

**UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA**

**LA MOLINA**

**ESCUELA DE POSGRADO**

**MAESTRÍA EN TECNOLOGÍA DE ALIMENTOS**



**“INFLUENCIA DEL PROCESO DE ACIDIFICACIÓN EN LA  
CAPACIDAD ANTIOXIDANTE Y COMPUESTOS BIOACTIVOS DEL  
ZUMO DE TUNA MORADA (*Opuntia ficus-indica*)”**

**Presentada por:**

**ELSA CELIA ANICAMA ÑAÑEZ**

**TESIS PARA OPTAR EL GRADO DE  
MAGISTER SCIENTIAE EN TECNOLOGÍA DE ALIMENTOS**

**Lima – Perú**

**2024**

# INFLUENCIA DEL PROCESO DE ACIDIFICACIÓN EN LA CAPACIDAD ANTIOXIDANTE Y COMPUESTOS BIOACTIVOS DEL ZUMO DE TUNA MORADA (*Opuntia ficus-indica*)

## ORIGINALITY REPORT

<b>18%</b> SIMILARITY INDEX	<b>18%</b> INTERNET SOURCES	<b>5%</b> PUBLICATIONS	<b>3%</b> STUDENT PAPERS
--------------------------------	--------------------------------	---------------------------	-----------------------------

## PRIMARY SOURCES

<b>1</b>	<b>hdl.handle.net</b> Internet Source	<b>2%</b>
<b>2</b>	<b>repositorio.lamolina.edu.pe</b> Internet Source	<b>2%</b>
<b>3</b>	<b>vsip.info</b> Internet Source	<b>1%</b>
<b>4</b>	<b>repositorio.umsa.bo</b> Internet Source	<b>1%</b>
<b>5</b>	<b>rdcb.cbg.ipn.mx</b> Internet Source	<b>1%</b>
<b>6</b>	<b>repositorio.unfv.edu.pe</b> Internet Source	<b>1%</b>
<b>7</b>	<b>repositorio.unas.edu.pe</b> Internet Source	<b>1%</b>
<b>8</b>	<b>Submitted to Universidad Nacional Agraria La Molina</b> Student Paper	<b>1%</b>

**UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA**

**LA MOLINA**

**ESCUELA DE POSGRADO**

**MAESTRÍA EN TECNOLOGÍA DE ALIMENTOS**

**“INFLUENCIA DEL PROCESO DE ACIDIFICACIÓN EN LA  
CAPACIDAD ANTIOXIDANTE Y COMPUESTOS BIOACTIVOS DEL  
ZUMO DE TUNA MORADA (*Opuntia ficus indica*)”**

**TESIS PARA OPTAR EL GRADO DE  
MAGISTER SCIENTIAE**

**Presentada por:**

**ELSA CELIA ANICAMA ÑAÑEZ**

Sustentada y aprobada por el siguiente jurado:

**Dr. Carlos Elías Peñafiel**  
PRESIDENTE

**Dr. Eduardo Morales Soriano**  
ASESOR

**Ph. D. Marianela Inga Guevara**  
MIEMBRO

**Mg.Sc. Diana Nolazco Cama**  
MIEMBRO

### ***Dedicatoria***

*A mi ex profesor y asesor de tesis; por sus conocimientos impartidos en el presente tema: Dr. Américo Guevara.*

*Agradezco a quien me impulsó en la continuación del proyecto de tesis; Ing. Valentín Bartolomé García Peña; por su ayuda técnica adaptada al reglamento SUNEDU.*

*Agradezco a mi asesor Dr. Eduardo Morales; docente principal de la UNALM; por su dirección en el desarrollo del presente trabajo de investigación.*

## ÍNDICE GENERAL

I.	INTRODUCCIÓN .....	14
II.	REVISIÓN DE LITERATURA.....	16
2.1.	GENERALIDADES DE LA TUNA MORADA.....	16
2.1.1.	Usos, aprovechamientos comerciales y composición química .....	4
2.1.2.	Origen, distribución y clasificación taxonómica.....	6
2.1.3.	Variedades de la tuna .....	6
2.1.4.	Descripción botánica.....	8
2.2.	BETALAÍNAS DE LA TUNA .....	9
2.3.	ACTIVIDAD ANTIOXIDANTE .....	11
2.4.	RADICALES LIBRES .....	12
2.5.	BIODISPONIBILIDAD DE POLIFENOLES .....	13
2.6.	COMPUESTOS FENÓLICOS EXTRAÍBLES Y NO EXTRAÍBLES .....	14
III.	MATERIALES Y MÉTODOS .....	16
3.1.	LUGAR DE EJECUCIÓN.....	16
3.2.	MATERIALES Y EQUIPOS.....	16
3.2.1.	Materia prima.....	16
3.2.2.	Materiales.....	16
3.2.3.	Equipos .....	16
3.2.4.	Reactivos.....	17
3.2.5.	Programas informáticos .....	17
3.3.	MÉTODOS DE ANÁLISIS .....	17
3.3.1.	Contenido de betalaínas totales, betacianinas y betaxantinas .....	17
3.3.2.	Compuestos fenólicos totales.....	18
3.3.3.	Capacidad antioxidante.....	18
3.4.	METODOLOGÍA EXPERIMENTAL.....	19
3.5.	DISEÑO EXPERIMENTAL .....	22
3.6.	ANÁLISIS ESTADÍSTICO.....	23
IV.	RESULTADOS Y DISCUSIONES .....	24
4.1.	PULPEADO.....	24
4.1.1.	Contenido de betalaínas totales de la pulpa de tuna.....	24
4.1.2.	Contenido de compuestos fenólicos totales de la pulpa de tuna .....	26
4.1.3.	Capacidad antioxidante (DPPH y ABTS) de la pulpa de tuna.....	26

4.2.	PASTEURIZADO.....	27
4.2.1.	Contenido de betalaínas totales del zumo de tuna con diferentes pH y pasteurizada.....	27
4.2.2.	Contenido de compuestos fenólicos totales del zumo de tuna con diferentes pH y pasteurizada.....	30
4.2.3.	Capacidad antioxidante (DPPH y ABTS) del zumo de tuna con diferentes pH y pasteurizada.....	31
4.3.	ALMACENAMIENTO.....	33
4.3.1.	Contenido de betalaínas totales del zumo de tuna con diferentes pH y pasteurizada a los 0 y 15 días de almacenamiento en refrigeración (4 °C) .....	33
4.3.2.	Contenido de compuestos fenólicos totales del zumo de tuna con diferentes pH y pasteurizada a los 0 y 15 días de almacenamiento en refrigeración (4 °C).....	36
4.3.3.	Capacidad antioxidante del zumo de tuna con diferentes pH y pasteurizada a los 0 y 15 días de almacenamiento en refrigeración (4 °C) .....	37
V.	CONCLUSIONES .....	40
VI.	RECOMENDACIONES .....	41
VII.	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	42
VIII.	ANEXOS .....	51

## ÍNDICE DE TABLAS

<b>Tabla 1:</b> Composición química de la tuna .....	5
<b>Tabla 2:</b> Contenido de betacianinas, betaxantinas y betalaínas totales de la pulpa de tuna	25
<b>Tabla 3:</b> Capacidad antioxidante de la pulpa de tuna medido por el método del DPPH ....	27
<b>Tabla 4:</b> Contenido de betacianinas, betaxantinas y betalaínas totales del zumo de tuna con diferentes pH y pasteurizada.....	28
<b>Tabla 5:</b> Contenido de compuestos fenólicos totales del zumo de tuna con diferentes pH y pasteurizada.....	31
<b>Tabla 6:</b> Capacidad antioxidante mediante el método DPPH del zumo de tuna pasteurizado a diferentes pH.....	32
<b>Tabla 7:</b> Contenido de betacianinas, betaxantinas y betalaínas totales del zumo de tuna con diferentes pH y pasteurizada a los 0 días de almacenamiento en refrigeración (4 °C) .....	34
<b>Tabla 8:</b> Contenido de compuestos fenólicos totales del zumo de tuna con diferentes pH y pasteurizada a los 0 y 15 días de almacenamiento en refrigeración (4 °C).....	37
<b>Tabla 9:</b> Capacidad antioxidante del zumo de tuna con diferentes pH y pasteurizada a los 0 y 15 días de almacenamiento en refrigeración (4 °C) medido por el método del DPPH y ABTS .....	39

## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura 1.</b> Estructuras principales del a) ácido betalámico, b) betaxantinas y c) betacianinas .....	10
<b>Figura 2.</b> Flujograma de la elaboración de zumo de tuna morada.....	20
<b>Figura 3.</b> Espectro de absorción de la pulpa de tuna y picos obtenidos por desconvolución para la cuantificación del contenido de betacianinas, betaxantinas y betalaínas totales (promedio $\pm$ desviación estándar, n= 3) .....	25
<b>Figura 4.</b> Espectro de absorción del zumo de tuna con diferentes pH y pasteurizada y picos obtenidos por desconvolución para la cuantificación del contenido de betacianinas, betaxantinas y betalaínas totales (promedio $\pm$ desviación estándar, n= 3).....	29
<b>Figura 5.</b> Espectro de absorción del zumo de tuna con diferentes pH y pasteurizada a los 0 días de almacenamiento en refrigeración (4 °C) y picos obtenidos por desconvolución para la cuantificación del contenido de betacianinas, betaxantinas y betalaínas totales (promedio $\pm$ desviación estándar, n= 3) .....	35
<b>Figura 6.</b> Espectro de absorción del zumo de tuna con diferentes pH y pasteurizada a los 15 días de almacenamiento en refrigeración (4 °C) y picos obtenidos por desconvolución para la cuantificación del contenido de betacianinas, betaxantinas y betalaínas totales (promedio $\pm$ desviación estándar, n= 3) .....	36
<b>Figura 7.</b> Contenido de compuestos fenólicos totales de la pulpa de tuna y del zumo estandarizada a diferente pH y pasteurizada. Los valores son el promedio $\pm$ desviación estándar (n= 3).....	53
<b>Figura 8.</b> Capacidad antioxidante de la pulpa de tuna y del zumo estandarizada a diferente pH y pasteurizada medido por el método DPPH. Los valores son el promedio $\pm$ desviación estándar (n= 3).....	54
<b>Figura 9.</b> Capacidad antioxidante de la pulpa de tuna y del zumo estandarizada a diferente pH y pasteurizada medido por el método ABTS. Los valores son el promedio $\pm$ desviación estándar (n= 3).....	54
<b>Figura 10.</b> Análisis de color de la pulpa de tuna. A) sin centrifugar y B) centrifugado. Valores de R (Red), G (Green) y B (Blue) son el promedio $\pm$ desviación estándar (n= 3)...	55
<b>Figura 11.</b> Análisis de color del zumo de tuna con diferentes pH y pasteurizada. A) sin centrifugar y B) centrifugado. Valores de R (Red), G (Green) y B (Blue) son el promedio $\pm$ desviación estándar (n= 3) .....	56

**Figura 12.** Análisis de color del zumo de tuna con diferentes pH y pasteurizada a los 0 días de almacenamiento en refrigeración (4 °C). A) sin centrifugar y B) centrifugado. Valores de R (Red), G (Green) y B (Blue) son el promedio±desviación estándar (n= 3)..... 57

**Figura 13.** Análisis de color del zumo de tuna con diferentes pH y pasteurizada a los 15 días de almacenamiento en refrigeración (4 °C). A) sin centrifugar y B) centrifugado. Valores de R (Red), G (Green) y B (Blue) son el promedio±desviación estándar (n= 3)..... 58

## ÍNDICE DE ANEXOS

<b>ANEXO 1:</b> Curva de calibración de ácido gálico para la cuantificación de compuestos fenólicos totales .....	51
<b>ANEXO 2:</b> Curva de calibración de ácido gálico para la determinación de la capacidad...	52
<b>ANEXO 3:</b> Compuestos fenólicos y capacidad antioxidante de la pulpa y zumos acidificados de tuna .....	53
<b>ANEXO 4:</b> Análisis Complementario de Color .....	55
<b>ANEXO 5:</b> Análisis estadístico del contenido de betacianinas .....	59
<b>ANEXO 6:</b> Análisis estadístico del contenido de betaxantinas .....	60
<b>ANEXO 7:</b> Análisis estadístico del contenido de betalaínas .....	61
<b>ANEXO 8:</b> Análisis estadístico del contenido de compuestos fenólicos totales .....	62
<b>ANEXO 9:</b> Análisis estadístico del contenido de capacidad antioxidante (DPPH).....	63
<b>ANEXO 10:</b> Análisis estadístico del contenido de capacidad antioxidante (ABTS).....	64

## RESUMEN

El presente trabajo de investigación tuvo por objetivo determinar la influencia del proceso de acidificación en la conservación de compuestos bioactivos y capacidad antioxidante en el zumo de tuna (*Opuntia ficus indica*) morada pasteurizado. La investigación se centró en el análisis del contenido de betalaínas (betacianinas + betaxantinas), compuestos fenólicos totales y la capacidad antioxidante de zumo de tuna morada. Se investigó cómo el proceso de acidificación afecta estos componentes y su estabilidad durante el almacenamiento a lo largo de 15 días. Los tratamientos fueron zumos de tuna morada pasteurizados sin acidificar (pH: 6.35) y acidificados a diferentes niveles de pH, incluyendo 4.0, 4.2 y 4.4. Los resultados del estudio destacaron la importancia de la acidificación del zumo de tuna morada. En particular, se observó que la acidificación a niveles de pH más bajos (4.0) resultó en una mayor estabilidad de los pigmentos betalánicos, los cuales son responsables de los colores característicos de esta fruta. Esta estabilidad de los pigmentos es un hallazgo significativo, ya que contribuye a mantener la apariencia visual atractiva del zumo durante el almacenamiento. Además, la acidificación demostró ser beneficiosa para la conservación de los compuestos bioactivos y la capacidad antioxidante del zumo. A lo largo del período de almacenamiento de 15 días, se observó que los niveles de betacianinas, betaxantinas y betalaínas se mantuvieron más consistentes en los zumos acidificados en comparación con los zumos no acidificados. En cuanto a la capacidad antioxidante, se evaluó mediante dos métodos ampliamente utilizados: DPPH y ABTS. Los resultados indicaron que los zumos acidificados conservaron una mayor capacidad antioxidante en comparación con los zumos no acidificados, lo que sugiere que la acidificación es un factor clave para preservar las propiedades antioxidantes del zumo de tuna morada.

**Palabras clave:** Tuna, betacianinas, compuestos bioactivos, capacidad antioxidante, pasteurización.

## **ABSTRACT**

This research work aimed to determine the influence of the acidification process on the conservation of bioactive compounds and antioxidant capacity in pasteurized purple prickly pear (*Opuntia ficus indica*) juice. The research focused on analysing the content of betalains (betacyanins + betaxanthins), total phenolic compounds and the antioxidant capacity of purple prickly pear juice. It was investigated how acidification affects these components and their stability during storage over 15 days. The treatments were pasteurized purple prickly pear juices without acidification (pH: 6.35) and at different pH levels, including 4.0, 4.2 and 4.4. The study's results highlighted the importance of purple prickly pear juice acidification. In particular, it was observed that acidification at lower pH levels (4.0) resulted in more excellent stability of betalamic pigments, which are responsible for the characteristic colours of this fruit. This stability of the pigments is a significant finding, as it helps maintain the attractive visual appearance of the juice during storage. Furthermore, acidification proved beneficial for the conservation of bioactive compounds and the antioxidant capacity of the juice. Throughout the 15-day storage period, it was observed that the levels of betacyanins, betaxanthins and betalains remained more consistent in the acidified juices compared to the non-acidified juices. The antioxidant capacity was evaluated by two widely used methods: DPPH and ABTS. The results indicated that acidified juices retained a greater antioxidant capacity compared to non-acidified juices, suggesting that acidification is a key factor in preserving the antioxidant properties of purple prickly pear juice.

**Keywords:** Prickly pear, betacyanins, bioactive compounds, antioxidant capacity, pasteurization.

## I. INTRODUCCIÓN

El procesamiento industrial de los alimentos es muy importante en el mundo entero. Tan importante que constituye uno de los pilares económicos de muchos países, pero tiene una cara no muy amistosa, los problemas de salud de una buena parte de la población, (OPS/OMS, 2015). Para atacar este problema países como México han introducido en su legislación (Ley General de Salud) una serie de normas para tratar de garantizar que la calidad e inocuidad de alimentos procesados sea parte importante de las normas de calidad sanitaria (CONALEP, 2006).

Así pues, los diversos estados del mundo están tomando importancia de que los alimentos procesados conserven sus propiedades benéficas. Por ello, en el Perú ya hay nuevas leyes que apuntan a advertir a los consumidores acerca de la calidad de los alimentos procesados que consumen. Es así que, a partir del 15 de junio de 2019, se ha modificado el reglamento de la Ley 30021, mediante la cual los productos procesados y ultraprocesados deben tener en forma obligatoria impresos los octógonos del etiquetado frontal con el fin de determinar si son altos en azúcar, grasas saturadas entre otros elementos considerados dañinos a la salud (ASPEC, 2020; Mamani-Urrutia et al., 2021).

Ante este hecho, se hace necesario investigar sobre la manera de alcanzar los mejores estándares en el procesamiento industrial de los alimentos que consumen millones de personas donde las frutas han tenido un lugar especialmente relevante en la alimentación cotidiana y dentro de éstas, por sus componentes bioactivos y su capacidad antioxidante, la tuna (Quiñones et al., 2012).

La tuna morada (*Opuntia ficus indica*) es una fruta fitogenética procedente de México y adaptada en zonas áridas y andinas de nuestro Perú, con características similares a las de sus orígenes. La región que alberga a la mayor producción es Ayacucho, donde ha incrementado su cultivo a escala comercial en los últimos años (AGROMOQUEGUA, 2022).

Se conocen hasta doce variedades, diferenciándose físicamente por su color y de formas casi similares; desde blancas hasta moradas y desde ovaladas hasta redondas. Químicamente

también muestran diferencias en su composición, pero la mayor característica es el de contener componentes bioactivos (sustancias no nutritivas, pero necesarias para el organismo humano) y antioxidantes, pudiendo tener un alto impacto en la prevención de enfermedades. Estos compuestos actúan muchas veces como preventorios del cáncer y eliminación de tumores y/o carcinomas en etapa inicial; es decir, que, actúan como quimiopreventorios; denominados en la industria alimenticia como alimentos funcionales. Actúan teniendo un efecto protector del sistema cardiovascular, reduciendo la presión sanguínea, la glucemia y la colesterolemia; así como disminuyendo el riesgo de cáncer mejorando el sistema inmunitario (Mendoza, 2014).

La tuna morada contiene mayores proporciones de componentes bioactivos como betalaínas, compuestos fenólicos con capacidad antioxidante, comparado a las otras variedades; sin embargo, no se conoce cómo influye el proceso tecnológico, específicamente el proceso de acidificación, en estos componentes benéficos para la salud del consumidor; por lo tanto, los objetivos de la investigación fueron:

### **Objetivo General**

Determinar la influencia del proceso de acidificación en la conservación de compuestos bioactivos y capacidad antioxidante en el zumo de tuna morada.

### **Objetivos específicos**

- Caracterizar la pulpa de tuna morada en sus componentes bioactivos (betalaínas, compuestos fenólicos) y capacidad antioxidante.
- Determinar la variación de los componentes bioactivos (betalaínas, compuestos fenólicos) y capacidad antioxidante, durante el proceso de acidificación del zumo de tuna morada.
- Evaluar la estabilidad de los componentes bioactivos (betalaínas, compuestos fenólicos) y capacidad antioxidante del zumo de tuna morada durante el almacenamiento hasta 15 días.

## II. REVISIÓN DE LITERATURA

### 2.1. GENERALIDADES DE LA TUNA MORADA

La tuna (*Opuntia ficus-indica*) es un cactus originario de México, pudiendo alcanzar hasta los 4 m. de altura. Esta planta, de procedencia cactácea, posee tallos en formas ovaladas o de paletas planas y chatas, con un largo de 4 cm., y un ancho de 2 cm. Están llenas de espinas, con flores amarillas y sus frutos están pegados en los bordes (Abdel-Hameed et al., 2014).

Los productores más importantes son México, seguido por Italia, España y Sudáfrica. Las tunas se reproducen mejor en zonas soleadas con altas temperaturas y poca agua. Es catalogada en el mercado internacional como "fruto exótico". Generalmente son de color anaranjado con tonalidades rojizas (Carreón-Hidalgo et al., 2023).

Además de tuna, también se le conoce en México como nopal, cardón de México y en otros lugares de Centro América como choya, alquitira, higo chumbo, etc. (De Wit et al., 2020).

De acuerdo con el Ministerio de Desarrollo Agrario y Riego (2022), la producción de tuna al 2020 llega a más de 62000 toneladas con un área cosechada de 12000 ha, teniendo un rendimiento promedio de 5,3 t/ha. Los bajos niveles de rendimiento se deben principalmente a la preferencia de los agricultores por el cultivo de la cochinilla, y a la falta de un buen manejo agronómico. Las principales áreas de producción de tuna son: Ayacucho, Cusco, Huancavelica y Apurímac, representando más del 75% de la producción total.

Cabe indicar que desde el 2011, la región Ayacucho cuenta con un Banco Nacional de Germoplasma de Tuna, que alberga 179 entradas o accesiones provenientes de diversas ciudades del país. Las zonas de cultivo de tuna en Ayacucho son Huanta, Huamanga, San Miguel y en menor medida en Cangallo y Ocos. Esta región cuenta con áreas potenciales de producción donde existe alta variabilidad genética sin la respectiva identificación de las características de calidad de fruta (Ministerio de Desarrollo Agrario y Riego, 2022).

### **2.1.1. Usos, aprovechamientos comerciales y composición química**

Los usos de los frutos son muy variados. Se pueden consumir frescos o procesados en forma de zumo, mermelada, dulce, caramelo líquido, arrope, miel de tuna, pulpa para helados o yogurt, frutas abrillantadas y gelatinas (López, 2011; Huamani, 2007; Guevara, 2002).

La tuna en el Perú tiene un alto consumo en el mercado local, más del 98% de la producción total; existiendo demanda en fresco. Cada región productora consume parte de su oferta. El principal demandante de tuna es Lima, cuya preferencia de consumo se da por las variedades blanca, amarilla y morada. Los ingresos de estas variedades al mercado mayorista se dan por las regiones de Ayacucho (variedad amarilla), Lima (variedad blanca y morada) e Ica (variedad amarilla) (Ministerio de Desarrollo Agrario y Riego, 2022).

Además, el Perú es el principal productor mundial de cochinilla, abasteciendo el 80% de las necesidades mundiales. La cochinilla es un insecto que vive sobre las pencas de las tunas y de las hembras se obtiene el ácido carmínico el cual sirve para producir el colorante natural carmín. Adicionalmente de la cochinilla y el consumo fresco o en alimentos, la tuna tiene otros potenciales usos como el aceite de semilla (rico en tocoferoles) o el nopal como fuente de biocombustible (Ministerio de Desarrollo Agrario y Riego, 2022).

En la Tabla 1 se observa la composición química de la tuna, la cual tiene un alto contenido de humedad, es rica en carbohidratos, fibra, calcio y fósforo.

**Tabla 1: Composición química de la tuna**

<b>Componentes</b>	<b>Tuna</b>	<b>Tuna</b>
	<b>Blanca</b>	<b>Colorada</b>
Calorías (Kcal)	58,0	58,0
<b>Mayores (g / 100 g porción comestible)</b>		
Agua	82,3	83,5
Proteínas	0,9	0,6
Grasas	0,0	0,0
Carbohidratos	15,3	15,5
Fibra	3,8	3,7
Cenizas	1,6	0,4
<b>Minerales (mg / 100 g porción comestible)</b>		
Calcio	16,0	40,0
Fosforo	26,0	39,0
Hierro	0,3	0,2
<b>Vitaminas (mg / 100 g porción comestible)</b>		
Caroteno	0,01	0,00
Niacina	0,36	0,42
Tiamina	0,01	0,01
Riboflavina	0,03	0,04
Ac. Ascórbico	13,00	25,50

Fuente: Collazos et al. (1993, como se citó en Cruz, 1996).

### **2.1.2. Origen, distribución y clasificación taxonómica**

Chirinos (1994) menciona que el centro de origen de la tuna está en los andes peruanos y bolivianos, así como en la meseta central de México. A partir de estos lugares, el cultivo se ha esparcido hacia otros países, especialmente a España, Italia, Austria y Chile. A nivel mundial los países con mayor producción de tuna son: México, Chile, Perú y España. Existen mercados para la exportación de tunas como Estados Unidos, Canadá y Arabia Saudita.

En el Perú, la tuna se desarrolla en forma silvestre; sin embargo, es cultivada en los departamentos de: Ayacucho, Ancash, Apurímac, Huancavelica, Cuzco, Lima, Arequipa (Espinoza, 1984, como se citó en Chirinos, 1994).

Según Espinoza et al. (1996, como se citó en Cruz, 1996), la clasificación taxonómica de la tuna es la siguiente:

División: *Fanerogama*

Clase: *Dicotiledónea*

Sub-clase: *Arquiclamídea (coripetala)*

Familia: *Cactaceae*

Sub-Familia: *Opunticidaeae*

Género: *Opuntia*

Especie: *Opuntia ficus indica*

### **2.1.3. Variedades de la tuna**

En el Perú no se ha estudiado bien las variedades de tuna, a pesar de que no hay muchas que produzcan una fruta con buenas características de calidad. Se han identificado decenas de variedades con muy buenas características que crecen entre los 4° y 17° de latitud sur en la costa y sierra del país, en lo que se refiere a la producción de fruta y forraje (Espinoza, 1984, como se citó en Cruz, 1996).

Según el ITINTEC (1988, como se citó en Cruz, 1996), los valles de Huanta, Huamanga y Pauza, pertenecientes al departamento de Ayacucho, es la zona donde se encuentra mayor número

de plantas, con características sobresalientes en lo que respecta en producción de fruta y forraje.

En el Perú, las variedades de tunas difieren por el color del fruto y por la ausencia o presencia de espinas. Según Espinoza (1996, como se citó en Cruz, 1996), las variedades más conocidas y utilizadas son:

**Blanca.** - Posee un tamaño mediano (1,50 a 2,50 m de altura), con flores de color amarillo claro. Las pencas tienen de 20 a 35 cm de diámetro con espinas de tamaño mediano y con frutos de una longitud de 8 a 10 cm y un diámetro mayor de 4,5 a 5 cm.

El fruto tiene la parte comestible firme, jugosa, muy dulce y de color verde cristalino claro. El fruto de esta variedad es el que tiene mejor aceptación en el mercado de Lima (ITINTEC, 1988, como se citó en Cruz, 1996).

**Amarilla.** - Las variedades más conocidas son: “amarilla de monte”, “amarilla de huerta” y la “amarilla costeña”. Sus flores son de color amarillo. Las dos primeras plantas son de tamaño mediano pequeñas (3 a 2 metros de altura), y presentan espinas con pencas no muy suculentas. La “amarilla costeña” llega hasta 3m. de altura con espinas muy pequeñas y pencas grandes y suculentas. Las variedades “amarilla de huerta” y “amarilla costeña” son las preferidas por su calidad, en cambio la “amarilla del monte” tiene muchas semillas y es de un tamaño pequeño.

Al respecto, Cruz (1996) manifiesta que la variedad amarilla es muy dulce, posee muchas semillas, con espinas, y es la mejor para producir cochinilla.

**Colorada.** - Esta variedad posee un fruto delicado, grande, arenoso, con espinas, y de menor aceptación.

**Morada.** - En este caso, las plantas son de gran tamaño, pasan los 3 metros de altura con pencas carnosas de gran tamaño, presentando escasas y pequeñas espinas. La flor es de color violáceo, presentando tonalidades. El fruto es muy sabroso, dulce, jugoso y de buen tamaño.

Se distingue dos variedades, una denominada “morada de huerta” y otra simplemente “morada”.

Esta variedad es de mejor calidad, delicada, de doble propósito es decir para la producción de cochinilla y frutos; su color va de rojo claro a rojo oscuro, rendidora y es de buena calidad. (Cruz, 1996).

CORPERI (1969, como se citó en Chirinos, 1994), manifiesta que la planta es rendidora siempre y cuando se le aplique los cuidados necesarios.

#### **2.1.4. Descripción botánica**

La planta de la tuna recibe varios nombres de acuerdo al país donde se encuentre, así tenemos:

- Perú, Bolivia: tuna.
- México: Nopal, Chumbera.
- España: Chumbo, Cardón de México, Choyo. Higo de Barbaria. Higuera de la Indias, Higuera Chumba, Palera, Tunera.
- Venezuela: Tuna española.
- Inglés: Barbary fig, Indian figs.
- Alemán: Indiansche feige.
- Italia: Erba de Calli.
- Francia: Figue de Barbarie.

#### **Morfología**

Chirinos (1994) indica que todas las especies de nopal (*Opuntia* spp) han desarrollado, a través de la evolución, características morfológicas adaptadas a la escasa disponibilidad de agua, a las variaciones extremas de temperatura y, en general a las diversas condiciones de las zonas áridas y semiáridas.

#### **La raíz**

Como toda especie deriva de la radícula (cuando se propaga por semilla), pero también se puede estimular su desarrollo a partir del tallo (penca). Generalmente sus raíces son gruesas, pero no suculentas de tamaño y ancho variables y a menudo es proporcional al tamaño de tallo.

#### **El tallo**

A diferencia de otras especies está conformado por tronco y ramas aplanadas. Espinoza (1984, como se citó en Cruz, 1996), define al tallo de forma aplanada, ovoide de dimensiones

variables constituyendo lo que se llama penca (botánicamente reciben el nombre de cladodios).

### **Las hojas**

En el nopal existen en los renuevos de pencas (cladodios) cuando están en tiernas. Las hojas desaparecen completamente al alcanzar la penca cierto grado de desarrollo, en cuyo lugar quedan las espinas (Espinoza, 1984, como se citó en Cruz,1996).

### **El fruto**

Es una baya carnosa, de forma redonda, cónica u ovoide, de color verde, amarillo, anaranjado, rojo o morado. La cáscara es gruesa y lleva areola casi siempre con espinillas: las espinillas son frágiles y finas.

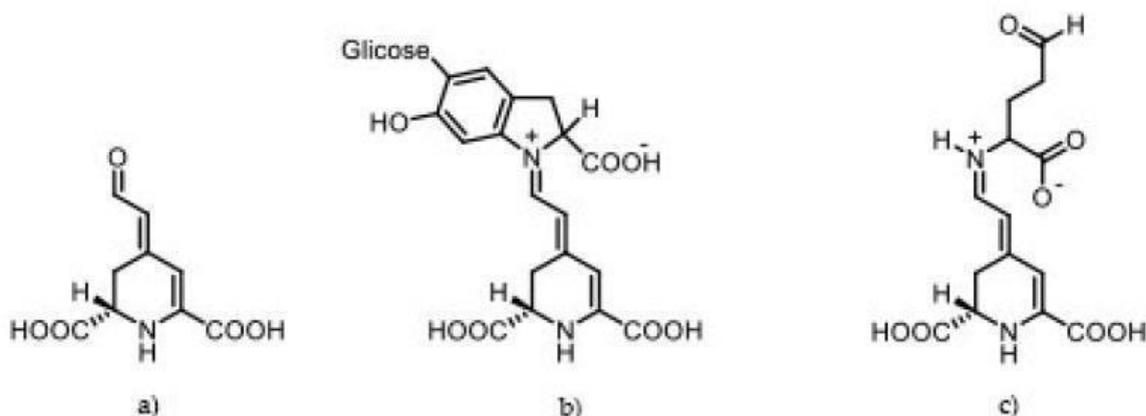
La planta comienza a producir fruto a los dos años, dependiendo de la fertilidad del suelo. La pulpa puede ser dulce o ligeramente acida.

## **2.2. BETALAÍNAS DE LA TUNA**

Las betalaínas son colorantes hidrosolubles, contienen nitrógeno y son responsables del color rojo o amarillo brillante de frutos, flores, raíces y hojas de plantas pertenecientes al orden de los *Caryophyllales*. Una de estas plantas, *Opuntia ficus indica* (L.) Mill. (cactus o tuna) contiene betalaínas en los frutos, particularmente betacianinas en la variedad morada y betaxantinas en la variedad naranja (Figura 1). La biodiversidad de *Opuntia* sp. han sido desde hace años objeto de investigaciones, tanto a nivel taxonómico como molecular. Las asignaciones de genotipos taxonómicos, basadas únicamente en características morfológicas, demostraron algunas inconsistencias, ya que la variabilidad morfológica continua dentro del género.

Los frutos de la tuna son muy importantes desde el punto de vista comercial, ya que son sabrosos y muy apreciados por los consumidores. La fruta generalmente se consume fresca, durante el período de maduración, de julio a octubre, pero la creciente demanda del mercado de alimentos que promuevan la salud ha llevado a los tecnólogos alimentarios a desarrollar procedimientos para aumentar la vida útil de la tuna. El fruto del nopal ha llamado la atención por sus beneficios nutricionales y promotores de la salud, siendo rico en compuestos antioxidantes bioactivos (betalaínas y compuestos fenólicos). Además, se ha demostrado que

el extracto de nopal tiene actividades antiulcerogénicas, antioxidantes, anticancerígenas, neuroprotectoras, hepatoprotectoras y antiproliferativas. Las tunas también se han considerado una buena fuente de colorantes alimentarios rojos y amarillos. Dado que las betalainas son particularmente estables en el rango de pH de 4 a 7, están indicadas preferentemente para colorear alimentos no ácidos. Además, la presencia de betacianinas y betaxantinas juntas proporciona un amplio intervalo de color (Betancourt, 2015).



**Figura 1. Estructuras principales del a) ácido betalámico, b) betaxantinas y c) betacianinas**

Fuente: Bentancourt (2015).

Las betalainas son pigmentos que contienen nitrógeno soluble en agua, que se sintetizan a partir del aminoácido tirosina en dos grupos estructurales: las betacianinas de color rojo violeta y las betaxantinas de color amarillo anaranjado. El ácido betalámico, es el cromóforo común a todos los pigmentos de betalaína. La naturaleza del residuo de adición de ácido betalámico determina la clasificación del pigmento como betacianina o betaxantina. Las diferencias estructurales se reflejan en la apariencia variable de los subgrupos de betalaína. Las betacianinas contienen un residuo de ciclo-3,4-dihidroxifenilalanina (ciclo-Dopa). La condensación con la estructura cerrada de la ciclo-Dopa extiende la resonancia electrónica al anillo aromático difenólico. Esta conjugación adicional cambia el máximo de absorción de 480 nm (amarillo, betaxantinas) a aproximadamente 540 nm (violeta, betacianinas). Las betaxantinas, por otro lado, contienen diferentes cadenas laterales de aminoácidos o aminas. Las modificaciones estructurales de las betaxantinas producen cambios hipso o batocrómicos. Los conjugados de amina muestran un máximo de absorción más bajo que sus

respectivos aminoácidos homólogos (Azeredo, 2009).

### **2.3. ACTIVIDAD ANTIOXIDANTE**

Pokorny et al. (2001) refieren que los compuestos fenólicos tienen una actividad antioxidante que se debe principalmente a las propiedades redox. Esto les permite actuar como agentes reductores, donadores de hidrógeno y captadores de radicales OH (Muñoz et al., 2007). Además, retrasan la oxidación de los lípidos mejorando el valor nutricional y la calidad de los alimentos. Los flavonoides y otros compuestos fenólicos están implicados en un papel preventivo de enfermedades cancerígenas (posee actividad antipromotora, efecto anti-invasivo e inhibición de enzimas como la tirosina kinasa) (Katsube et al., 2003), previene la trombosis (influye en el metabolismo del ácido araquidónico con niveles reducidos de tromboxano y niveles altos de prostaciclina) y también previene enfermedades del corazón (Brenna et al., 2009; Clydesdale, 2004).

Para Pokorny et al. (2001) los compuestos fenólicos, la vitamina C y los flavonoides son antioxidantes y junto a otros, constituyen varias líneas del sistema de defensa *in vivo*. La primera línea se basa en la disminución de la generación de radicales libres y especies reactivas de oxígeno. Esto se logra secuestrando iones metálicos, reduciendo hidroperóxidos y oxígeno singlete. La segunda línea de defensa la realizan los antioxidantes, ya que absorben los radicales. Un ejemplo de ello es la vitamina C o los compuestos fenólicos, que al atrapar radicales rompen la reacción en cadena y paralizan la propagación. Finalmente, la tercera línea de defensa la constituyen los mecanismos de reparación de componentes alterados por la oxidación, tales como los lípidos, proteínas y ADN.

Por lo tanto, la acción antioxidante es uno de los muchos mecanismos que ejercen las propiedades benéficas para la salud de las plantas. Estas propiedades nutricionales y saludables de la tuna están asociadas con su contenido de compuestos fenólicos. Los extractos de la fruta mostraron ser un antioxidante natural efectivo tanto en ambientes lipídicos como acuosos. Las propiedades antioxidantes de la tuna se atribuyeron a la presencia de betalaínas naturales (betacianina y betaxantina). El potencial antioxidante de la fruta de *Opuntia* puede neutralizar especies reactivas de oxígeno como el oxígeno singlete, el peróxido de hidrógeno y la peroxidación lipídica. La capacidad antioxidante de la fruta de *Opuntia* fue determinada por varios ensayos antioxidantes que dependen de factores como la reactividad hacia los radicales, y la distribución, localización y destino de los radicales derivados de los antioxidantes en interacción con otros antioxidantes. La mayor parte de la

capacidad antioxidante asociada con las frutas es ejercida por el ácido ascórbico y los compuestos fenólicos, y una mezcla de pigmentos betacianina (púrpura-rojo) y betaxantina (amarillo-naranja). En una comparación entre diferentes estudios sobre la capacidad antioxidante, se demostró que la habilidad de los frutos de cactus para eliminar los radicales libres es mayor que la de peras, manzanas, tomates, plátanos, uvas blancas y es comparable a la de berries, uvas rojas, pomelos rosados y naranjas rojas (Nassrallah et al., 2021; Mejía et al., 2010).

#### **2.4. RADICALES LIBRES**

Luh (1998) refiere que la generación de radicales libres y especies reactivas de oxígeno, se deben a factores como la contaminación ambiental, los pesticidas, la contaminación del agua, el uso de medicamentos, y hasta el metabolismo aeróbico de las células. El aumento de estas especies reactivas y radicales, pueden llevar al organismo a un estado de estrés oxidativo. En este estado se pueden producir lesiones fisiológicas y bioquímicas que perjudicarían el metabolismo del individuo, causando lesiones oxidativas a ácidos nucleicos, proteínas, lípidos. Todo ello conlleva a la muerte de la célula.

Cáscales (1997) afirma que los radicales libres son átomos o moléculas que tienen un electrón desapareado en el orbital más externo. En ese sentido, todos los seres aerobios van a poseer células que van a generar endógenamente radicales libres. Estos radicales mayoritariamente se generan cuando el O<sub>2</sub> se reduce parcialmente cuando es usado por las mismas células. Entre un 2 y un 5% del O<sub>2</sub> consumido para mantener vida, genera especies reactivas de oxígeno (ROS) y otros radicales libres. Estas especies son los que llegan a oxidar otros componentes celulares, afectando su función o su estructura. Los radicales libres dañan continuamente a los lípidos, ácidos nucleicos, proteínas, azúcares, presentes ya sea dentro o fuera de la célula (Ishige et al., 2001).

## **2.5. BIODISPONIBILIDAD DE POLIFENOLES**

O'Dell (1985) manifiesta que es importante no solamente conocer el contenido de los nutrientes en un alimento, también es necesario determinar cuánto de dicho nutriente puede ser absorbido por el organismo, es decir, su biodisponibilidad.

Para Steinmetz et al. (1999), la biodisponibilidad es un término que describe la fracción de un elemento nutritivo que es absorbido por el organismo y que se encuentra luego disponible para su posterior utilización.

Manach et al. (2004) manifiestan que, en la dieta, los compuestos fenólicos son micronutrientes presentes en altas concentraciones. Asimismo, es importante la evidencia de su rol en la prevención de enfermedades cardiovasculares (Schramm y German, 1998) y otras como el cáncer (Olguín et al., 2004). Estos beneficios dependen tanto de la concentración ingerida, pero también de su biodisponibilidad (Espin et al., 2000; Herrera et al., 2001).

Manach et al. (2005) mencionan, por ejemplo, que los polifenoles de la quercetina se encuentran usualmente en vegetales (frutas, cereales, leguminosas) y en sus productos derivados (jugos de frutas, té, vino, infusiones, etc.). También manifiestan que otros polifenoles son específicos para ciertos alimentos como las isoflavonas en soya, flavanonas en cítricos, floridizin en manzanas. Mayormente, los polifenoles están presentes en los alimentos formando mezclas complejas, siendo el procesamiento un factor que afecta su contenido (Patras et al., 2009). Las pérdidas pueden darse tanto en el pelado de frutas, como en el descascarado de semillas, así como el procesamiento de cereales, entre otros (Asami et al., 2003).

Pokorny et al. (2001) sostienen que algunos procesos en los que intervienen temperaturas elevadas se utilizan para conseguir cambios positivos, sin embargo, a menudo traen consecuencia pérdidas en el valor nutritivo, y en algunos casos, pérdidas en la resistencia del alimento frente a la oxidación de lípidos. El uso de temperaturas moderadas (máximo 100°C) reduce los cambios negativos de la calidad nutritiva en un alimento. El principal motivo para someter a un alimento a temperaturas moderadas es la destrucción de los microorganismos presentes. También se busca la desnaturalización de las enzimas, pero en paralelo se producen alteraciones, como cambios en el aroma, textura, color y la destrucción de nutrientes sensibles al calor.

## 2.6. COMPUESTOS FENÓLICOS EXTRAÍBLES Y NO EXTRAÍBLES

La extracción de compuestos fenólicos (CF) revela una división fundamental entre dos fracciones: los compuestos fenólicos extraíbles (CFE) y los no extraíbles (CFNE), también conocidos como compuestos fenólicos ligados. Los CFE, primordialmente alojados en las vacuolas vegetales, se consideran libres en la matriz alimentaria. Su denominación como "extraíbles" radica en su facilidad para ser removidos de los alimentos mediante solventes orgánicos, agua y agitación. En contraste, los CFNE se caracterizan por ser "no extraíbles", dado que su liberación no es posible únicamente con solventes orgánicos o mezclas de solventes y agua. Para extraerlos, se requiere un proceso de hidrólisis previa para separarlos de la matriz alimenticia. Esta hidrólisis es esencial debido a la interacción de los CFNE con componentes estructurales de la pared celular, como la celulosa, hemicelulosa, pectina y lignina (Carboni-Martins et al., 2022; Freile et al., 2003).

Los compuestos polifenólicos, como indica su nombre, se distinguen por la presencia de múltiples grupos fenólicos que se unen a diversas sustancias químicas de peso molecular tanto bajo como alto para conformar sus estructuras. Se originan como subproductos del metabolismo vegetal y han suscitado un creciente interés debido a sus propiedades antioxidantes y sus beneficios para la salud (Vasco et al., 2008; Zhishen et al., 1999). En la tuna, estos compuestos se encuentran en todos sus componentes, incluyendo una diversidad de ácidos polifenólicos y flavonoides. Por ejemplo, la flor contiene principalmente ácido gálico, junto con otros compuestos como 6-isoramnetina-3-O-robinobiosido. La pulpa de la fruta de la tuna también es una notable fuente de compuestos fenólicos, como el glucósido de isoramnetina. Las semillas de la fruta, por su parte, poseen un alto contenido de polifenoles, incluyendo taninos y derivados de feruloilo. Es relevante mencionar que la corteza del fruto también contiene una cantidad considerable de compuestos fenólicos, entre los cuales se destacan derivados de la quercetina y el kaempferol, reconocidos por sus propiedades bioactivas, como beneficios para el corazón, la memoria y la prevención de enfermedades como el Alzheimer y el cáncer, entre otros (Shoukat et al., 2023).

La flor de cactus es una fuente importante de flavonoides y compuestos polifenólicos, especialmente en ciertos tipos de cactus con cladodios, que producen una amplia variedad de estos compuestos. Por ejemplo, el cactus *Phaeacantha* presenta una riqueza de compuestos flavonoides raros como la narcisina y la nicotiflorina, junto con isoquercetina y

ácido ferúlico en cantidades significativas. Las variaciones en el contenido de polifenoles entre distintos cactus pueden atribuirse a factores como el suelo, el clima, la edad de los cladodios y el entorno ambiental. Incorporar una dieta rica en compuestos polifenólicos puede brindar una amplia gama de beneficios para la salud.

Asimismo, existen investigaciones acerca del efecto del tratamiento térmico, como pasteurización, en los compuestos fenólicos y capacidad antioxidante del zumo de tuna. En pruebas realizadas a 65, 75 y 85°C, los resultados mostraron una mayor estabilidad de compuestos fenólicos y capacidad antioxidante a una temperatura de 65°C y un tiempo de 10 min (Puma, 2023). Asimismo, Meza (2014) en su trabajo con pulpas concentradas de tuna naranja, obtiene mejores resultados con las temperaturas más bajas (40°C en concentración al vacío), principalmente en compuestos fenólicos y capacidad antioxidante.

### **III. MATERIALES Y MÉTODOS**

#### **3.1. LUGAR DE EJECUCIÓN**

La investigación se realizó en las instalaciones pertenecientes a la Facultad de Industrias Alimentarias de la Universidad Nacional Agraria La Molina (UNALM) específicamente en la Planta Piloto de Alimentos (PPA) y en los laboratorios de Biotecnología, Análisis Fisicoquímico de Alimentos y de Investigación.

#### **3.2. MATERIALES Y EQUIPOS**

##### **3.2.1. Materia prima**

Se empleó tuna morada (100 kg), la cual fue adquirida en el mercado de Ica – Perú.

##### **3.2.2. Materiales**

- Frascos de plástico (100 mL).
- Tapas para los frascos de plástico.
- Agua de mesa embotellada.
- Utensilios (tinas, ollas, tazones, entre otros).
- Material de vidrio (bureta, fiolas, matraces, beakers, pipetas, tubos de ensayo, etc.)
- Picetas de plástico.
- Cronómetro digital.

##### **3.2.3. Equipos**

- Pulpeadora (Vulcano, Perú).
- Marmita con chaqueta de vapor (industria nacional).
- Refractómetro de mano (0-50 %) (Atago, RS500, Japón).
- Balanza de precisión con capacidad de 0 -100g (OHAUS, Adventurer, Alemania).
- Mesa de acero inoxidable (industria nacional).
- Potenciómetro digital de mesa (Janway 3510, Reino Unido).
- Espectrofotómetro (Perkin Elmer, EEUU).

- Mufla digital (Thermo Scientific, Thermolyne 1400, Canadá).
- Balanza analítica digital (Sartorius CP 224S).
- Balanza de precisión digital de 2 kg (OHAUS, Scout Pro, Alemania).
- Centrífuga digital (Hettich, MIKRO 22R, Alemania).
- Penetrómetro (Wagner Instruments, Reino Unido).
- Baño María de 12 L (Memmert digital, Alemania).
- Micropipeta (BRAND, 5 - 50 uL).
- Micropipeta (BRAND, 100 - 1000 uL).
- Cocinilla con agitador magnético (CAT M6, Alemania).

#### **3.2.4. Reactivos**

- Ácido cítrico, grado alimentario (Mallinckrodt Baker Inc., USA).
- Folin Ciocalteu (Merck, USA).
- Ácido gálico, grado analítico (Sigma Aldrich, USA).
- Carbonato de sodio, grado analítico. (Mallinckrodt Baker Inc., USA).
- DPPH (2, 2, difenil-1-picrilhidrazil) (Sigma Aldrich, USA).
- Metanol, grado analítico (Merck, USA).
- Tampón Tris (DC Fine Chemicals, España).
- ABTS+ (2,2'-Azinobis) (Sigma Aldrich, USA).
- Persulfato de potasio, grado analítico (2,45 mM) (Merck, USA).

#### **3.2.5. Programas informáticos**

- Software: OriginPro demo (OriginLab Corporation, MA, EEUU).
- Software: Statgraphics Centurium (StatPoint Technologies, Inc, Warrenton, VA).

### **3.3. MÉTODOS DE ANÁLISIS**

#### **3.3.1. Contenido de betalaínas totales, betacianinas y betaxantinas**

El contenido de betalaínas totales se determinó como una suma de betacianinas (Bcy) y betaxantinas (Bx) de acuerdo al método espectrofotométrico descrito por Abderrahim et al. (2015) y Laqui-Vilca et al. (2018). La muestra se diluyó en agua con un factor de dilución de tres ( $FD = 3$ ) y en el caso de la muestra obtenida después del pulpeado se centrifugó a  $20000 \times g$  por 20 min ( $4 \text{ }^\circ\text{C}$ ) para eliminar partículas en suspensión. La

muestra diluida (500  $\mu\text{l}$ ) se colocó en una cubeta de cuarzo y se adquirió la curva de espectro de absorción entre 400-700 nm con incrementos de 1 nm usando un espectrofotómetro. Se usó como blanco agua destilada. El espectro de absorción se desconvolucionó para separar los picos usando el programa OriginPro demo. El contenido de BCy (betacianina) y Bx (betaxantina) se cuantificó de la absorbancia obtenida después del proceso de desconvolución usando los coeficientes molares de extinción de 60000 y 48000  $\text{L mol}^{-1} \text{cm}^{-1}$ , respectivamente.

### **3.3.2. Compuestos fenólicos totales**

El contenido de compuestos fenólicos extraíbles se midió mediante la metodología de Abderrahim, et al. (2011). Se tomó 50  $\mu\text{l}$  de la muestra diluida (Factor de dilución = 15) o solución de ácido gálico (0,02 – 0,1 mg/ml), se añadió 50  $\mu\text{l}$  de reactivo de Folin-Ciocalteu y 400  $\mu\text{l}$  de solución de carbonato de sodio al 5 por ciento (p/v). Se mezcló y se dejó en reposo 1 h en oscuridad y se midió la absorbancia a 760 nm usando un espectrofotómetro. El contenido de compuestos fenólicos se expresó en miligramos equivalentes de ácido gálico (EAG) por mililitro de muestra, que se calculó a partir de una recta de calibración ( $Y = 13,431 X$ ,  $R^2 = 0,9997$ ,  $Y =$  absorbancia y  $X =$  concentración, mg/ml).

### **3.3.3. Capacidad antioxidante**

#### **a) Método del radical libre DPPH**

La capacidad antioxidante se determinó por el método del radical libre DPPH según el procedimiento descrito por Abderrahim et al. (2013) adaptado a un espectrofotómetro. La solución madre de DPPH (1 mM) se diluyó adecuadamente en tampón tris base: metanol, 1:1 v/v, pH = 7,5 para obtener una solución de trabajo de DPPH con absorbancia de 0,89-0,91. Se mezcló 25  $\mu\text{l}$  de la muestra diluida (factor de dilución = 5) o solución de ácido gálico (0,008 – 0,040 mg/ml) con 500  $\mu\text{l}$  de la solución de trabajo de DPPH y la absorbancia se midió a 520 nm usando un espectrofotómetro después de 10 min de reacción. La capacidad antioxidante se expresó en mmol equivalente trolox (ET) por litro

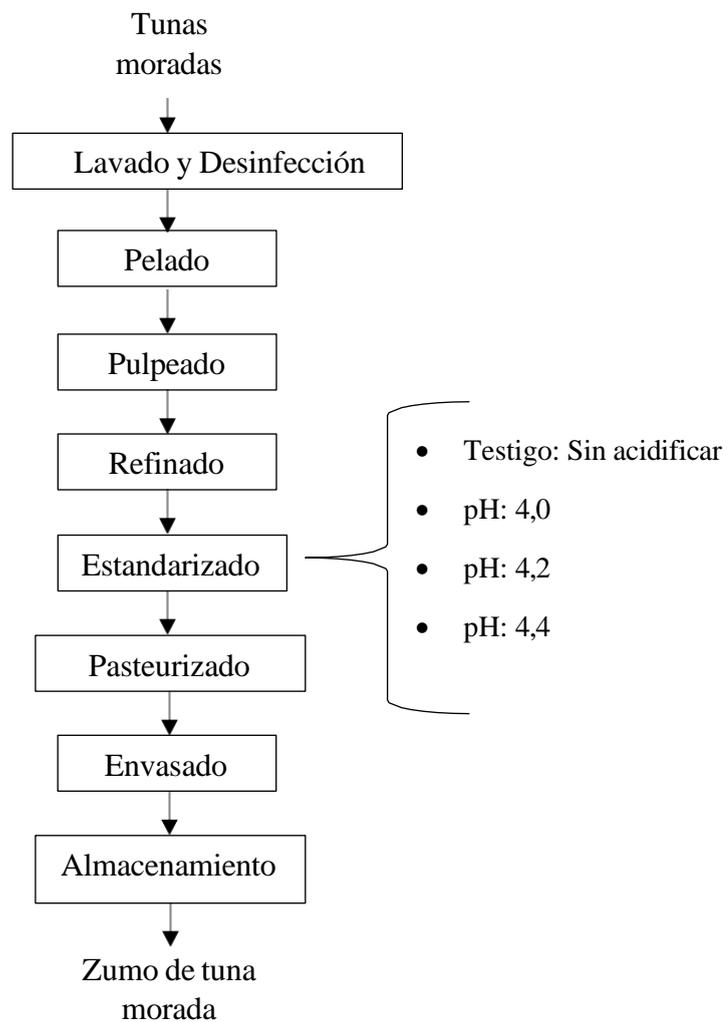
de muestra calculado a partir de la recta de calibración ( $Y = 1706,7 X$ ,  $R^2 = 0,9990$ ,  $Y =$  Inhibición, % y  $X =$  concentración, mg/ml).

#### **b) Método del radical libre ABTS**

La capacidad antioxidante total extraíble (CATE) se determinó por el método del radical libre ABTS utilizando el método de Re et al. (1999) con algunas modificaciones. Para la síntesis del radical ABTS<sup>+</sup> (2,2'-Azinobis) se mezcló ABTS (7 mM) con persulfato de potasio (2,45 mM) en medio acuoso y se incubó a temperatura ambiente durante 16 h en oscuridad. Posteriormente, se preparó la solución de trabajo de ABTS a partir de la dilución de la solución madre de ABTS con una solución de etanol hasta alcanzar una absorbancia 0,73-0,75 a 734 nm. La reacción se realizó mezclando 25  $\mu$ l de la muestra diluida (factor de dilución = 10-20) o de disolución de ácido gálico (0.006 - 0.030 mg/ml) con 500  $\mu$ l de la solución de trabajo de ABTS y la absorbancia se midió a 734 nm a los 30 min usando un espectrofotómetro. La actividad antioxidante se calculó en mmol equivalente trolox (ET) por litro de muestra calculado a partir de la recta de calibración ( $Y = 3510,7 X$ ;  $R^2 = 0,9971$ ,  $Y =$  Inhibición, % y  $X =$  concentración, mg/ml).

### **3.4. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL**

Para la elaboración de zumo de tuna morada se siguió el proceso mostrado en la Figura 2, basado en Herrera (1992), Hurtado (1987) y Guevara (2002). Asimismo, se tomó en cuenta las normas del Codex Alimentarius (2005) y FAO (1982).



**Figura 2. Flujograma de la elaboración de zumo de tuna morada**

**Lavado y Desinfección:** En esta etapa, las tunas moradas se lavan minuciosamente para eliminar cualquier suciedad, residuos de pesticidas u otros contaminantes superficiales. El lavado se realizó con agua limpia y se desinfectó con hipoclorito de sodio con una concentración de 100 ppm para garantizar la higiene.

**Pelado:** Después de lavar las tunas, se procedió al pelado. Las tunas moradas se pelan para eliminar la cáscara externa, exponiendo la pulpa interna. Esto se puede hacer manualmente o con la ayuda de maquinaria especializada.

**Pulpeado:** Una vez peladas, las tunas se pasaron por una máquina de pulpeado que separa la pulpa de la fruta de las semillas y otras partes no comestibles. Esto resulta en una pulpa de tuna pura que es la base del zumo.

**Refinado:** En esta etapa, la pulpa se somete a un proceso de refinado para eliminar cualquier partícula gruesa, como pequeñas semillas o restos de piel que puedan haber quedado después del pulpeado utilizando la pulpeadora con malla fina. El objetivo de esta operación es obtener zumo de tuna, ya que se eliminó partículas pépticas de la pulpa.

**Estandarizado:** El zumo de tuna morada se acidificó con ácido cítrico hasta lograr el pH de 4,0; 4,2 y 4,4. Al tratamiento control no se le adicionó ácido cítrico.

**Pasteurizado:** Para garantizar la seguridad alimentaria y prolongar la vida útil del producto, el zumo fue pasteurizado a la temperatura de 95°C por 5 minutos (Durant et al., 2017). Esto implica calentar el zumo a una temperatura específica durante un período de tiempo determinado para eliminar microorganismos patógenos y enzimas que podrían deteriorar el zumo con el tiempo.

**Envasado:** Después de la pasteurización, el zumo de tuna morada se envasó en contenedores de plástico (100 mL). Los envases se sellaron herméticamente para evitar la contaminación y mantener la frescura del producto.

**Almacenamiento:** Los envases de zumo envasado se almacenó en condiciones adecuadas para conservar su calidad y para poder realizar los análisis en diferentes tiempos de almacenamiento (Temperatura ambiente 23°C y en ausencia de luz).

### 3.5. DISEÑO EXPERIMENTAL

El diseño experimental de esta tesis se enfocó en determinar la influencia del proceso de acidificación en la conservación de compuestos bioactivos y la capacidad antioxidante en el zumo de tuna morada. El objetivo principal es analizar cómo diferentes niveles de pH impactan en la estabilidad de componentes clave de la tuna morada, como las betacianinas, betaxantinas y betalaínas, así como en su capacidad antioxidante, medida a través de los ensayos DPPH y ABTS.

Para llevar a cabo este estudio, se realizaron cuatro tratamientos distintos:

**Zumo de tuna pasteurizado (Testigo):** Este grupo servirá como control (zumo sin acidificación) y permitirá comparar con los otros tratamientos, evaluando la degradación de los compuestos bioactivos y la capacidad antioxidante en condiciones normales de procesamiento.

**Zumo de tuna acidificado pH = 4,0 pasteurizado:** Se acidificará el zumo a un nivel de pH de 4,0 para simular una condición ligeramente ácida. Esto se hace para observar cómo esta acidez moderada afecta a los compuestos bioactivos y antioxidantes.

**Zumo de tuna acidificado pH = 4,2 pasteurizado:** El zumo se acidificará a un pH de 4,2, lo que representa un aumento en la acidez con respecto al tratamiento anterior. Se evaluará cómo esta disminución del pH influye en los compuestos estudiados.

**Zumo de tuna acidificado pH = 4,4 pasteurizado:** En este tratamiento, el zumo se acidificará aún más, con un pH de 4,4, para analizar los efectos de una mayor acidez en la conservación de los compuestos bioactivos y la capacidad antioxidante.

Los valores de pH utilizados en la presente investigación fueron seleccionados siguiendo trabajos previos de bebidas de tuna estandarizadas a pH 4 (Huanaco y Huampa, 2019), además del criterio de acidificar los alimentos para poderlos pasteurizar, así mismo, porque es convencional encontrar en el mercado zumos de fruta acidificados.

Las variables respuesta incluirán el contenido de betacianinas, betaxantinas, betalaínas, así como la capacidad antioxidante, medida mediante los ensayos DPPH y ABTS. Estos parámetros se medirán a lo largo del tiempo para evaluar la estabilidad de los compuestos y la eficacia de la acidificación en la conservación de las propiedades nutricionales y antioxidantes del zumo de tuna morada.

### **3.6. ANÁLISIS ESTADÍSTICO**

Se realizó un análisis de varianza (ANOVA), el cual determinó si las medias de los cuatro grupos son diferentes utilizando la prueba F para evaluarlas estadísticamente y así obtener el valor confiable (Castillo, Mejía y Arévalo en Reyes, 2011). Se realizaron cinco repeticiones por cada tratamiento. Para ver si hay diferencias entre los tratamientos evaluados, se aplicó la prueba de Tukey, a un nivel de significancia del 95%.

## **IV. RESULTADOS Y DISCUSIONES**

### **4.1. PULPEADO**

#### **4.1.1. Contenido de betalaínas totales de la pulpa de tuna**

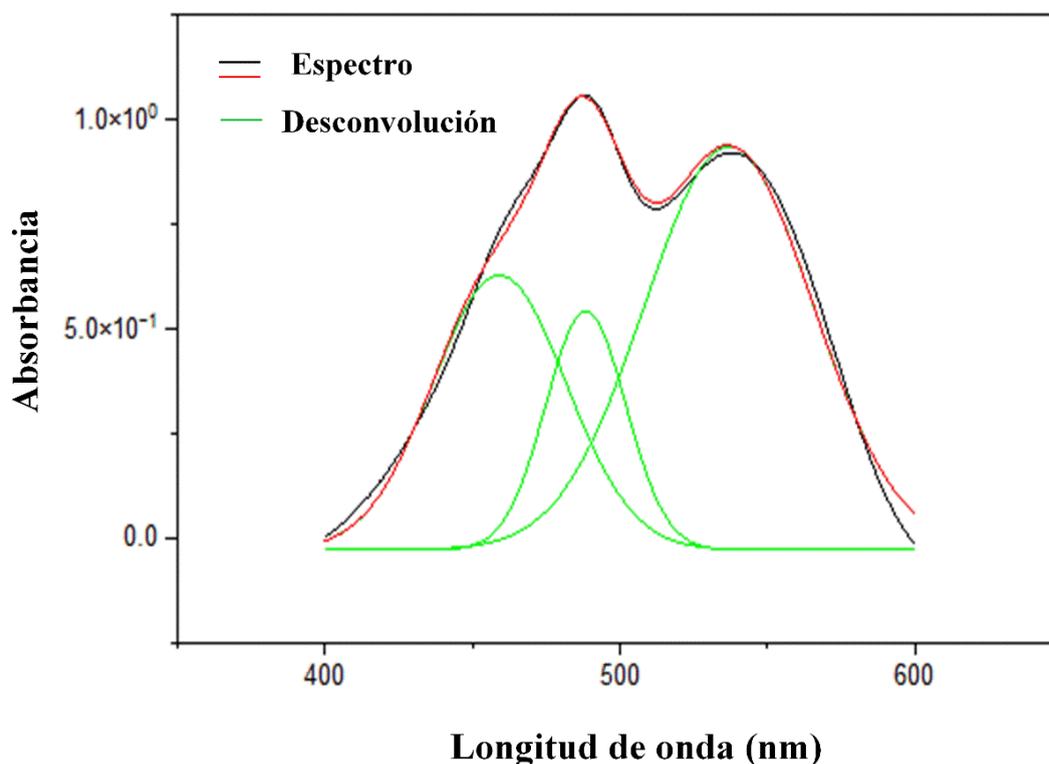
El contenido de betacianinas, betaxantinas y betalaínas de la pulpa de tuna se muestran en la Tabla 2. Se pudo determinar que el contenido de betalaínas (betacianinas + betaxantinas) de la tuna morada pulpeada fue de 17,30 mg/L. Este resultado es mucho menor al reportado por Ferreira et al. (2023), quienes reportan que el jugo de tuna rosada, proveniente de Portugal, presentó un contenido de betalaínas de 53,1 mg/L (28,2 mg/L de betalaínas + 24,8 mg/L de betaxantinas). Incluso, valores superiores se han reportado en el trabajo de Cruz-Cansino et al. (2015), quienes reportan un contenido de betaninas de 291,52 mg/L y 107,87 de betaxantinas en jugos de tuna provenientes de México. A nivel de Perú, existen reportes divergentes en relación al contenido de betalaínas de la tuna, por ejemplo, Repo de Carrasco y Encina-Zelada (2008), reportan valores de 68,95 mg/L, mientras que Meneses (2021) informan el contenido de betalaínas es variable entre 14,5 a 60,2 mg/L, dependiendo del tratamiento térmico al que se ven sometidos este alimento. En una reciente investigación, se han reportado valores menores a los determinados en la presente investigación; por ejemplo, De Wit et al. (2020) reportan valores de betalaínas de 1,52 – 11,69 mg/kg, en tunas provenientes de Sudáfrica. Esta variación en el contenido de los pigmentos se puede deber a varios factores, como la variedad de la planta, el grado de madurez de los frutos y las condiciones de crecimiento. Además, la concentración de betalaínas en el zumo de tuna también depende de la preparación y el procesamiento del zumo (De Wit et al., 2020).

**Tabla 2: Contenido de betacianinas, betaxantinas y betalaínas totales de la pulpa de tuna**

	Contenido (mg/L) <sup>1</sup>
Betacianinas	7,39 ± 0,29
Betaxantinas	9,91 ± 0,40
Betalaínas totales	17,30 ± 0,69

<sup>1</sup> Promedio ± desviación estándar, (n= 3).

En la Figura 3, se muestra el espectro de absorción de la pulpa de tuna y picos obtenidos por desconvolución para la cuantificación del contenido de betacianinas, betaxantinas y betalaínas totales. La desconvolución en espectroscopía se emplea para descomponer un espectro complejo en sus componentes individuales, lo que permite analizar y cuantificar diferentes sustancias o características presentes en la muestra.



**Figura 3. Espectro de absorción de la pulpa de tuna y picos obtenidos por desconvolución para la cuantificación del contenido de betacianinas, betaxantinas y betalaínas totales (promedio ± desviación estándar, n= 3)**

En relación a la proporción de betacianinas y betaxantinas, en el presente estudio de investigación fue de 0,75, esto quiere decir que la proporción de betaxantinas (color amarillo) fue predominante (Tabla 2). Se conoce que, en algunas variedades, esta relación varía entre 0 y 11,7 (Ramadan et al., 2021). Respecto a la ubicación de las betalaínas en los frutos, se ha indicado que se hallan en las vacuolas en forma de zwitteriones. Los zwitteriones son moléculas que tienen una carga eléctrica neta igual a cero, lo que significa que tienen tanto cargas positivas como negativas dentro de la misma molécula. En el caso de las betalaínas, pueden existir como zwitteriones debido a su estructura química particular (De Wit et al., 2020). Si bien, se indican que las betacianinas y betaxantinas, son los pigmentos mayoritarios en el jugo de la tuna, también se han reportado un total de nueve tipos de betalaínas, incluidas seis betaxantinas y tres betacianinas, en muestras de jugo de tuna proveniente de Portugal, donde la indicaxantina, la betanina y la isobetanina eran los pigmentos principales.

#### **4.1.2. Contenido de compuestos fenólicos totales de la pulpa de tuna**

Con respecto al contenido de compuestos fenólicos encontrados en la pulpa de tuna ( $0,56 \pm 0,01$  mg AGE/mL), fue similar a lo reportado por Galati et al. (2003), quienes reportan una concentración media de compuestos fenólicos totales de 0.746 mg/mL, siendo el ácido ferúlico el principal derivado del ácido hidroxicinámico presente en la tuna. Dichos autores indican que la fracción de flavonoides, analizada mediante cromatografía líquida de alta resolución-detección por matriz de diodos, consistía en derivados de rutina e isorhamnetina.

#### **4.1.3. Capacidad antioxidante (DPPH y ABTS) de la pulpa de tuna**

La capacidad antioxidante de la pulpa de la tuna se evaluó mediante los métodos de DPPH y ABTS (Tabla 3). El DPPH (2,2-difenil-1-picrilhidrazil) y el ABTS (ácido 2,2'-azino-bis (3-etilbenzotiazolina-6-sulfónico)) son dos compuestos químicos ampliamente utilizados en pruebas de capacidad antioxidante. Estas pruebas se usan para determinar la capacidad de un compuesto o muestra para neutralizar radicales libres, lo que indica su capacidad antioxidante. La capacidad antioxidante encontrada en la presente investigación (Tabla 4),

fue mucho mayor a lo reportado por Ferreira et al. (2023). Esta capacidad antioxidante es proporcionada por los compuestos fenólicos, así como por los pigmentos (Azeredo, 2009; Jacobo et al., 2009). Se ha reportado que las betalaínas son excelentes eliminadores de radicales con una actividad antioxidante 3 a 4 veces mayor que la del ácido ascórbico, la rutina y la catequina (De Wit et al., 2020).

**Tabla 3: Capacidad antioxidante de la pulpa de tuna medido por el método del DPPH**

	(mmol ET/L) <sup>1</sup>
Capacidad antioxidante DPPH	90,773 ± 7,047
Capacidad antioxidante ABTS	342,663 ± 8,462

<sup>1</sup> Promedio ± desviación estándar, (n= 3). ET: equivalente trolox.

## 4.2. PASTEURIZADO

### 4.2.1. Contenido de betalaínas totales del zumo de tuna con diferentes pH y pasteurizada

Con respecto al zumo de tuna pasteurizado, se pudo evidenciar que las betalaínas en el zumo pasteurizado testigo (pH del zumo natural: 5,8) sufrieron una degradación del 30%, al pasar de 17,30 a 12,09 mg/L (Tabla 2 y Tabla 4). Por otro lado, la acidificación a pH 4,0 fue el tratamiento que logró que las betalaínas sean estables al proceso de pasteurización (18,81 mg/L); mientras que, los tratamientos de acidificación a pH 4,2 y 4,4 produjeron una ligera disminución del contenido de betalaínas en 16,84 y 14,09 mg/L, respectivamente.

Si bien, se ha informado que las betalaínas no son tan susceptibles a los cambios de pH como las antocionaninas, se observó que el pH ácido mejora su estabilidad ante el tratamiento con calor, ya que hay diferencias significativas en todos los casos con respecto al control. Se conoce que las betalaínas son relativamente estables en un amplio rango de pH de 3 a 7, lo que permite su aplicación en alimentos de baja acidez. Por debajo de pH 3,5 la máxima de absorción se desplaza hacia longitudes de onda más bajas, y por encima de pH 7 el cambio es hacia longitudes de onda superiores; fuera del rango de pH de 3,5 a 7,0 la intensidad del espectro visible disminuye. Las condiciones alcalinas causan la hidrólisis del enlace aldimino, mientras que la acidificación induce la recondensación del ácido betalámico con el grupo amino del residuo de adición. A valores de pH bajos, se observaron

isomerización de C<sub>15</sub> y deshidrogenación (Azeredo, 2009). Por lo tanto, se puede indicar que, en soluciones altamente ácidas o altamente alcalinas, las betalaínas pueden descomponerse más rápidamente, lo que afectará su estabilidad y su capacidad para mantener su color característico.

**Tabla 4: Contenido de betacianinas, betaxantinas y betalaínas totales del zumo de tuna con diferentes pH y pasteurizada**

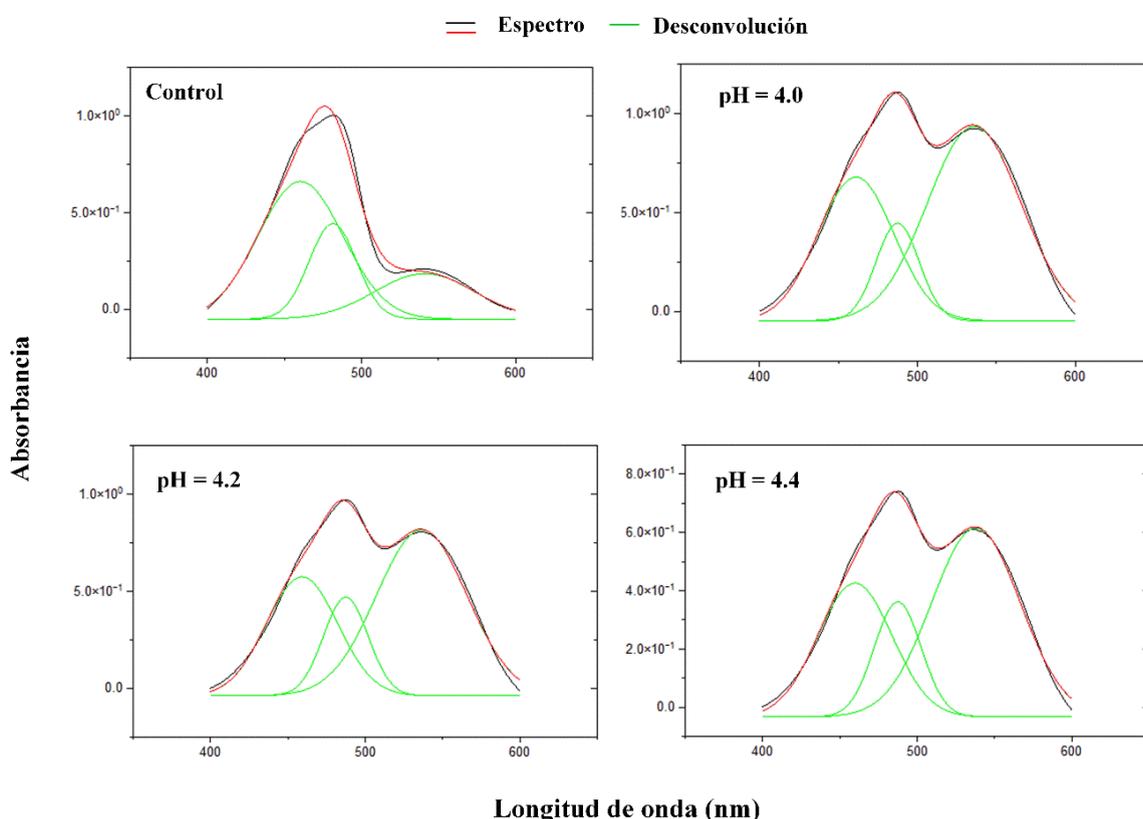
	Contenido (mg/L) <sup>1</sup>		
	Betacianinas	Betaxantinas	Betalaínas totales
Control	1,93 ± 0,06 <sup>a</sup>	10,16 ± 0,23 <sup>ab</sup>	12,09 ± 0,29 <sup>a</sup>
pH = 4,0	7,73 ± 0,12 <sup>c</sup>	11,08 ± 0,18 <sup>ab</sup>	18,81 ± 0,30 <sup>c</sup>
pH = 4,2	6,93 ± 0,10 <sup>c</sup>	9,90 ± 0,13 <sup>a</sup>	16,84 ± 0,23 <sup>b</sup>
pH = 4,4	5,81 ± 0,53 <sup>b</sup>	8,29 ± 0,78 <sup>a</sup>	14,09 ± 1,31 <sup>ab</sup>

<sup>1</sup> Promedio ± desviación estándar, (n= 3). pH control = 6.35±0.09 (25 °C). Las letras diferentes indican diferencia significativa (p<0,05) en cada columna.

De una manera más específica, se pudo observar estadísticamente que las betacianinas fueron las que se degradaron en mayor proporción que las betaxantinas. Por ejemplo, se observó que en el zumo pasteurizado testigo, la pérdida de betacianinas fue del 74%, pasando de 7,39 mg/ L (zumo fresco sin pasteurizar) a 1,93 mg/L. Por otro lado, con la acidificación, las betacianinas fueron más estables, al evidenciarse solo una mínima degradación en el tratamiento de pasteurización a pH 4,4. En vista de los resultados el pH de 4,0 fue el más apropiado para mantener la estabilidad del pigmento en mención. Esto también se puede notar en la Figura 4, donde se muestran los espectros de absorción del zumo de tuna con diferentes pH y pasteurizada, así como los picos obtenidos por desconvolución para la cuantificación del contenido de betacianinas, betaxantinas y betalaínas totales.

Con respecto al efecto de la temperatura se sabe que, durante el procesamiento térmico, la betanina puede degradarse por isomerización, descarboxilación o escisión (mediante calor o ácidos, lo que resulta en una reducción gradual del color rojo y, finalmente, la aparición de un color marrón claro. La deshidrogenación de betanina conduce a la formación de neobetanina, provocando un cambio al amarillo. La escisión de betanina e isobetanina, que también puede ser inducida por bases, genera el ácido betalámico de color amarillo brillante y el ciclo-Dopa-5- O -glicósido incoloro (Azeredo, 2009).

Los resultados encontrados en la presente investigación están acordes con El Gharras et al. (2008), quienes evaluaron la estabilidad pigmentaria de jugos preparados a partir de tuna marroquí. Los experimentos planteados en la investigación se realizaron a temperaturas que oscilaron entre 80 y 100 °C con jugos a pH 3,5; 5,0 y 6,5; y encontraron que el grado de retención de pigmento disminuyó cuando aumentó la temperatura. Así mismo, encontraron que el ácido ascórbico era un mejor agente protector a pH 3,5; aumentando la protección del pigmento en un 40%.



**Figura 4. Espectro de absorción del zumo de tuna con diferentes pH y pasteurizada y picos obtenidos por desconvolución para la cuantificación del contenido de betacianinas, betaxantinas y betalaínas totales (promedio±desviación estándar, n= 3)**

Carreón-Hidalgo et al. (2023) identificaron tres betalaínas principales en dos variedades de tuna; las cuales fueron, betanina, isobetanina e indicaxantina. También, indican que en general, el aumento de temperatura en el rango de 50 a 90°C tuvo un efecto significativo

sobre la degradación de las betalaínas, que se observó como una reducción proporcional de la vida media de estos pigmentos. Los autores precisan que, considerando que los porcentajes de degradación de las betalaínas (tanto para las betacianinas como para las betaxantinas) fueron superiores al 85% al final del tratamiento térmico a 90°C, es necesario realizar más investigaciones encaminadas a desarrollar métodos de estabilización de las betalaínas, que contribuyan a incrementar sus aplicaciones.

Moßhammer et al. (2006) sugirieron la adición de ácido isoascórbico al 0,1%, retrasa significativamente la degradación de la betaxantina y la betacianina al calentarse, lo que mejora la estabilidad del color y encontraron que la formación de 2-descarboxi-betanina es un indicador de exposición al calor intenso, y una dosis de ácido isoascórbico al 0,1 % utilizada antes del tratamiento también limita su aparición.

#### **4.2.2. Contenido de compuestos fenólicos totales del zumo de tuna con diferentes pH y pasteurizada**

El contenido de compuestos fenólicos totales del zumo de tuna con diferentes pH y pasteurizada se muestran en la Tabla 5. En comparación con los compuestos fenólicos iniciales (zumo de tuna sin pasteurizar), se pudo evidenciar que existen diferencias estadísticamente significativas con la pulpa pasteurizada sin acidificar y a pH 4,0; los cuales mostraron un ligero aumento. Por el contrario, el zumo pasteurizado a pH 4,2 y 4,4 presentaron resultados estadísticamente similares al zumo sin pasteurizar.

Lamia et al. (2018) formularon néctares con 35–45 % de pulpa de fruta de *Opuntia ficus-indica*, 11 % de sacarosa y 0,3 % de ácido cítrico, y dieron como resultado valores de 14–15 °Brix después de la pasteurización a 80 °C por 15 min. Los investigadores indican que una botella de 250 mL es suficiente para cubrir el requerimiento nutricional aproximado de un niño, así mismo, indican que los compuestos fenólicos de los jugos de tuna, con 35 y 45% de pulpa fueron 4,21 y 5,7 ± 0,86 mg AGE/L (Lamia et al., 2018). El contenido fenólico y antioxidante de los jugos se ve afectado por su variedad. Esto fue demostrado por un estudio donde los contenidos fenólicos totales de los jugos de tuna roja (1152,9 y 1065,1 mg AGE/100 mL) fueron mayores que los de los jugos de tuna amarillo (786 y 667 mg AGE/100 mL) (Abdel-Hameed et al., 2014).

**Tabla 5: Contenido de compuestos fenólicos totales del zumo de tuna con diferentes pH y pasteurizada**

	Contenido de compuestos fenólicos totales (mg/mL) <sup>1</sup>
Zumo sin pasteurizar	0,56 ± 0,01 <sup>a</sup>
Control	0,66 ± 0,04 <sup>b</sup>
pH = 4,0	0,69 ± 0,01 <sup>b</sup>
pH = 4,2	0,61 ± 0,02 <sup>ab</sup>
pH = 4,4	0,59 ± 0,03 <sup>a</sup>

<sup>1</sup> Promedio ± desviación estándar, (n= 3). AGE: equivalentes de ácido gálico, pH control = 6.35±0.09 (25 °C). Las letras diferentes indican diferencia significativa (p<0,05).

#### **4.2.3. Capacidad antioxidante (DPPH y ABTS) del zumo de tuna con diferentes pH y pasteurizada**

En la Tabla 6, se muestra la capacidad antioxidante por el método DPPH y ABTS del zumo de tuna morada pasteurizado sin acidificar (pH control = 6.35 ± 0.09) y acidificado a pH 4,0; 4,2 y 4,4; donde se puede evidenciar que la capacidad antioxidante por el método DPPH fue estadísticamente mayor en los tratamientos acidificados, de acuerdo con la prueba de Tukey. De forma similar se evidenció que la capacidad antioxidante analizada por el método ABTS, también fue significativamente más elevada en el tratamiento acidificado a pH 4.4.

La pasteurización puede afectar la capacidad antioxidante del jugo de tuna, pero el grado de impacto dependerá de diversos factores, como la temperatura, el tiempo de exposición al calor y el pH del jugo. Algunos estudios han demostrado que, en algunos casos, la pasteurización puede preservar o incluso aumentar la capacidad antioxidante al desactivar enzimas que degradan compuestos antioxidantes (Ramadan et al., 2021; Jacobo et al., 2005).

La capacidad antioxidante medida por DPPH (1,1-difenil-2-picrilhidrazil) y ABTS (ácido 2,2'-azino-bis(3-etilbenzotiazolina-6-sulfónico)) varía debido a sus mecanismos de reacción y su sensibilidad a diferentes tipos de antioxidantes. DPPH es más sensible a los antioxidantes fenólicos, mientras que ABTS es sensible a una gama más amplia de antioxidantes, incluidos los fenólicos y los no fenólicos (Dehbi et al., 2013). Es por eso que

los valores de capacidad antioxidante por el método ABTS es mayor, comparado con el método DPPH, ya que el método ABTS expresa la capacidad antioxidante de los compuestos fenólicos y betalainas de la tuna.

**Tabla 6: Capacidad antioxidante mediante el método DPPH del zumo de tuna pasteurizado a diferentes pH**

	Capacidad antioxidante DPPH (mmol ET/L) <sup>1</sup>	Capacidad antioxidante ABTS (mmol ET/L) <sup>1</sup>
Control	86,62 ± 7,93 <sup>a</sup>	284,94 ± 18,31 <sup>c</sup>
pH = 4,0	100,82 ± 3,80 <sup>b</sup>	221,16 ± 9,89 <sup>a</sup>
pH = 4,2	97,98 ± 2,47 <sup>c</sup>	234,00 ± 3,84 <sup>b</sup>
pH = 4,4	96,34 ± 7,95 <sup>c</sup>	437,38 ± 9,34 <sup>d</sup>

<sup>1</sup> Promedio ± desviación estándar, (n= 3). ET: equivalente trolox. Las letras diferentes indican diferencia significativa (p<0,05) en cada columna.

Si bien la capacidad antioxidante analizada con el método DPPH refleja la contribución de los compuestos fenólicos, estos no se vieron incrementados en los zumos pasteurizados (Tabla 5), por lo tanto, se presume que el ácido utilizado para la acidificación del zumo también tiene una contribución en la capacidad antioxidante.

Un interesante estudio fue realizado por Madrigal-Santillan et al. (2013) para comprender el potencial antioxidante de diferentes variedades de jugos de tuna. Se observó que la variedad rojo-violeta mostró mayor propiedad antioxidante DPPH en comparación con la variedad amarillo-naranja y blanco-verde. Además, el jugo obtenido de la variedad rojo-púrpura mostró un fuerte efecto anticlastogénico contra el mutágeno metanosulfonato de metilo en el modelo de ratón. Se observó que el efecto es directamente proporcional a la concentración del jugo. De las diferentes dosis del jugo, es decir, 25; 16,5 y 8,3 ml/kg en presencia de mutágeno, la protección más alta se observó con 25 ml/kg. El jugo de tuna también se estudió para comprender los efectos de las ratas diabéticas con cataratas. Los modelos animales se dividieron en grupos para comprender el impacto del jugo de tuna en ratas diabéticas con cataratas. Se les inyectó aloxano para inducir diabetes y, además, se les alimentó por vía oral con 1 a 4 ml de jugo concentrado de tuna por rata por día. Se observó una caída considerable de la glucosa en sangre y cristalino en los ratones tratados con jugo de tuna durante 8 semanas (Ramadan et al., 2021).

### **4.3. ALMACENAMIENTO**

#### **4.3.1. Contenido de betalaínas totales del zumo de tuna con diferentes pH y pasteurizada a los 0 y 15 días de almacenamiento en refrigeración (4 °C)**

Con respecto a la estabilidad de las betalaínas del zumo de tuna durante el almacenamiento, se puede observar (Tabla 7), que las concentraciones tanto de betacianinas y betaxantinas fueron estadísticamente similares, de acuerdo a la prueba de Tukey, a las muestras procesadas en el primer día y después de 15 días en los tratamientos que fueron acidificados a pH 4,0; 4,2 y 4,4. En el tratamiento testigo, se evidenció que el contenido de betalaínas hubo un incremento estadísticamente significativo, llegando a concentraciones similares de los tratamientos acidificados. Este fenómeno, se puede deber a una regeneración del pigmento. Se ha informado que la betanina se puede regenerar a partir de sus productos de degradación primaria, cuando los extractos se mantienen durante algún tiempo a una temperatura inferior a 10 °C y un pH de alrededor de 5,0. La regeneración de betanina, que consiste en una resíntesis parcial de betanina a partir de sus productos de hidrólisis, implica una condensación del grupo amino del ciclo-Dopa-5- O -glicósido con el grupo aldehído del ácido betalámico. La betanina se forma rápidamente cuando ambos compuestos se mezclan en solución (Azeredo, 2009). La hipótesis de que las betalaínas del tratamiento control son diferentes a los tratamientos acidificados, se sustenta en las Figuras 5 y 6, donde se pueden observar similitudes entre los espectros de absorción del zumo control a los 0 días y 15 días.

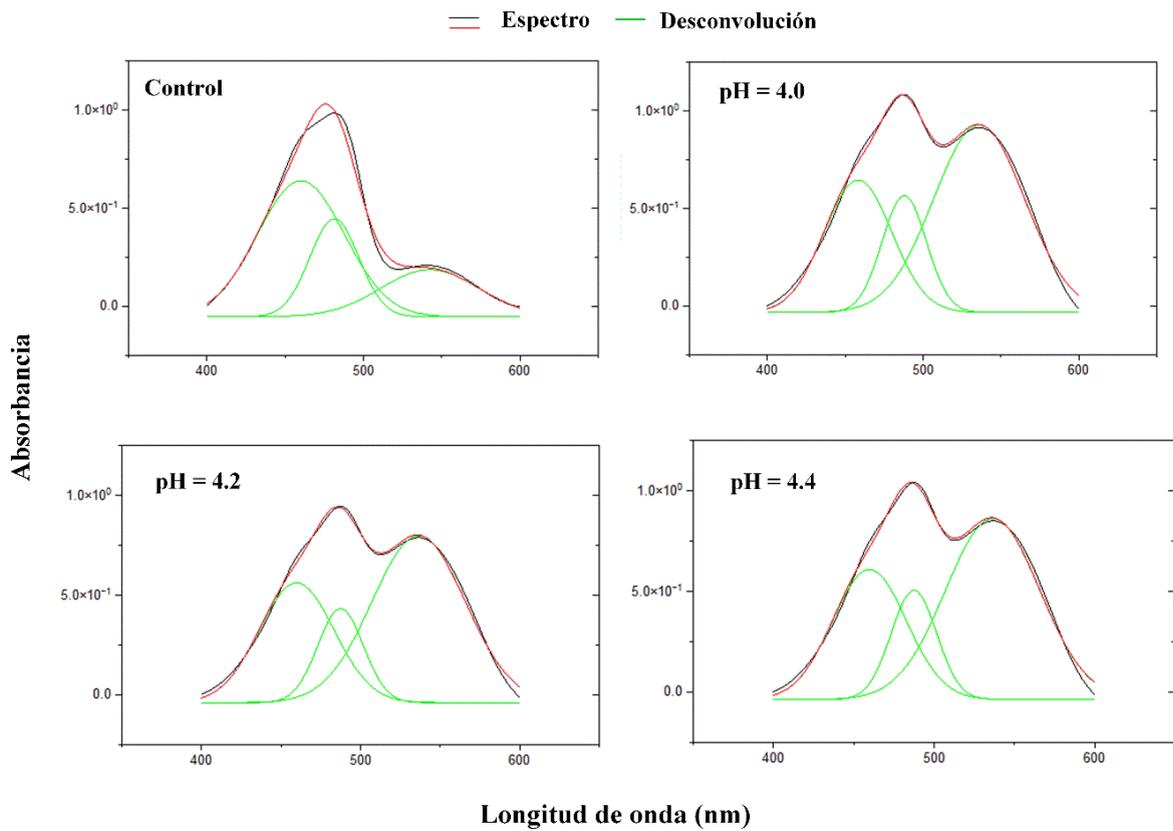
Existen otros factores que pueden acelerar la degradación de los pigmentos betalámicos de la tuna, como, por ejemplo, la presencia de luz, al respecto se ha reportado que el almacenamiento en la oscuridad mostró retenciones de color y pigmento notablemente mejores en las muestras que en las iluminadas (Moßhammer et al., 2006). Además, Moßhammer et al. (2007) investigaron el impacto de la adición de ácido ascórbico, isoascórbico y cítrico en la estabilidad térmica de las betalaínas de tuna a pH 4 y 6, respectivamente. Los autores encontraron que la estabilidad del pigmento varía dependiendo del tipo y concentración del aditivo respectivo y de las condiciones de pH. Aunque la adición de ascórbico, isoascórbico puede estabilizar significativamente los pigmentos de color

(betaxantinas y betacianinas) en el jugo de tuna de color característico, así como en la preparación de pigmentos purificados y los ácidos cítricos, debido a los efectos de apoyo de los compuestos de la matriz como azúcares, ácidos orgánicos, aminoácidos y sustancias pécticas. La máxima retención de pigmento del 79% se logró añadiendo 0,1% de ácido cítrico al jugo de fruta a pH 6 (Moßhammer et al., 2007).

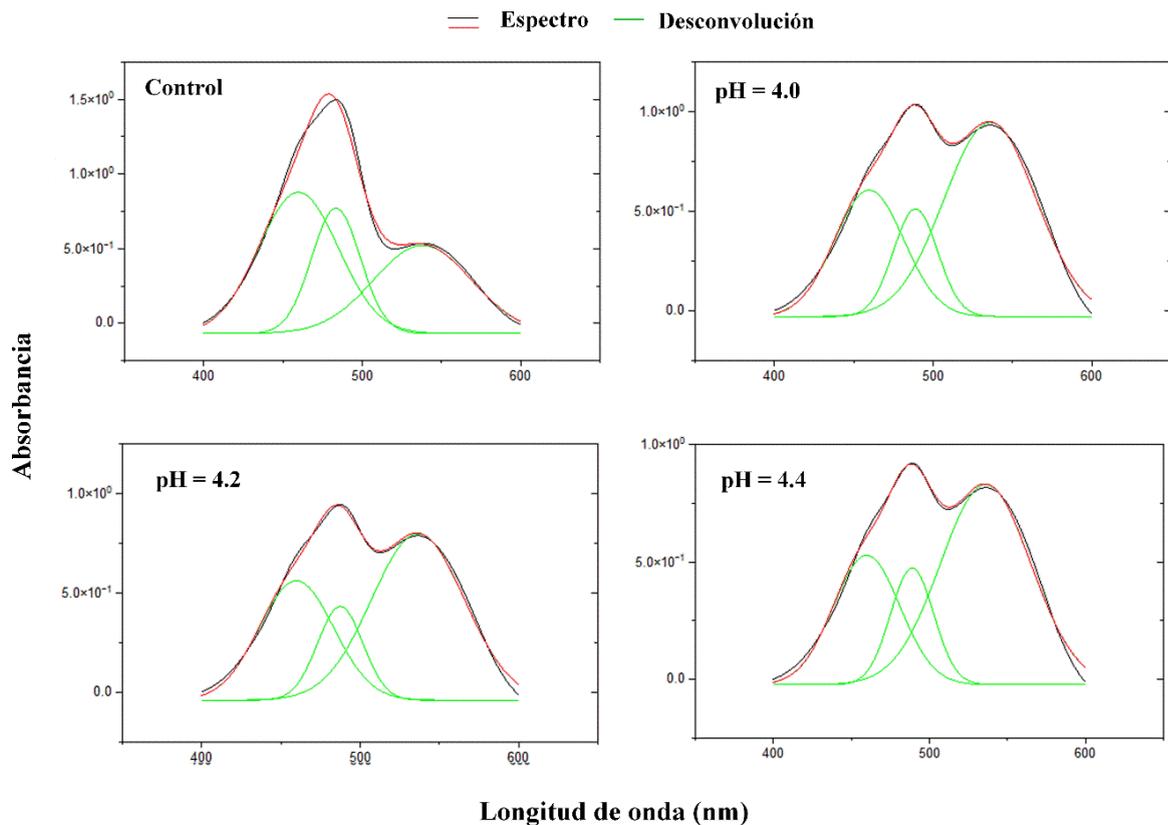
**Tabla 7: Contenido de betacianinas, betaxantinas y betalaínas totales del zumo de tuna con diferentes pH y pasteurizada a los 0 días de almacenamiento en refrigeración (4 °C)**

Tratamiento	Almacenamiento <sup>1</sup>	
	0 días	15 días
Testigo	BCy = 1,82 ± 0,08 <sup>a</sup> Bx = 9,80 ± 0,11 <sup>a</sup> Bt = 11,62 ± 0,15 <sup>a</sup>	BCy = 4,24 ± 0,49 <sup>b</sup> Bx = 13,08 ± 1,42 <sup>b</sup> Bt = 17,32 ± 1,91 <sup>b</sup>
pH = 4,0	BCy = 7,58 ± 0,34 <sup>a</sup> Bx = 10,75 ± 0,5 <sup>a</sup> Bt = 18,33 ± 0,84 <sup>a</sup>	BCy = 7,36 ± 0,96 <sup>a</sup> Bx = 10,07 ± 1,27 <sup>a</sup> Bt = 17,44 ± 2,23 <sup>a</sup>
pH = 4,2	BCy = 6,64 ± 0,09 <sup>a</sup> Bx = 9,47 ± 0,13 <sup>a</sup> Bt = 16,11 ± 0,21 <sup>a</sup>	BCy = 7,35 ± 0,31 <sup>b</sup> Bx = 10,04 ± 0,45 <sup>a</sup> Bt = 17,39 ± 0,76 <sup>a</sup>
pH = 4,4	BCy = 7,32 ± 0,11 <sup>a</sup> Bx = 10,52 ± 0,15 <sup>a</sup> Bt = 17,84 ± 0,26 <sup>a</sup>	BCy = 7,04 ± 0,46 <sup>a</sup> Bx = 9,57 ± 0,60 <sup>a</sup> Bt = 16,62 ± 1,06 <sup>b</sup>

<sup>1</sup> Promedio ± desviación estándar, (n= 3). Bx: Betaxantinas (mg/L); BCy: Betacianinas (mg/L); Bt: Betalaínas (mg/L). Las letras diferentes indican diferencia significativa (p<0,05) en cada fila.



**Figura 5. Espectro de absorción del zumo de tuna con diferentes pH y pasteurizada a los 0 días de almacenamiento en refrigeración (4 °C) y picos obtenidos por desconvolución para la cuantificación del contenido de betacianinas, betaxantinas y betalaínas totales (promedio $\pm$ desviación estándar, n= 3)**



**Figura 6. Espectro de absorción del zumo de tuna con diferentes pH y pasteurizada a los 15 días de almacenamiento en refrigeración (4 °C) y picos obtenidos por desconvolución para la cuantificación del contenido de betacianinas, betaxantinas y betalaínas totales (promedio±desviación estándar, n= 3)**

#### **4.3.2. Contenido de compuestos fenólicos totales del zumo de tuna con diferentes pH y pasteurizada a los 0 y 15 días de almacenamiento en refrigeración (4 °C)**

En la Tabla 8 se observa la modificación de la concentración de compuestos fenólicos totales de los diversos tratamientos de zumos de tuna almacenados durante 15 días. Se evidenció que los compuestos fenólicos totales del tratamiento control presentaron cambios estadísticamente significativos ( $p < 0,05$ ), así mismo, el tratamiento acidificado a pH 4,0 evidenció una disminución del contenido de compuestos fenólicos en un 23%. El tratamiento a pH 4,2 evidenció una menor pérdida de compuestos fenólicos en un 11% y el tratamiento a pH 4,4 mostró una pérdida de compuestos fenólicos no significativa de un 3%. Esto demuestra que, a pH cercanos a 4,4 favorece la preservación de los compuestos fenólicos en el zumo de tuna morada.

**Tabla 8: Contenido de compuestos fenólicos totales del zumo de tuna con diferentes pH y pasteurizada a los 0 y 15 días de almacenamiento en refrigeración (4 °C)**

	Contenido de compuestos fenólicos totales (mg/mL) <sup>1</sup>	
	0 días	15 días
Control	0,62 ± 0,02 <sup>b</sup>	0,56 ± 0,01 <sup>a</sup>
pH = 4,0	0,65 ± 0,03 <sup>b</sup>	0,53 ± 0,05 <sup>a</sup>
pH = 4,2	0,56 ± 0,04 <sup>a</sup>	0,55 ± 0,02 <sup>a</sup>
pH = 4,4	0,54 ± 0,01 <sup>a</sup>	0,57 ± 0,04 <sup>a</sup>

<sup>1</sup> Promedio ± desviación estándar, (n= 3). AGE: equivalentes de ácido gálico, pH control = 6,35±0,09 (25 °C). Las letras diferentes indican diferencia significativa (p<0,05) en cada fila.

Al respecto Lamia et al., (2018), señalan que los néctares de tuna podrían considerarse bebidas funcionales y nutracéuticas libres de aditivos alimentarios sintéticos. También señalaron que una botella de 250 ml de néctar con 45% de pulpa de tuna podría proporcionar aproximadamente el 40% de las necesidades diarias promedio de carbohidratos de los adultos. Podría cubrir también todas las necesidades diarias de vitamina C de niños de 4 a 12 años y la mitad de las necesidades de un adulto. El mismo volumen podría cubrir respectivamente el 8,42 y el 12,8% de las necesidades diarias promedio: 3,29 g de K y 0,5-1,2 g de Ca. Además, no se utilizaron conservantes sintéticos, ni colorantes ni edulcorantes para garantizar la estabilidad de estos néctares. En consecuencia, los néctares de tuna son naturales y podrían considerarse seguros y podrían garantizar beneficios para la salud de los consumidores.

#### **4.3.3. Capacidad antioxidante del zumo de tuna con diferentes pH y pasteurizada a los 0 y 15 días de almacenamiento en refrigeración (4 °C)**

Con respecto a la capacidad antioxidante analizada por el método DPPH, se evidenció que esta se mantiene estable durante la pasteurización y almacenamiento del zumo de tuna testigo, sin embargo, en los tratamientos acidificados, como a pH 4,0; la capacidad antioxidante disminuyó en un 23% después de su almacenamiento durante 15 días; de forma similar, el tratamiento acidificado a pH 4,2; la capacidad antioxidante disminuyó en un 22%.

En el caso del tratamiento a pH 4,4; la disminución después del almacenamiento durante 15 días, la disminución de la capacidad antioxidante fue en un 10%.

Las diferencias en los resultados de las pruebas de capacidad antioxidante por DPPH y ABTS se deben a variaciones en los mecanismos de reacción, las condiciones experimentales y la naturaleza de los radicales libres utilizados en cada prueba. Es importante entender que estas pruebas proporcionan una indicación de la capacidad antioxidante, pero no siempre se correlacionan perfectamente entre sí. Por lo tanto, es común que se utilicen múltiples ensayos antioxidantes para obtener una imagen más completa de la capacidad antioxidante de una muestra (Madrigal-Santillán et al., 2013).

También se debe indicar que las betalaínas y el ácido ascórbico de las tunas actúan como antioxidantes al mejorar el equilibrio redox del cuerpo, disminuir la oxidación de lípidos y actuar como eliminadores de radicales. Debido a su perfil de betalaína y compuestos fenólicos, las tunas han sido estudiadas recientemente con respecto a sus actividades antioxidantes y antiinflamatorias. Sin embargo, los compuestos bioactivos de las frutas y verduras poseen una baja bioaccesibilidad porque primero deben liberarse de la matriz alimentaria y absorberse en el intestino delgado. Al procesar frutas espinosas en jugo de fruta, pulpa y productos relacionados como concentrado y polvo, las frutas se convierten en productos de valor agregado más asequibles con una vida útil prolongada y alta bioaccesibilidad. Por lo tanto, merecen más esfuerzos para examinar posibles técnicas de procesamiento de frutas y sus efectos sobre la eficiencia del proceso y la calidad del producto (Ramadan et al., 2021).

**Tabla 9: Capacidad antioxidante del zumo de tuna con diferentes pH y pasteurizada a los 0 y 15 días de almacenamiento en refrigeración (4 °C) medido por el método del DPPH y ABTS**

Tratamiento	Almacenamiento <sup>1</sup>	
	0 días	15 días
Testigo	DPPH = 86,34 ± 3,18 <sup>a</sup> ABTS = 376,66 ± 7,24 <sup>b</sup>	DPPH = 98,95 ± 7,24 <sup>b</sup> ABTS = 315,27 ± 65,88 <sup>a</sup>
pH = 4,0	DPPH = 103,99 ± 1,00 <sup>b</sup> ABTS = 227,51 ± 2,38 <sup>b</sup>	DPPH = 77,67 ± 6,72 <sup>a</sup> ABTS = 203,00 ± 8,09 <sup>a</sup>
pH = 4,2	DPPH = 97,87 ± 5,33 <sup>b</sup> ABTS = 229,46 ± 10,60 <sup>b</sup>	DPPH = 76,55 ± 3,86 <sup>a</sup> ABTS = 206,24 ± 11,46 <sup>a</sup>
pH = 4,4	DPPH = 105,41 ± 0,19 <sup>b</sup> ABTS = 458,66 ± 17,50 <sup>a</sup>	DPPH = 85,79 ± 8,03 <sup>a</sup> ABTS = 451,13 ± 12,41 <sup>a</sup>

<sup>1</sup> Promedio ± desviación estándar, (n= 3). DPPH: Capacidad antioxidante mediante 2,2-difenil-1-picrilhidracilo (mmol ET/L); ABTS: Capacidad antioxidante mediante Ácido 2,2'- azino-bis-(3-etiltiazolina-bencenosulfónico-6) (mmol ET/L). Las letras diferentes indican diferencia significativa (p<0,05) en cada fila.

## V. CONCLUSIONES

- Los resultados de la investigación muestran de manera concluyente que la acidificación del zumo de tuna morada es esencial para preservar sus compuestos bioactivos, como las betalaínas y los compuestos fenólicos, así como su capacidad antioxidante. Esto demuestra que la acidificación contribuye significativamente a mantener sus propiedades funcionales del zumo durante el almacenamiento.
- La pulpa de tuna morada presentó un significativo contenido de compuestos fenólicos totales y betalaínas (betacianinas y betaxantinas), los cuales contribuyeron a su capacidad antioxidante.
- Los resultados demostraron que la acidificación del zumo de tuna morada a pH de 4,0; 4,2 y 4,4 son efectivos para lograr la estabilidad de los compuestos bioactivos y la capacidad antioxidante. Así mismo, los pigmentos más estables durante la pasteurización fueron las betaxantinas (color amarillo).
- Los compuestos bioactivos y capacidad antioxidante de los zumos de tuna acidificados fueron estables durante el almacenamiento por 15 días. Los resultados encontrados proporcionan información valiosa sobre cómo preservar y mejorar la calidad de los productos derivados de la tuna morada, como los zumos y bebidas. La acidificación controlada puede ser una estrategia efectiva para desarrollar productos alimentarios más saludables y atractivos visualmente, al tiempo que se mantienen sus propiedades antioxidantes.

## **VI. RECOMENDACIONES**

- Evaluar la influencia del tipo de ácido orgánico (por ejemplo, ácido ascórbico, ácido cítrico, ácido málico) utilizados para la estandarización del zumo de tuna, ya que esto podría ayudar a identificar la elección más efectiva de ácido y su concentración para optimizar la calidad del producto.
- Realizar un estudio de vida útil acelerado de temperatura para evaluar cambios en el contenido de pigmentos, compuestos fenóles y capacidad antioxidante durante más tiempo.
- Investigar cómo otros factores de procesamiento, como la temperatura de pasteurización, el tipo de envasado y la concentración de sólidos solubles, interactúan con la acidificación para influir en la conservación de compuestos bioactivos y antioxidantes; ya que esto podría ayudar a comprender mejor el proceso de producción en su conjunto.

## VII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abdel-Hameed, E. S., Nagaty, M. A., Salman, M. S. y Bazaid, S. A. (2014). Phytochemicals, nutritionals and antioxidant properties of two prickly pear cactus cultivars (*Opuntia ficus indica* Mill.) growing in Taif, KSA. *Food Chemistry*, 160, 31–38. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2014.03.060>
- Abderrahim, F., Estrella, S., Susín, C., Arribas, S. M., González, M. C. y Condezo-Hoyos, L. (2011). The Antioxidant Activity and Thermal Stability of Lemon Verbena (*Aloysia triphylla*) Infusion. *Journal of Medicinal Food*, 14(5): 517–527.
- Abderrahim, F., Arribas, S. M., Gonzalez, M. C. y Condezo-Hoyos, L. (2013). Rapid high-throughput assay to assess scavenging capacity index using DPPH. *Food Chemistry*, 141(2): 788–794.
- Abderrahim, F., Huanatico, E., Segura, R., Arribas, S. M., Gonzalez, C. y Condezo-Hoyos, L. (2015). Physical features, phenolic compounds, betalains and total antioxidant capacity of coloured quinoa seeds (*Chenopodium quinoa* Willd.) from Peruvian Altiplano. *Food Chemistry*, 183: 83-90.
- AGROMOQUEGUA. (2022). Producción nacional de tuna se contrajo 20.78% en 2020 Disponible en: [https://www.agromoquegua.gob.pe/noticia\\_07\\_2022.html](https://www.agromoquegua.gob.pe/noticia_07_2022.html)
- Asami, D., Hong, Y-J., Barret, D. y Mitchell, A. (2003). Comparison of the Total Phenolic and Ascorbic Acid Content of Freeze-Dried Marionberry, Strawberry, and Corn Using Conventional, Organic, and Sustainable Agricultural Practices. *J. Agric. Food. Chem.* 51: 1237-1241.
- ASPEC. (2020). ¿Prohibir la venta de comida chatarra a los niños asegura una mejor alimentación? Recuperado de: <https://aspec.org.pe/2020/09/01/prohibir-la-venta-de-comida-chatarra-a-los-ninos-asegura-una-mejor-alimentacion/#:~:text=El%2015%20de%20junio%20de,o%20que%20contienen%20grasas%20trans.>

- Azeredo, H. M. C. (2009). Betalains: properties, sources, applications, and stability – a review. *International Journal of Food Science & Technology*, 44(12), 2365–2376. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2621.2007.01668.x>
- Betancourt, O. (2015). Aislamiento, caracterización, estabilidad y actividad antioxidante *in vitro* de los pigmentos tipo betalaínas del fruto de *Opuntia dillenii*. Tesis para optar el título de Químico. Universidad de Nariño. San Juan de Pasto. Colombia.
- Brenna, O., Ceppi, E. y Giovanelli, G. (2009). Antioxidant capacity of some caramel-containing soft drinks. Milan Italia. *Food Chemistry*. 119-123 p.
- Carboni-Martins, C., Rodrigues, R. C., Domeneghini Mercali, G. y Rodrigues, E. (2022). New insights into non-extractable phenolic compounds analysis. *Food Research International*, 157, 111487. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2022.111487>
- Carreón-Hidalgo, J. P., Román-Guerrero, A., Navarro-Ocaña, A., Gómez-Linton, D. R., Franco-Vásquez, D. C., Franco-Vásquez, A. M., ... Pérez-Flores, L. J. (2023). Chemical characterization of yellow-orange and purple varieties of *Opuntia ficus-indica* fruits and thermal stability of their betalains. *Journal of Food Science*, 88(1), 161–174. <https://doi.org/10.1111/1750-3841.16421>
- Cáscales, A. (1997). *Bioquímica y fisiopatología del estrés oxidativo*. Fundación Casares Gil de la Real Academia de Farmacia. Madrid. España.
- Clydesdale, F. (2004). *Functional Foods: Opportunities & Challenges*. *Food Technology*. 58(12): 35-40.
- Chirinos, R. (1994). Obtención del colorante a partir de la tuna (*Opuntia ficus indica*) variedad morada. Tesis para optar el título de Ingeniero en Industrias Alimentarias. Universidad Nacional Agraria La Molina. Lima. Perú.
- Codex Alimentarius (Comisión del Codex Alimentarius, IT). (2005). Codex Stan 247-2005. Norma general del Codex para zumos (jugos) y néctares de frutas.
- CONALEP. (2006). Análisis de los alimentos. Manual para el alumno de segundo semestre. Recuperado de [https://www.conalepslp.edu.mx/biblioteca/manual\\_08/alimentos-06.pdf](https://www.conalepslp.edu.mx/biblioteca/manual_08/alimentos-06.pdf)

- Cruz, M. (1996). Obtención de vinagre tinto a partir de tuna (*Opuntia ficus indica*) variedad morada. Tesis para optar el título de Ingeniero en Industrias Alimentarias. Universidad Nacional Agraria La Molina. Lima. Perú.
- Cruz-Cansino, N. del S., Ramírez-Moreno, E., León-Rivera, J. E., Delgado-Olivares, L., Alanís-García, E., Ariza-Ortega, J. A., ... Jaramillo-Bustos, D. P. (2015). Shelf life, physicochemical, microbiological and antioxidant properties of purple cactus pear (*Opuntia ficus indica*) juice after thermoultrasound treatment. *Ultrasonics Sonochemistry*, 27(1), 277–286. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2015.05.040>
- De Wit, M., Du Toit, A., Osthoff, G. y Hugo, A. (2020). Antioxidant Content, Capacity and Retention in Fresh and Processed Cactus Pear (*Opuntia ficus indica* and *O. robusta*) Fruit Peels from Different Fruit-Colored Cultivars. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, 4, 1–14. <https://doi.org/10.3389/fsufs.2020.00133>
- Dehbi, F., Hasib, A., Bouaziz, M.A., Ouattmane, A., Elbatal, H., Jaouad, A. y Sayadi, S. (2013). Effect of phenolic compounds and betalain pigments on the antioxidant capacity of Moroccan prickly pear juices. *Journal Agronomic & Biological Sciences*, 9, 2-7.
- Durant Torrez, E., Vallejos Rodriguez, E. y Símpalo Lopez, W. (2017). Efecto de la pasteurización en el contenido de betalaínas de la pulpa de tuno indio (*Opuntia dillenii*). *Rev.Ingeniería: Ciencia, Tecnología e Innovación*, 4(1), 1-8.
- El Gharras, H., Hasib, A., Jaouad, A., El-bouadili, A. y Schoefs, B. (2008). Stability of vacuolar betaxanthin pigments in juices from Moroccan yellow *Opuntia ficus indica* fruits. *International Journal of Food Science & Technology*, 43(2), 351–356. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2621.2007.01536.x>
- Espin JC, Sololer-Rivas C, Wichers H. J. y García-Viguera C. (2000). Anthocyanin-based natural colorants: A new source of antiradical activity for foodstuff. *J Agr Food Chem* 48:1588-1592.
- FAO. (1982). Norma general para zumos (jugos) y néctares de frutas (CODEX STAN 247-2005) Recuperado de: [https://www.fao.org/fao-who-codexalimentarius/sh-proxy/ru/?lnk=1&url=https%253A%252F%252Fworkspace.fao.org%252Fsites%252Fcodex%252Fstandards%252FCXS%2B247-2005%252FCXS\\_247s.pdf](https://www.fao.org/fao-who-codexalimentarius/sh-proxy/ru/?lnk=1&url=https%253A%252F%252Fworkspace.fao.org%252Fsites%252Fcodex%252Fstandards%252FCXS%2B247-2005%252FCXS_247s.pdf)

- Ferreira, R. M., Costa, A. M., Pinto, C. A., Silva, A. M. S., Saraiva, J. A. y Cardoso, S. M. (2023). Impact of Fermentation and Pasteurization on the Physico-Chemical and Phytochemical Composition of *Opuntia ficus indica* Juices. *Foods*, 12(11), 2096. <https://doi.org/10.3390/foods12112096>
- Freile, M. L., Giannini, F, Puccia, G., Sturnioloc, A., Roderoc, L., Puccic, O., Balzaretia V., y Enriz, R. D. (2003). Antimicrobial activity of aqueous extracts and of berberine isolated from *Berberis heterophylla*. *Fitoterapia*, 74:702–705.
- Galati, E. M., Mondello, M. R., Giuffrida, D., Dugo, G., Miceli, N., Pergolizzi, S. y Taviano, M. F. (2003). Chemical Characterization and Biological Effects of Sicilian *Opuntia ficus indica* (L.) Mill. Fruit Juice: Antioxidant and Antiulcerogenic Activity. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 51(17), 4903–4908. <https://doi.org/10.1021/jf030123d>
- Guevara, A. (2002). Elaboración de zumos, pulpas y néctares de frutas. Facultad de Industrias Alimentarias. Universidad Nacional Agraria La Molina. Lima. Perú.
- Herrera, G. (1992). Elaboración y almacenaje de pulpa y néctar de ciruela (*Spondias purpuera*). Tesis Industrias Alimentarias. Lima. Perú. Universidad Nacional Agraria La Molina. Lima. Perú.
- Herrera, M., López, N., Villegas, J. & Martínez, A. (2001). Alimentos funcionales. *Nutrición Hospitalaria*. Vol. XVI. N°5.
- Huamani, A. L. (2007). Estimación de la vida útil de frutos de tuna bajo diferentes tratamientos poscosecha. Ayacucho, Universidad Nacional de San Cristóbal de Huamanga. Perú.
- Huanaco, C. y Huampa, S. (2019). Efecto térmico en betalaínas y capacidad antioxidante en néctar de tuna (*Opuntia ficus indica*). Tesis para optar el título de Ingeniero Agroindustrial. Universidad Nacional San Antonio Abad del Cusco. Cusco. Perú.
- Hurtado, P. (1987). Procesos tecnológicos de conservación de frutas y hortalizas y su almacenamiento. Cartagena, Colombia.
- Ishige, K., Schubert, D. y Sagara Y. (2001). Flavonoids protect neuronal cells from oxidative stress by three distinct mechanisms. *Free Radical Biol Med*, 30:433-446.

- Jacobo Klopotek, Y., Otto, K. y Bohm, V. (2005). Processing Strawberries to different products alters contents of Vitamin C, total phenolics, total anthocyanins, and Antioxidant Capacity. *J. Agric. Food. Chem.* 53 (14): 5640 - 5646.
- Jacobo Velásquez, D. y Cisneros Zevallos, L. (2009) Correlations of Antioxidant Activity against Phenolic Content Revisited: A New Approach in Data for Food and Medicinal plants. *J. Food Sci*, 74 (9): R107-R113.
- Katsube, N., Keiko, I., Tsushida, T., Yamaki, K. y Kobor, I. M. (2003). Induction of apoptosis in cancer cells by bilberry (*Vaccinium myrtillus*) and the anthocyanins. *J Agr Food Chem* 51:68-75.
- Lamia, I., Zouhir, C. y Youcef, A. (2018). Characterization and transformation of the *Opuntia ficus indica* fruits. *Journal of Food Measurement and Characterization*, 12(4), 2349–2357. <https://doi.org/10.1007/s11694-018-9851-z>
- Laqui-Vilca, C., Aguilar-Tuesta, S., Mamani-Navarro, W., Montaña-Bustamante, J. y Condezo-Hoyos, L. (2018). Ultrasound-assisted optimal extraction and thermal stability of betalains from colored quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd) hulls. *Industrial Crops and Products*, 111: 606-614.
- López, M., Mercado, J., Martínez, G. y Magaña, J. L. (2011). Formulación de una mermelada a partir de pulpa y cáscara de tunas (*Opuntia* spp.) elaborada a nivel planta piloto. Recuperado de: <https://www.actauniversitaria.ugto.mx/index.php/acta/article/view/33/pdf>
- Luh, B.S. (1998). Antioxidants and phenolic phytochemicals in some fruits and wines. *Fruit Process.* 12: 500-504.
- Madrigal-Santillán, E., García-Melo, F., Morales-González, J. A., Vázquez-Alvarado, P., Muñoz-Juárez, S., Zuñiga-Pérez, C., ... Hernández-Ceruelos, A. (2013). Antioxidant and anticlastogenic capacity of prickly pear juice. *Nutrients*, 5(10), 4145–4158. <https://doi.org/10.3390/nu5104145>
- Mamani-Urrutia, V., Domínguez-Curi, C. H., Moreno-Díaz, A. L., Silva-Díaz, V. y Bustamante-López, A. (2021). Evaluación de alimentos procesados y ultraprocesados: Un análisis antes de la implementación del etiquetado frontal en Perú. *Revista chilena de nutrición*, 48(3), 355-365. <https://dx.doi.org/10.4067/s0717-75182021000300355>

- Manach, C, Scalbert, A., Morand, C, Remesy, C. y Jiménez, L. (2004). Polyphenols: food sources and bioavailability. *Am.J. Clin Nutr.* 79: 727 – 749.
- Manach, C., Williamson, G., Morand, C., Scalbert, A. y Rémésy, C. (2005). Bioavailability and Bioefficacy of Polyphenols in Humans. I. Review of 97 Bioavailability Studies. *The American Journal of Clinical Nutrition*, 81, 230S-242S. <https://doi.org/10.1093/ajcn/81.1.230S>
- Mejía, E., Yañez, J., Remsberg, C, Takemoto, J., Davies, N., Rasco, B. y Clary, C. (2010). Effect of dehydration on raspberries: Polyphenol and anthocyanin retention, antioxidant capacity, and antiadipogenic activity. *J. of Food Sci.* 75 (1): 5 - 12.
- Meneses Peralta, J. E. (2021). Efecto termodegradativo de la pasteurización en el contenido de betacianinas, polifenoles totales y capacidad antioxidante en el néctar funcional de ayrampo (*Opuntia apurimacensis*). Tesis para optar el grado de Magister en Ciencia de Alimentos. Universidad Nacional San Luis Gonzaga. Perú.
- Meza, R. (2014). Los compuestos bioactivos y capacidad antioxidante en pulpa concentrada de tuna anaranjada (*Opuntia spp.*) Recuperado de: <https://repositorio.uncp.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12894/1234/MEZA%20SOSA.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Ministerio de Desarrollo Agrario y Riego. (2022). Análisis de Mercado 2015- 2021. Tuna. Sierra y Selva Exportadora. Unidad de Inteligencia Comercial. Perú.
- Moßhammer, M. R., Maier, C., Stintzing, F. C. y Carle, R. (2006). Impact of thermal treatment and storage on color of yellow-orange cactus pear (*Opuntia ficus indica* [L.] Mill. cv. ‘Gialla’) juices. *Journal of Food Science*, 71(7), C400–C406. <https://doi.org/10.1111/j.1750-3841.2006.00134.x>
- Moßhammer, M. R., Rohe, M., Stintzing, F. C. y Carle, R. (2007). Stability of yellow- orange cactus pear (*Opuntia ficus-indica* [L.] Mill. cv. ‘Gialla’) betalains as affected by the juice matrix and selected food additives. *European Food Research and Technology*, 225(1), 21–32. <https://doi.org/10.1007/s00217-006-0378-X>

- Muñoz Jáuregui, A., Ramos-Escudero, D., Alvarado-Ortiz Ureta, C. y Castañeda, B. (2007). Evaluación de la capacidad antioxidante y contenido de compuestos fenólicos en recursos vegetales promisorios. *Revista Sociedad Química del Perú*. Lima, PE. 73(3): 142-149.
- Nassrallah, A. A., Khodaeiaminjan, M. Y. y Kamal, K. (2021). Profile and Biological Properties of the Main Phenolic Compounds in Cactus Pear (*Opuntia* spp.). In: *Opuntia spp.: Chemistry, Bioactivity and Industrial Applications*. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-78444-7\\_15](https://doi.org/10.1007/978-3-030-78444-7_15)
- O'Dell, B. (1985). Bioavailability and interactions among trace elements. Editorial New York. Raven Press. Nestle Nutrition.
- Olgúin, G., Meléndez, G., Zúñiga, A. y Pasquetti, A. (2004). Antioxidantes y aterosclerosis. *Revista de Endocrinología y Nutrición* .12 (4). Recuperado de: <https://www.medigraphic.com/pdfs/endoc/er-2004/er044d.pdf>
- OPS/OMS. (2015). Los alimentos ultra procesados son motor de la epidemia de obesidad en América Latina, señala un nuevo reporte de la OPS/OMS. Recuperado de: [https://www3.paho.org/hq/index.php?option=com\\_content&view=article&id=11180:ultra-processed-foods&Itemid=1926&lang=es#:~:text=p%C3%A1gina%20de%20inicio,.Los%20alimentos%20ultra%20procesados%20son%20motor%20de%20la%20epidemia%20de,efectos%20alarmantes%20en%20la%20salud.](https://www3.paho.org/hq/index.php?option=com_content&view=article&id=11180:ultra-processed-foods&Itemid=1926&lang=es#:~:text=p%C3%A1gina%20de%20inicio,.Los%20alimentos%20ultra%20procesados%20son%20motor%20de%20la%20epidemia%20de,efectos%20alarmantes%20en%20la%20salud.)
- Patras, A., Brunton, N., Da Pieve, S. y Butler, F. (2009). Impact of high-pressure processing on total antioxidant activity, phenolic, ascorbic acid, anthocyanin content and colour of strawberry and blackberry purées. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*. Ireland.
- Pokorny, J., Yanishiieva, N. y Gordon, M. (2001). *Antioxidantes de los alimentos*. Zaragoza, ES. Acribia.
- Puma, Y. (2023). Efecto del tratamiento térmico en el contenido de compuestos fenólicos y capacidad antioxidante del zumo de tuna (*Opuntia ficus indica*) en tres ecotipos. Tesis para obtener el grado de Ingeniero Agroindustria. Universidad Nacional de Moquegua, Perú.

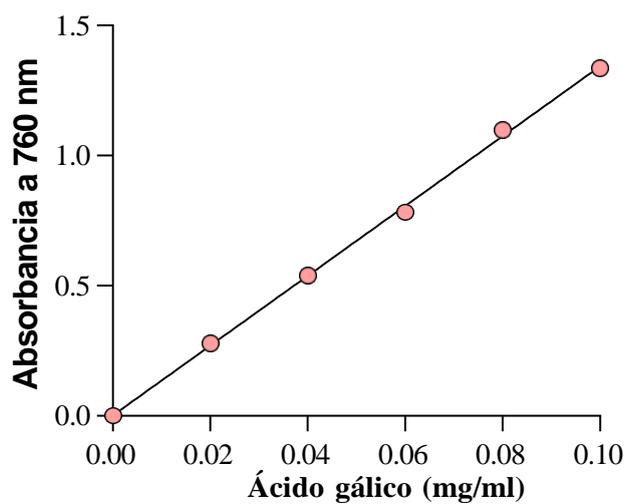
- Quiñones, M., Miguel, M. y Aleixandre, A. (2012). Los polifenoles, compuestos de origen natural con efectos saludables sobre el sistema cardiovascular. *Nutrición Hospitalaria*, 27(1), 76-89. Recuperado en 22 de agosto de 2022, de [https://scielo.isciii.es/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0212-16112012000100009#:~:text=Los%20compuestos%20fen%C3%B3licos%20son%20el,de%20enfermedades%20cardiovasculares1%2C2](https://scielo.isciii.es/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0212-16112012000100009#:~:text=Los%20compuestos%20fen%C3%B3licos%20son%20el,de%20enfermedades%20cardiovasculares1%2C2).
- Ramadan, M. F., Moussa Ayoub, T. E. y Rohn, S. (2021). Introduction to *Opuntia spp.*: Chemistry, Bioactivity and Industrial Applications. In *Opuntia spp.*: Chemistry, Bioactivity and Industrial Applications (pp. 3–11). [https://doi.org/10.1007/978-3-030-78444-7\\_1](https://doi.org/10.1007/978-3-030-78444-7_1)
- Repo de Carrasco, R. y Encina-Zelada, C. (2008). Determinación de la capacidad antioxidante y compuestos bioactivos de frutas nativas peruanas. *Revista sociedad química del Perú*. 74 (2): 108-124.
- Reyes, L. (2011). Estadística, Matemática y Computación. Material de los cursos impartidos por el Ingeniero Luis Manfredo Reyes Guatemala, Centro América para el mundo. Reyes Estadística. [http://reyesestadistica.blogspot.com/2011/07/diseño-de-experimentos-al-completo-azar.html#:~:text=El%20modelo%20matem%C3%A1tico%20es%20de,Su%20sencillez%20\(estad%C3%ADstico%20f%C3%A1cil\)](http://reyesestadistica.blogspot.com/2011/07/diseño-de-experimentos-al-completo-azar.html#:~:text=El%20modelo%20matem%C3%A1tico%20es%20de,Su%20sencillez%20(estad%C3%ADstico%20f%C3%A1cil)).
- Re, R., Pellegrini, N., Proteggente, A., Pannala, A., Yang, M. y Rice-Evans, C. (1999). Antioxidant activity applying an improved ABTS radical cation decolorization assay. *Free Radical Biology and Medicine*, 26(9-10): 1231–1237.
- Schramm DD, German JB. (1998). Potential effects of flavonoids on the etiology of vascular disease. *J Nutr Biochem*, 9:560-566.
- Shoukat, R., Cappai, M., Pia, G. y Pilia, L. (2023). An Updated Review: *Opuntia ficus indica* (OFI) Chemistry and Its Diverse Applications. *Applied Sciences*, 13(13), 7724. <https://doi.org/10.3390/app13137724>
- Steinmetz, T. y Ingelheim, B. (1999). Alimentos Funcionales. Empleo de minerales de elevado valor. *Revista: Alimentación, Equipos y Tecnología*. Vol 5. N 02.

Vasco, C; Rúaes, J. y Kamal, A. (2008). Total phenolic compounds and antioxidant capacities of major fruits from Ecuador. *Food Chemistry*, 111(4): 816-823.

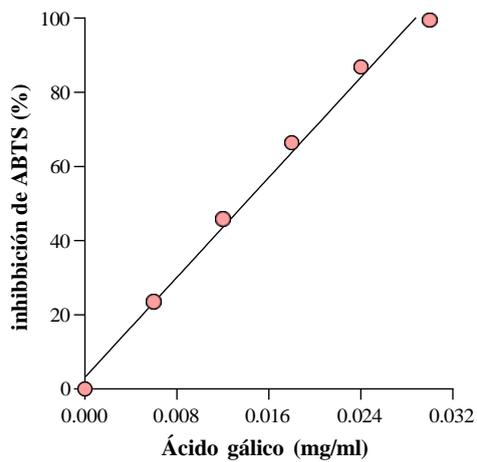
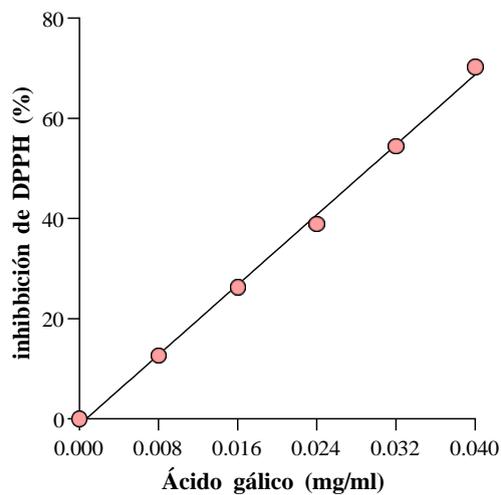
Zhishen, J., Mengcheng, T. y Jianming, W. (1999). Extraction and identification of antioxidant components from leaves of mulberry (*Morus Alba* L.). *Food Chemistry. China*. 64: 555-559 p.

## VIII. ANEXOS

**ANEXO 1: Curva de calibración de ácido gálico para la cuantificación de compuestos fenólicos totales**



**ANEXO 2: Curva de calibración de ácido gálico para la determinación de la capacidad antioxidante mediante el método del DPPH y ABTS<sup>•+</sup>**



### ANEXO 3: Compuestos fenólicos y capacidad antioxidante de la pulpa y zumos acidificados de tuna

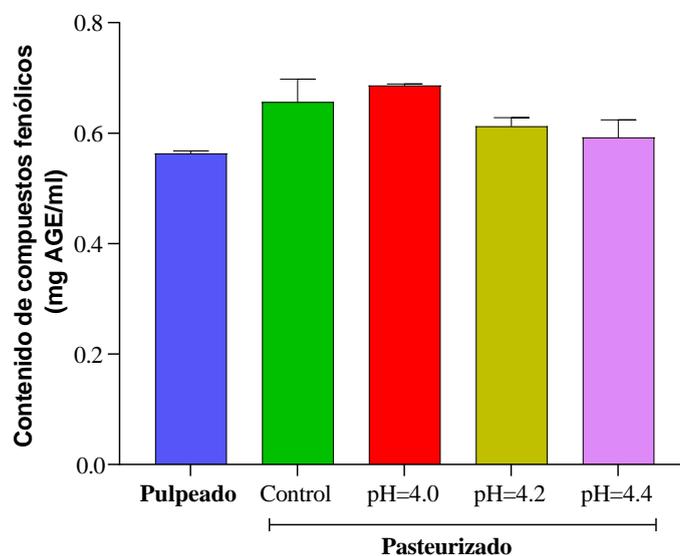
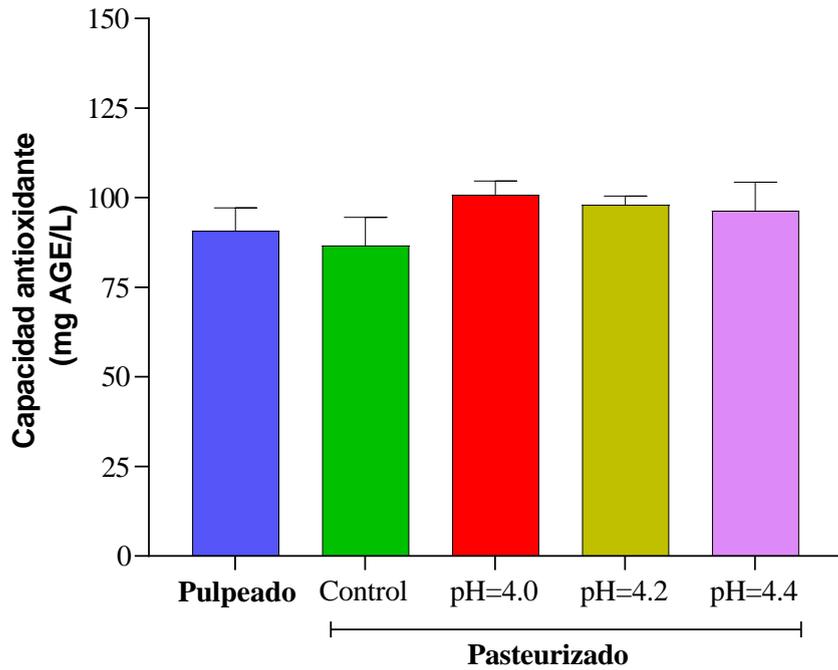
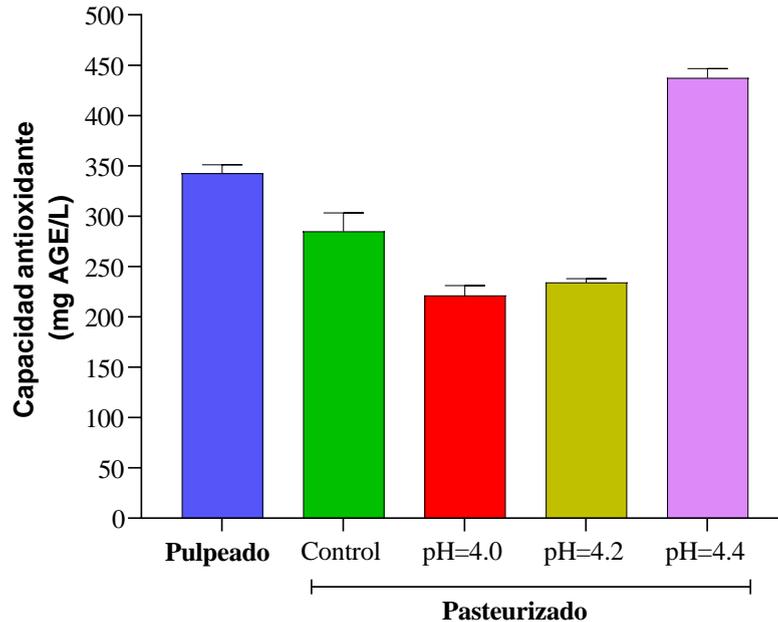


Figura 7. Contenido de compuestos fenólicos totales de la pulpa de tuna y del zumo estandarizada a diferente pH y pasteurizada. Los valores son el promedio $\pm$ desviación estándar (n= 3)



**Figura 8. Capacidad antioxidante de la pulpa de tuna y del zumo estandarizada a diferente pH y pasteurizada medido por el método DPPH. Los valores son el promedio±desviación estándar (n= 3)**



**Figura 9. Capacidad antioxidante de la pulpa de tuna y del zumo estandarizada a diferente pH y pasteurizada medido por el método ABTS. Los valores son el promedio±desviación estándar (n= 3)**

#### ANEXO 4: Análisis Complementario de Color

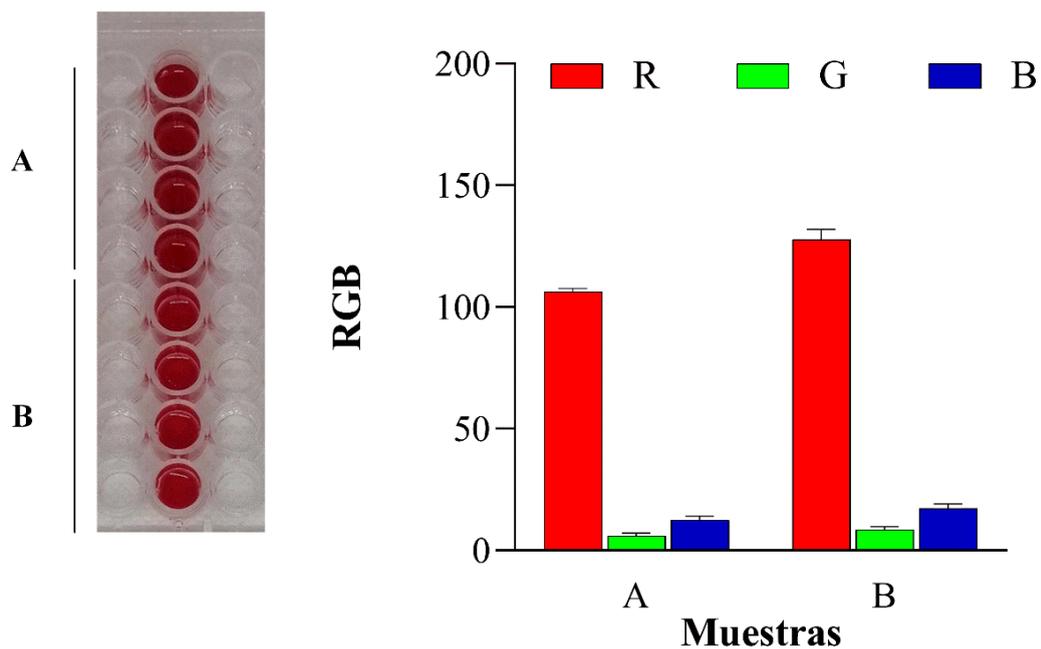
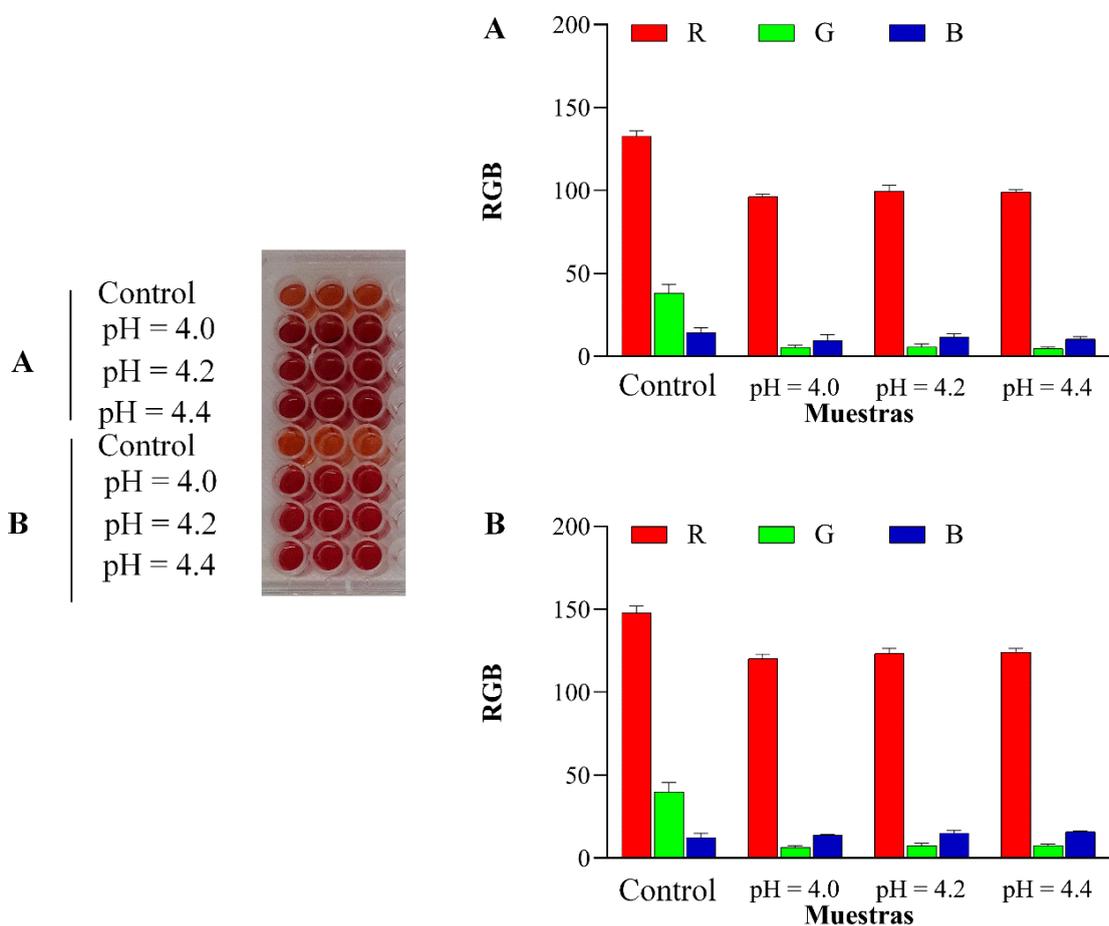
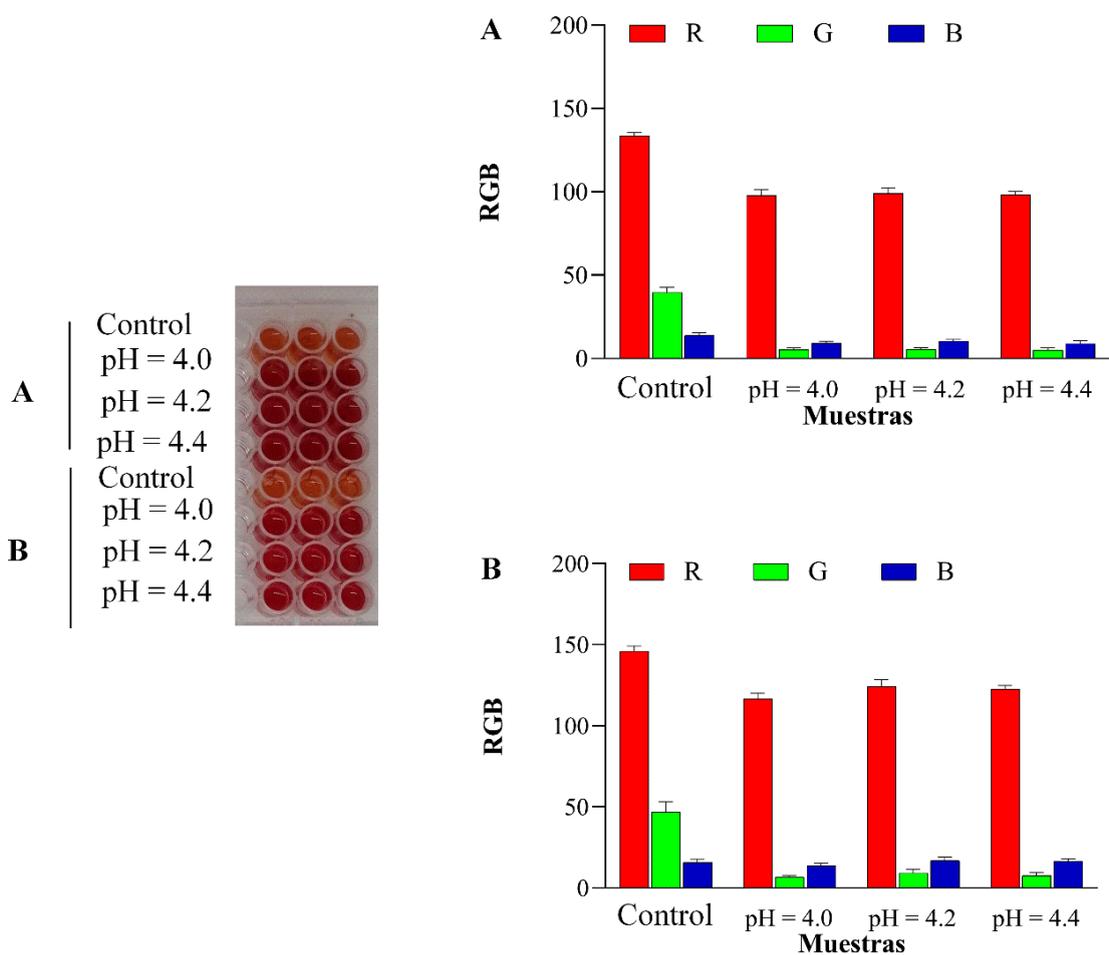


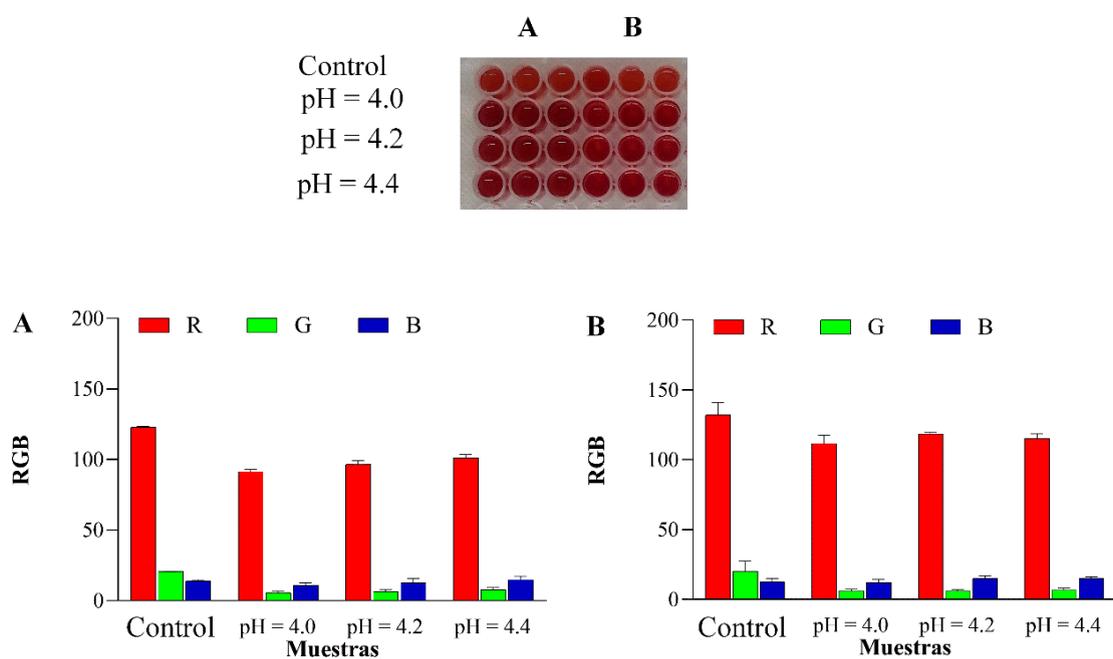
Figura 10. Análisis de color de la pulpa de tuna. A) sin centrifugar y B) centrifugado. Valores de R (Red), G (Green) y B (Blue) son el promedio $\pm$ desviación estándar (n= 3)



**Figura 11. Análisis de color del zumo de tuna con diferentes pH y pasteurizada. A) sin centrifugar y B) centrifugado. Valores de R (Red), G (Green) y B (Blue) son el promedio±desviación estándar (n= 3)**



**Figura 12. Análisis de color del zumo de tuna con diferentes pH y pasteurizada a los 0 días de almacenamiento en refrigeración (4 °C). A) sin centrifugar y B) centrifugado. Valores de R (Red), G (Green) y B (Blue) son el promedio±desviación estándar (n= 3)**



**Figura 13. Análisis de color del zumo de tuna con diferentes pH y pasteurizada a los 15 días de almacenamiento en refrigeración (4 °C). A) sin centrifugar y B) centrifugado. Valores de R (Red), G (Green) y B (Blue) son el promedio±desviación estándar (n= 3)**

## ANEXO 5: Análisis estadístico del contenido de betacianinas

**Tabla ANOVA para BCy (mg/L) por Factores**

<i>Fuente</i>	<i>Suma de Cuadrados</i>	<i>Gl</i>	<i>Cuadrado Medio</i>	<i>Razón-F</i>	<i>Valor-P</i>
Entre grupos	156.954	12	13.0795	84.74	0.0000
Intra grupos	4.01325	26	0.154356		
Total (Corr.)	160.967	38			

**Pruebas de Múltiple Rangos para BCy (mg/L) por Factores**

Método: 95.0 porcentaje Tukey HSD

<i>Factores</i>	<i>Casos</i>	<i>Media</i>	<i>Grupos Homogéneos</i>
Patestigo-tO	3	1.81633	X
Pa.testigo	3	1.92867	X
Pa.testigo-t15	3	4.24167	X
Pa.pH=4.4	3	5.80767	X
Pa.pH=4.2-tO	3	6.63767	XX
Pa.pH=4.2	3	6.932	XX
Pa.pH=4.4-t15	3	7.04367	X
Pa.pH=4.4-tO	3	7.324	X
Pa.pH=4.2-t15	3	7.348	X
Pa.pH=4.0-t15	3	7.36233	X
Pulpeado	3	7.392	X
Pa.pH=4.0-tO	3	7.576	X
Pa.pH=4.0	3	7.73167	X

\* indica una diferencia significativa.

## ANEXO 6: Análisis estadístico del contenido de betaxantinas

**Tabla ANOVA para Bx (mg/L) por Factores**

<i>Fuente</i>	<i>Suma de Cuadrados</i>	<i>Gl</i>	<i>Cuadrado Medio</i>	<i>Razón-F</i>	<i>Valor-P</i>
Entre grupos	43.1931	12	3.59942	8.72	0.0000
Intra grupos	10.7314	26	0.412745		
Total (Corr.)	53.9245	38			

**Pruebas de Múltiple Rangos para Bx (mg/L) por Factores**

Método: 95.0 porcentaje Tukey HSD

<i>Factores</i>	<i>Casos</i>	<i>Media</i>	<i>Grupos Homogéneos</i>
Pa.pH=4.4	3	8.28533	X
Pa.pH=4.2-tO	3	9.47333	XX
Pa.pH=4.4-t15	3	9.57467	XX
Patestigo-tO	3	9.80233	XX
Pa.pH=4.2	3	9.90433	XX
Pulpeado	3	9.90833	XX
Pa.pH=4.2-t15	3	10.0427	XX
Pa.pH=4.0-t15	3	10.073	XX
Pa.testigo	3	10.1617	XX
Pa.pH=4.4-tO	3	10.5177	X
Pa.pH=4.0-tO	3	10.751	X
Pa.pH=4.0	3	11.0773	X
Pa.testigo-t15	3	13.075	X

\* indica una diferencia significativa.

## ANEXO 7: Análisis estadístico del contenido de betalaínas

**Tabla ANOVA para Bt (mg/L) por Factores**

<i>Fuente</i>	<i>Suma de Cuadrados</i>	<i>Gl</i>	<i>Cuadrado Medio</i>	<i>Razón-F</i>	<i>Valor-P</i>
<b>Entre grupos</b>	186.684	12	15.557	14.88	0.0000
<b>Intra grupos</b>	27.1758	26	1.04522		
<b>Total (Corr.)</b>	213.86	38			

Tabulares.

### Pruebas de Múltiple Rangos para Bt (mg/L) por Factores

Método: 95.0 porcentaje Tukey HSD

<i>Factores</i>	<i>Casos</i>	<i>Media</i>	<i>Grupos Homogéneos</i>
<b>Patestigo-tO</b>	3	11.618	X
<b>Pa.testigo</b>	3	12.0903	X
<b>Pa.pH=4.4</b>	3	14.093	XX
<b>Pa.pH=4.2-tO</b>	3	16.111	XX
<b>Pa.pH=4.4-t15</b>	3	16.6187	XX
<b>Pa.pH=4.2</b>	3	16.8367	XX
<b>Pulpeado</b>	3	17.3003	X
<b>Pa.testigo-t15</b>	3	17.3167	X
<b>Pa.pH=4.2-t15</b>	3	17.3907	X
<b>Pa.pH=4.0-t15</b>	3	17.4363	X
<b>Pa.pH=4.4-tO</b>	3	17.841	X
<b>Pa.pH=4.0-tO</b>	3	18.3267	X
<b>Pa.pH=4.0</b>	3	18.8087	X

## ANEXO 8: Análisis estadístico del contenido de compuestos fenólicos totales

**Tabla ANOVA para Compuestos fenólicos (mg AGE/mL) por Factores**

<i>Fuente</i>	<i>Suma de Cuadrados</i>	<i>Gl</i>	<i>Cuadrado Medio</i>	<i>Razón-F</i>	<i>Valor-P</i>
Entre grupos	0.0951512	12	0.00792927	10.30	0.0000
Intra grupos	0.0200107	26	0.000769641		
Total (Corr.)	0.115162	38			

## Pruebas de Múltiple Rangos para Compuestos fenólicos (mg AGE/mL) por Factores

Método: 95.0 porcentaje Tukey HSD

<i>Factores</i>	<i>Casos</i>	<i>Media</i>	<i>Grupos Homogéneos</i>
Pa.pH=4.0-t15	3	0.527	X
Pa.pH=4.4-tO	3	0.537	XX
Pa.pH=4.2-t15	3	0.537333	XX
Pa.testigo-t15	3	0.556333	XX
Pa.pH=4.2-tO	3	0.559333	XX
Pulpeado	3	0.563333	XX
Pa.pH=4.4-t15	3	0.573667	XXX
Pa.pH=4.4	3	0.591667	XXXX
Pa.pH=4.2	3	0.612667	XXXX
Patestigo-tO	3	0.618667	XXXX
Pa.pH=4.0-tO	3	0.654	XXX
Pa.testigo	3	0.656333	XX
Pa.pH=4.0	3	0.686333	X

## ANEXO 9: Análisis estadístico del contenido de capacidad antioxidante (DPPH)

**Tabla ANOVA para Cap. antioxidante - DPPH por Factores**

<i>Fuente</i>	<i>Suma de Cuadrados</i>	<i>Gl</i>	<i>Cuadrado Medio</i>	<i>Razón-F</i>	<i>Valor-P</i>
Entre grupos	3516.43	12	293.036	9.43	0.0000
Intra grupos	807.994	26	31.0767		
Total (Corr.)	4324.42	38			

**Pruebas de Múltiple Rangos para Cap. antioxidante - DPPH por Factores**

Método: 95.0 porcentaje Tukey HSD

<i>Factores</i>	<i>Casos</i>	<i>Media</i>	<i>Grupos Homogéneos</i>
Pa.pH=4.2-t15	3	76.555	X
Pa.pH=4.0-t15	3	77.669	X
Pa.pH=4.4-t15	3	82.795	XX
Patestigo-tO	3	83.3447	XX
Pa.testigo	3	86.622	XXX
Pulpeado	3	90.7727	XXXX
Pa.pH=4.4	3	96.3437	XXX
Pa.pH=4.2-tO	3	97.873	XXX
Pa.pH=4.2	3	97.982	XXX
Pa.testigo-t15	3	98.9527	XXX
Pa.pH=4.0	3	100.822	XX
Pa.pH=4.0-tO	3	103.99	X
Pa.pH=4.4-tO	3	105.41	X

## ANEXO 10: Análisis estadístico del contenido de capacidad antioxidante (ABTS)

**Tabla ANOVA para Cap. antioxidante ABTS por Factores**

<i>Fuente</i>	<i>Suma de Cuadrados</i>	<i>Gl</i>	<i>Cuadrado Medio</i>	<i>Razón-F</i>	<i>Valor-P</i>
Entre grupos	340354.	12	28362.8	63.85	0.0000
Intra grupos	11549.1	26	444.195		
Total (Corr.)	351903.	38			

### Pruebas de Múltiple Rangos para Cap. antioxidante ABTS por Factores

Método: 95.0 porcentaje Tukey HSD

<i>Factores</i>	<i>Casos</i>	<i>Media</i>	<i>Grupos Homogéneos</i>
Pa.pH=4.0-t15	3	202.996	X
Pa.pH=4.2-t15	3	206.239	X
Pa.pH=4.0	3	221.156	X
Pa.pH=4.0-tO	3	227.511	XX
Pa.pH=4.2-tO	3	229.457	XX
Pa.pH=4.2	3	233.997	XX
Pa.testigo	3	284.941	XX
Pa.testigo-t15	3	315.27	XX
Pulpeado	3	342.663	XX
Patestigo-tO	3	376.661	XX
Pa.pH=4.4	3	437.383	XX
Pa.pH=4.4-t15	3	451.132	X
Pa.pH=4.4-tO	3	458.655	X