husillo gira, el reómetro mide el torque, que se convierte en esfuerzo cortante mediante una relación predefinida basada en el husillo y la geometría de la celda.
- Registra los valores de esfuerzo cortante en unidades de pascal (Pa) a distintas velocidades de deformación.

Medición de la Velocidad de Deformación (s^{-1}):

- La velocidad de deformación o tasa de cizallamiento se ajusta en el software del reómetro y se mide directamente en s^{-1} .
- El reómetro calculará la velocidad de deformación basada en la velocidad de rotación del husillo y la geometría del sistema de cilindros concéntricos.

Determinación del Índice de Consistencia ($Pa \cdot s^n$) y el Índice de Fluidéz (n):

- Usa el modelo de la ley de potencia (modelo de Ostwald-de Waele) para determinar estos índices:

- La ley de potencia se expresa como:
 - $\tau = K \cdot \gamma^n$
 - τ es el esfuerzo cortante (Pa).
 - K índice de consistencia (Pa.sⁿ).
 - γ es la velocidad de deformación (s⁻¹).
 - n es el índice de fluidez o comportamiento de flujo.
 - Al medir el esfuerzo cortante a diferentes velocidades de deformación, el reómetro genera una curva de flujo (τ vs γ), a partir de esta curva:
- **Índice de consistencia (K)** se obtiene como el parámetro de ajuste de la pendiente en la ley de potencia.
- **Índice de fluidez (n)** representa el comportamiento del flujo (si $n < 1$, la muestra es pseudoplástica; si $n > 1$, la muestra es dilatante; si $n = 1$, es newtoniana).

Temperatura:

Durante las mediciones, la temperatura se monitorea y se mantiene estable para obtener lecturas precisas. Registra la temperatura al inicio y fin del análisis para asegurarte de que se mantuvo constante.

e. Propiedad funcional

- Actividad antioxidante (Método DPPH):

Fundamento del método: El método DPPH evalúa la capacidad antioxidante de una muestra en función de su capacidad para reducir el radical libre DPPH (2,2-difenil-1-picrilhidrazil), que al reducirse cambia de color (de púrpura a amarillo).

Preparación de la muestra:

- Se prepara una solución de DPPH en metanol o etanol a una concentración conocida.

- La muestra a analizar también puede necesitar preparación, como extracción en solvente o dilución, dependiendo de su naturaleza.

Procedimiento:

- Se mezcla un volumen de la solución de DPPH con un volumen de la muestra en estudio y se deja reaccionar durante un tiempo específico (normalmente entre 30 minutos y 1 hora) a temperatura ambiente y en oscuridad.
- Se mide la absorbancia de la mezcla resultante en un espectrofotómetro a una longitud de onda de 517 nm.
- La disminución en la absorbancia con respecto a un blanco (DPPH sin antioxidantes) se utiliza para calcular la capacidad antioxidante de la muestra.
- Las determinaciones se suelen realizar en un lector multimodal, que permite realizar múltiples análisis simultáneamente.

3.5.3. Instrumentos

- Ultrasonic Cleaner Cole- Parmer, Mod. 08892-26, Serie QPC010698219F
- Balanza Analítica, Marca: Precisa, Modelo: XB 2200C – Serie 320XB5200093
- Medidor de pH y conductividad Marca: THERMO SCIENTIFIC. Model: ORION STAR A211. SINGAPUR
- Refractómetro, Marca Rudolph, Modelo A24051-CC J-157
- Refrigerador marca GENERAL ELECTRIC modelo GSMF3REX
- Estufa
- Espectrofotómetro UV. Modelo Perkins – Elmer – USA

- Reómetro de cilindros concéntricos. Reómetro. Marca: Brookfield.
Modelo: R/S-CC. Incluye: Usillos de medida: Spin CC40 y CC25.
- Picnómetro
- Equipo Kjeldahl

3.5.4. Reactivos:

- DPPH (2,2-difenil-1-picrilhidracilo 1 mM)
- NaOH 0.1 N
- Trolox
- Metanol al 80%
- Agua destilada
- Fenolftaleína.
- Éter de petróleo.

IV. RESULTADOS Y DISCUSIONES

4.1. Caracterización química – proximal de materia prima.

Tabla 5.

Composición químico - proximal de la pulpa de arándano en 100 gramos

Componente	Cantidad Aproximada
Humedad (%)	84.12 ± 0.57
Hidratos de carbono (%)	9.68 ± 0.33
Proteínas (%)	0.62 ± 0.05
Grasas (%)	0.41 ± 0.07
Ceniza (%)	0.19 ± 0.03
pH	3.09 ± 0.02
°Brix	11.86 ± 0.03
Acidez total (% ác. cítrico)	0.922 ± 0.013

Los resultados de la composición químico-proximal y propiedades fisicoquímicas de la pulpa de arándano (*Vaccinium myrtillus*) mostraron valores de 84.12 ± 0.57 % de humedad, 9.68 ± 0.33 % de hidratos de carbono, 0.62 ± 0.05 % de proteínas, 0.41 ± 0.07 % de grasas y 0.19 ± 0.03 % de cenizas, además de un pH de 3.09 ± 0.02 , 11.86 ± 0.03 °Brix y 0.922 ± 0.013 % de acidez total expresada como ácido cítrico. Estos resultados evidencian que la pulpa de arándano está constituida principalmente por agua, mientras que los hidratos de carbono representan la mayor proporción de materia seca. Asimismo, el bajo contenido de proteínas, grasas y cenizas coincide con las características composicionales reportadas para esta especie.

Al comparar las propiedades fisicoquímicas obtenidas con las reportadas por Archila et al. (2022), quienes informaron valores de pH de 3.31 ± 0.04 , 10.6 ± 3.9 °Brix, 0.76 ± 0.02 % de acidez total y 83.31 ± 0.03 % de humedad, se observa que la pulpa evaluada presentó una humedad ligeramente superior (84.12 % frente a 83.31 %), un mayor contenido de sólidos solubles (11.86 frente a 10.6

°Brix), un pH menor (3.09 frente a 3.31) y una acidez total superior (0.922 frente a 0.76 %). Archila et al. (2022) señalaron que las diferencias en las características fisicoquímicas del arándano están influenciadas por factores como la variedad, el estado de madurez, las condiciones de cultivo y el origen geográfico del fruto.

Asimismo, Wu et al. (2021) indicaron que durante el desarrollo y maduración del arándano se producen cambios en la concentración de azúcares, ácidos orgánicos y compuestos fenólicos, los cuales influyen directamente sobre parámetros como los sólidos solubles totales, el pH y la acidez titulable. De manera similar, Zhang et al. (2024) reportaron que las variaciones observadas en la composición química del arándano están asociadas a factores genéticos y ambientales que afectan la acumulación de metabolitos responsables de la calidad fisicoquímica y funcional del fruto.

El pH obtenido (3.09 ± 0.02) y la acidez total de 0.922 ± 0.013 % reflejan la naturaleza ácida característica del arándano. Según Wu et al. (2021), esta condición está relacionada principalmente con la presencia de ácidos orgánicos como el ácido cítrico y el ácido málico, compuestos que participan en la definición del sabor característico del fruto. Asimismo, Hernández-Hernández et al. (2024) indicaron que las matrices vegetales con pH ácido favorecen la estabilidad de diversos compuestos fenólicos presentes de forma natural en el arándano, particularmente las antocianinas responsables de su coloración característica.

Por otro lado, el contenido de sólidos solubles obtenido (11.86 ± 0.03 °Brix) se encuentra dentro de los rangos reportados para arándanos en estado de madurez comercial. Carvalho et al. (2024) señalaron que la concentración de compuestos

solubles en el arándano está influenciada por las condiciones de producción, cosecha y almacenamiento, factores que pueden generar diferencias entre estudios realizados en distintas zonas de cultivo. Del mismo modo, Wu et al. (2021) destacaron que la acumulación de azúcares durante la maduración constituye uno de los principales factores responsables del incremento de los sólidos solubles y de la calidad sensorial del fruto.

4.2. Caracterización fisicoquímica de la pulpa de arándano ultrasonificada

4.2.1. pH

Tabla 6.

Valores de pH de la pulpa de arándano ultrasonificada

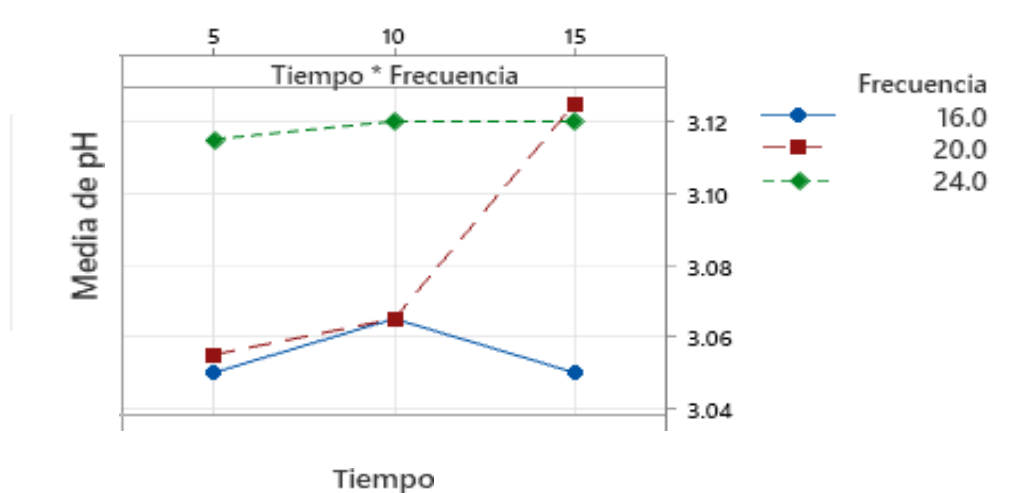
Frecuencia (kHz)	Tiempo (min)	pH
16	5	3.04
16	5	3.11
16	10	3.08
16	10	3.1
16	15	3.09
16	15	3.06
20	5	3.1
20	5	3.06
20	10	3.09
20	10	3.04
20	15	3.07
20	15	3.13
24	5	3.1
24	5	3.08
24	10	3.08
24	10	3.11
24	15	3.09
24	15	3.1

Los resultados obtenidos variaron entre 3.04 y 3.13, registrándose el valor máximo en el tratamiento de 20 kHz durante 15 min (3.13) y el valor mínimo en los tratamientos de 16 kHz durante 5 min y 20 kHz durante 10 min (3.04). A la frecuencia de 16 kHz, los valores de pH oscilaron entre 3.04 y 3.11; a 20 kHz,

entre 3.04 y 3.13; y a 24 kHz, entre 3.08 y 3.11. En términos generales, los valores de pH se mantuvieron dentro de un rango estrecho para todas las combinaciones de frecuencia ultrasónica y tiempo de sonicación evaluadas, observándose variaciones de baja magnitud entre los tratamientos.

Figura 4.

Gráfica de interacción Tiempo – Frecuencia de pH



La figura muestra la interacción entre el tiempo de sonicación y la frecuencia ultrasónica sobre el pH de la pulpa de arándano. En términos generales, los valores de pH se mantuvieron dentro de un rango estrecho comprendido entre 3.05 y 3.13. A una frecuencia de 16 kHz se observa un ligero incremento del pH entre cinco y diez minutos, seguido de una leve disminución a los quince minutos. En el tratamiento de 20 kHz se aprecia una tendencia ascendente a medida que aumenta el tiempo de sonicación, alcanzándose el valor más alto a los quince minutos. Por otro lado, a 24 kHz los valores de pH presentan escasa variación a lo largo de los tres tiempos evaluados, manteniéndose prácticamente constantes. Asimismo, las curvas muestran cambios de baja magnitud entre los distintos niveles de frecuencia y tiempo de sonicación evaluados.

Tabla 7.*Análisis estadístico del pH mediante ANOVA*

Análisis de Varianza						
Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p	
Frecuencia	2	0.000633	0.000317	0.37	0.69912	
Tiempo	2	0.000233	0.000117	0.14	0.87354	
Frecuencia-Tiempo	4	0.001333	0.000333	0.39	0.80943	
Error	9	0.00765	0.00085			
Total	17	0.00985				

Nota. Los factores evaluados y su interacción no presentaron efectos estadísticamente significativos sobre el pH.

El análisis de varianza (ANOVA) factorial aplicada al pH de la pulpa de arándano se presenta en la tabla anterior. Los resultados evidenciaron que la frecuencia ultrasónica, el tiempo de sonicación y la interacción entre ambos factores no presentaron efectos estadísticamente significativos sobre esta variable. La frecuencia no influyó significativamente en el pH ($p = 0.69912$), al igual que el tiempo de sonicación ($p = 0.87354$) y la interacción frecuencia $\times$ tiempo ($p = 0.80943$). Asimismo, los valores bajos de F indican que la variabilidad entre tratamientos fue reducida en comparación con la variabilidad experimental. De manera general, el pH se mantuvo dentro de un rango estrecho durante los tratamientos evaluados, sin mostrar una tendencia definida asociada al incremento de la frecuencia de 16, 20 y 24 kHz ni al tiempo de sonicación de 5, 10 y 15 min. Por tanto, la aplicación de ultrasonido no modificó significativamente el equilibrio ácido-base de la pulpa de arándano.

Estos resultados coinciden con estudios recientes realizados en matrices frutales y vegetales tratadas con ultrasonido, donde se han observado mejoras funcionales, estructurales o microbiológicas sin variaciones significativas en el pH. En jugo de pitahaya roja sometido a ultrasonido, se registraron incrementos en compuestos

fenólicos, antocianinas y capacidad antioxidante, sin cambios significativos en el pH, la acidez titulable ni los sólidos solubles totales (Tan et al., 2023). De manera similar, en jugo de naranja y néctar de mango tratados con ultrasonido a 20 kHz, radiación UVC y la combinación US+UVC, el pH, los °Brix y la acidez titulable se mantuvieron estables, aun cuando se evidenció una mayor inactivación de bacterias mesófilas aerobias, mohos y levaduras (Ramírez-Corona et al., 2024). Asimismo, en jugos de calabaza tratados con ultrasonido a 25 kHz bajo diferentes condiciones de potencia y tiempo, se conservaron las propiedades fisicoquímicas, como pH, sólidos solubles y acidez titulable, mientras se redujo el recuento microbiano, disminuyó el tamaño de partícula y aumentó la actividad antioxidante (Zhang et al., 2024). De igual forma, la sonicación aplicada en jugo de marula mejoró características funcionales y nutricionales sin alterar significativamente parámetros fisicoquímicos como el pH (Mulweli et al., 2026).

La concordancia entre los resultados obtenidos y los estudios mencionados se explica porque el ultrasonido ejerce principalmente una acción física sobre la matriz alimentaria. Durante la sonicación, la cavitación acústica genera microcorrientes, fuerzas de cizallamiento, microchorros, compresión, expansión y ruptura localizada de estructuras celulares; sin embargo, estos fenómenos actúan sobre la organización estructural de la matriz y no sobre la composición química de los ácidos orgánicos responsables del pH (Bernardi et al., 2021; Pandiselvam et al., 2023; Qiu et al., 2020). Por esta razón, el ultrasonido favorece procesos como la liberación de compuestos intracelulares, la reducción del tamaño de partícula y la modificación de la estructura vegetal, pero no genera una variación suficiente en la concentración de iones hidrógeno como para modificar significativamente el pH del sistema.

Este comportamiento explica que, tanto en la pulpa de arándano tratada a 16, 20 y 24 kHz como en los jugos estudiados por Tan et al. (2023), Ramírez-Corona et al. (2024), Zhang et al. (2024) y Mulweli et al. (2026), se hayan observado efectos positivos sobre propiedades funcionales, estructurales o microbiológicas sin cambios significativos en el pH. En términos fisicoquímicos, la cavitación modifica la matriz por acción mecánica, pero no transforma de manera directa los ácidos orgánicos ni altera el equilibrio ácido-base. Por ello, el pH se mantiene estable aun cuando el ultrasonido genera cambios en otros componentes de la pulpa.

En el caso específico de la pulpa de arándano, la estabilidad del pH se relaciona con su composición natural, caracterizada por la presencia de ácidos orgánicos, principalmente ácido cítrico y ácido málico, además de compuestos pécticos, azúcares y otros solutos propios de la matriz. Los azúcares, ácidos orgánicos, compuestos fenólicos y antocianinas influyen directamente sobre la calidad fisicoquímica y funcional del arándano (Wu et al., 2021). Asimismo, las propiedades de las pulpas de frutas dependen de la composición estructural de la matriz, incluyendo pH, fuerza iónica y pectina soluble (Carvalho et al., 2024). En ese sentido, los ácidos orgánicos presentes en la pulpa mantienen el carácter ácido del sistema, mientras que las pectinas y solutos contribuyen a la estabilidad de la matriz frente a las perturbaciones físicas generadas por la sonicación. Por ello, aunque el ultrasonido modifica físicamente la estructura celular, no altera de forma significativa los componentes responsables de la acidez.

Desde el punto de vista microbiológico, la estabilidad del pH ácido tiene relevancia tecnológica porque constituye una barrera fisicoquímica natural en matrices frutales. Esta condición ácida limita el desarrollo de microorganismos

sensibles al bajo pH y contribuye a la estabilidad del producto. En este contexto, la literatura reciente señala que el ultrasonido favorece la reducción microbiana por mecanismos físicos y químicos asociados a la cavitación acústica, no por una modificación del pH. En jugo de naranja y néctar de mango, la combinación US+UVC mejoró la inactivación de bacterias mesófilas aerobias, mohos y levaduras, manteniendo estables el pH, los °Brix y la acidez titulable (Ramírez-Corona et al., 2024). De manera similar, en jugos de calabaza tratados con ultrasonido a 25 kHz se redujo significativamente el recuento total de colonias sin alterar de forma relevante el pH ni los sólidos solubles (Zhang et al., 2024). Por tanto, el mantenimiento del pH en la pulpa de arándano se explica porque la cavitación actúa principalmente sobre la estructura celular y microbiana mediante ondas de choque, presión localizada, radicales libres, formación de poros y fuerzas de corte, sin modificar directamente el equilibrio ácido-base de la matriz (Lepaus et al., 2023).

4.2.2. °Brix

Tabla 8.

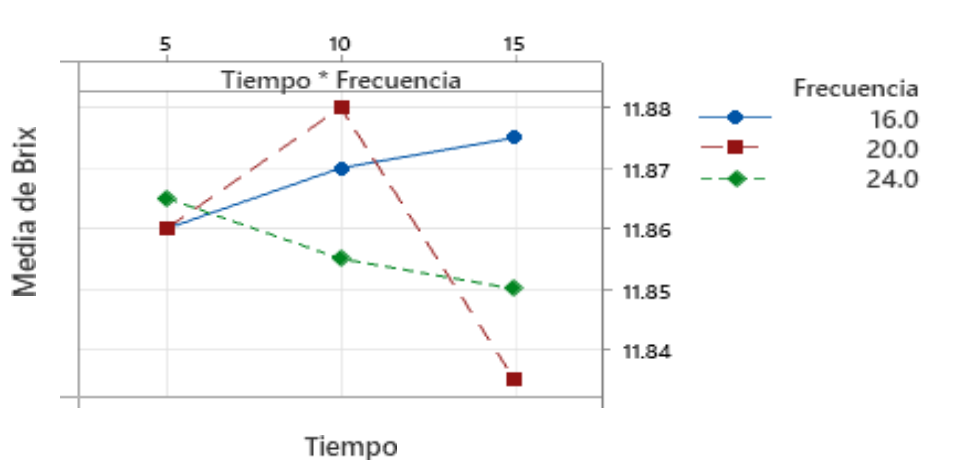
Valores de °Brix de la pulpa de arándano ultrasonificada

Frecuencia (kHz)	Tiempo (min)	Brix
16	5	11.88
16	5	11.82
16	10	11.85
16	10	11.87
16	15	11.9
16	15	11.83
20	5	11.86
20	5	11.84
20	10	11.87
20	10	11.89
20	15	11.81
20	15	11.88
24	5	11.85
24	5	11.9
24	10	11.86
24	10	11.87
24	15	11.84
24	15	11.88

Los resultados obtenidos variaron entre 11.81 y 11.90 °Brix, registrándose el valor máximo en los tratamientos de 16 kHz durante 15 min y 24 kHz durante 5 min (11.90 °Brix), mientras que el valor mínimo se observó en el tratamiento de 20 kHz durante 15 min (11.81 °Brix). A la frecuencia de 16 kHz, los valores oscilaron entre 11.82 y 11.90 °Brix; a 20 kHz, entre 11.81 y 11.89 °Brix; y a 24 kHz, entre 11.84 y 11.90 °Brix. En términos generales, los valores de °Brix se mantuvieron dentro de un rango estrecho para todas las combinaciones de frecuencia ultrasónica y tiempo de sonicación evaluadas, observándose variaciones de baja magnitud entre los tratamientos.

Figura 5.

Gráfica de interacción Tiempo – Frecuencia de °Brix



La figura muestra la interacción entre el tiempo de sonicación y la frecuencia ultrasónica sobre los sólidos solubles totales (°Brix) de la pulpa de arándano. En términos generales, los valores se mantuvieron dentro de un intervalo reducido, comprendido entre 11.84 y 11.88 °Brix. A una frecuencia de 16 kHz se observa un ligero incremento de los °Brix conforme el tiempo de sonicación aumentó de cinco a quince minutos, mientras que a 24 kHz se aprecia una disminución gradual durante el mismo intervalo de tiempo. Por otro lado, a 20 kHz los valores aumentaron hasta los diez minutos y posteriormente disminuyeron a los quince minutos. Asimismo, las curvas presentan variaciones de baja magnitud a lo largo de los niveles evaluados, observándose diferencias reducidas entre las distintas combinaciones de frecuencia ultrasónica y tiempo de sonicación.

Tabla 9.*Análisis estadístico de °Brix mediante ANOVA*

Análisis de Varianza					
Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Frecuencia	2	0.000278	0.000139	0.13	0.87717
Tiempo	2	0.000478	0.000239	0.23	0.80003
Frecuencia-Tiempo	4	0.001422	0.000356	0.34	0.84416
Error	9	0.0094	0.001044		
Total	17	0.011578			

Nota. Ninguno de los factores ni su interacción mostró efectos significativos sobre los °Brix ($p > 0.05$).

El análisis de varianza (ANOVA) factorial aplicada a los sólidos solubles totales (°Brix) de la pulpa de arándano se presenta en la tabla anterior. Los resultados evidenciaron que la frecuencia ultrasónica, el tiempo de sonicación y la interacción entre ambos factores no presentaron efectos estadísticamente significativos sobre esta variable. La frecuencia no influyó significativamente en los °Brix ($p = 0.87717$), al igual que el tiempo de sonicación ($p = 0.80003$) y la interacción frecuencia $\times$ tiempo ($p = 0.84416$). Asimismo, los valores bajos de F indican que la variabilidad atribuida a los tratamientos fue reducida en comparación con la variabilidad experimental. De manera general, los valores de °Brix se mantuvieron dentro de un intervalo estrecho, entre 11.81 y 11.90 °Brix, sin evidenciar una tendencia definida asociada al incremento de la frecuencia de 16, 20 y 24 kHz ni al tiempo de sonicación de 5, 10 y 15 min. Por tanto, la aplicación de ultrasonido no modificó significativamente la concentración de sólidos solubles totales de la pulpa de arándano.

Estos resultados coinciden con estudios recientes realizados en matrices frutales y vegetales tratadas con ultrasonido, donde se han observado mejoras funcionales, estructurales o microbiológicas sin variaciones significativas en los

sólidos solubles totales. En jugo de pitahaya roja sometido a ultrasonido a 37 kHz, 600 W y tiempos de 20, 40 y 60 min, se registraron incrementos en compuestos fenólicos, antocianinas y capacidad antioxidante, sin cambios significativos en los sólidos solubles totales, pH ni acidez titulable (Tan et al., 2023). De manera similar, en jugo de naranja y néctar de mango tratados con ultrasonido a 20 kHz durante 20 min, radiación UVC y la combinación US+UVC, los °Brix, el pH y la acidez titulable se mantuvieron estables, aun cuando se obtuvo una mayor inactivación de bacterias mesófilas aerobias, mohos y levaduras (Ramírez-Corona et al., 2024). Asimismo, en jugos de calabaza tratados con ultrasonido a 25 kHz bajo diferentes condiciones de potencia, tiempo y temperatura, se conservaron los sólidos solubles, el pH y la acidez titulable, mientras se redujo el recuento microbiano, disminuyó el tamaño de partícula y aumentó la actividad antioxidante (Zhang et al., 2024). De igual forma, en jugo de marula tratado con ultrasonido a 20 kHz, 5 W durante 5 min a 25 °C, la sonicación mejoró características funcionales y nutricionales sin alterar significativamente las propiedades fisicoquímicas generales de la matriz (Mulweli et al., 2026).

La concordancia entre los resultados obtenidos y los estudios mencionados se explica porque el ultrasonido actúa principalmente sobre la estructura física de la matriz alimentaria y no sobre la concentración total de solutos disueltos. Los °Brix representan principalmente azúcares solubles, ácidos orgánicos y otros compuestos de bajo peso molecular presentes en la fase líquida de la pulpa. Durante la sonicación, la cavitación acústica genera microcorrientes, fuerzas de cizallamiento, microchorros, compresión, expansión y ruptura parcial de estructuras celulares; no obstante, estos fenómenos modifican la organización

estructural, la dispersión de partículas y la liberación de compuestos intracelulares, pero no producen incorporación, degradación ni concentración suficiente de solutos como para modificar significativamente la lectura refractométrica de sólidos solubles totales (Bernardi et al., 2021; Pandiselvam et al., 2023; Qiu et al., 2020). Por ello, los tratamientos aplicados a 16, 20 y 24 kHz produjeron variaciones mínimas entre muestras, pero no cambios estadísticamente significativos en los °Brix.

En el caso específico de la pulpa de arándano, la estabilidad de los °Brix se relaciona con la composición natural de la matriz, donde los azúcares solubles, ácidos orgánicos, compuestos fenólicos, antocianinas y pectinas se encuentran distribuidos en una fase acuosa estable. Los azúcares, ácidos orgánicos, compuestos fenólicos y antocianinas influyen directamente en la calidad fisicoquímica y funcional del arándano (Wu et al., 2021). Asimismo, las propiedades de las pulpas de frutas dependen de la composición estructural de la matriz, incluyendo pH, fuerza iónica y pectina soluble (Carvalho et al., 2024). En ese sentido, aunque el ultrasonido modifica físicamente la estructura celular y favorece la dispersión de componentes de la pulpa, la cantidad total de sólidos solubles presentes en el sistema se conserva, debido a que los compuestos solubles no se degradan ni se concentran de forma significativa bajo las condiciones de sonicación aplicadas.

Este comportamiento también se explica por la naturaleza del tratamiento ultrasónico en matrices líquidas o semilíquidas. En condiciones controladas, el ultrasonido mejora la homogeneización, reduce el tamaño de partícula y favorece la estabilidad de la suspensión, sin alterar necesariamente parámetros fisicoquímicos como °Brix, pH o acidez titulable (Lepaus et al., 2023). En jugos

de calabaza tratados a 25 kHz, la reducción del tamaño de partícula y la modificación de la microestructura ocurrieron sin cambios significativos en los sólidos solubles, lo que confirma que el efecto principal del ultrasonido se expresa en la estructura física y funcional de la matriz, más que en la concentración global de solutos (Zhang et al., 2024). Por ello, la estabilidad de los °Brix observada en la pulpa de arándano tratada a 16, 20 y 24 kHz responde a que la cavitación modificó la matriz a nivel físico, pero no alteró la fracción soluble total medida por refractometría.

Desde el punto de vista microbiológico, la estabilidad de los °Brix adquiere relevancia tecnológica porque los azúcares solubles representan una fuente de sustrato para el desarrollo de microorganismos en matrices frutales. En el presente estudio, la aplicación de ultrasonido a 16, 20 y 24 kHz durante 5, 10 y 15 min mantuvo estable la concentración de sólidos solubles, lo que evidencia la conservación de la composición soluble de la pulpa. Este comportamiento concuerda con lo observado en jugo de naranja y néctar de mango tratados con ultrasonido a 20 kHz, donde la inactivación de bacterias mesófilas aerobias, mohos y levaduras ocurrió sin cambios en los °Brix, pH y acidez titulable (Ramírez-Corona et al., 2024). Asimismo, en jugos de calabaza tratados con ultrasonido a 25 kHz, la reducción del recuento total de colonias se presentó sin variaciones significativas en los sólidos solubles, lo que demuestra que la estabilidad fisicoquímica puede mantenerse aun cuando se generan efectos sobre la carga microbiana (Zhang et al., 2024).

En ese sentido, la relación entre ultrasonido y estabilidad microbiológica no se sustenta en una reducción de los °Brix disponibles, sino en los efectos mecánicos y químicos generados por la cavitación acústica. Este fenómeno

produce ondas de choque, presión localizada, fuerzas de corte, radicales libres y formación de poros en las membranas celulares, mecanismos que comprometen la integridad de las células microbianas y favorecen su inactivación. Por tanto, el mantenimiento de los °Brix en la pulpa de arándano se explica porque la sonicación conserva la fracción soluble de la matriz, mientras la cavitación actúa principalmente sobre la estructura celular, la dispersión de partículas y los mecanismos asociados a la estabilidad microbiológica (Lepaus et al., 2023).

4.2.3. Acidez titulable

Tabla 10.

Valores de Acidez Titulable de la pulpa de arándano ultrasonificada

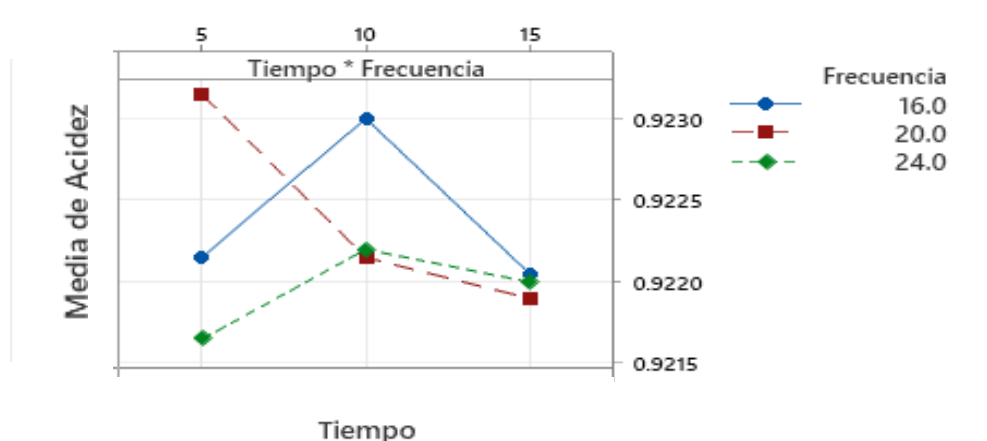
Frecuencia (kHz)	Tiempo (min)	Acidez Titulable
16	5	0.9221
16	5	0.9217
16	10	0.9225
16	10	0.923
16	15	0.9214
16	15	0.9222
20	5	0.9227
20	5	0.9231
20	10	0.9219
20	10	0.9224
20	15	0.9215
20	15	0.9228
24	5	0.922
24	5	0.9218
24	10	0.9226
24	10	0.9223
24	15	0.9229
24	15	0.9216

Los resultados obtenidos variaron entre 0.9214 y 0.9231 g de ácido cítrico/100 mL, registrándose el valor máximo en el tratamiento de 20 kHz durante 5 min

(0.9231 g de ácido cítrico/100 mL) y el valor mínimo en el tratamiento de 16 kHz durante 15 min (0.9214 g de ácido cítrico/100 mL). A la frecuencia de 16 kHz, los valores oscilaron entre 0.9214 y 0.9230 g de ácido cítrico/100 mL; a 20 kHz, entre 0.9215 y 0.9231 g de ácido cítrico/100 mL; y a 24 kHz, entre 0.9216 y 0.9229 g de ácido cítrico/100 mL. En términos generales, la acidez titulable se mantuvo dentro de un rango estrecho para todas las combinaciones de frecuencia y tiempo evaluadas, sin apreciarse variaciones marcadas entre los tratamientos.

Figura 6.

Gráfica de interacción Tiempo – Frecuencia de Acidez (%)



La figura muestra la interacción entre el tiempo de sonicación y la frecuencia ultrasónica sobre la acidez titulable de la pulpa de arándano. En términos generales, los valores de acidez se mantuvieron dentro de un intervalo reducido, comprendido entre 0.9215 y 0.9231 g de ácido cítrico/100 mL, evidenciando una baja variabilidad entre los tratamientos evaluados. A una frecuencia de 16 kHz se observa un incremento de la acidez entre 5 y 10 min, seguido de una disminución a los 15 min. En el tratamiento de 20 kHz se aprecia una tendencia descendente conforme aumenta el tiempo de sonicación, mientras que a 24 kHz

se registra un ligero incremento hasta los 10 min y una posterior disminución a los 15 min. Asimismo, las curvas presentan diferencias en su comportamiento a lo largo de los tiempos evaluados, observándose variaciones de magnitud reducida entre las distintas combinaciones de frecuencia y tiempo aplicadas.

Tabla 11.

Análisis estadístico de Acidez Titulable mediante ANOVA

Análisis de Varianza					
Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Frecuencia	2	0.0000002100	0.0000001050	0.38	0.69415
Tiempo	2	0.0000004433	0.0000002217	0.8	0.47772
Frecuencia-Tiempo	4	0.0000017067	0.0000004267	1.55	0.26937
Error	9	0.0000024850	0.0000002761		
Total	17	0.0000048450			

Nota. Los factores evaluados y su interacción no generaron efectos estadísticamente significativos sobre la acidez titulable ($p > 0.05$).

El análisis de varianza (ANOVA) factorial aplicada a la acidez titulable de la pulpa de arándano se presenta en la tabla anterior. Los resultados evidenciaron que la frecuencia ultrasónica, el tiempo de sonicación y la interacción entre ambos factores no presentaron efectos estadísticamente significativos sobre esta variable. La frecuencia no influyó significativamente en la acidez titulable ($p = 0.69415$), al igual que el tiempo de sonicación ($p = 0.47772$) y la interacción frecuencia $\times$ tiempo ($p = 0.26937$). Asimismo, los valores bajos de F indican que la variabilidad atribuida a los tratamientos fue reducida en comparación con la variabilidad experimental. De manera general, la acidez titulable se mantuvo dentro de un intervalo estrecho, entre 0.9214 y 0.9231 g de ácido cítrico/100 mL, sin evidenciar una tendencia definida asociada al incremento de la frecuencia de 16, 20 y 24 kHz ni al tiempo de sonicación de 5, 10 y 15 min. Por

tanto, la aplicación de ultrasonido no modificó significativamente la concentración de ácidos titulables presentes en la pulpa de arándano.

Estos resultados coinciden con estudios recientes realizados en matrices frutales y vegetales tratadas con ultrasonido, donde se han observado mejoras funcionales, estructurales o microbiológicas sin cambios significativos en parámetros relacionados con la acidez. En jugo de pitahaya roja sometido a ultrasonido, se registraron incrementos en compuestos fenólicos, antocianinas y capacidad antioxidante, sin alteraciones significativas en la acidez titulable, el pH ni los sólidos solubles totales (Tan et al., 2023). De manera similar, en jugo de naranja y néctar de mango tratados con ultrasonido a 20 kHz, radiación UVC y la combinación US+UVC, la acidez titulable, el pH y los °Brix se mantuvieron estables, aun cuando se obtuvo una mayor inactivación de bacterias mesófilas aerobias, mohos y levaduras (Ramírez-Corona et al., 2024). Asimismo, en jugos de calabaza tratados con ultrasonido a 25 kHz bajo diferentes condiciones de potencia, tiempo y temperatura, se conservaron la acidez titulable, el pH y los sólidos solubles, mientras se redujo el recuento microbiano, disminuyó el tamaño de partícula y aumentó la actividad antioxidante (Zhang et al., 2024). Este comportamiento también concuerda con lo señalado para matrices frutales procesadas por ultrasonido, donde el tratamiento conserva propiedades fisicoquímicas generales sin generar alteraciones importantes en la composición global del producto (Trusińska et al., 2024).

La concordancia entre los resultados obtenidos y los estudios mencionados se explica porque el ultrasonido actúa principalmente sobre la estructura física de la matriz alimentaria y no sobre la concentración total de los ácidos orgánicos

responsables de la acidez titulable. Esta variable expresa la cantidad de ácidos capaces de reaccionar durante la titulación, principalmente ácido cítrico, ácido málico y otros ácidos orgánicos presentes en frutas. Durante la sonicación, la cavitación acústica genera microcorrientes, fuerzas de cizallamiento, microchorros, compresión, expansión y ruptura parcial de estructuras celulares; sin embargo, estos fenómenos modifican la organización estructural, la dispersión de partículas y la liberación de compuestos intracelulares, pero no generan una degradación ni una formación significativa de ácidos orgánicos como para modificar estadísticamente la acidez titulable (Bernardi et al., 2021; Pandiselvam et al., 2023; Qiu et al., 2020).

En el caso específico de la pulpa de arándano, la estabilidad de la acidez titulable se relaciona con la composición natural de la matriz, caracterizada por la presencia de ácidos orgánicos, azúcares, compuestos fenólicos, antocianinas, pectinas y otros solutos distribuidos en la fase acuosa. Los ácidos orgánicos cumplen un papel importante en la calidad fisicoquímica y funcional del arándano, junto con los azúcares, compuestos fenólicos y antocianinas (Wu et al., 2021). Asimismo, las propiedades de las pulpas de frutas dependen de la estructura de la matriz, incluyendo el pH, la fuerza iónica y la pectina soluble (Carvalho et al., 2024). En ese sentido, aunque el ultrasonido aplicado a 16, 20 y 24 kHz modifica físicamente la estructura celular y favorece la dispersión de componentes de la pulpa, la fracción ácida titulable se conserva porque los ácidos orgánicos no se consumen ni se concentran de manera significativa bajo las condiciones de tratamiento evaluadas.

Desde el punto de vista microbiológico, la estabilidad de la acidez titulable tiene relevancia tecnológica porque los ácidos orgánicos contribuyen al carácter ácido

de las matrices frutales y actúan como una barrera fisicoquímica frente al desarrollo de microorganismos sensibles a condiciones ácidas. En este contexto, la literatura indica que el ultrasonido favorece la estabilidad microbiológica por mecanismos asociados a la cavitación acústica, no por una modificación directa de la acidez titulable. En jugo de naranja y néctar de mango tratados con ultrasonido a 20 kHz, la inactivación de bacterias mesófilas aerobias, mohos y levaduras ocurrió manteniendo estable la acidez titulable, el pH y los °Brix (Ramírez-Corona et al., 2024). De manera similar, en jugos de calabaza tratados con ultrasonido a 25 kHz, la reducción del recuento total de colonias se presentó sin cambios relevantes en la acidez titulable ni en otros parámetros fisicoquímicos (Zhang et al., 2024). Por tanto, el mantenimiento de la acidez titulable en la pulpa de arándano se explica porque la cavitación actúa principalmente mediante ondas de choque, presión localizada, radicales libres, formación de poros y fuerzas de corte sobre la estructura celular y microbiana, sin modificar directamente la concentración total de ácidos orgánicos responsables de la acidez (Lepaus et al., 2023).

4.2.4. Densidad (g/cm³)

Tabla 12.

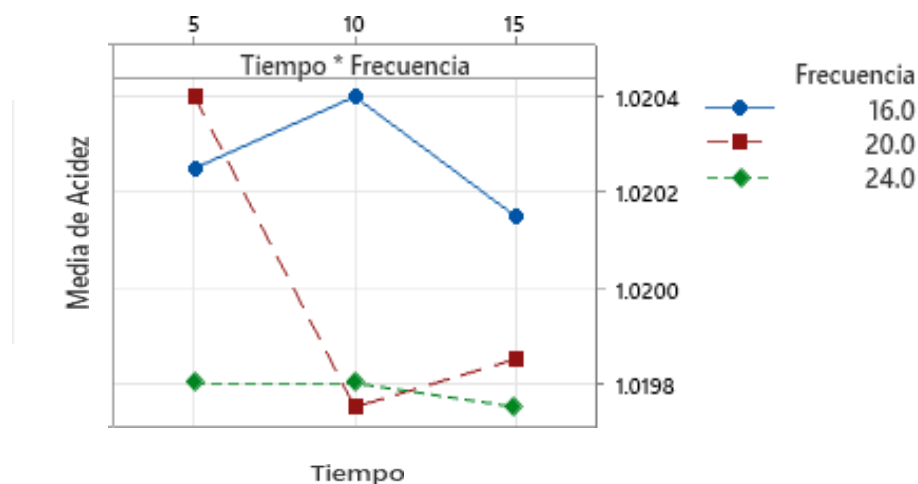
Valores de Densidad de la pulpa de arándano ultrasonificada

Frecuencia (kHz)	Tiempo (min)	Densidad
16	5	1.0196
16	5	1.0204
16	10	1.0197
16	10	1.0206
16	15	1.0198
16	15	1.02
20	5	1.0202
20	5	1.0201
20	10	1.0195
20	10	1.02
20	15	1.0199
20	15	1.0203
24	5	1.0204
24	5	1.0197
24	10	1.0201
24	10	1.02
24	15	1.0198
24	15	1.0202

Los resultados obtenidos variaron entre 1.0195 y 1.0206 g/cm³, registrándose el valor máximo en el tratamiento de 16 kHz durante 10 min (1.0206 g/cm³) y el valor mínimo en el tratamiento de 20 kHz durante 10 min (1.0195 g/cm³). A 16 kHz, los valores de densidad oscilaron entre 1.0196 y 1.0206 g/cm³; a 20 kHz, entre 1.0195 y 1.0203 g/cm³; y a 24 kHz, entre 1.0197 y 1.0204 g/cm³. En términos generales, la densidad se mantuvo dentro de un rango estrecho para todas las combinaciones de frecuencia y tiempo evaluadas, sin observarse variaciones marcadas entre los tratamientos.

Figura 7.

Gráfica de interacción Tiempo – Frecuencia de Densidad



La figura muestra el efecto de interacción entre el tiempo de sonicación y la frecuencia ultrasónica sobre la densidad de la pulpa de arándano. Se observa que la densidad se mantuvo en un rango estrecho entre 1.0197 y 1.0204 g/cm³ durante todos los tratamientos evaluados. A 16 kHz, la densidad aumentó desde los 5 min hasta alcanzar un valor máximo a los 10 min, seguido de una ligera disminución a los 15 min. Por otro lado, a 20 kHz se registró una disminución hasta los 10 min y un posterior incremento a los 15 min. En el caso de 24 kHz, la densidad presentó una tendencia ligeramente decreciente conforme aumentó el tiempo de tratamiento. Asimismo, se observa que las curvas no presentan un comportamiento paralelo, evidenciando diferencias en la respuesta de la densidad según la combinación de frecuencia ultrasónica y tiempo de sonicación aplicada.

Tabla 13.*Análisis estadístico de Densidad mediante ANOVA*

Análisis de Varianza					
Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Frecuencia	2	0.0000000033	0.0000000017	0.01	0.98841
Tiempo	2	0.0000000233	0.0000000117	0.08	0.92221
Frecuencia-Tiempo	4	0.0000002333	0.0000000583	0.41	0.79836
Error	9	0.0000012850	0.0000001428		
Total	17	0.0000015450			

Nota. Los factores de estudio y su interacción no mostraron efectos significativos sobre la densidad de la pulpa ($p > 0.05$).

El análisis de varianza (ANOVA) factorial aplicado a la densidad de la pulpa de arándano se presenta en la tabla anterior. Los resultados evidenciaron que la frecuencia ultrasónica, el tiempo de sonicación y la interacción entre ambos factores no presentaron efectos estadísticamente significativos sobre esta variable. La frecuencia no influyó significativamente en la densidad ($p = 0.98841$), al igual que el tiempo de sonicación ($p = 0.92221$) y la interacción frecuencia $\times$ tiempo ($p = 0.79836$). Asimismo, los valores bajos de F indican que la variabilidad atribuida a los tratamientos fue mínima en comparación con la variabilidad experimental. De manera general, la densidad se mantuvo dentro de un intervalo estrecho, entre 1.0195 y 1.0206 g/cm³, sin evidenciar una tendencia definida asociada al incremento de la frecuencia de 16, 20 y 24 kHz ni al tiempo de sonicación de 5, 10 y 15 min. Por tanto, la aplicación de ultrasonido no modificó significativamente la relación entre masa y volumen de la pulpa de arándano.

Estos resultados coinciden con estudios recientes realizados en matrices frutales y vegetales tratadas con ultrasonido, donde las principales modificaciones se han observado en propiedades estructurales, funcionales o reológicas, mientras

que ciertos parámetros fisicoquímicos globales se mantienen estables. En pulpa de arándano sometida a ultrasonido, las principales variaciones se relacionaron con propiedades funcionales y reológicas, sin cambios importantes en algunos parámetros fisicoquímicos de la matriz (Sousa et al., 2025). De manera similar, en jugo de naranja y néctar de mango tratados con ultrasonido a 20 kHz, radiación UVC y la combinación US+UVC, se mantuvieron estables el pH, los °Brix y la acidez titulable, aun cuando se observó inactivación microbiana (Ramírez-Corona et al., 2024). Asimismo, en jugos de calabaza tratados con ultrasonido a 25 kHz bajo diferentes condiciones de potencia, tiempo y temperatura, se observaron cambios en tamaño de partícula, microestructura y actividad antioxidante, sin alteraciones significativas en parámetros fisicoquímicos como pH, sólidos solubles y acidez titulable (Zhang et al., 2024). La concordancia entre los resultados obtenidos y los estudios mencionados se explica porque la densidad depende principalmente de la proporción entre agua, sólidos solubles, sólidos suspendidos y aire incorporado en la matriz. Durante la sonicación, la cavitación acústica genera microcorrientes, microchorros, fuerzas de cizallamiento, compresión, expansión y ruptura parcial de estructuras celulares; sin embargo, estos fenómenos actúan principalmente sobre la dispersión de partículas, la homogeneización de la pulpa y la organización microscópica de la matriz, sin modificar de manera significativa la composición global del sistema (Bernardi et al., 2021; Pandiselvam et al., 2023; Qiu et al., 2020). Por ello, los tratamientos aplicados a 16, 20 y 24 kHz generaron variaciones mínimas entre muestras, pero no cambios estadísticamente significativos en la densidad.

En el caso específico de la pulpa de arándano, la estabilidad de la densidad se relaciona con la conservación de su composición fisicoquímica general. Los resultados previos de pH, °Brix y acidez titulable evidenciaron que la sonicación no modificó significativamente el equilibrio ácido-base, la concentración de sólidos solubles ni la fracción ácida titulable. En ese sentido, al mantenerse estable la proporción de agua, azúcares, ácidos orgánicos, pectinas, compuestos fenólicos y partículas suspendidas, también se conserva la relación masa-volumen de la pulpa. Los componentes como azúcares, ácidos orgánicos, antocianinas y compuestos fenólicos influyen en la calidad fisicoquímica y funcional del arándano, mientras que la estructura de las pulpas depende de factores como pH, fuerza iónica y pectina soluble (Carvalho et al., 2024; Wu et al., 2021). Por esta razón, aunque el ultrasonido modifica físicamente la matriz, no altera la composición global suficiente para generar cambios significativos en la densidad.

Este comportamiento también se explica por la naturaleza del tratamiento ultrasónico en matrices líquidas o semilíquidas. En condiciones controladas, el ultrasonido mejora la homogeneización, reduce el tamaño de partícula y favorece la estabilidad de la suspensión, pero no modifica necesariamente propiedades físicas globales cuando no existe pérdida de agua, concentración de solutos o incorporación significativa de aire en el sistema. En jugos y pulpas, los efectos del ultrasonido dependen de la intensidad del tratamiento y de las características propias de la matriz, por lo que sus cambios se expresan principalmente en la microestructura y no siempre en propiedades macroscópicas como densidad, °Brix, pH o acidez titulable (Lepaus et al., 2023). Por ello, la estabilidad de la densidad observada en la pulpa de arándano tratada

a 16, 20 y 24 kHz responde a que la cavitación modificó la matriz a escala física, pero no alteró la proporción global entre masa y volumen.

Desde el punto de vista microbiológico, la estabilidad de la densidad adquiere relevancia tecnológica porque refleja que la sonicación no produjo concentración ni dilución de la pulpa, manteniendo la relación entre agua, sólidos solubles y sólidos suspendidos. Esta condición es importante en matrices frutales, ya que los cambios en la composición global pueden modificar la disponibilidad de nutrientes, la movilidad de partículas y las condiciones físicas del medio. Sin embargo, la literatura reciente indica que la acción microbiológica del ultrasonido no se sustenta en cambios de densidad ni en una modificación de la composición global de la matriz, sino en los efectos mecánicos y químicos generados por la cavitación acústica. En jugo de naranja y néctar de mango tratados con ultrasonido a 20 kHz, la inactivación de bacterias mesófilas aerobias, mohos y levaduras ocurrió manteniendo estables los parámetros fisicoquímicos del producto (Ramírez-Corona et al., 2024). De manera similar, en jugos de calabaza tratados con ultrasonido a 25 kHz, la reducción del recuento total de colonias se presentó junto con cambios estructurales, pero sin alteraciones relevantes en las propiedades fisicoquímicas generales (Zhang et al., 2024).

En ese sentido, el mantenimiento de la densidad en la pulpa de arándano tratada con ultrasonido se explica porque la cavitación actúa principalmente sobre la estructura celular, la dispersión de partículas y la integridad de las células microbianas, sin modificar directamente la proporción global entre agua y sólidos de la matriz. Los mecanismos asociados a ondas de choque, presión localizada, radicales libres, fuerzas de corte y formación de poros afectan la

estructura celular y microbiana, pero no implican necesariamente cambios significativos en propiedades físicas globales como la densidad (Lepaus et al., 2023).

4.2.5. Índice de Madurez

Tabla 14.

Valores de Índice de Madurez de la pulpa de arándano ultrasonificada

Frecuencia (kHz)	Tiempo (min)	Índice de Madurez
Control	Control	12.863
16	5	12.884
16	5	12.824
16	10	12.846
16	10	12.86
16	15	12.915
16	15	12.828
20	5	12.854
20	5	12.826
20	10	12.876
20	10	12.89
20	15	12.816
20	15	12.874
24	5	12.852
24	5	12.91
24	10	12.855
24	10	12.87
24	15	12.829
24	15	12.891

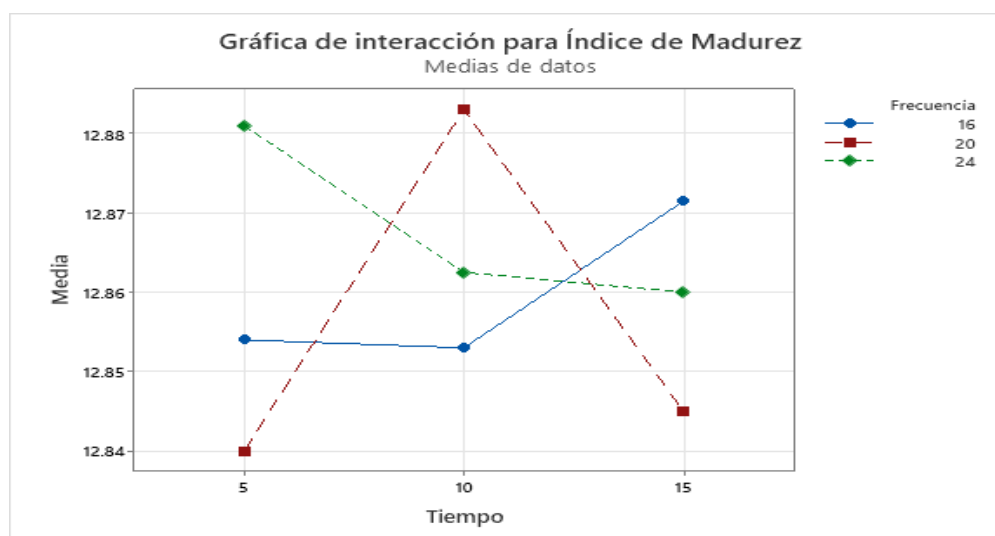
Nota. El índice de madurez fue calculado mediante la relación entre los sólidos solubles totales expresados en °Brix y la acidez titulable.

Los valores del índice de madurez de la pulpa de arándano control y sometida a ultrasonido se presentan en la tabla anterior. El índice de madurez de la muestra control fue de 12.863, calculado a partir de los valores de 11.86 °Brix y 0.922 % de acidez total obtenidos en la caracterización fisicoquímica inicial. En las muestras ultrasonificadas, los resultados variaron entre 12.816 y 12.915,

registrándose el valor máximo en el tratamiento de 16 kHz durante 15 min, mientras que el valor mínimo se observó en el tratamiento de 20 kHz durante 15 min. A la frecuencia de 16 kHz, los valores oscilaron entre 12.824 y 12.915; a 20 kHz, entre 12.816 y 12.890; y a 24 kHz, entre 12.829 y 12.910. En términos generales, el índice de madurez se mantuvo dentro de un intervalo reducido en todas las combinaciones de frecuencia ultrasónica y tiempo de sonicación evaluadas, presentando valores cercanos al control, lo cual indica que la relación entre los sólidos solubles totales y la acidez titulable presentó baja variabilidad entre los tratamientos.

Figura 8.

Gráfica de interacción Tiempo – Frecuencia de Viscosidad



La figura anterior muestra la interacción entre el tiempo de sonicación y la frecuencia ultrasónica sobre el índice de madurez de la pulpa de arándano. En términos generales, los valores se mantuvieron dentro de un intervalo reducido, aproximadamente entre 12.84 y 12.88, evidenciando una baja variabilidad entre los tratamientos evaluados. A una frecuencia de 16 kHz se observa una ligera estabilidad entre 5 y 10 min, seguida de un incremento a los 15 min. En el

tratamiento de 20 kHz se aprecia un aumento del índice de madurez hasta los 10 min, alcanzando el valor promedio más alto, para luego disminuir a los 15 min. Por otro lado, a 24 kHz se evidencia una tendencia ligeramente descendente conforme aumenta el tiempo de sonicación. Asimismo, las curvas no presentan un comportamiento paralelo, lo que indica una posible interacción entre la frecuencia y el tiempo; sin embargo, las diferencias observadas fueron de baja magnitud.

Tabla 15.

Análisis estadístico de índice de madurez mediante ANOVA

Análisis de Varianza					
Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Frecuencia	2	0.000443	0.000222	0.17	0.844
Tiempo	2	0.000231	0.000115	0.09	0.915
Frecuencia-Tiempo	4	0.002941	0.000735	0.57	0.69
Error	9	0.011571	0.001286		
Total	17	0.015186			

Nota. La frecuencia, el tiempo y su interacción presentaron efectos estadísticamente significativos sobre la viscosidad ($p < 0.05$).

El análisis de varianza (ANOVA) factorial aplicado al índice de madurez de la pulpa de arándano se presenta en la tabla anterior. Los resultados evidenciaron que la frecuencia ultrasónica, el tiempo de sonicación y la interacción entre ambos factores no presentaron efectos estadísticamente significativos sobre esta variable. La frecuencia no influyó significativamente en el índice de madurez ($p = 0.844$), al igual que el tiempo de sonicación ($p = 0.915$) y la interacción frecuencia $\times$ tiempo ($p = 0.690$). Asimismo, los valores bajos de F indican que la variabilidad atribuida a los tratamientos fue reducida en comparación con la variabilidad experimental. De manera general, el índice de madurez de las muestras ultrasonificadas se mantuvo dentro de un intervalo estrecho, entre 12.816 y 12.915, con valores cercanos al control, que presentó un índice de 12.863. Por tanto, la aplicación de ultrasonido a 16, 20 y 24 kHz durante 5, 10

y 15 min no modificó significativamente la relación entre sólidos solubles totales y acidez titulable de la pulpa de arándano.

Este resultado se explica porque el índice de madurez se obtiene mediante la relación entre los °Brix y la acidez titulable. En los apartados anteriores, ambos parámetros se mantuvieron estables frente a las condiciones de sonicación aplicadas; por ello, la relación azúcar/acidez tampoco presentó variaciones significativas. En términos tecnológicos, el índice de madurez expresa el equilibrio entre dulzor y acidez de la matriz frutal. Al no modificarse de manera significativa ni los sólidos solubles totales ni la fracción ácida titulable, el ultrasonido conservó el balance fisicoquímico de la pulpa de arándano. Esto confirma que las variaciones visuales observadas en la gráfica de interacción fueron de baja magnitud y no representaron un efecto estadístico real de la frecuencia ni del tiempo de tratamiento.

Los resultados obtenidos coinciden con estudios recientes en matrices frutales y vegetales tratadas con ultrasonido, donde se han observado mejoras funcionales, estructurales o microbiológicas sin cambios significativos en los parámetros que determinan el índice de madurez. En jugo de pitahaya roja sometido a ultrasonido, se registraron incrementos en compuestos fenólicos, antocianinas y capacidad antioxidante, sin alteraciones significativas en los sólidos solubles totales, el pH ni la acidez titulable (Tan et al., 2023). De manera similar, en jugo de naranja y néctar de mango tratados con ultrasonido a 20 kHz, radiación UVC y la combinación US+UVC, los °Brix, el pH y la acidez titulable se mantuvieron estables, aun cuando se obtuvo una mayor inactivación de bacterias mesófilas aerobias, mohos y levaduras (Ramírez-Corona et al., 2024). Asimismo, en jugos de calabaza tratados con ultrasonido a 25 kHz bajo diferentes condiciones de

potencia, tiempo y temperatura, se conservaron los sólidos solubles, el pH y la acidez titulable, mientras se redujo el recuento microbiano, disminuyó el tamaño de partícula y aumentó la actividad antioxidante (Zhang et al., 2024).

La concordancia entre los resultados obtenidos y los estudios mencionados se sustenta en que el ultrasonido actúa principalmente sobre la estructura física de la matriz alimentaria y no sobre la relación global entre azúcares y ácidos orgánicos. Durante la sonicación, la cavitación acústica genera microcorrientes, fuerzas de cizallamiento, microchorros, compresión, expansión y ruptura parcial de estructuras celulares; sin embargo, estos fenómenos modifican la dispersión de partículas, la homogeneización de la pulpa y la liberación de compuestos intracelulares, pero no generan una degradación, formación o concentración significativa de los solutos que determinan los °Brix y la acidez titulable (Bernardi et al., 2021; Pandiselvam et al., 2023; Qiu et al., 2020). Por ello, los tratamientos aplicados a 16, 20 y 24 kHz produjeron variaciones mínimas en el índice de madurez, pero no cambios estadísticamente significativos.

En el caso específico de la pulpa de arándano, la estabilidad del índice de madurez se relaciona con la composición natural de la matriz, caracterizada por la presencia de azúcares solubles, ácidos orgánicos, compuestos fenólicos, antocianinas, pectinas y otros solutos distribuidos en la fase acuosa. La relación entre azúcares y ácidos orgánicos está directamente vinculada con la calidad fisicoquímica, funcional y sensorial del arándano, ya que determina el balance entre dulzor y acidez del fruto (Wu et al., 2021). Asimismo, las propiedades de las pulpas de frutas dependen de la estructura de la matriz, incluyendo pH, fuerza iónica y pectina soluble, componentes que contribuyen a la estabilidad del sistema durante el procesamiento (Carvalho et al., 2024). En ese sentido,

aunque el ultrasonido modifica físicamente la estructura celular y favorece la dispersión de los componentes de la pulpa, la relación entre los sólidos solubles y la acidez titulable se conserva porque ambos parámetros permanecen estables bajo las condiciones de tratamiento evaluadas.

Al comparar el índice de madurez control obtenido en la presente investigación con lo reportado por Archila et al. (2022), se observa una diferencia atribuida a la composición inicial de la materia prima. En dicho estudio se reportaron 10.6 °Brix y 0.76 % de acidez total en arándano, lo que permite estimar un índice de madurez aproximado de 13.95, valor superior al control obtenido en esta investigación, que fue de 12.863. Esta diferencia se explica porque la pulpa evaluada en el presente estudio presentó una mayor acidez titulable. Debido a que la acidez se ubica en el denominador de la relación °Brix/acidez, un mayor contenido de ácidos orgánicos reduce el valor final del índice de madurez, aun cuando los sólidos solubles sean elevados. Por ello, el menor índice obtenido no se relaciona con una menor concentración de azúcares, sino con el mayor nivel de acidez propio de la pulpa de arándano analizada.

Desde el punto de vista microbiológico, la estabilidad del índice de madurez tiene relevancia tecnológica porque expresa la conservación simultánea de los sólidos solubles y de la acidez titulable, dos factores relacionados con la disponibilidad de sustratos y con las condiciones ácidas de la matriz frutal. Los azúcares solubles constituyen una fuente de nutrientes para microorganismos, mientras que los ácidos orgánicos contribuyen a mantener un ambiente ácido que limita el desarrollo de microorganismos sensibles a bajos valores de pH. En este contexto, la literatura señala que el ultrasonido favorece la estabilidad microbiológica por mecanismos asociados a la cavitación acústica, no por una

modificación directa de la relación azúcar/acidez. En jugo de naranja y néctar de mango tratados con ultrasonido a 20 kHz, la inactivación de bacterias mesófilas aerobias, mohos y levaduras ocurrió manteniendo estables los °Brix y la acidez titulable (Ramírez-Corona et al., 2024). De manera similar, en jugos de calabaza tratados con ultrasonido a 25 kHz, la reducción del recuento total de colonias se presentó sin cambios relevantes en los sólidos solubles ni en la acidez titulable (Zhang et al., 2024).

Por tanto, el mantenimiento del índice de madurez en la pulpa de arándano se explica porque la sonicación conservó la relación entre sólidos solubles totales y acidez titulable, mientras la cavitación actuó principalmente sobre la estructura celular, la dispersión de partículas y los mecanismos asociados a la estabilidad microbiológica mediante ondas de choque, presión localizada, radicales libres, formación de poros y fuerzas de corte (Lepaus et al., 2023).

4.3. Determinación de propiedades reológicas de la pulpa de arándano ultrasonificada.

4.3.1. Viscosidad

Tabla 16.

Valores de Viscosidad de la pulpa de arándano ultrasonificada

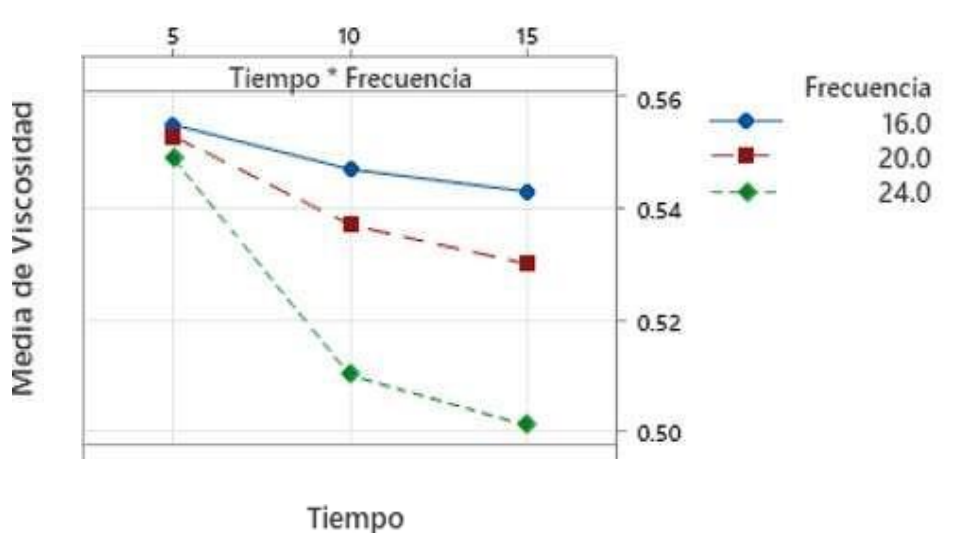
Frecuencia (kHz)	Tiempo (min)	Viscosidad
16	5	0.550
16	5	0.560
16	10	0.540
16	10	0.554
16	15	0.539
16	15	0.547
20	5	0.547
20	5	0.559
20	10	0.534
20	10	0.540
20	15	0.529
20	15	0.531
24	5	0.544
24	5	0.554
24	10	0.507
24	10	0.513
24	15	0.495
24	15	0.507

Los valores de viscosidad de la pulpa de arándano sometida a ultrasonido se presentan en la presente tabla, observándose resultados comprendidos entre 0.495 y 0.560 Pa·s. El mayor valor de viscosidad se registró en el tratamiento de 16 kHz durante 5 min (0.560 Pa·s), mientras que el menor correspondió al tratamiento de 24 kHz durante 15 min (0.495 Pa·s). A la frecuencia de 16 kHz, los valores disminuyeron de 0.550–0.560 Pa·s a los 5 min a 0.539–0.547 Pa·s a los 15 min; de manera similar, a 20 kHz se registraron valores de 0.547–0.559 Pa·s a los 5 min y de 0.529–0.531 Pa·s a los 15 min. Por otro lado, a 24 kHz se

observaron valores de 0.544–0.554 Pa·s a los 5 min, disminuyendo hasta 0.495–0.507 Pa·s a los 15 min.

Figura 9.

Gráfica de interacción Tiempo – Frecuencia de Viscosidad



La presente figura muestra la interacción entre el tiempo de sonicación y la frecuencia ultrasónica sobre la viscosidad de la pulpa de arándano. Se observa una disminución progresiva de la viscosidad conforme aumentó el tiempo de tratamiento para las tres frecuencias evaluadas. A 16 kHz y 20 kHz la reducción fue gradual, mientras que a 24 kHz se registró un descenso más pronunciado entre 5 y 10 min, alcanzándose los menores valores de viscosidad a los 15 min. Asimismo, las diferencias en la pendiente de las curvas evidencian una interacción entre ambos factores, indicando que el efecto del tiempo sobre la viscosidad dependió de la frecuencia ultrasónica aplicada.

Tabla 17.*Análisis estadístico de Viscosidad mediante ANOVA*

Análisis de Varianza					
Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Frecuencia	2	0.002544	0.001272	27.79	0.0001408
Tiempo	2	0.002502	0.001251	27.33	0.0001503
Frecuencia-Tiempo	4	0.000808	0.000202	4.41	0.0301293
Error	9	0.000412	0.000046		
Total	17	0.006266			

Nota. La frecuencia, el tiempo y su interacción presentaron efectos estadísticamente significativos sobre la viscosidad ($p < 0.05$).

El análisis de varianza (ANOVA) factorial aplicada a la viscosidad de la pulpa de arándano se presenta en la tabla anterior. Los resultados evidenciaron que la frecuencia ultrasónica, el tiempo de sonicación y la interacción entre ambos factores presentaron efectos estadísticamente significativos sobre esta variable. La frecuencia influyó significativamente en la viscosidad ($p = 0.0001408$), al igual que el tiempo de sonicación ($p = 0.0001503$) y la interacción frecuencia $\times$ tiempo ($p = 0.0301293$).

Asimismo, los valores de F indican que la frecuencia ultrasónica y el tiempo de sonicación tuvieron una influencia importante sobre la viscosidad, con valores de $F = 27.79$ y $F = 27.33$, respectivamente. Esto demuestra que ambos factores contribuyeron de manera similar a la modificación del comportamiento reológico de la pulpa. La interacción frecuencia $\times$ tiempo también fue significativa ($F = 4.41$), lo que indica que el efecto del tiempo de tratamiento dependió de la frecuencia ultrasónica aplicada.

Los resultados experimentales fueron consistentes con el ANOVA, debido a que la viscosidad disminuyó conforme aumentaron la frecuencia y el tiempo de sonicación. Los valores oscilaron entre 0.560 y 0.495 Pa·s, registrándose las mayores viscosidades en los tratamientos de menor intensidad, principalmente

a 16 kHz durante 5 min, y los menores valores en el tratamiento de 24 kHz durante 15 min. Esta tendencia confirma que la aplicación de ultrasonido modificó significativamente la resistencia al flujo de la pulpa de arándano.

Tabla 18.

Comparaciones por parejas de Tukey para la Viscosidad: Frecuencia - Tiempo

Frecuencia-Tiempo	N	Media	Agrupación		
16 5	2	0.555	A		
20 5	2	0.553	A		
24 5	2	0.549	A		
16 10	2	0.547	A		
16 15	2	0.543	A		
20 10	2	0.537	A		
20 15	2	0.530	A	B	
24 10	2	0.510		B	C
24 15	2	0.501			C

Nota. Las comparaciones de Tukey evidencian diferencias significativas entre varios tratamientos, identificándose grupos homogéneos según los niveles de viscosidad obtenidos.

El análisis de comparaciones múltiples mediante la prueba de Tukey permitió identificar diferencias significativas entre los tratamientos evaluados según la combinación frecuencia–tiempo aplicado. Los tratamientos de 16 kHz–5 min, 20 kHz–5 min, 24 kHz–5 min, 16 kHz–10 min, 16 kHz–15 min y 20 kHz–10 min conformaron el grupo A, con viscosidades promedio entre 0.537 y 0.555 Pa·s. Esto indica que las condiciones de menor intensidad o de menor tiempo de sonicación no produjeron reducciones suficientemente marcadas para diferenciarse estadísticamente entre sí.

El tratamiento de 20 kHz–15 min presentó una viscosidad promedio de 0.530 Pa·s y se ubicó entre los grupos A y B, evidenciando un comportamiento intermedio. Por su parte, el tratamiento de 24 kHz–10 min presentó una media

de 0.510 Pa·s y se ubicó entre los grupos B y C, mostrando una reducción mayor respecto a los tratamientos del grupo A. Finalmente, el tratamiento de 24 kHz–15 min registró la menor viscosidad promedio, con 0.501 Pa·s, ubicándose en el grupo C. Esto demuestra que la combinación de mayor frecuencia y mayor tiempo de sonicación fue la condición más efectiva para reducir la viscosidad de la pulpa de arándano.

La reducción de la viscosidad también se evidencia en términos porcentuales. Al comparar el tratamiento de 16 kHz–5 min con el de 24 kHz–15 min, la viscosidad disminuyó de 0.555 a 0.501 Pa·s, lo que representa una reducción aproximada de 9.73 %. Asimismo, a una frecuencia constante de 24 kHz, el incremento del tiempo de sonicación de 5 a 15 min redujo la viscosidad de 0.549 a 0.501 Pa·s, equivalente a una disminución aproximada de 8.74 %. Estos resultados confirman que la intensificación del tratamiento ultrasónico redujo significativamente la resistencia al flujo de la pulpa.

Los resultados obtenidos coinciden con estudios recientes en matrices vegetales tratadas con ultrasonido, donde la disminución de la viscosidad se ha relacionado con modificaciones estructurales de pectinas, polisacáridos, fibras y componentes celulares. Suo et al. (2022) observaron una disminución significativa de la viscosidad aparente en jugo de calabaza tratado con ultrasonido a 25 kHz, principalmente bajo condiciones de mayor intensidad, atribuyendo este comportamiento a cambios estructurales en componentes como la pectina. De manera similar, Chen et al. (2020) reportaron que el ultrasonido de alta potencia aplicado a pulpa de fresa modificó la estructura de la pectina soluble, redujo su peso molecular y alteró las propiedades reológicas del sistema. Asimismo, Du et al. (2022) indicaron que la sonicación modifica las

características estructurales de la pectina, generando partículas más uniformes y afectando propiedades físicas relacionadas con la viscosidad y la estabilidad de sistemas alimentarios.

La concordancia entre los resultados obtenidos y los estudios mencionados se explica porque la viscosidad de una pulpa frutal depende directamente de la organización de sus partículas suspendidas, pectinas, polisacáridos, fibra dietética y componentes de pared celular. Durante la sonicación, la cavitación acústica genera microcorrientes, fuerzas de cizallamiento, microchorros, compresión y expansión localizada, fenómenos que rompen agregados, reducen el tamaño de partícula y modifican la red estructural responsable de la resistencia al flujo (Bernardi et al., 2021; Pandiselvam et al., 2023; Qiu et al., 2020). Por ello, los tratamientos de mayor intensidad, especialmente 24 kHz durante 10 y 15 min, generaron una mayor desorganización estructural de la pulpa y, en consecuencia, una menor viscosidad.

En el caso específico de la pulpa de arándano, la reducción de la viscosidad se relaciona con su composición estructural, caracterizada por la presencia de pectinas, fibra dietética, compuestos fenólicos, antocianinas, azúcares, ácidos orgánicos y partículas celulares dispersas. El arándano contiene componentes de pared celular y fibra que contribuyen al comportamiento reológico de la pulpa (Rashidinejad, 2020). Asimismo, las propiedades reológicas de las pulpas de frutas dependen de la composición estructural de la matriz, incluyendo pH, fuerza iónica y pectina soluble, factores que influyen en la interacción entre partículas y en la resistencia al flujo (Carvalho et al., 2024). En ese sentido, el ultrasonido aplicado a 16, 20 y 24 kHz modificó físicamente la matriz, pero la

reducción más marcada se produjo cuando la frecuencia alta se combinó con mayor tiempo de exposición.

Desde el punto de vista tecnológico, la disminución de la viscosidad es relevante porque mejora la fluidez de la pulpa y favorece operaciones unitarias como bombeo, mezclado, transporte, dosificación y envasado. Asimismo, una matriz menos viscosa facilita la dispersión de partículas y la distribución de la energía ultrasónica dentro del sistema. Por tanto, la reducción de la viscosidad se explica porque la cavitación actúa principalmente sobre la estructura física de la pulpa mediante ruptura de agregados, reducción del tamaño de partícula, fuerzas de corte y desorganización de la red formada por pectinas y componentes celulares (Lepaus et al., 2023; Pandiselvam et al., 2023; Zhou et al., 2024).

4.3.2. Comportamiento reológico de la pulpa de arándano

Tabla 19.

Resultados del esfuerzo cortante de la pulpa de arándano sometida a diferentes tratamientos ultrasónicos

Tiempo (s)	Ritmo cortante (1/s)	Tratamiento Control Esfuerzo cortante (Pa)	16 KHz			20 KHz			24 KHz		
			5 minutos	10 minutos	15 minutos	5 minutos	10 minutos	15 minutos	5 minutos	10 minutos	15 minutos
			Esfuerzo cortante (Pa)	Esfuerzo cortante (Pa)	Esfuerzo cortante (Pa)	Esfuerzo cortante (Pa)	Esfuerzo cortante (Pa)	Esfuerzo cortante (Pa)	Esfuerzo cortante (Pa)	Esfuerzo cortante (Pa)	Esfuerzo cortante (Pa)
4	1.01	8.091 ± 0.231	6.623 ± 0.412	4.821 ± 0.183	3.978 ± 0.256	5.694 ± 0.521	4.372 ± 0.298	3.487 ± 0.145	4.452 ± 0.367	3.768 ± 0.224	3.434 ± 0.479
8	8.08	10.946 ± 0.287	7.912 ± 0.121	6.245 ± 0.397	5.241 ± 0.218	7.318 ± 0.462	5.742 ± 0.189	5.168 ± 0.321	6.257 ± 0.271	5.038 ± 0.603	4.692 ± 0.158
12	15.15	11.752 ± 0.324	8.432 ± 0.354	6.588 ± 0.268	5.583 ± 0.511	8.087 ± 0.194	6.187 ± 0.423	5.715 ± 0.136	7.152 ± 0.289	5.243 ± 0.477	5.344 ± 0.212
16	22.22	12.614 ± 0.296	8.741 ± 0.067	6.829 ± 0.319	5.812 ± 0.239	8.512 ± 0.651	6.604 ± 0.201	6.089 ± 0.487	7.731 ± 0.166	5.591 ± 0.533	5.592 ± 0.154
20	29.29	12.881 ± 0.351	9.035 ± 0.292	6.973 ± 0.143	6.037 ± 0.385	8.814 ± 0.512	6.911 ± 0.268	6.442 ± 0.176	8.177 ± 0.608	6.031 ± 0.238	5.764 ± 0.347
24	36.36	13.479 ± 0.382	9.268 ± 0.487	7.138 ± 0.221	6.287 ± 0.599	9.042 ± 0.318	7.167 ± 0.452	6.618 ± 0.119	8.583 ± 0.236	6.314 ± 0.401	5.921 ± 0.278
28	43.43	13.695 ± 0.301	9.419 ± 0.158	7.261 ± 0.384	6.421 ± 0.267	9.234 ± 0.502	7.289 ± 0.140	6.829 ± 0.330	8.921 ± 0.451	6.582 ± 0.206	6.148 ± 0.612
32	50.5	14.108 ± 0.413	9.654 ± 0.236	7.381 ± 0.174	6.542 ± 0.523	9.311 ± 0.197	7.381 ± 0.415	6.992 ± 0.249	9.163 ± 0.332	6.803 ± 0.289	6.237 ± 0.165
36	57.57	14.215 ± 0.337	9.816 ± 0.611	7.492 ± 0.298	6.689 ± 0.145	9.428 ± 0.503	7.524 ± 0.192	7.136 ± 0.576	9.403 ± 0.218	7.011 ± 0.472	6.412 ± 0.301
40	64.64	14.638 ± 0.364	9.982 ± 0.278	7.601 ± 0.423	6.811 ± 0.189	9.543 ± 0.349	7.687 ± 0.627	7.214 ± 0.203	9.651 ± 0.178	7.221 ± 0.326	6.523 ± 0.492
44	71.71	14.673 ± 0.289	10.132 ± 0.389	7.736 ± 0.256	6.927 ± 0.614	9.671 ± 0.291	7.873 ± 0.237	7.344 ± 0.342	9.874 ± 0.433	7.387 ± 0.153	6.642 ± 0.275
48	78.78	15.012 ± 0.447	10.224 ± 0.144	7.885 ± 0.502	6.973 ± 0.284	9.759 ± 0.614	8.041 ± 0.268	7.428 ± 0.186	10.042 ± 0.401	7.553 ± 0.492	6.742 ± 0.341
52	85.85	15.046 ± 0.328	10.337 ± 0.253	8.071 ± 0.337	7.098 ± 0.418	9.807 ± 0.208	8.232 ± 0.569	7.582 ± 0.274	10.226 ± 0.607	7.692 ± 0.398	6.873 ± 0.219
56	92.92	15.241 ± 0.391	10.429 ± 0.501	8.126 ± 0.199	7.229 ± 0.361	9.875 ± 0.443	8.351 ± 0.308	7.639 ± 0.172	10.398 ± 0.233	7.842 ± 0.629	6.987 ± 0.187
60	99.99	15.238 ± 0.355	10.523 ± 0.332	8.194 ± 0.578	7.348 ± 0.214	9.921 ± 0.261	8.496 ± 0.491	7.762 ± 0.389	10.473 ± 0.278	7.987 ± 0.155	7.096 ± 0.433

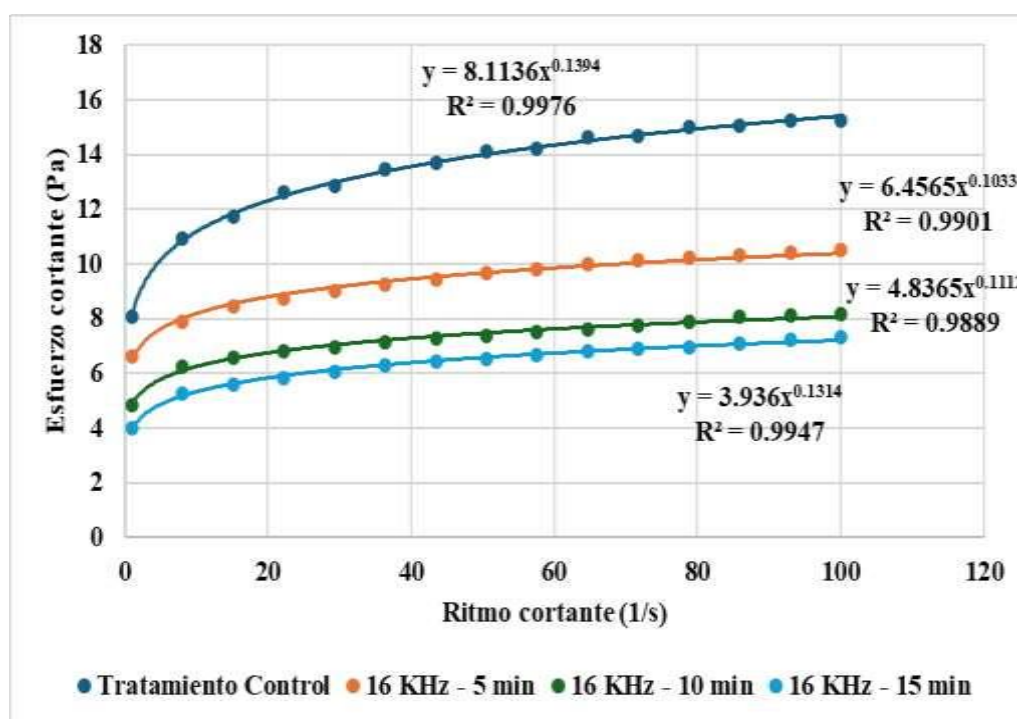
Los resultados obtenidos muestran que el esfuerzo cortante aumentó progresivamente conforme se incrementó el ritmo de corte en todos los tratamientos evaluados. Sin embargo, dicho incremento no fue proporcional al aumento del ritmo de corte, evidenciando un comportamiento característico de fluidos no newtonianos. La muestra control registró los mayores valores de esfuerzo cortante en todo el intervalo estudiado, alcanzando 15.238 Pa a un ritmo de corte de 99.99 s^{-1} , mientras que los tratamientos ultrasonificados mostraron menores valores conforme aumentaron la frecuencia y el tiempo de exposición. Los tratamientos aplicados a 24 kHz durante 10 y 15 min presentaron las menores resistencias al flujo, registrando valores máximos de 7.987 y 7.096 Pa, respectivamente, lo que representa reducciones aproximadas del 47.6 % y 53.4 % respecto al tratamiento control.

La disminución progresiva del esfuerzo cortante observada al incrementar la frecuencia y el tiempo de tratamiento puede atribuirse a los fenómenos asociados a la cavitación acústica generada durante la sonicación. La formación, crecimiento y colapso de microburbujas producen fuerzas de cizalla, microcorrientes y microchorros capaces de provocar la fragmentación parcial de estructuras macromoleculares y la dispersión de partículas presentes en la matriz (Pandiselvam et al., 2023; Zhou et al., 2024). Considerando que la pulpa de arándano contiene cantidades importantes de polisacáridos, fibras y pectinas, es probable que la combinación de mayores frecuencias y tiempos prolongados haya favorecido una modificación parcial de la red estructural interna del sistema. Este efecto podría estar asociado con la disminución de las interacciones entre componentes estructurales y la reducción del tamaño de agregados presentes en la fase dispersa, generando una menor resistencia al flujo

y, en consecuencia, menores valores de esfuerzo cortante en los tratamientos de mayor intensidad ultrasónica (Carvalho et al., 2024; Hernández-Hernández et al., 2024).

Figura 10.

Comportamiento reológico de la pulpa de arandano sonificado a 16 KHz en tiempos de 5, 10 y 15 minutos

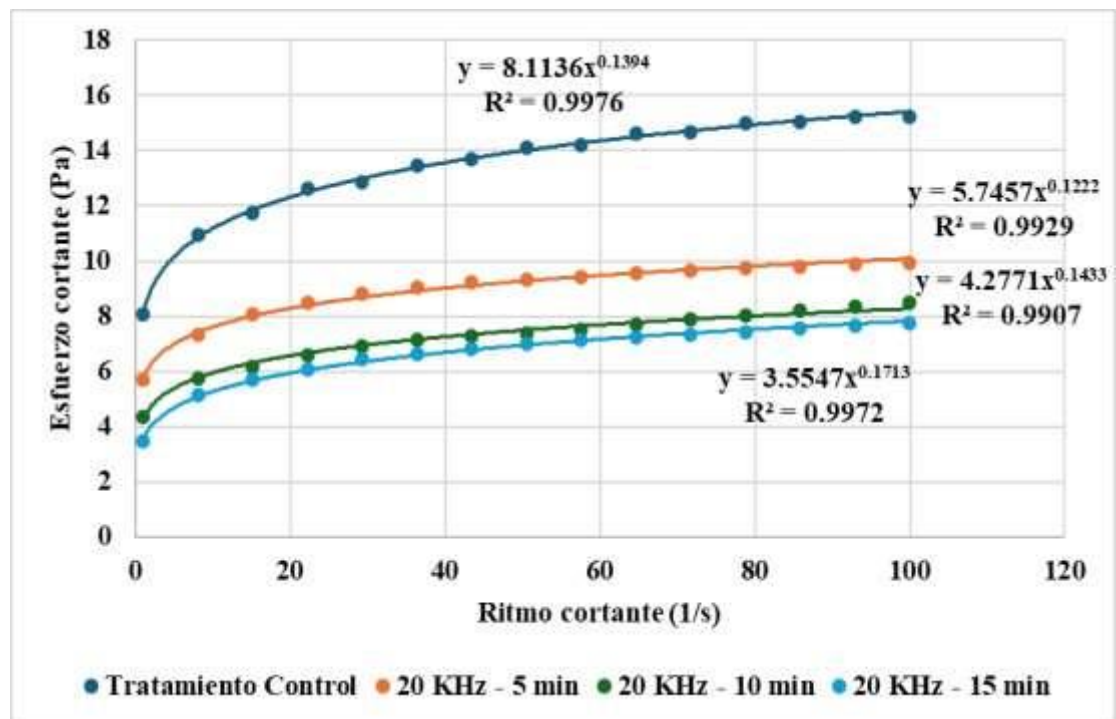


La pulpa de arándano sometida a ultrasonido a 16 kHz presentó un comportamiento característico de fluido pseudoplástico ($n < 1$), evidenciando una disminución de la viscosidad aparente conforme aumentó el ritmo cortante. Asimismo, se observó que el incremento del tiempo de sonicación de 5 a 15 minutos produjo una reducción progresiva del esfuerzo cortante y del índice de consistencia (K), pasando de 6.4565 a 3.9360 $\text{Pa} \cdot \text{s}^n$. Estos resultados sugieren que el tratamiento ultrasónico favoreció modificaciones estructurales en la matriz de la pulpa, disminuyendo su resistencia al flujo y generando un sistema más fluido. Este comportamiento coincide con lo reportado por Carvalho et al. (2024), quienes

indicaron que la aplicación de ultrasonido en matrices frutales puede reducir la viscosidad debido a cambios en la organización de componentes celulares y macromoleculares. De manera similar, Liu et al. (2024) señalaron que la reducción de la viscosidad aparente en pulpas tratadas con ultrasonido está asociada con alteraciones en polisacáridos, pectinas y complejos estructurales responsables del comportamiento viscoelástico.

Figura 11.

Comportamiento reológico de la pulpa de arándano sonificado a 20 KHz en tiempos de 5, 10 y 15 minutos

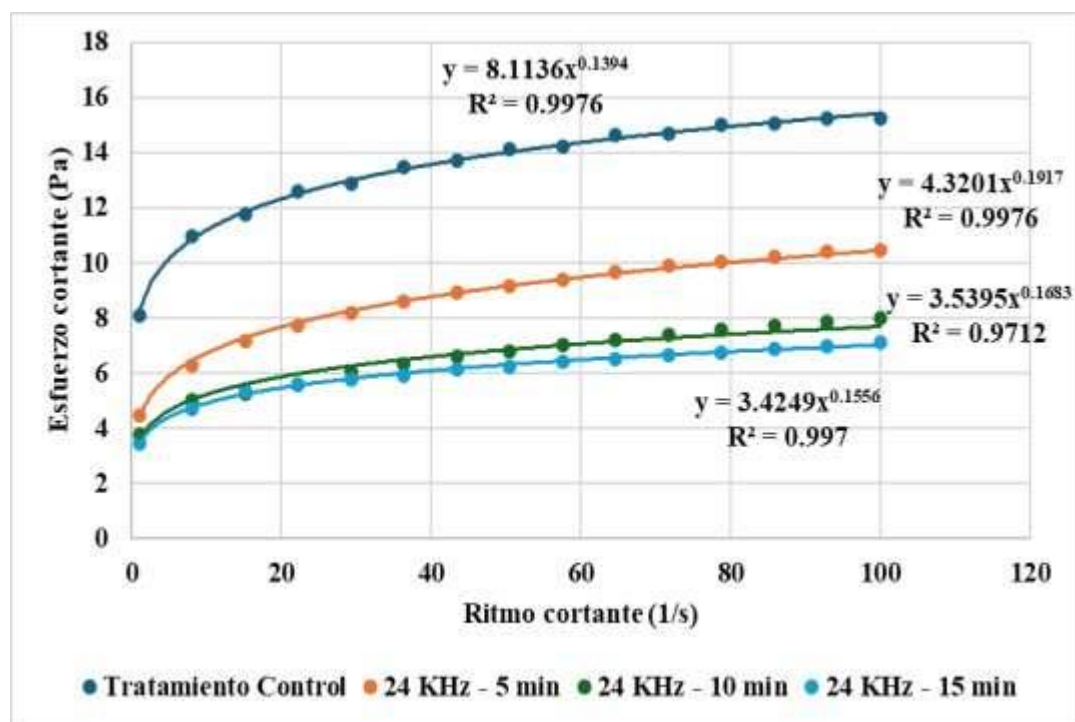


La pulpa de arándano tratada a 20 kHz mantuvo un comportamiento pseudoplástico en todas las condiciones evaluadas, ya que los valores del índice de comportamiento de flujo permanecieron por debajo de la unidad. El aumento del tiempo de sonicación de 5 a 15 minutos estuvo acompañado por una disminución progresiva del esfuerzo cortante y del índice de consistencia (K), el cual se redujo de 5.7457 a 3.5547 Pa·sⁿ. Esta tendencia indica una menor resistencia interna al

flujo y una reducción de la viscosidad aparente conforme aumentó la exposición al ultrasonido. Resultados similares fueron descritos por Hernández-Hernández et al. (2024), quienes reportaron que la cavitación acústica favorece la reducción del tamaño de partículas y la dispersión de agregados estructurales presentes en matrices alimentarias. Asimismo, Zhou et al. (2024) señalaron que las fuerzas de compresión, expansión y cizallamiento generadas durante la cavitación pueden modificar la organización interna de jugos y pulpas, produciendo cambios importantes en sus propiedades reológicas.

Figura 12.

Comportamiento reológico de la pulpa de arandano sonificado a 24 KHz en tiempos de 5, 10 y 15 minutos



La pulpa de arándano sometida a ultrasonido a 24 kHz presentó igualmente un comportamiento pseudoplástico, caracterizado por valores de n inferiores a la unidad en todos los tratamientos evaluados. Se observó que el incremento del

tiempo de sonicación de 5 a 15 minutos produjo una disminución progresiva del esfuerzo cortante y del índice de consistencia (K), pasando de 4.3201 a 3.4249 Pa·sⁿ, lo que refleja una reducción de la viscosidad aparente de la pulpa. Al comparar los tratamientos evaluados, la frecuencia de 24 kHz produjo los menores valores de K y esfuerzo cortante, evidenciando una mayor capacidad para modificar las propiedades reológicas del sistema. Este comportamiento puede atribuirse a una mayor intensidad de los fenómenos de cavitación acústica, los cuales favorecen la fragmentación parcial de estructuras celulares y la reorganización de componentes macromoleculares presentes en la matriz. Estos resultados concuerdan con lo reportado por Pandiselvam et al. (2023), quienes señalaron que el ultrasonido genera fuerzas de cizalla y microcorrientes capaces de alterar significativamente la estructura física de los alimentos. De manera similar, Lepaus et al. (2023) indicaron que la cavitación acústica promueve modificaciones estructurales que pueden traducirse en disminuciones de la viscosidad y cambios en el comportamiento reológico de productos líquidos y semisólidos.

Tabla 20.

Parámetros del modelo de Ley de Potencia de la pulpa de arándano sometida a tratamiento ultrasónico

Frecuencia (KHz)	Tiempo (minutos)	Índice de Consistencia (Pa.s ⁿ)	Índice de Comportamiento de Flujo (n)
Control	Sin Ultrasonido	8.1136 ± 0.246	0.1394 ± 0.012
16	5	6.4565 ± 0.182	0.1033 ± 0.013
	10	4.8365 ± 0.145	0.1112 ± 0.011
	15	3.936 ± 0.118	0.1314 ± 0.022
	5	5.7457 ± 0.164	0.1222 ± 0.047
20	10	4.2771 ± 0.132	0.1433 ± 0.033
	15	3.5547 ± 0.107	0.1713 ± 0.015
	5	4.3201 ± 0.129	0.1917 ± 0.010
24	10	3.5395 ± 0.106	0.1683 ± 0.024
	15	3.4249 ± 0.102	0.1556 ± 0.018

Los parámetros del modelo de Ley de Potencia de la pulpa de arándano sometida a tratamiento ultrasónico se presentan en la tabla anterior. El índice de consistencia (K) mostró una disminución progresiva respecto a la muestra control, la cual presentó un valor de $8.1136 \pm 0.246 \text{ Pa} \cdot \text{s}^n$. En los tratamientos ultrasonificados, este parámetro disminuyó conforme aumentaron la frecuencia ultrasónica y el tiempo de sonicación, alcanzando el menor valor en el tratamiento de 24 kHz durante 15 min, con $3.4249 \pm 0.102 \text{ Pa} \cdot \text{s}^n$. Esta reducción representa una disminución aproximada de 57.8 % respecto al control, lo que evidencia que el ultrasonido modificó de manera importante la consistencia de la pulpa de arándano.

La disminución del índice de consistencia se relaciona directamente con la reducción de viscosidad observada en los tratamientos de mayor intensidad. En términos reológicos, el parámetro K expresa la resistencia del fluido al movimiento; por ello, valores menores indican una matriz menos consistente y con mayor facilidad de flujo. En la presente investigación, los tratamientos de 24 kHz durante 10 y 15 min presentaron los menores valores de K , lo que confirma que la combinación de mayor frecuencia y mayor tiempo de sonicación intensificó el efecto del ultrasonido sobre la estructura interna de la pulpa. Este comportamiento se explica porque la cavitación acústica genera fuerzas de cizallamiento, microcorrientes, microchorros, compresión y expansión localizada, fenómenos capaces de romper agregados celulares, reducir el tamaño de partícula y debilitar la red estructural formada por pectinas, fibras y polisacáridos (Bernardi et al., 2021; Pandiselvam et al., 2023; Qiu et al., 2020).

Estos resultados coinciden con lo reportado por Suo et al. (2022), quienes observaron una disminución significativa de la viscosidad aparente en jugo de calabaza tratado con ultrasonido a 25 kHz, atribuyendo este comportamiento a modificaciones estructurales de componentes como la pectina. De manera similar, Chen et al. (2020) indicaron que el ultrasonido de alta potencia aplicado a pulpa de fresa modificó la estructura de la pectina soluble, redujo su peso molecular y alteró significativamente las propiedades reológicas del sistema. Asimismo, Du et al. (2022) señalaron que la sonicación modifica las características estructurales de la pectina, generando partículas más uniformes y afectando propiedades físicas relacionadas con la viscosidad, la consistencia y la estabilidad de sistemas alimentarios. Por ello, la disminución del índice de consistencia en la pulpa de

arándano se sustenta en la desorganización física de la matriz vegetal inducida por la cavitación.

En el caso específico de la pulpa de arándano, la reducción del índice de consistencia se relaciona con su composición estructural, caracterizada por la presencia de pectinas, fibra dietética, compuestos fenólicos, antocianinas, azúcares, ácidos orgánicos y partículas celulares dispersas. Estos componentes participan en la formación de una red interna que determina la resistencia al flujo de la pulpa. El arándano contiene fibra y componentes de pared celular que contribuyen a su comportamiento reológico (Rashidinejad, 2020). Asimismo, las propiedades reológicas de las pulpas de frutas dependen de la estructura de la matriz, incluyendo pH, fuerza iónica y pectina soluble, factores que influyen en la interacción entre partículas y en la consistencia del sistema (Carvalho et al., 2024). En consecuencia, la aplicación de ultrasonido a 16, 20 y 24 kHz generó una reducción progresiva de K porque alteró la organización de estos componentes estructurales, especialmente bajo las condiciones más intensas de tratamiento.

Respecto al índice de comportamiento de flujo (n), todos los tratamientos presentaron valores inferiores a la unidad, incluyendo la muestra control, cuyo valor fue de 0.1394 ± 0.012 . En las muestras ultrasonificadas, los valores de n oscilaron entre 0.1033 ± 0.013 y 0.1917 ± 0.010 , manteniéndose en todos los casos por debajo de 1. Este comportamiento confirma que la pulpa de arándano, tanto control como ultrasonificada, presentó naturaleza pseudoplástica. Es decir, la pulpa disminuye su viscosidad aparente cuando aumenta la velocidad de deformación, comportamiento característico de pulpas y jugos con partículas suspendidas, pectinas y polisacáridos.

El incremento de algunos valores de n después de la sonicación indica una tendencia hacia una menor pseudoplasticidad, debido a que el sistema se aproxima ligeramente a un comportamiento más fluido; sin embargo, al mantenerse $n < 1$, la naturaleza pseudoplástica de la pulpa no se pierde. Este resultado se explica porque el ultrasonido redujo la consistencia y modificó la organización estructural de la matriz, pero no eliminó completamente la presencia de partículas, fibras, pectinas y sólidos suspendidos responsables del comportamiento no newtoniano. En ese sentido, el tratamiento ultrasónico modificó la magnitud de los parámetros reológicos, principalmente K , pero conservó el tipo de comportamiento de flujo de la pulpa.

Este comportamiento coincide con lo señalado en estudios sobre sistemas frutales tratados con ultrasonido, donde la sonicación modifica la viscosidad, la consistencia y la estructura interna de la matriz, sin transformar necesariamente su naturaleza pseudoplástica. Liu et al. (2024) reportaron que los tratamientos ultrasónicos alteran la magnitud de los parámetros reológicos en sistemas frutales, manteniendo el comportamiento no newtoniano característico. De manera similar, Lepaus et al. (2023) y Zhou et al. (2024) indicaron que la cavitación acústica modifica la estructura interna de jugos y pulpas mediante efectos mecánicos, afectando parámetros como viscosidad, consistencia y estabilidad, sin cambiar necesariamente el patrón general de flujo.

Desde el punto de vista tecnológico, la reducción del índice de consistencia es relevante porque una pulpa menos consistente requiere menor energía para fluir, lo que favorece operaciones como bombeo, mezclado, transporte, dosificación y envasado. Asimismo, la conservación del comportamiento pseudoplástico resulta favorable en productos tipo pulpa, ya que permite mantener cierta estabilidad

estructural en reposo y mejorar la fluidez durante el procesamiento. Por tanto, los resultados del modelo de Ley de Potencia confirman que el ultrasonido aplicado a la pulpa de arándano redujo de manera marcada su consistencia, especialmente a 24 kHz durante 15 min, sin alterar su naturaleza pseudoplástica.

Desde el punto de vista microbiológico, la disminución del índice de consistencia también tiene relevancia tecnológica, ya que una matriz menos consistente favorece una mejor dispersión de la energía ultrasónica y una mayor exposición de las partículas y estructuras celulares a los efectos de la cavitación. En matrices más viscosas, la propagación de las ondas ultrasónicas y la formación de cavitación se ven limitadas por la resistencia interna del sistema. En cambio, la reducción de K facilita la movilidad de partículas y la distribución del tratamiento dentro de la pulpa. En ese sentido, la literatura señala que la cavitación genera ondas de choque, presión localizada, radicales libres, fuerzas de corte y formación de poros en membranas celulares, mecanismos asociados con la alteración de estructuras celulares y microbianas durante la sonicación (Lepaus et al., 2023).

4.4. Actividad antioxidante de la pulpa de arándano ultrasonificada

Tabla 21.

Valores de la Actividad Antioxidante de la pulpa de arándano sonificada

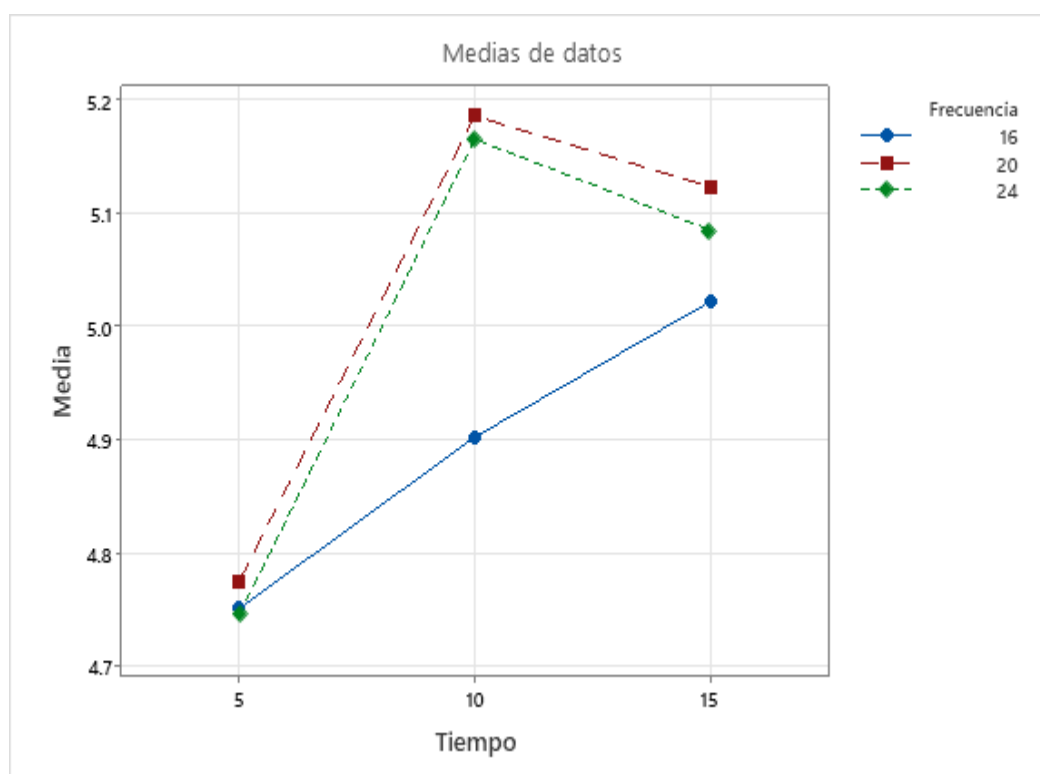
Frecuencia (kHz)	Tiempo (min)	Actividad Antioxidante ($\mu\text{mol Trolox/mL}$)
Control	0	4.602
Control	0	4.676
16	5	4.711
16	5	4.792
16	10	4.861
16	10	4.944
16	15	4.983
16	15	5.061
20	5	4.739
20	5	4.812
20	10	5.148
20	10	5.223
20	15	5.081
20	15	5.165
24	5	4.708
24	5	4.784
24	10	5.129
24	10	5.201
24	15	5.047
24	15	5.123

Nota. El promedio de los tratamientos controles es de 4.639 $\mu\text{mol Trolox/mL}$.

Los valores de actividad antioxidante de la pulpa de arándano ultrasonificada oscilaron entre 4.746 y 5.186 $\mu\text{mol Trolox/mL}$, mientras que el tratamiento control presentó un valor promedio de 4.639 $\mu\text{mol Trolox/mL}$. Los mayores valores se registraron en los tratamientos de 20 kHz durante 10 min (5.186 $\mu\text{mol Trolox/mL}$) y 24 kHz durante 10 min (5.165 $\mu\text{mol Trolox/mL}$), mientras que los menores correspondieron a los tratamientos de 24 kHz durante 5 min (4.746 $\mu\text{mol Trolox/mL}$) y 16 kHz durante 5 min (4.752 $\mu\text{mol Trolox/mL}$). En general, se observó un incremento de la actividad antioxidante respecto al control en todos los tratamientos ultrasónicos evaluados.

Figura 13.

Gráfica de interacciones de la actividad antioxidante



La gráfica de interacción mostró que la respuesta de la capacidad antioxidante fue influenciada simultáneamente por la frecuencia y el tiempo de tratamiento. Se observó un incremento de la actividad antioxidante entre 5 y 10 min para las frecuencias de 20 y 24 kHz, seguido por una ligera disminución a los 15 min. En contraste, la frecuencia de 16 kHz presentó un incremento progresivo conforme aumentó el tiempo de sonicación.

Tabla 22.*Análisis estadístico de Actividad Antioxidante mediante ANOVA*

Análisis de Varianza					
Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Frecuencia	2	0.06147	0.030734	10.19	0.004871
Tiempo	2	0.41706	0.208531	69.15	0.000003
Frecuencia-Tiempo	4	0.04954	0.012384	4.11	0.036488
Error	9	0.02714	0.003016		
Total	17	0.55521			

Nota. La frecuencia, el tiempo y su interacción mostraron efectos estadísticamente significativos sobre la actividad antioxidante ($p < 0.05$).

El análisis de varianza (ANOVA) factorial aplicada a la actividad antioxidante de la pulpa de arándano ultrasonificada se presenta en la tabla anterior. Los resultados evidenciaron que la frecuencia ultrasónica, el tiempo de sonicación y la interacción entre ambos factores presentaron efectos estadísticamente significativos sobre esta variable. La frecuencia influyó significativamente en la actividad antioxidante ($p = 0.004871$), al igual que el tiempo de sonicación ($p = 0.000003$) y la interacción frecuencia $\times$ tiempo ($p = 0.036488$).

Asimismo, los valores de F indican que el tiempo de sonicación fue el factor con mayor influencia sobre la actividad antioxidante, debido a que presentó el valor más alto ($F = 69.15$), seguido de la frecuencia ultrasónica ($F = 10.19$) y de la interacción entre ambos factores ($F = 4.11$). Esto evidencia que la respuesta antioxidante de la pulpa no dependió únicamente de la frecuencia aplicada, sino principalmente del tiempo de exposición y de la combinación específica entre ambos factores.

Los resultados experimentales fueron consistentes con el ANOVA, debido a que todos los tratamientos ultrasónicos presentaron valores superiores al control, cuyo promedio fue de $4.639 \mu\text{mol Trolox/mL}$. La actividad antioxidante de las muestras ultrasonificadas varió entre 4.746 y $5.186 \mu\text{mol Trolox/mL}$, evidenciando un

incremento asociado a la aplicación del ultrasonido. A 16 kHz, la actividad antioxidante aumentó progresivamente conforme el tiempo de sonicación se incrementó de 5 a 15 min; en cambio, a 20 y 24 kHz, los mayores valores se obtuvieron a los 10 min, seguido de una ligera disminución a los 15 min. Este comportamiento explica la significancia de la interacción frecuencia $\times$ tiempo, ya que el efecto del tiempo dependió de la frecuencia ultrasónica aplicada.

Tabla 23.

Comparaciones por parejas de Tukey para la Actividad Antioxidante: Frecuencia - Tiempo

Frecuencia-Tiempo	N	Media	Agrupación		
20 10	2	5.186	A		
24 10	2	5.165	A		
20 15	2	5.123	A		
24 15	2	5.085	A	B	
16 15	2	5.022	A	B	
16 10	2	4.903		B	C
20 5	2	4.776			C
16 5	2	4.752			C
24 5	2	4.746			C

Nota. Las comparaciones de Tukey muestran diferencias significativas entre varios tratamientos, agrupándolos según sus niveles de actividad antioxidante.

El análisis de comparaciones múltiples mediante la prueba de Tukey permitió identificar diferencias significativas entre los tratamientos evaluados en función de la combinación frecuencia–tiempo aplicado. Los mayores valores de actividad antioxidante correspondieron a los tratamientos de 20 kHz–10 min, 24 kHz–10 min y 20 kHz–15 min, con medias de 5.186, 5.165 y 5.123 $\mu\text{mol Trolox/mL}$, respectivamente. Estos tratamientos se ubicaron en el grupo A, lo que indica que no presentaron diferencias significativas entre sí y que constituyeron las

condiciones más favorables para incrementar la actividad antioxidante de la pulpa de arándano.

Los tratamientos de 24 kHz–15 min y 16 kHz–15 min presentaron valores de 5.085 y 5.022 $\mu\text{mol Trolox/mL}$, respectivamente, ubicándose en una agrupación compartida entre los grupos A y B. Esto evidencia que también alcanzaron una respuesta antioxidante elevada, aunque ligeramente inferior a los tratamientos con mayor media. Por otro lado, el tratamiento de 16 kHz–10 min presentó una media de 4.903 $\mu\text{mol Trolox/mL}$ y se ubicó entre los grupos B y C, mostrando un comportamiento intermedio. Finalmente, los tratamientos de 20 kHz–5 min, 16 kHz–5 min y 24 kHz–5 min conformaron el grupo C, con los menores valores de actividad antioxidante, entre 4.746 y 4.776 $\mu\text{mol Trolox/mL}$. Esto demuestra que los tiempos cortos de sonicación no fueron suficientes para alcanzar los mayores niveles de actividad antioxidante.

Respecto al control, cuyo promedio fue de 4.639 $\mu\text{mol Trolox/mL}$, los tratamientos con mayor actividad antioxidante mostraron incrementos relevantes. El tratamiento de 20 kHz–10 min presentó un aumento aproximado de 11.8 %, seguido por 24 kHz–10 min con 11.3 % y 20 kHz–15 min con 10.4 %. Estos resultados confirman que la aplicación de ultrasonido mejoró la actividad antioxidante de la pulpa, principalmente cuando se emplearon frecuencias de 20 y 24 kHz durante 10 min. Sin embargo, el descenso ligero observado a los 15 min en las frecuencias de 20 y 24 kHz indica que prolongar el tratamiento no necesariamente genera el mayor incremento antioxidante.

Los resultados obtenidos coinciden con estudios recientes en matrices frutales y vegetales tratadas con ultrasonido, donde se ha reportado un incremento de la actividad antioxidante como consecuencia de la mayor liberación de compuestos

bioactivos. En jugo de pitahaya roja sometido a ultrasonido, se observaron incrementos en compuestos fenólicos, antocianinas y capacidad antioxidante, sin alteraciones significativas en los parámetros fisicoquímicos generales (Tan et al., 2023). De manera similar, en jugo de calabaza tratado con ultrasonido a 25 kHz se reportó un aumento de la actividad antioxidante junto con la reducción del tamaño de partícula, lo que evidencia que la sonicación favorece la disponibilidad de compuestos funcionales en matrices vegetales (Zhang et al., 2024). Asimismo, en jugo de marula tratado con ultrasonido a 20 kHz se registraron incrementos en vitamina C, compuestos fenólicos y capacidad antioxidante (Mulweli et al., 2026). La concordancia entre los resultados obtenidos y los estudios mencionados se explica porque la cavitación acústica generada durante la sonicación rompe parcialmente estructuras celulares, desorganiza tejidos vegetales, reduce el tamaño de partícula y favorece la liberación de compuestos bioactivos retenidos en vacuolas, paredes celulares y complejos estructurales de la matriz. En el caso del arándano, la actividad antioxidante está asociada principalmente a compuestos fenólicos, antocianinas, flavonoides y otros metabolitos capaces de neutralizar radicales libres. Por ello, la aplicación de ultrasonido a 16, 20 y 24 kHz favoreció la extracción y dispersión de estos compuestos en la pulpa, incrementando la respuesta antioxidante medida mediante DPPH (Pandiselvam et al., 2023; Zhou et al., 2024).

La diferencia entre los grupos de Tukey se explica por el equilibrio entre la ruptura estructural de la matriz y la estabilidad de los compuestos bioactivos. A los 5 min, la cavitación generó un efecto menor sobre la ruptura celular, por lo que los tratamientos se ubicaron en el grupo C y presentaron valores más cercanos al control. A los 10 min, especialmente a 20 y 24 kHz, la cavitación alcanzó una

intensidad suficiente para liberar una mayor cantidad de antocianinas, fenoles y otros antioxidantes, razón por la cual estos tratamientos se ubicaron en el grupo A. A los 15 min, la respuesta antioxidante se mantuvo elevada; sin embargo, en las frecuencias de 20 y 24 kHz se observó una ligera disminución respecto a los tratamientos de 10 min, debido a que una exposición más prolongada genera zonas localizadas de alta energía, formación de radicales libres y transformaciones parciales en compuestos sensibles como antocianinas, vitamina C y algunos fenoles (Bernardi et al., 2021; Bermudez-Aguirre & Niemira, 2022).

En el caso específico de la pulpa de arándano, este comportamiento se relaciona con su composición natural, caracterizada por la presencia de antocianinas, compuestos fenólicos y otros antioxidantes hidrofílicos. Estos compuestos influyen directamente en la calidad funcional del arándano y son responsables de una parte importante de su capacidad antioxidante (Kalt et al., 2020; Wu et al., 2021). Por tanto, los tratamientos de 20 kHz–10 min y 24 kHz–10 min fueron los más eficientes porque generaron suficiente cavitación para liberar compuestos antioxidantes, sin alcanzar una exposición prolongada que reduzca parcialmente la estabilidad de los compuestos sensibles. La mayor actividad antioxidante se explica por la liberación de compuestos bioactivos inducida por cavitación, mediante ruptura celular, microcorrientes, fuerzas de corte y transferencia de masa en la matriz vegetal (Lepaus et al., 2023; Pandiselvam et al., 2023; Zhou et al., 2024).

V. CONCLUSIONES

La caracterización de la pulpa de arándano (*Vaccinium myrtillus*) presentó valores de 84.12 ± 0.57 % de humedad, 9.68 ± 0.33 % de hidratos de carbono, 0.62 ± 0.05 % de proteínas, 0.41 ± 0.07 % de grasas y 0.19 ± 0.03 % de cenizas. Asimismo, se determinaron valores de pH de 3.09 ± 0.02 , sólidos solubles de 11.86 ± 0.03 °Brix y acidez total de 0.922 ± 0.013 % de ácido cítrico.

La frecuencia ultrasónica, el tiempo de tratamiento y la interacción entre ambos factores no ejercieron una influencia significativa sobre las propiedades fisicoquímicas de la pulpa de arándano. Los valores de pH, sólidos solubles (°Brix), acidez titulable y densidad se mantuvieron sin variaciones significativas entre los tratamientos evaluados. Las propiedades reológicas de la pulpa de arándano fueron influenciadas de manera significativa por la frecuencia ultrasónica, el tiempo de tratamiento y la interacción entre ambos factores. La viscosidad disminuyó conforme aumentaron la frecuencia y el tiempo de sonicación, registrándose el mayor valor en el tratamiento de 16 kHz durante 5 min y el menor valor en el tratamiento de 24 kHz durante 15 min. Además, todos los tratamientos presentaron valores del índice de comportamiento de flujo menores a la unidad, evidenciando un comportamiento pseudoplástico.

La actividad antioxidante de la pulpa de arándano fue influenciada de manera significativa por la frecuencia ultrasónica, el tiempo de tratamiento y la interacción entre ambos factores. En general, los tratamientos ultrasónicos presentaron valores superiores al control ($4.639 \mu\text{mol Trolox/mL}$), alcanzándose el mayor valor en el tratamiento de 20 kHz durante 10 min ($5.186 \mu\text{mol Trolox/mL}$) y el menor valor en el tratamiento de 24 kHz durante 5 min ($4.746 \mu\text{mol Trolox/mL}$).

VI. RECOMENDACIONES

- Evaluar el contenido de antocianinas, fenoles totales y vitamina C en la pulpa de arándano sometida a tratamiento ultrasónico, a fin de complementar la información obtenida sobre la actividad antioxidante.
- Evaluar la estabilidad de las propiedades fisicoquímicas, reológicas y funcionales de la pulpa de arándano ultrasonificada durante diferentes periodos de almacenamiento.
- Investigar el efecto de diferentes niveles de potencia, amplitud e intensidad acústica sobre las propiedades fisicoquímicas, reológicas y funcionales de la pulpa de arándano.
- Realizar análisis microestructurales de la pulpa de arándano tratada con ultrasonido para relacionar los cambios estructurales con las variaciones observadas en la viscosidad y la actividad antioxidante.
- Aplicar el tratamiento ultrasónico en otras frutas con características similares al arándano, con el propósito de comparar la respuesta de diferentes matrices alimentarias frente a esta tecnología.
- Comparar el tratamiento ultrasónico con tecnologías convencionales y emergentes empleadas en el procesamiento de pulpas de frutas, considerando sus efectos sobre las propiedades fisicoquímicas, reológicas y funcionales del producto final.

VII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Archila, E., Rojas-Bautista, F., García, N., & Carvajal, J. (2022). A promising blueberry from Colombia: antioxidant activity, nutritional and phytochemical composition of *Cavendishia nitida* (Kunth) A.C.Sm. *Heliyon*, 8(5). doi:<https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2022.e09448>
- Bas-Bellver, C., Barrera, C., Betoret, N., & Seguí, L. (2020). Turning agri-food cooperative vegetable residues into functional powdered ingredients for the food industry. *Sustainability*, 12(4). doi:<https://doi.org/10.3390/su12041284>
- Bermudez-Aguirre, D., & Niemira, B. (2022). Pasteurization of foods with ultrasound: The present and the future. *Applied Sciences*, 12(20). doi:<https://doi.org/10.3390/app122010416>
- Bernardi, S., Lupatini-Menegotto, A., Kalschne, D., Moraes, É., Bittencourt, P., Colla, E., & Canan, C. (2021). Ultrasound: a suitable technology to improve the extraction and techno-functional properties of vegetable food proteins. *Plant Foods for Human Nutrition*, 76, 1-11. doi:<https://doi.org/10.1007/s11130-021-00884-w>
- Carvalho, J., Gomes, J., Bianchetti, M., de Moraes, L., Vilela, S., Rodrigues, C., . . . Fernandes, L. (2024). Influence of intensity ultrasound on rheological properties and bioactive compounds of araticum (*Annona crassiflora*) juice. *Ultrasonics Sonochemistry*, 105(106868). doi:<https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2024.106868>
- Chavan, P., Sharma, P., Sharma, S., Mittal, T., & Jaiswal, A. (2022). Application of high-intensity ultrasound to improve food processing efficiency: A review. *Foods*, 11(1), 122. doi:<https://doi.org/10.3390/foods11010122>

- Chen, L., Chen, L., Zhu, K., Bi, X., Xing, Y., & Chea, Z. (2020). The effect of high-power ultrasound on the rheological properties of strawberry pulp. *Ultrasonics Sonochemistry*, 67(105144). doi:<https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2020.105144>
- Dermengiu, N., Milea, S., Burada, B., Sancier, S., Cîrciumaru, A., Râpeanu, G., & Stănciuc, N. (2022). A dark purple multifunctional ingredient from blueberry pomace enhanced with lactic acid bacteria for various applications. *Journal of Food Science*, 87(10), 4725-4737. doi:<https://doi.org/10.1111/1750-3841.16315>
- Du, B., Jeepipalli, P., & Xu, B. (2022). Critical review on alterations in physiochemical properties and molecular structure of natural polysaccharides upon ultrasonication. *Ultrasonics Sonochemistry*, 90(106170). doi:<https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2022.106170>
- Duan, Y., Tarafdar, A., Chaurasia, D., Singh, A., Bhargava, P., Yang, J., . . . Awasthi, M. (2022). Blueberry fruit valorization and valuable constituents: A review. *International Journal of Food Microbiology*, 381(16). doi:<https://doi.org/10.1016/j.ijfoodmicro.2022.109890>
- Fernandez de Araújo, F., Farias, D., Neri-Numa, I., Dias-Audibert, F., Delafiori, J., Gama de Souza, F., . . . Pastore, G. (2021). Influence of high-intensity ultrasound on color, chemical composition and antioxidant properties of araçá-boi pulp. 338(127747). doi:<https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2020.127747>
- Ge, Y., Zhang, Y., Peng, T., Yang, L., Li, X., & Wang, C. (2025). Gelling properties and formation mechanism of blueberry pomace polysaccharide gels induced by calcium ions. *Food Chemistry*, 472(142918). doi:<https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2025.142918>

- Hernandez-Hernandez, O., Ferreira-Lazarte, A., Tiwari, B., & Villamiel, M. (2024). Update of high-intensity ultrasound applications for the extraction of pectin from agri-food by-products. *TrAC Trends in Analytical Chemistry*, 175(117728). doi:<https://doi.org/10.1016/j.trac.2024.117728>
- Hotchkiss Jr, A., Chau, H., Strahan, G., Nuñez, A., Simon, S., White, A., . . . Hirsch, J. (2021). Structure and composition of blueberry fiber pectin and xyloglucan that bind anthocyanins during fruit puree processing. *Food Hydrocolloids*, 116(106572). doi:<https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2020.106572>
- Jaouhari, Y., Ferreira-Santos, P., Disca, V., Oliveira, H., Martoccia, M., Travaglia, F., . . . Bordiga, M. (2024). Carbohydrases treatment on blueberry pomace: Influence on chemical composition and bioactive potential. *LWT*, 206(116573). doi:<https://doi.org/10.1016/j.lwt.2024.116573>
- Kalt, W., Cassidy, A., Howard, L., Krikorian, R., Stull, A., Tremblay, F., & Zamora-Ros, R. (2020). Recent research on the health benefits of blueberries and their anthocyanins. *Adv Nutr*, 11, 224-236. doi:<https://doi.org/10.1093/advances/nmz065>
- Kavindya, G., Alahakoon, P., Herath, A., Ekanayake, P., Karunarathna, O., Thilakarathna, N., . . . Bandara, P. (2026). Hybrid ultrasound-based extraction techniques in food industry: A state-of-the-art review. *Food Physics*, 3(100092). doi:<https://doi.org/10.1016/j.foodp.2026.100092>
- Khosravi, A., Razavi, S., & Fadda, A. (2020). Advanced assessments on innovative methods to improve the bioaccessibility of polyphenols in wheat. *Process Biochemistry*, 88, 1-14. doi:<https://doi.org/10.1016/j.procbio.2019.09.005>

- Koh, J., Xu, Z., & Wicker, L. (2020). Blueberry pectin and increased anthocyanins stability under in vitro digestion. *Food Chemistry*, 302(125343). doi:<https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2019.125343>
- Ktenioudaki, A., O'Donnell, C., Emond, J., & do Nascimento, M. (2021). Blueberry supply chain: Critical steps impacting fruit quality and application of a boosted regression tree model to predict weight loss. *Postharvest Biology and Technology*, 179(111590). doi:<https://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2021.111590>
- Lepaus, B., Valiati, B., Machado, B., Domingos, M., Silva, M., Faria-Silva, L., . . . Freitas, J. (2023). Impact of ultrasound processing on the nutritional components of fruit and vegetable juices. *Trends in Food Science & Technology*, 138, 752-765. doi:<https://doi.org/10.1016/j.tifs.2023.07.002>
- Liu, J., Bi, J., McClements, D., Liu, X., Yi, J., Lyu, J., . . . Liu, D. (2020). Impacts of thermal and non-thermal processing on structure and functionality of pectin in fruit- and vegetable- based products: A review. *Carbohydrate Polymers*, 250(116890). doi:<https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2020.116890>
- Liu, S., Kong, T., Feng, Y., Yanli, A., Yu, J., Duan, Y., . . . Zhang, H. (2023). Effects of slit dual-frequency ultrasound-assisted pulping on the structure, functional properties and antioxidant activity of *Lycium barbarum* proteins and in situ real-time monitoring process. *101*(106696). doi:<https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2023.106696>
- Ma, Q.-Y., Yan, G., Zielnska, M., Shu, J.-X., Wang, S.-Y., Huang, X., & Liu, Z.-L. (2026). A systematic review of emerging pretreatments, drying technologies, and artificial intelligence applied in processing blueberry. *Food Control*, 188(112255). doi:<https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2026.112255>

- Mehta, N., Kumar, S., Verma, A., Jeyapriya, S., Umaraw, P., Khatkar, S., . . . Sazili, A. (2022). Ultrasound-Assisted Extraction and the Encapsulation of Bioactive Components for Food Applications. *11*(19). doi:<https://doi.org/10.3390/foods11192973>
- More, P., Jambrak, A., & aRYA, s. (2022). Green, environment-friendly and sustainable techniques for extraction of food bioactive compounds and waste valorization. *Trends in Food Science & Technology*, *128*, 296-315. doi:<https://doi.org/10.1016/j.tifs.2022.08.016>
- Mulweli, N., Mmaphuti, R., Nakisani, M., & Bamidele, O. (2026). Physicochemical and antioxidant activities of Marula fruit (*Sclerocarya birrea*) juice extracted from thermal and non-thermal pre-treated ripe Marula fruit. *Next Research*, *9*(101813). doi:<https://doi.org/10.1016/j.nexres.2026.101813>
- Nonglait, D., Chukkan, S., Arya, S., Bhat, M., & Waghmare, R. (2022). Emerging non-thermal technologies for enhanced quality and safety of fruit juices. *International Journal of Food Science and Technology*, *57*(10), 6368-6377. doi:<https://doi.org/10.1111/ijfs.16017>
- Ntemiri, A., Ghosh, T., Gheller, M., Tran, T., Blum, J., Pellanda, P., O'Toole, P. (2020). Whole Blueberry and Isolated Polyphenol-Rich Fractions Modulate Specific Gut Microbes in an In Vitro Colon Model and in a Pilot Study in Human Consumers. *Nutrients*, *12*(9). doi:<https://doi.org/10.3390/nu12092800>
- Olmedo, G., Trama, A., Mattia, M., Zhao, W., Hunter, W., Roskopf, E., Baia, J. (2025). Evaluation of modified humidity and controlled-release thymol on the preservation of blueberries and blackberries. *Postharvest Biology and Technology*, *219*(113237). doi:<https://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2024.113237>

- Padiselvam, R., Aydar, A., Kutlu, N., Aslam, R., Sahni, P., Mitharwal, S., . . . Kothakota, A. (2023). Individual and interactive effect of ultrasound pre-treatment on drying kinetics and biochemical qualities of food: A critical review. *Ultrasonics Sonochemistry*, 92(106261). doi:<https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2022.106261>
- Pico, J., Yan, Y., Gerbrandt, E., & Castellarín, S. (2022). Determination of free and bound phenolics in northern highbush blueberries by a validated HPLC/QTOF methodology. *Journal of Food Composition and Analysis*, 108(104412). doi:<https://doi.org/10.1016/j.jfca.2022.104412>
- Piechowiak, T., Skóra, B., Grzelak-Blaszczyk, K., & Sójka, M. (2021). Extraction of antioxidant compounds from blueberry fruit waste and evaluation of their in vitro biological activity in human keratinocytes (HaCaT). *Food Analytical Methods*, 14(11), 2317-2327. doi:<https://doi.org/10.1007/s12161-021-02056-7>
- Qiu, L., Zhang, M., Chitrakar, B., & Bhandari, B. (2020). Application of power ultrasound in freezing and thawing Processes: Effect on process efficiency and product quality. *Ultrasonics Sonochemistry*, 68(105230). doi:<https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2020.105230>
- Rahman, M., & Lamsal, B. (2021). Ultrasound-assisted extraction and modification of plant-based proteins: Impact on physicochemical, functional, and nutritional properties. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 20(2), 1457-1480. doi:<https://doi.org/10.1111/1541-4337.12709>
- Ramírez-Corona, N., García, N., Martínez, M., López-Malo, A., & Mani-López, E. (2024). Effect of combining ultrasound and UVC treatments for processing orange juice and mango nectar on their microbiological, physicochemical, and sensory characteristics.

- Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 94(103686).
doi:<https://doi.org/10.1016/j.ifset.2024.103686>
- Rashidinejad, A. (2020). Chapter 29 - Blueberries. *Nutritional Composition and Antioxidant Properties of Fruits and Vegetables*, 467-482. doi:<https://doi.org/10.1016/B978-0-12-812780-3.00029-5>
- Rivera-Tobar, D., Pérez-Won, M., Jara-Quijada, E., Gonzáles-Cavieres, L., Tabilo-Munizaga, G., & Lemus-Mondaca, R. (2025). Principles of ultrasonic agglomeration and its effect on physicochemical and macro- and microstructural properties of foods. *Food Chemistry*, 463(141309). doi:<https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2024.141309>
- Silva, S., Costa, E., Veiga, M., Morais, R., Calhau, C., & Pintado, M. (2020). Health promoting properties of blueberries: A review. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 60(2), 181-200. doi:<https://doi.org/10.1080/10408398.2018.1518895>
- Singla, M., & Sit, N. (2021). Application of ultrasound in combination with other technologies in food processing. *Ultrasonics Sonochemistry*, 73(105506). doi:<https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2021.105506>
- Sousa, J., Martins, C., Filho, E., Guimarães, J., Pagani, M., Mársico, E., . . . Esmerino, E. (2025). High-intensity ultrasound processing of blueberry pulp: a pathway to improve physicochemical quality and bioactive retention in enriched skyr. *Ultrasonics Sonochemistry*, 121(107513). Obtenido de <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2025.107513>
- Suo, G., Zhou, C., Su, W., & Hu, X. (2022). Effects of ultrasonic treatment on color, carotenoid content, enzyme activity, rheological properties, and microstructure of pumpkin juice during storage. *Ultrasonics Sonochemistry*, 84(105974). doi:<https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2022.105974>

- Tan, C., Lim, V., Tan, S., & Tan, S. (2023). Characterization of Juice Extracted from Ultrasonic-Treated Red Pitaya Flesh. *Horticulturae*, 9(1)(92). doi:<https://doi.org/10.3390/horticulturae9010092>
- Tovar-Pérez, E., Aguilera-Aguirre, S., López-García, U., Valdez-Morales, M., Ibarra-Zurita, A., Ortiz-Basurto, R., & Chacón-López, A. (2020). Effect of ultrasound treatment on the quality and contents of polyphenols, lycopene and rutin in tomato fruits. *Czech Journal of Food Sciences*, 38(1), 20-27. doi:<https://doi.org/10.17221/189/2019-CJFS>
- Trusinska, M., Rybak, K., Drudi, F., Tylewicz, U., & Nowacka, M. (2024). Combined effect of ultrasound and vacuum impregnation for the modification of apple tissue enriched with aloe vera juice. *Ultrasonics Sonochemistry*, 104(106812). doi:<https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2024.106812>
- Umair, M., Abid, M., Mumraiz, M., Jabbar, S., Xun, S., Ameer, K., . . . Nayik, G. (2025). Emerging frontiers in juice processing: The role of ultrasonication and other non-thermal technologies in enhancing antioxidant capacity and quality of fruit and vegetable juices. *Ultrasonics Sonochemistry*, 122(107554). doi:<https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2025.107554>
- Wang, J., Wang, j., Vanga, S., & Raghavan, V. (2020). High-intensity ultrasound processing of kiwifruit juice: Effects on the microstructure, pectin, carbohydrates and rheological properties. *Food Chemistry*, 313(126121). doi:<https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2019.126121>
- Woolf, E., Lee, S., Ghanem, N., Vazquez, A., & Johnson, S. (2023). Protective effects of blueberries on vascular function: A narrative review of preclinical and clinical evidence. *Nutrition Research*, 120, 20-57. doi:<https://doi.org/10.1016/j.nutres.2023.09.007>

- Wu, Y., Liu, Y., Jia, Y., Feng, C., Zhang, H., Ren, F., & Zhao, G. (2024). Effects of thermal processing on natural antioxidants in fruits and vegetables. *Food Research International*, 192(114797). doi:<https://doi.org/10.1016/j.foodres.2024.114797>
- Wu, Y., Xu, L., Liu, X., Hasan, K., Li, H., Zhou, S., . . . Zhou, Y. (2021). Effect of thermosonication treatment on blueberry juice quality: Total phenolics, flavonoids, anthocyanin, and antioxidant activity. *LWT*, 150(112021). doi:<https://doi.org/10.1016/j.lwt.2021.112021>
- Yıkılmış, S., Duman, A., m, T., Egemen, G., Ganimet, S., Abdi, G., . . . Aadil, R. (2024). Effects on quality characteristics of ultrasound-treated gilaburu juice using RSM and ANFIS modeling with machine learning algorithm. *Ultrasonics Sonochemistry*, 107(106922). doi:<https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2024.106922>
- Yildiz, G., & Aadil, R. (2020). Comparison of high temperature-short time and sonication on selected parameters of strawberry juice during room temperature storage. *Journal of Food Science and Technology*, 57, 1462-1468. doi:<https://doi.org/10.1007/s13197-019-04181-y>
- Zhang, L., Xiao, G., Yu, Y., Xu, Y., Wu, J., Zou, B., & Li, L. (2022). Low-oxygen pulping combined with high hydrostatic pressure improve the stability of blueberry pulp anthocyanins and color during storage. *Food Control*, 138(108991). doi:<https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2022.108991>
- Zhang, M., Chen, X., Zhang, Y., Zhang, R., Liu, J., Fan, B., . . . Li, L. (2023). Application progress of ultrasonication in flour product processing: A review. *Ultrasonics Sonochemistry*, 99(106538). doi:<https://doi.org/10.1016/J.ULTSONCH.2023.106538>

- Zhang, M., Zhou, C., Ma, L., Su, W., Jiang, J., & Hu, X. (2024). Influence of ultrasound on the microbiological, physicochemical properties, and sensory quality of different varieties of pumpkin juice. *Heliyon*, 10(6). doi:<https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e27927>
- Zhou, S., Chen, W., & Fan, K. (2024). Recent advances in combined ultrasound and microwave treatment for improving food processing efficiency and quality: A review. *Food Bioscience*, 58(103683). doi:<https://doi.org/10.1016/j.fbio.2024.103683>

VIII. ANEXOS

Anexo 1.

Muestra de arándano en la cocinilla



Anexo 2.

Muestra puesta en la mufla



Anexo 3.

Preparación de muestra para Soxleth



Anexo 4.

Colocación de muestra en el equipo



Anexo 5.

Etapas de digestibilidad



Anexo 6.

Equipo Kjeldahl



Anexo 7.

Peso del arandano



Anexo 8.

Despulpado del arandano



Anexo 9.

Configuración del equipo de ultrasonido



Anexo 10.

Tratamiento de pulpa de arándano por ultrasonido.



Anexo 11.

Medición de pH de la pulpa sonificada



Anexo 12.

Resultado de la medición de acidez



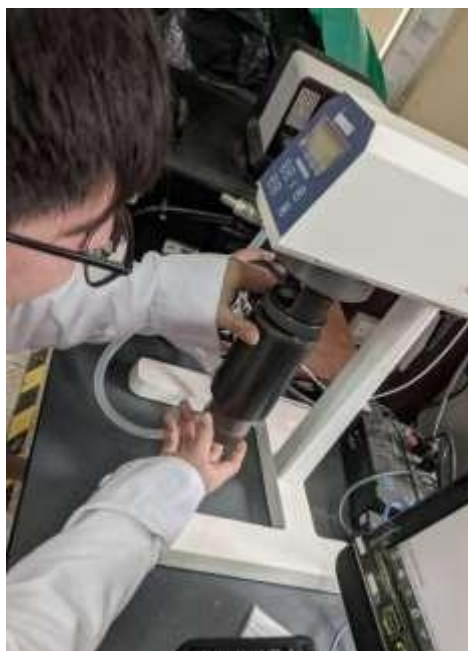
Anexo 13.

Medición de densidad



Anexo 14.

Colocación la muestra de pulpa de arándano en el reómetro



Anexo 15.

Programación de los parámetros del equipo reómetro



Anexo 16.

Certificado de prueba de Actividad Antioxidante



PERÚ

Ministerio
de la Producción



Tramite Digital

Procedido digitalmente por SALAS
MALDONADO Alberto Clemente Falla
20121009077.html
Fecha: Hoy al autor del documento
Fecha: 03/12/2025 18:36:15 -05:00

"Año de la recuperación y consolidación de la economía peruana"

Ventanilla, 02 de Diciembre del 2025

OFICIO N° 000388-2025-ITP/CITEPESACUAGROCALLAO

Señor

CASTILLO CERPA GHILBERT FRANCISCO

GHILBERT.CASTILLO.CERPA@GMAIL.COM

Presente.-

Asunto : Remisión de informes

Referencia : a. Factura Electrónica F015-00001813
b. FOST N° 42284

Anexo: Informe 320 al 329

De mi consideración:

Tengo el agrado de dirigirme a usted, en relación al asunto y documentos de la referencia, a fin de remitir los Informes 320 al 329-25, realizado en los laboratorios del Centro de Innovación Productiva y Transferencia Tecnológica Pesquero – CITEpesquero Acuicola Agroindustrial, para su conocimiento y fines correspondientes.

Atentamente,

ALBERTO CLEMENTE SALAS MALDONADO
Director CITEpesquero Acuicola y Agroindustrial Callao
Instituto Tecnológico de la Producción

(ASM/crp)

Esta es una copia auténtica imprimible de un documento electrónico archivado por el Instituto Tecnológico de la Producción, aplicando lo dispuesto por el Art. 25 de D.S. 070-2013-PCM y la Tercera Disposición Complementaria Final del D.S. 026-2016-PCM. Su autenticidad e integridad pueden ser contrastadas a través de la siguiente dirección web: <https://egd.itp.gob.pe:8181/verificafinicio.do> e ingresando el siguiente código de verificación: **UTFLMMG**



Anexo 17.

Tabla de operacionalización de variables

CLASIFICACIÓN	VARIABLE	DEFINICIÓN CONCEPTUAL	DEFINICIÓN OPERACIONAL	DIMENSIONES	INDICADORES	ESCALA DE MEDICIÓN
Independiente	Aplicación de ultrasonido	Técnica física basada en ondas sonoras de alta intensidad, utilizada para modificar las propiedades de materiales mediante cavitación.	Procedimiento en el que se expone la pulpa de arándano a ultrasonido a diferentes frecuencias (kHz) y tiempos (minutos), usando un equipo de ultrasonido en condiciones controladas.	Frecuencia ultrasónica	Frecuencia ultrasónica en los valores de 16, 20 y 24 kHz.	Razón
				Tiempo de ultrasonificación.	Tiempo de exposición en un rango de 5, 10 y 15 minutos	Razón
Dependiente	Propiedades físico-químicas	Características intrínsecas de la pulpa de arándano que describen su comportamiento en términos de pH, Brix, densidad y acidez.	Medición de parámetros como pH y acidez, de la pulpa tratada.	pH. Acidez Brix Densidad	pH. Acidez (% Ác. Cítrico) Brix Densidad (g/cm ³)	Razón
	Propiedades reológicas	Comportamiento de flujo y deformación de la pulpa bajo esfuerzo aplicado, medido en términos de esfuerzo cortante, velocidad de deformación, índice de consistencia y fluidez.	Evaluación del comportamiento reológico de la pulpa tratada mediante ultrasonido en condiciones controladas.	Esfuerzo cortante. Velocidad de deformación Viscosidad	Viscosidad (Pa.s) Índice de Consistencia Índice de Comportamiento de Flujo	Razón
	Propiedades funcionales	Capacidad de un compuesto para neutralizar radicales libres, previniendo el daño oxidativo en células y tejidos.	Evaluación de la capacidad antioxidante de la pulpa tratada mediante el ensayo DPPH.	Actividad antioxidante	Inhibición de radicales libres en: $\mu\text{mol Trolox/mL}$	Razón