

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA CHAPINGO**

**DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA AGROINDUSTRIAL**

**POSGRADO EN CIENCIA Y TECNOLOGÍA AGROALIMENTARIA**

**DESARROLLO DE UN PRODUCTO ESTABLE Y SENSORIALMENTE  
ACEPTABLE ELABORADO A BASE DE AGUACATE CRIOLLO LIOFILIZADO**

**TESIS**

Que como requisito parcial  
para obtener el grado de:

**MAESTRO EN CIENCIAS EN CIENCIA Y TECNOLOGÍA AGROALIMENTARIA**



**APROBADA**



**Presenta:**

**ELISEO TAFOYA FLORES**

**Bajo la supervisión de: J. JOEL E. CORRALES GARCÍA, DR.**



**Chapingo, Estado de México, diciembre de 2024.**

**DESARROLLO DE UN PRODUCTO ESTABLE Y SENSORIALMENTE  
ACEPTABLE ELABORADO A BASE DE AGUACATE CRIOLLO LIOFILIZADO**

Tesis realizada por **Eliseo Tafoya Flores** bajo la dirección del Comité Asesor indicado, aprobada por el mismo y aceptada como requisito parcial para obtener el grado de:

**MAESTRO EN CIENCIAS EN CIENCIA Y TECNOLOGÍA AGROALIMENTARIA**

DIRECTOR:



DR. JOSÉ JOEL ENRIQUE CORRALES GARCÍA

ASESORA:



DRA. PATRICIA LANDA SALGADO

ASESORA:



DRA. VERENICE TORRES SALAS

ASESORA:



DRA. DIANA BECERRA MORALES

Chapingo, Estado de México, diciembre de 2024

## CONTENIDO

|                                                                                         |      |
|-----------------------------------------------------------------------------------------|------|
| LISTA DE CUADROS .....                                                                  | v    |
| LISTA DE FIGURAS .....                                                                  | vi   |
| LISTA DE ANEXOS.....                                                                    | vii  |
| DEDICATORIAS .....                                                                      | viii |
| AGRADECIMIENTOS .....                                                                   | ix   |
| DATOS BIOGRÁFICOS .....                                                                 | x    |
| RESUMEN GENERAL.....                                                                    | xi   |
| GENERAL ABSTRACT .....                                                                  | xii  |
| 1 INTRODUCCION GENERAL .....                                                            | 1    |
| 1.1    Justificación .....                                                              | 5    |
| 1.2    Objetivos.....                                                                   | 6    |
| 1.2.1    General.....                                                                   | 6    |
| 1.2.2    Particulares .....                                                             | 6    |
| 2 REVISION DE LITERATURA .....                                                          | 8    |
| 2.1 Aguacate ( <i>Persea americana</i> Mill.) Análisis de similitud (iThenticate) ..... | 8    |
| 2.1.1    Historia y origen del aguacate .....                                           | 8    |
| 2.1.2    Clasificación taxonómica .....                                                 | 9    |
| 2.1.3    Raza mexicana (var. <i>drymifolia</i> ) .....                                  | 10   |
| 2.1.4    Importancia y comercialización.....                                            | 10   |
| 2.1.5    Usos del aguacate.....                                                         | 11   |
| 2.2    Nutraceúticos.....                                                               | 13   |
| 2.2.1    Composición química .....                                                      | 13   |
| 2.2.2    Ácidos grasos libres .....                                                     | 13   |
| 2.2.3    Flavonoides .....                                                              | 14   |
| 2.2.4    Antioxidantes .....                                                            | 15   |
| 2.3    Liofilización .....                                                              | 16   |

|       |                                                                                                                  |    |
|-------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 2.4   | Evaluación sensorial de los alimentos .....                                                                      | 18 |
| 2.5   | Literatura citada .....                                                                                          | 20 |
| 3     | DESARROLLO DE UN PRODUCTO ESTABLE Y SENSORIALMENTE<br>ACEPTABLE ELABORADO A BASE DE AGUACATE CRIOLLO LIOFILIZADO | 26 |
| 3.1   | Introducción .....                                                                                               | 26 |
| 3.2   | Materiales y métodos.....                                                                                        | 28 |
| 3.2.1 | Origen del material vegetal.....                                                                                 | 28 |
| 3.2.2 | Liofilización de las muestras.....                                                                               | 29 |
| 3.2.3 | Preparación de la muestra para análisis químicos .....                                                           | 31 |
| 3.2.4 | Determinación de fenoles totales .....                                                                           | 31 |
| 3.2.5 | Extracción de aceite .....                                                                                       | 31 |
| 3.2.6 | Determinación de índice de acidez.....                                                                           | 32 |
| 3.2.7 | Determinación de índice de peróxidos .....                                                                       | 32 |
| 3.2.8 | Evaluación sensorial.....                                                                                        | 33 |
| 3.2.9 | Análisis estadístico .....                                                                                       | 34 |
| 3.3   | Resultados y discusión .....                                                                                     | 34 |
| 3.3.1 | Contenido de fenoles totales .....                                                                               | 34 |
| 3.3.2 | Actividad antioxidante de la pulpa .....                                                                         | 37 |
| 3.3.3 | Índice de peróxidos .....                                                                                        | 39 |
| 3.3.4 | Índice de acidez.....                                                                                            | 41 |
| 3.3.5 | Contenido de aceite.....                                                                                         | 44 |
| 3.3.6 | Evaluación sensorial.....                                                                                        | 48 |
| 3.4   | Conclusiones .....                                                                                               | 50 |
| 3.5   | Agradecimientos .....                                                                                            | 51 |
| 3.6   | Bibliografía.....                                                                                                | 52 |
| 4     | ANEXOS .....                                                                                                     | 56 |

## LISTA DE CUADROS

|                                                                                                                                                                                                                                |    |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Cuadro 1</b> . Contenido total de fenoles (mg EAG g <sup>-1</sup> bs) y actividad antioxidante (mMol ET g <sup>-1</sup> bs) en pulpa liofilizada de aguacate criollo de raza mexicana. (Media ± Desviación estándar). ..... | 35 |
| <b>Cuadro 2.</b> Índice de peróxidos del aceite extraído mediante solventes de la pulpa de aguacate criollo de raza mexicana.....                                                                                              | 39 |
| <b>Cuadro 3.</b> Índice de acidez del aceite extraído mediante solventes de la pulpa de aguacate criollo de raza mexicana.....                                                                                                 | 42 |
| <b>Cuadro 4.</b> Contenido de aceite extraído mediante solventes a partir de la pulpa de aguacate criollo de raza mexicana.....                                                                                                | 44 |
| <b>Cuadro 5.</b> Aceptabilidad sensorial de diferentes tratamientos de guacamole ..                                                                                                                                            | 49 |

## LISTA DE FIGURAS

|                                                                                                                                                                                                           |    |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Figura 1</b> Configuración esencial de los flavonoides (Panche et al., 2016). .....                                                                                                                    | 14 |
| <b>Figura 2</b> Árboles de aguacate criollo en Tochimilco, Puebla. ....                                                                                                                                   | 29 |
| <b>Figura 3</b> Proceso de liofilización de pulpa de aguacate criollo: a) corte y despulpe, b) congelación y c) liofilización.....                                                                        | 30 |
| <b>Figura 4.</b> Comportamiento del índice de peróxidos en aceite de aguacate criollo a lo largo de tres meses.....                                                                                       | 41 |
| <b>Figura 5.</b> Comportamiento del índice de acidez en aceite de aguacate criollo a lo largo de tres meses. ....                                                                                         | 43 |
| <b>Figura 6.</b> Comparación de la cantidad de aceite extraído de la pulpa liofilizada de aguacate criollo de raza mexicana: extracción realizada al día 1 vs el día 90 después de la liofilización. .... | 46 |
| <b>Figura 7.</b> Distribución de la aceptabilidad de diferentes tratamientos de guacamole evaluada mediante boxplot.....                                                                                  | 50 |

## LISTA DE ANEXOS

|                                                                                                                                                                             |    |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Anexo 1.</b> Árboles de aguacate criollo de raza mexicana con coordenadas geográficas en Tochimilco, Puebla, utilizados para colecta de frutos para el experimento. .... | 56 |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|

## DEDICATORIAS

*A Dios, por regalarme el don de la vida y colocarme en el lugar correcto para ser una mejor persona.*

*A mi hija, María José Tafoya Bajonero, por motivarme a ser mejor persona cada día.*

*A mi madre, Virginia Flores Ortiz, quien siempre creyó en mí, incluso cuando nadie más lo hacía.*

*A mi padre, Eliseo Tafoya Flores, por su cariño, paciencia y apoyo constante.*

*A mi hermana, Ivonne Alejandra Tafoya Flores, quien siempre estuvo presente cuando necesitaba a alguien que me ayudara.*

## **AGRADECIMIENTOS**

Con gratitud, expreso mi reconocimiento a la Universidad Autónoma Chapingo por permitirme alcanzar una meta más en mi trayectoria profesional.

Al Consejo Nacional de Humanidades, Ciencias y Tecnologías (CONAHCyT), agradezco el respaldo financiero que hizo posible la realización de mis estudios de maestría.

A la Dirección General de Investigación y Posgrado (DGIP), mi agradecimiento por el financiamiento proporcionado para culminar este trabajo.

Agradezco al Departamento de Ingeniería Agroindustrial, particularmente al Posgrado en Ciencia y Tecnología Agroalimentaria, por brindarme la oportunidad de desarrollarme académicamente.

Al Dr. Joel Corrales García, expreso mi gratitud por su orientación y respaldo brindados a lo largo del desarrollo de esta tesis.

A la Dra. Diana Becerra Morales, le expreso mi gratitud por su asesoría y colaboración en la fase experimental de esta investigación.

A la Dra. Patricia Landa Salgado, le reconozco su valiosa orientación, apoyo en el laboratorio y en la revisión de este documento.

A la Dra. Verenice Torres Salas, agradezco su asesoría y colaboración en los aspectos estadísticos y sensoriales del proyecto.

A la Dra. Diana Guerra Ramírez, le extiendo mi gratitud por su contribución en el análisis experimental de la investigación.

Finalmente, al Ing. Efraín, mi agradecimiento por su apoyo durante la colecta realizada en Tochimilco, Puebla y a mis compañeros de la MCyTA, les agradezco por su amistad y respaldo a lo largo de este proceso.

## DATOS BIOGRÁFICOS

### NOMBRE

Eliseo Tafoya Flores

### FECHA DE NACIMIENTO

25 de septiembre de 1994

### LUGAR DE NACIMIENTO

Ciudad Juárez, Chihuahua, México

### CURP

TAFE940925HCHFLL04

### DESARROLLO ACADÉMICO

Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro

### LICENCIATURA:

Ingeniero en Ciencia y Tecnología de Alimentos

### CÉDULA PROFESIONAL

12933447



## RESUMEN GENERAL

### DESARROLLO DE UN PRODUCTO ESTABLE Y SENSORIALMENTE ACEPTABLE ELABORADO A BASE DE AGUACATE CRIOLLO LIOFILIZADO<sup>1</sup>

El aguacate criollo de la raza mexicana (*Persea americana* var. *drymifolia*) destaca por sus propiedades nutraceuticas superiores en comparación con variedades comerciales como el Hass. Sin embargo, su alta perecibilidad limita su comercialización. Este estudio evaluó la liofilización como método de conservación para desarrollar un producto estable y sensorialmente aceptable que preserve las propiedades nutraceuticas del aguacate criollo. Se recolectaron frutos de cinco árboles en Tochimilco, Puebla, y se sometieron a liofilización tras un pretratamiento con ácido ascórbico (5%). Se analizaron fenoles totales, actividad antioxidante, índice de peróxidos, índice de acidez y contenido de aceite en la pulpa liofilizada, tanto al día 1 como tras 90 días de almacenamiento. También se realizó una evaluación sensorial con panelistas no entrenados. Los resultados mostraron que no hubo diferencias significativas en fenoles totales y actividad antioxidante, cuyos valores fueron consistentes (fenoles: 2.37-2.55 mg EAG g<sup>-1</sup> bs; actividad antioxidante: 7.10-7.60 mMol TE g<sup>-1</sup> bs). El índice de peróxidos y acidez aumentó durante el almacenamiento, destacando los tratamientos T4 y T5 por su estabilidad oxidativa y menor acidez, lo que sugiere su potencial comercial. El contenido de aceite varió entre 22.4 % y 26.5 % al día 1, pero disminuyó tras 90 días, alcanzando valores entre 20.1 % y 22.9 %. La evaluación sensorial indicó que todos los tratamientos fueron igualmente aceptados, con puntuaciones cercanas a 4 en una escala hedónica de 9 puntos, reflejando una aceptación moderada. Este estudio confirma la viabilidad del aguacate criollo para desarrollar productos nutraceuticos de alta calidad, sugiriendo realizar evaluaciones sensoriales frecuentes para evaluar la aceptabilidad a largo plazo.

**Palabras clave:** Aguacate criollo, liofilización, propiedades nutraceuticas, estabilidad oxidativa, evaluación sensorial, desarrollo de alimentos.

---

<sup>1</sup> Tesis de Maestría en Ciencia, Programa de Posgrado en Ciencia y Tecnología Agroalimentaria, Universidad Autónoma Chapingo.

Autor: Eliseo Tafoya Flores

Director de Tesis: Dr. José Joel Enrique Corrales García

## GENERAL ABSTRACT

### DEVELOPMENT OF A STABLE AND SENSORIALLY ACCEPTABLE PRODUCT MADE FROM FREEZE-DRIED CRIOLLO AVOCADO<sup>2</sup>

Criollo Avocado of the Mexican Race (*Persea americana* var. *drymifolia*) stands out for its superior nutraceutical properties compared to commercial varieties like Hass. However, its high perishability limits its commercialization. This study evaluated freeze-drying as a preservation method to develop a stable and sensorily acceptable product that preserves the nutraceutical properties of criollo avocado. Fruits were collected from five trees in Tochimilco, Puebla, and subjected to freeze-drying after a pretreatment with ascorbic acid (5%). Total phenols, antioxidant activity, peroxide index, acidity index, and oil content in the freeze-dried pulp were analyzed on day 1 and after 90 days of storage. A sensory evaluation was also performed with untrained panelists. The results showed no significant differences in total phenols and antioxidant activity, with consistent values observed (total phenols: 2.37-2.55 mg EAG g<sup>-1</sup> dw; antioxidant activity: 7.10-7.60 mMol TE g<sup>-1</sup> dw). The peroxide and acidity indices increased during storage, with treatments T4 and T5 standing out for their oxidative stability and lower acidity, suggesting their commercial potential. The oil content ranged from 22.4% to 26.5% on day 1 but decreased after 90 days, reaching values between 20.1% and 22.9%. The sensory evaluation indicated that all treatments were equally accepted, with average scores close to 4 on a 9-point hedonic scale, reflecting moderate acceptability. This study confirms the viability of criollo avocado for developing high-quality nutraceutical products, suggesting the need for frequent sensory evaluations to assess long-term acceptability.

**Keywords:** Criollo avocado, freeze-drying, nutraceutical properties, oxidative stability, sensory evaluation, food development.

---

<sup>2</sup> Thesis of Master Science. Program of Agro-Food Science and Technology, Universidad Autónoma Chapingo.

Author: Eliseo Tafoya Flores

Advisor: Dr. José Joel Enrique Corrales García

## 1 INTRODUCCION GENERAL

A nivel mundial, el mayor productor, consumidor y exportador de aguacate es México. En el año 2020, la superficie cultivada de este frutal fue de 241,140 ha, posicionándose en el segundo lugar entre los frutales producidos en México con mayor superficie cultivada en el país, después del limón. Además, presentó un volumen de producción anual, de casi 2.4 millones de toneladas. Respecto al valor de la producción anual, alcanzó más de 49 mil millones de pesos y el valor de las exportaciones fue de poco más de 64 mil millones de pesos, lo cual lo posicionó en el primer lugar dentro de los principales productos hortofrutícolas de nuestro país (Corrales-García *et al.*, 2022).

El aguacate pertenece al Reino *Plantae*, Familia *Lauraceae*, Orden *Lurales*, Género *Persea* y Especie *P. americana*. El Género *Persea* cuenta con más de 150 especies, botánicamente, el nombre científico del aguacate es *Persea americana* Mill. En todo el mundo se han documentado más de 1000 variedades y en México, se han registrado 23 variedades de aguacate y 624 genotipos que están en continuo aumento debido al cruzamiento natural o inducido (Ramos-Aguilar *et al.*, 2021). Los más conocidos y comercializados son los cultivares Hass y Fuerte producto de las cruas entre las razas mexicana y guatemalteca (Litz *et al.*, 2007). Actualmente, se reconocen tres razas de aguacate: la mexicana (*Persea americana* var. *drymifolia*), la guatemalteca (*P. americana* var. *guatemalensis*) y la antillana (*P. americana* var. *americana*).

Estas razas se distinguen por sus características morfológicas, fisiológicas y de cultivo. Numerosas variedades comerciales son híbridos interraciales obtenidos a través del intercambio genético entre las distintas razas.

La raza mexicana, en particular, comprende variedades locales cuyo uso y venta se concentran principalmente en el ámbito regional. Asimismo, estas variedades se emplean como portainjertos para el cultivo del 'Hass', que es la variedad más ampliamente comercializada a nivel global (SAGARPA, 2007).

El aguacate criollo mexicano (*Persea americana* var. *drymifolia*) ha sido consumido en México desde tiempos prehispánicos, aunque actualmente es una de las variedades menos vendidas como fruta fresca debido a su rápida degradación. Esto se debe a su cáscara extremadamente delgada, lo que lo hace más propenso a daños físicos (López-López & Morales-Sánchez, 2016). Por estas razones y por factores económicos, muchos productores han optado por reemplazarlo con la variedad 'Hass', que tiene una mayor aceptación comercial.

Aunque no es del dominio público, hay evidencias científicas de que el aguacate criollo de raza mexicana tiene mayores beneficios nutraceuticos comparándolo con la variedad "Hass" por las siguientes razones: a) tanto cáscara como pulpa aportan compuestos bioactivos importantes, tales como antocianinas y ácidos grasos mono y poli-insaturados (Corrales-García *et al.*, 2019; Méndez-Zúñiga *et al.*, 2019); b) el contenido de aceite por unidad de peso es mayor (15.8 %) en aguacates criollos que en Hass (12.5 %) (Corrales-García *et al.*, 2019; Méndez-Zúñiga *et al.*, 2019). Además, c) los ácidos grasos monoinsaturados son más abundantes (78.0 % del total de ácidos grasos) en aguacates criollos de raza mexicana (Corrales-García *et al.* 2019 y Méndez-Zúñiga *et al.* 2019), en comparación con los valores reportados por Dreher y Davenport (2013) para "Hass" (71 %). Por otro lado, Corrales-García, *et al.* (2019) reportaron que la cantidad de ácidos grasos poliinsaturados en aguacates criollos de raza mexicana puede llegar hasta 37.13 %, siendo más del doble que la reportada por Sánchez-Pérez (2009) para aguacates "Hass" con tan solo un 13.62 %.

El aceite de aguacate criollo destaca por su alto contenido de vitamina E, que puede superar los 200 ppm e incluso alcanzar niveles de 300 ppm. El principal compuesto de esta vitamina presente en el aceite es el  $\alpha$ -tocoferol, el cual, junto con el  $\beta$ -sitosterol, le confiere propiedades nutraceuticas. Esto significa que, aunado a su valor nutricional, el aceite de aguacate tiene la capacidad de contribuir a la prevención de enfermedades, lo que aumenta su atractivo (Valdez *et al.*, 2017).

Por su parte, Restrepo *et al.* (2009) señalan que la vitamina E actúa como un potente antioxidante en el organismo, evitando que los radicales libres reaccionen con moléculas esenciales, como los lípidos de las membranas celulares, las grasas presentes en la sangre, las proteínas, las vitaminas y los ácidos nucleicos contenidos en los genes.

El aceite de aguacate es una rica fuente de fitoesteroles y fitoestanoles, entre los cuales destaca el  $\beta$ -sitosterol, con concentraciones típicas que oscilan entre 0.45 % y 1.0 % (Valdez *et al.*, 2017). Además, el aguacate se posiciona como una de las principales fuentes naturales de fitosteroles, compuestos que pueden bloquear la absorción intestinal de colesterol de manera más efectiva que los alimentos enriquecidos o los suplementos (Duester, 2001). Además, los fitosteroles del aguacate tienen propiedades beneficiosas para la salud cardiovascular y poseen efectos inmunomoduladores, antiinflamatorios, antitumorales, bactericidas y fungicidas (Muñoz *et al.*, 2011).

Sin embargo, a pesar de todas las ventajas nutraceuticas antes mencionadas, la producción y consumo de aguacate criollo de raza mexicana es muy reducido en comparación al consumo del "Hass". Este bajo consumo podría incrementarse si el fruto no fuera tan perecedero. Como lo anterior no se puede evitar y es muy difícil contrarrestar, se deben buscar procesos agroindustriales capaces de dar alternativas eficaces que permitan un mejor aprovechamiento del aguacate criollo de raza mexicana.

El secado es una de las técnicas utilizadas para conservar alimentos, y entre las que no utilizan altas temperaturas destaca la liofilización. Según Bergh y Lahav (1996), la liofilización es una técnica de conservación basada en el desecado de materiales mediante la sublimación del agua contenida en ellos. Esta técnica es particularmente prometedora para estabilizar y prolongar la vida útil del aguacate criollo sin alterar sus características de sabor y color.

Este proceso genera un gradiente de presión de vapor entre el entorno del producto y el hielo en su interior. La liofilización se lleva a cabo en tres fases: en primer lugar, la congelación, que separa el agua de los demás componentes del producto; a continuación, el secado por sublimación en condiciones de alto vacío, eliminando la mayor parte del agua; y finalmente, una segunda etapa de sublimación secundaria para retirar el agua restante, lo que da como resultado un producto con una estructura porosa y ligera (Bergh y Lahav.,1996).

Los alimentos liofilizados tienen la ventaja de poder reconstituirse fácilmente; sin embargo, la congelación puede dañar la estructura celular, lo que hace que el producto seco sea frágil y susceptible a daños mecánicos (Brennan *et al.*, 1998). Souza *et al.* (2015) investigaron los procesos de liofilización en el aguacate 'Hass' y concluyeron que esta técnica representa una opción viable para su conservación, ya que permite obtener productos de alta calidad. De manera similar, Álvarez-Castro *et al.* (2014) señalaron que la liofilización favorece la preservación de características importantes como el sabor y la apariencia del producto, en comparación con métodos que emplean altas temperaturas, como los procesos de conservación por calor convectivo, los cuales suelen dar como resultado alimentos con un color y aspecto menos atractivos.

En este contexto, la presente investigación tiene como objetivo desarrollar un producto de aguacate criollo de raza mexicana liofilizado que tenga una buena aceptación sensorial, una larga vida de anaquel y mínimos cambios en sus propiedades nutraceuticas.

## **1.1 Justificación**

El aguacate criollo es consumido exclusivamente en México, principalmente en mercados locales pequeños. Sin embargo, debido a sus notables características, podría ser altamente valorado y demandado en mercados internacionales sofisticados y de gran alcance. El desafío radica en que estos mercados están ubicados a largas distancias, y la vida útil de este tipo de aguacate es considerablemente corta.

Una alternativa para introducir este preciado producto en dichos mercados es mediante su presentación deshidratada. Aunque el método convencional de deshidratación por convección (utilizando aire caliente) resulta poco adecuado, ya que destruye gran parte del potencial nutracéutico del aguacate criollo, una opción más prometedora es la deshidratación en frío mediante liofilización.

Sin duda, incrementar la producción, comercialización y consumo del aguacate criollo de raza mexicana sería conveniente debido a que contribuye a la conservación de la biodiversidad, promueve el desarrollo económico local, preserva variedades tradicionales con características organolépticas únicas y fomenta una dieta saludable gracias a su alto contenido de compuestos bioactivos y nutrientes esenciales. Sin embargo, debido a su alta perecibilidad y rápido deterioro, este fruto difícilmente llegaría en buen estado a los mercados importantes, que suelen encontrarse a grandes distancias.

El principal desafío de la pulpa de aguacate criollo es su alta vulnerabilidad a la oxidación enzimática. Este proceso ocurre cuando, durante el manejo o procesamiento, se rompen los compartimentos celulares que almacenan las enzimas. Esto permite que el oxígeno interactúe con el sustrato, provocando la oxidación de compuestos fenólicos incoloros a o-quinonas, las cuales reaccionan con antocianinas, dando lugar a la formación de pigmentos de color marrón. Para contrarrestar este fenómeno, se emplean diversos tratamientos destinados a inactivar la enzima polifenol oxidasa, tales como la refrigeración, congelación y secado.

No obstante, estos métodos pueden alterar las propiedades nutricionales y organolépticas del producto. También se recurren a la adición de conservantes y tecnologías de barrera que prolongan la vida útil, aunque no siempre garantizan la preservación de sus características. Además, tecnologías emergentes como las radiaciones ionizantes, microondas y altas presiones hidrostáticas están siendo investigadas como posibles soluciones (Pauker *et al.*, 1992).

Entonces para aumentar la vida de anaquel lo suficiente es necesario estabilizar reacción enzimática y así lograr la estabilización biológica, química, física, y microbiológica de este fruto, para lo cual el método más idóneo es la deshidratación o secado en frío como la liofilización.

La liofilización es una técnica que garantiza la conservación de la calidad del producto en términos de forma, tamaño, apariencia, sabor, color, textura y actividad biológica. Esto se logra gracias a que el proceso de deshidratación se realiza a temperaturas extremadamente bajas, lo que minimiza los daños causados por la degradación térmica y química (Marques & Freire, 2005). No obstante, los productos liofilizados suelen presentar características como porosidad, fragilidad, higroscopicidad y una excelente capacidad de rehidratación (Ceballos *et al.*, 2012). Estas propiedades hacen que la producción de fruta en polvo sea una alternativa viable para la comercialización del aguacate criollo.

## **1.2 Objetivos**

### **1.2.1 General**

Desarrollar un producto alimenticio a base de aguacate criollo liofilizado de raza mexicana que sea estable y sensorialmente aceptable.

### **1.2.2 Particulares**

- Identificar parámetros de proceso para la obtención final de aguacate criollo de raza mexicana (*P. americana* var. *drymifolia*) liofilizado.
- Analizar las características sensoriales y fitoquímicas entre los diferentes tratamientos sometidos a liofilización.

- Determinar cambios fitoquímicos y sensoriales en aguacate criollo de raza mexicana (*P. americana* var. *drymifolia*) sometido a deshidratación por liofilización, después de tres meses de almacenamiento a temperatura ambiente ( $25\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$ ).

## 2 REVISION DE LITERATURA

### 2.1 Aguacate (*Persea americana* Mill.) Análisis de similitud (iThenticate)

#### 2.1.1 Historia y origen del aguacate

El aguacate (*Persea americana* Mill.), clasificado dentro del subgénero *Persea*, se encuentra distribuido desde el centro de México hasta amplias regiones de Centroamérica (Bergh & Ellstrand, 1986). Smith (1966) informó sobre el hallazgo de cotiledones de aguacate en cuevas de Coxcatlán, Puebla, con una antigüedad de aproximadamente 7,000 a 8,000 años, lo que apoya la teoría de que México es el centro de origen de esta especie, desde donde se dispersó hacia Norteamérica, Las Antillas y parte de Sudamérica. La gran estima de los pueblos indígenas por este fruto carnoso, nutritivo y de sabor único, explica su amplia difusión en áreas de desarrollo de civilizaciones antiguas (De la Luz Sánchez-Pérez., 1999).

La palabra "aguacate" proviene del término en náhuatl "ahuacatl", que se traduce como "testículos del árbol". En naciones sudamericanas como Perú, este fruto recibe el nombre de palta o palto, una denominación que tiene su origen en el quichua. Antes del arribo de los conquistadores españoles, el aguacate ya se consideraba esencial de la dieta de los aztecas y otros grupos indígenas de América. Los españoles, admirados por este fruto, documentaron en sus crónicas aspectos como su forma, los nombres indígenas que poseía, su esencia y algunas características medicinales. En el Códice Florentino se mencionan tres variedades de aguacate: aoacaquauitl, tlacacolaoacatl y quilaoacatl, que podrían corresponder a las tres razas reconocidas en la actualidad. Los españoles lo introdujeron en Las Antillas, y posteriormente en Europa, adaptándose especialmente en Málaga, Murcia, Valencia y Cataluña. En 1833, Henry Perrine introdujo variedades mexicanas en Miami, y más tarde, se cultivó en California a

gran escala a partir de 1871. En México, la ciudad de Atlixco, Puebla, fue reconocida por su diversidad y calidad de aguacates, de donde proviene el cultivar Fuerte, base de la industria aguacatera en California, USA (Villanueva y Verti., 2007).

### **2.1.2 Clasificación taxonómica**

El aguacate es una planta perenne que forma parte del orden Ranal y la familia Lauraceae, caracterizada por producir frutos negros al alcanzar la madurez y con una forma alargada. Aquí se incluyen especies como el laurel (*Laurus nobilis* L.), la canela (*Cinnamomum zeylanicum* Schaeff.) y el alcanfor (*Cinnamomum camphora* Schaeff.), De esta forma el aguacate es la especie de mayor relevancia económica (Chanderbali *et al.*, 2013; Scora & Bergh, 1990).

En la familia Lauraceae, el género *Persea* es especialmente complicado y se divide en dos subgéneros que no tienen compatibilidad sexual. *Eriodaphne* y *Persea*. La distinción principal entre ambos se basa en los sépalos, que en el primero son caducos y en el segundo son persistentes (Boza *et al.*, 2018). El subgénero *Persea* incluye cuatro especies que presentan diferencias significativas. Especies *floccosa* Mez, Especies *schiedeana* Nees, Especies *steyrmarkiana* C.K. Allen y Especies *americana* Mill. (Chanderbali *et al.*, 2013).

El aguacate (*Persea americana* Mill.) se distingue en tres razas hortícolas dependiendo de su origen y proceso de domesticación: mexicana, guatemalteca y antillana. Estas razas también han sido clasificadas como variedades por Bergh, quien identificó a la raza mexicana como *Persea americana* var. *drymifolia*, a la guatemalteca como *Persea americana* var. *guatemalensis* y a la antillana como *Persea americana* var. *americana* (Acosta Díaz *et al.*, 2013; Chanderbali *et al.*, 2013).

Las plantas de este fruto pueden alcanzar alturas de hasta 30 metros, con flores que miden entre 3 y 6 mm de largo y presentan un color amarillo verdoso. En las ramas terminales se desarrollan entre uno y tres frutos de forma piriforme, con un exocarpo de color verde o morado oscuro, una pulpa de tonalidad marfil y una

semilla de forma ovalada y tamaño variable. Estas características pueden diferir entre las diversas razas (Chanderbali *et al.*, 2013; Douhan *et al.*, 2011).

### **2.1.3 Raza mexicana (var. *drymifolia*)**

Esta raza del aguacate incluye numerosos segregantes conocidos como criollos, que son especies endémicas de las regiones montañosas de México, distribuyéndose en estados como Veracruz, Puebla, México, Querétaro, Guerrero, Michoacán y Guanajuato (Ben-Ya'acov y Barrientos, 2003). Esta raza se caracteriza por su capacidad de adaptación a altitudes elevadas, su resistencia al frío y su contenido de aceite, que es superior al de las otras razas hortícolas (Galindo-Tovar *et al.*, 2008).

El fruto de esta raza, que ha sido utilizado como alimento desde aproximadamente el 8,000 a.C., destaca por su agradable sabor, textura cremosa y color amarillo verdoso (Corrales-García & Méndez-Zúñiga, 2020). La cáscara es fina y frágil, con un aroma y sabor distintivo que recuerda al anís; además, su tonalidad púrpura oscura, con tendencia al negro, se debe a la presencia de compuestos antioxidantes (Chanderbali *et al.*, 2013; Corrales-García & Méndez-Zúñiga, 2020).

A pesar de que la información sobre esta raza es limitada, debido a que la mayor parte del fruto comercializado proviene de cultivos en traspatios, se reporta que Puebla fue el principal estado productor de aguacate criollo mexicano en 2019, alcanzando una producción total de 6,890 toneladas (SIAP, 2020b).

### **2.1.4 Importancia y comercialización**

El comercio internacional del aguacate mexicano comenzó antes de la Revolución Mexicana, pero estuvo restringido por una normativa fitosanitaria impuesta por Estados Unidos desde 1914 hasta 1997 (CEDRSSA, 2017). Luego de eliminar esta restricción, las exportaciones de aguacate han experimentado un crecimiento significativo, representando el 4.39 % del Producto Interno Bruto de México en 2016 (SAGARPA, 2017). Luego de eliminar esta restricción, las

exportaciones de aguacate han experimentado un crecimiento significativo, representando el 4.39 % del Producto Interno Bruto de México en 2016 (SAGARPA, 2017). Para el año 2018, México se consolidó como el principal productor mundial, aportando un tercio de la producción global con más de 2 millones de toneladas cosechadas anualmente, luego se encuentran República Dominicana, Perú, Indonesia y Colombia (FAO, 2020).

Actualmente, el principal destino del aguacate mexicano es Norteamérica, seguido por naciones en Asia, América del Norte y Europa. Se proyecta que la demanda global de este fruto seguirá en aumento, tanto en términos de volumen como en la diversificación de los mercados internacionales (CEDRSSA, 2017).

A pesar de la expansión del mercado global, México mantiene el liderazgo en consumo interno de aguacate, lo cual indica que el mercado nacional sigue siendo una importante fuente de oportunidades económicas (CEDRSSA, 2017). Michoacán destaca como el mayor productor en el país, con el 75 % de la producción total, seguido por Jalisco, México, Nayarit y Morelos, que contribuyen con proporciones menores (SIAP, 2020a).

Por otro lado, las principales regiones de México con mayor consumo de aguacate incluyen áreas del centro, occidente, norte y noreste del país (SAGARPA, 2011). En contraste, el aguacate criollo mexicano se comercializa principalmente en mercados locales y regionales, generando ingresos aproximados de 225 mil pesos anuales (SIAP, 2020).

#### **2.1.5 Usos del aguacate**

El aguacate ha capturado la atención de numerosos países debido a su sabor, textura y propiedades nutritivas, siendo adoptado en lugares tan diversos como Francia, Japón, y más recientemente, Rusia.

El árbol de aguacate se aprovecha de manera integral; su madera, de buena calidad, se utiliza en zonas rurales de México para fabricar yugos y productos artesanales. Además, la industria extrae beneficios del aguacate, usándolo para la producción de aceites, lociones, jabones, cremas y champús (Velásquez, 2006).

El aguacate tiene diversos usos culinarios que varían dependiendo de la región. En países como Guatemala y México, su consumo se centra en su forma fresca, siendo un componente fundamental de preparaciones tradicionales como el guacamole, un puré de pulpa al que se le añaden diversos ingredientes dependiendo de la región. Por otro lado, en algunos países de América Latina y el Caribe, las variedades locales de aguacate, reconocidas por su sabor dulce, se utilizan principalmente para preparar batidos con edulcorantes y crema ácida (Campos *et al.*, 2008).

En la gastronomía mexicana, el aguacate es muy valorado por su sabor y propiedades nutritivas. No necesita condimentos para destacar, aunque se le puede realzar con varios ingredientes para intensificar su sabor natural o crear nuevos sabores. El limón es ideal para conservar sus propiedades y color tras cortarlo, al retardar su oxidación. El aguacate puede acompañar ensaladas con vinagreta fuerte, transformarse en crema para sopas frías, o complementar carnes, mariscos y pescados, realzando el sabor de la sazón mexicana. También se incluye en postres, como mousse exótico o nieve. Además, las hojas del aguacate se usan en la cocina mexicana para dar sabor a frijoles y salsas, o para envolver carnes (mixiotes) antes de cocinarlas en horno de tierra (Villanueva y Verti, 2007).

El aguacate ha sido valorado por sus propiedades medicinales desde tiempos previos a la llegada de los españoles a América, y su uso sigue siendo parte de la medicina tradicional mexicana. Algunas de sus variedades, consumidas con cáscara, presentan efectos antirraquíticos y vermífugos. Además, un té elaborado con las hojas y cáscaras del fruto es empleado para aliviar cólicos menstruales. Por otro lado, el aceite extraído de la semilla o hueso se utiliza como tratamiento

para prevenir la caída del cabello, y cuando se macera en alcohol, se aplica para aliviar dolores reumáticos en las piernas. Las hojas también se emplean para tratar fiebre y migraña, ya sea mediante infusiones o aplicándolas directamente sobre la cabeza (Villanueva y Verti, 2007).

## **2.2 Nutraceúticos**

Un nutraceutico se describe como un alimento o un componente de este que tiene la capacidad de ofrecer beneficios para la salud, lo que incluye su potencial para prevenir y tratar diversas enfermedades (Astiasarán y Martínez, 2003).

### **2.2.1 Composición química**

La composición química del aguacate criollo mexicano puede variar considerablemente (Corrales-García & Méndez-Zúñiga, 2020). Un análisis realizado en 2019 demostró que el aceite en la pulpa tiende a fluctuar entre 16.20 y 32.2 gramos por cada 100 gramos de materia fresca. Este aceite incluye entre un 9.48 y 37.13 % de ácidos grasos poliinsaturados, un 49 a 68.13 % de ácidos grasos monoinsaturados y un 13.5 a 26 % de ácidos grasos saturados.

Por otro lado, las antocianinas en la cascara de disco fruto van desde 0.06 hasta 5.49 mg por gramo de materia fresca, exhibiendo un potencial antioxidante que varía entre 53.31 y 307.33  $\mu\text{mol ET}$  por gramo de materia fresca (Corrales-García *et al.*, 2019).

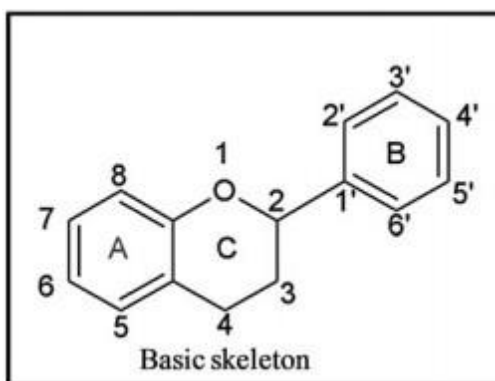
### **2.2.2 Ácidos grasos libres**

Los AGL cuentan con un grupo ácido sin estar ligados a un alcohol, lo que les confiere la capacidad de ser hidrolizados (Rodríguez *et al.*, 2016). Su cuantificación es ejecutada mediante la titulación del material con un álcali el cual tiene una concentración conocida, luego de esto lo obtenido se expresan en % AGL, calculados en términos de ácido oleico. Este parámetro, denominado índice de acidez, sirve como indicador de la calidad del aceite (Rodríguez *et al.*, 2016). Según Duque *et al.* (2013), el aceite de aguacate de la variedad “Hass”, extraído por el método de Soxhlet, presentó un índice de acidez del 1.68 %.

### 2.2.3 Flavonoides

Los flavonoides son compuestos secundarios producidos durante los procesos bioquímicos de las plantas. Están presentes en una amplia variedad de frutas y hortalizas, donde desempeñan funciones importantes, como favorecer el desarrollo de la planta, servir de defensa frente a plagas Y ayudar con algunos aspectos físicos como el color y en algunas ocasiones el olor (Panche *et al.*, 2016).

Estos polifenoles, de masa molecular reducida, presentan una estructura fundamental conformada por tres ciclos. (Figura 1). Según el carbono del ciclo C al que se conecta el anillo B y los grupos funcionales presentes en este, los flavonoides se dividen en diversos subtipos, como antocianinas, chalconas, flavanonas, flavonas, flavonoles e isoflavonoides (Panche *et al.*, 2016).



**Figura 1** Configuración esencial de los flavonoides (Panche *et al.*, 2016).

La ingesta de estos compuestos polifenólicos ha demostrado proporcionar diversas ventajas para la salud, entre las que destacan sus propiedades neutralizadoras de radicales libres, reductoras de la inflamación, preventivas de mutaciones genéticas y protectoras contra el cáncer. (Panche *et al.*, 2016).

#### **2.2.4 Antioxidantes**

Un agente antióxidante se describe como cualquier compuesto que, en cantidades reducidas en relación con un material susceptible a la oxidación, tiene la capacidad de ralentizar o impedir de manera notable el proceso oxidativo de ese material (Gutteridge, 1994). Estos compuestos son considerados nutraceuticos esenciales debido a los múltiples beneficios que aportan a la salud (Sharma y Bhat, 2009).

El proceso de oxidación metabólica es esencial para la preservación de las células; sin embargo, este proceso produce radicales libres y especies reactivas de oxígeno que pueden generar daños oxidativos en las células. Para mitigar estos efectos, las plantas ofrecen una fuente rica en antioxidantes naturales. En los seres humanos, el desequilibrio entre las especies reactivas de oxígeno y los sistemas de protección y reparación provoca el estrés oxidativo. Entre las defensas internas destacan enzimas como la superóxido dismutasa, la catalasa y la glutatión peroxidasa, junto con compuestos como la vitamina E, el ácido úrico y la albúmina presente en el suero sanguíneo. Junto a estas defensas internas, el aporte de antioxidantes a través de la dieta es fundamental. En los alimentos, la oxidación también desempeña un papel negativo, ya que es una de las principales causas de deterioro químico, lo que afecta la calidad nutricional, el color, el sabor, la textura e incluso la inocuidad, provocando fenómenos como la rancidez (Antolovich *et al.*, 2002).

Para que se lleve a cabo una reacción de oxidación, es necesaria la presencia de un material susceptible, un agente oxidante y un iniciador. La evaluación de los compuestos intermedios o finales permite determinar la capacidad antioxidante. Diversas estrategias se han desarrollado para este propósito, incluyendo la generación de radicales libres y la medición directa de su inhibición al añadir antioxidantes. Estas evaluaciones emplean métodos como fluorescencia, quimioluminiscencia, consumo de oxígeno y medición de la absorbancia de los productos finales (Antolovich *et al.*, 2002).

Entre las técnicas químicas para medir la capacidad antioxidante sobresalen el método ABTS (ácido 2,2'-azino-bis(3-etilbenzotiazolina-6-sulfónico)) y el DPPH (2,2-difenil-1-picrilhidrazilo). En el caso del ABTS, el radical ABTS<sup>+</sup> se forma oxidando el compuesto con un agente oxidante, como persulfato de potasio, bajo condiciones controladas. Este radical, caracterizado por un color azul verdoso, es estable y reacciona con los antioxidantes, reduciéndose y provocando un cambio de color proporcional a la capacidad antioxidante de la muestra. La absorbancia se mide a 734 nm, una longitud de onda cercana al infrarrojo que minimiza interferencias de otros compuestos absorbentes y la turbidez de la muestra. Este método presenta ventajas importantes, como la posibilidad de analizar compuestos hidrofílicos y lipofílicos, además de ofrecer rapidez y reproducibilidad en los resultados (Kuskoski *et al.*, 2004).

Por otro lado, el método DPPH se basa en la reducción del radical DPPH, de color violeta, al reaccionar con antioxidantes que donan un hidrógeno, convirtiéndolo en una forma no radical (DPPH-H) de color amarillo. La reacción se lleva a cabo en condiciones simples, directamente en solución, sin necesidad de preparación previa del reactivo. En el análisis, se registra la reducción de la absorbancia a 517 nm, lo que guarda una relación directa con la capacidad antioxidante de la muestra evaluada. Este método es ampliamente utilizado por su simplicidad, rapidez y por la estabilidad del radical libre (Kuskoski *et al.*, 2004).

### **2.3 Liofilización**

La liofilización es un proceso de deshidratación avanzado que preserva las propiedades nutricionales, sensoriales y estructurales de los alimentos mediante la eliminación del agua a través de sublimación. Este método minimiza la contracción del producto y garantiza una mayor porosidad, lo que permite una rehidratación eficiente sin comprometer el sabor, aroma o color originales. Sin embargo, es un proceso costoso y complejo, afectado por variables como la temperatura de congelación y la presión durante el secado (Sánchez-Santillán *et al.*, 2016; Rodríguez-Pérez *et al.*, 2020).

La liofilización es una técnica ampliamente utilizada en la industria alimentaria para el secado de alimentos, cuyo uso comenzó a implementarse en la década de 1950 (Brennan, 2006). Este método aprovecha la capacidad del agua congelada para sublimarse, es decir, pasar directamente de estado sólido a vapor, al aplicar condiciones de vacío (Baltes, 2007).

El proceso de liofilización consta de dos etapas fundamentales (Barbosa, 2000):

1. Congelación del producto.
2. Secado por sublimación directa del hielo en un entorno de presión reducida.

Barbosa (2000) señala que el proceso de congelación debe realizarse de manera rápida para obtener cristales de hielo pequeños y amorfos en el producto. La etapa de secado, por su parte, se lleva a cabo en condiciones de presión baja que favorecen la sublimación.

Según Ibarz y Barbosa (2005), la liofilización requiere considerar tres aspectos clave en su diseño:

- El grado de vacío en la cámara de secado.
- La energía radiante proporcionada al alimento.
- La temperatura del condensador.

El secado se utiliza en algunos casos para mantener el tamaño y la forma original de los alimentos. En este contexto, la liofilización permite disminuir el peso del producto sin que su volumen se vea significativamente afectado (Potter, 1978).

Entre los alimentos que se procesan mediante este método se encuentran extractos como el café y el té, así como frutas, verduras, carnes y pescados (Barbosa, 2000). Según Baltes (2007), los productos liofilizados tienen superficies amplias y pueden ser vulnerables a la exposición al oxígeno del aire, por lo que es fundamental utilizar un empaquetado adecuado, generalmente con gases inertes como el nitrógeno, para asegurar su conservación. Bajo

condiciones óptimas, estos productos pueden mantenerse en buen estado por hasta tres años. La principal ventaja de la liofilización frente a otros métodos radica en la excelente calidad que se logra en los alimentos procesados (Brennan, 2006).

## **2.4 Evaluación sensorial de los alimentos**

Las características sensoriales de los alimentos son aquellos atributos que pueden percibirse a través de los sentidos humanos (Anzaldúa, 2005). La evaluación sensorial implica la implementación de principios y técnicas específicas diseñadas para analizar las reacciones humanas hacia diferentes productos e ingredientes. Estas técnicas tienen un amplio uso en diversos sectores, incluyendo alimentos, productos agropecuarios, artículos para el hogar y productos de cuidado personal (Hernández, 2007).

Los métodos de evaluación sensorial son instrumentos utilizados para determinar la calidad de los alimentos. A los miembros de un panel de evaluación se les solicita emplear sus sentidos, como la visión, oído, el tacto, el olfato y la vista, para analizar y calificar las propiedades específicas de un alimento. (Charley, 1999).

Los métodos sensoriales son fundamentales en la evaluación de productos alimenticios, ya que permiten medir la aceptabilidad desde la perspectiva del consumidor. Existen pruebas afectivas, como las pruebas de preferencia y aceptabilidad, en las que los panelistas califican sus percepciones sobre características como sabor, aroma y textura. Estas evaluaciones se combinan con análisis estadísticos para determinar diferencias significativas entre tratamientos y su impacto en la percepción global del producto (Lozano-Acevedo *et al.*, 2021).

En este estudio, se emplearon pruebas de aceptación sensorial para evaluar la percepción de los consumidores hacia los productos desarrollados. Para ello, se utilizó la escala hedónica de nueve puntos, ampliamente reconocida en investigaciones sensoriales por su confiabilidad y capacidad para producir resultados estadísticamente robustos.

La escala hedónica está diseñada con categorías basadas en intervalos iguales, lo que permite asignar valores numéricos a las respuestas y realizar análisis estadísticos paramétricos. Este método tiene la ventaja de ser independiente de factores como la región o el tamaño del panel, asegurando estabilidad en los resultados.

En la escala hedónica utilizada, las categorías y su traducción al español fueron las siguientes:

1. Me gusta extremadamente
2. Me gusta mucho
3. Me gusta moderadamente
4. Me gusta poco
5. Ni me gusta ni me disgusta
6. Me disgusta poco
7. Me disgusta moderadamente
8. Me disgusta mucho
9. Me disgusta extremadamente

Durante el análisis, los resultados obtenidos con esta escala pueden transformarse en datos de preferencia de pares o de ordenamiento, dependiendo del objetivo del estudio. Aunque es posible reducir la escala a versiones más cortas (siete o cinco puntos), esta práctica puede limitar la sensibilidad del método, especialmente si los participantes tienden a evitar las categorías extremas. Asimismo, es fundamental mantener el equilibrio entre categorías

positivas y negativas, incluso si los productos evaluados no suelen ser considerados malos, para garantizar un análisis imparcial y confiable.

Este enfoque permitió evaluar de manera precisa la aceptación sensorial de los productos durante las pruebas realizadas, proporcionando información clave para interpretar las preferencias de los consumidores.

## **2.5 Literatura citada**

Anzaldúa, M. A. 2005. La evaluación sensorial de los alimentos en la teoría y en la práctica. Acribia (Ed.). Zaragoza, España.

Álvarez Castro, Nicté Verénice. García Corrales, Joel. Hernández Montes, Arturo. Peña Valdivia, Cecilia Beatriz. García Mateos, Rosario. (2013). Desarrollo de un dulce con potencial nutraceutico a partir del fruto de Xoconostle edulcorado con Neotame. Tesis de Maestría. Chapingo, Méx.

Antolovich, M., Prenzler, P. D., Patsalides, E., McDonald, S., & Robards, K. (2002). Methods for testing antioxidant activity. *The Analyst*, 127(2), 183–198.

Astiasarán, I., & Martínez, A. (2003). Alimentos, composición y propiedades (2ª ed.). McGraw-Hill Interamericana. España. 370 p.

Acosta Díaz, E., Almeyda León, I. H., & Hernández Torres, I. (2013). Evaluación de aguacates criollos en Nuevo León, México: región sur. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 4(4), 531–542.

Baltes W. 2007. Química de los alimentos. Acribia (Ed.). Zaragoza España.

Barbosa, C. G. 2000. Deshidratación de alimentos. Acribia (Ed.). Zaragoza, España.

Barrientos-Priego, A. F., Martínez-Damián, M. T., Vargas-Madriz, H. y Lázaro-Dzul, M. O. (2016). Effect of preharvest calcium spraying on ripening and chilling injury in ‘Hass’ (*Persea americana* Mill.) avocado. *Revista Chapingo Serie Horticultura*, 22(3), 145-159.

- Bergh, B., & Ellstrand, N. (1986). Taxonomy of the avocado. California Avocado Society. Yearbook 70:135-145.
- Ben-Ya'acov, A. y Barrientos P., A (2003). The *Persea* germplasm resources potential as discovered during an international collection project. V Congreso Mundial del Aguacate. International Avocado Society, España.
- Bergh, J. E., & Lahav, N. (1996). Freeze-drying (lyophilization): Applications in the preservation of food and other biological materials. *Journal of Food Engineering*, 29(1), 69–83.
- Boza, E. J., Tondo, C. L., Ledesma, N., Campbell, R. J., Bost, J., Schnell, R. J., & Gutiérrez, O. A. (2018). Genetic differentiation, races and interracial admixture in avocado (*Persea americana* Mill.), and *Persea* spp. Evaluated using SSR markers. *Genetic Resources and Crop Evolution*, 65(4), 1195–1215. <https://doi.org/10.1007/s10722-018-0608-7>
- Brennan J. G. 2006. Manual del procesado de los alimentos. Acribia (Ed.). Zaragoza España.
- Brennan, J. G., Butters, J. C., & ND Lilly, A. E. V. (1998). Las operaciones unitarias de la Ingeniería de los Alimentos. Acribia.
- Campos R., E., Espíndola B., M., & Mijares O., P. (2008). Diversidad del género *Persea* y sus usos. Fundación Salvador Sánchez Colín, Centro de Investigaciones Científicas y Tecnológicas del Aguacate en el Estado de México (CICTAMEX), S.C. Coatepec Harinas, México. 65 p.
- CEDRSSA. (2017). Reporte - Caso de Exportación: El Aguacate. 29.
- Ceballos, A., Giraldo, G. & Orrego, C., 2012. Effect of freezing rate on quality parameters of freeze dried soursop fruit pulp. *Journal of food engineering*, 111(2), pp. 360-365.
- Chanderbali, A. S., Soltis, D. E., Soltis, P. S., & Wolstenholme, B. N. (2013).
- Charley H. 1999. Tecnología de alimentos. Limusa (Ed.). México

- Corrales-García, J., & Méndez-Zúñiga, S. (2020). Criollo avocado of mexican race (*Persea americana* var. *drymifolia*): an underutilized species in horticulture. November, 4–7.
- Corrales-García, J., Castro-Parra, J., Landa-Salgado, P. y Espinal-Hernández, P. (2022). Orden de importancia agrícola y económica de las principales frutas y hortalizas de México. Memorias del X Congreso Internacional y XXIV Congreso Nacional de Ciencias Agronómicas. Chapingo, Méx. Octubre 4 – 7, 2022.
- Corrales-García, j.; García-Mateos, M.R.; Martínez-López, e.; Barrientos-Priego, a. f.; Ybarra-Moncada, M.C., Ibarra-Estrada, e.; Méndez-Zúñiga, s. Becerra-Morales, \* (2019). Anthocyanins and oil content, profile fatty acids and antioxidant activity of Mexican landrace avocado fruits. Plant Foods for Human Nutrition. June 2019, Volume 74, Issue 2, pp 210–215.
- De la Luz Sánchez-Pérez.1999. Recursos genéticos de aguacate (*Persea americana* Mill.) y especies afines en México. In: Proceedings of Fourth World Avocado Congress. México, 1999. Revista Chapingo Serie Horticultura 5: 7-18.
- Douhan, G. W., Fuller, E., McKee, B., & Pond, E. (2011). Genetic diversity analysis of avocado (*Persea americana* Miller) rootstocks selected under greenhouse conditions for tolerance to phytophthora root rot caused by *Phytophthora cinnamomi*. Euphytica, 182(2), 209–217.
- Dreher, M. L., & Davenport, A. J. (2013). Hass avocado composition and potential health effects. Critical Reviews in Food Science and Nutrition, 53(7), 738–750.
- Duester, K. C. (2001). Avocado fruit is a rich source of beta-sitosterol. Journal of the American Dietetic Association, 101(4), 404–405.
- Duque, A. M. R., Londoño-Londoño, J., Álvarez, D. G., Paz, Y. B., & Salazar, B. L. C. (2013). Comparación del aceite de aguacate variedad Hass cultivado en Colombia, obtenido por fluidos supercríticos y métodos convencionales:

Una perspectiva desde la calidad. Revista Lasallista de Investigación, 9(2), 151–161.

FAO. (2020). Cultivos: Aguacate. FAOSTAT Cultivos. <http://www.fao.org/faostat/es/#data/QC>

Gutteridge, J. M. C. (1994). Biological origin of free radicals and mechanisms of antioxidant protection. *Chemico-Biological Interactions*, 91(2), 133–140.

Galindo-Tovar, M. E., Ogata-Aguilar, N., & Arzate-Fernández, A. M. (2008). Some aspects of avocado (*Persea americana* Mill.) diversity and domestication in Mesoamerica. *Genetic Resources and Crop Evolution*, 55(3), 441–450. <https://doi.org/10.1007/s10722-007-9250-5>

Hernández, M. A. 2007. Evaluación sensorial de productos agroalimentarios. Universidad Autónoma Chapingo. México. 190 p.

Ibarz A. y Barbosa, C. 2005. Operaciones unitarias en la ingeniería de los alimentos. Editorial Mundi-Prensa. Madrid, España.

Kuskoski, E. M., Asuero, A. G., Troncoso, A. M., García-Parilla, M. C., & Fett, R. (2004). Actividad antioxidante de pigmentos antocianicos. *Revista Brasileira de Ciência e Tecnologia de Alimentos*, 24(4), 691–693.

Kuskoski, E. M., Asuero, A. G., Troncoso, A. M., Mancini-Filho, J., & Fett, R. (2004). Aplicación de diversos métodos químicos para determinar actividad antioxidante en pulpa de frutos. *Ciência e Tecnologia de Alimentos*, 24(4), 726–732.

Lahav, E. 1996. Avocados. In: Janick, J. and Moore, J. N. (Eds.). *Fruit breeding. Tree and tropical fruits*. John Wiley and Sons. 113-166 pp

Litz, R.; Efendi, D.; Raharjo, S.H.T; Padilla, G; & Moon, P.A. 2007. Genetic transformation of avocado with S-adenosylmethionine hydrolase (samase) and evaluation of transformants after three years. *Pro VI World Avocado Congr CD*, 10, 12-16.

- Lozano-Acevedo, P., Hernández-García, M., & Torres-Morales, R. (2021). Análisis estadístico aplicado a la evaluación sensorial de alimentos: Diferencias significativas entre tratamientos. *Revista de Ciencia y Tecnología Alimentaria*, 19(2), 123–135. <https://doi.org/10.1016/j.rcta.2021.02.003>
- Lozano-Acevedo, R., García, M., & López, P. (2021). Métodos sensoriales para la evaluación de aceptabilidad en alimentos. *Journal of Sensory Studies*, 36(2), 234-245.
- López-López, L., & Morales-Sánchez, E. (2016). Estudio sobre la comercialización y manejo postcosecha del aguacate criollo de raza mexicana (*Persea americana* var. *drymifolia*) en México. *Revista de Tecnología y Ciencia Agropecuaria*, 10(3), 45-55.
- Marqués, L.G. & Freire, J.T., 2005. Analysis of freeze-drying of tropical fruits. *Drying Technology*, 23(9-11), pp.2169-2184.
- Muñoz, J. A. M.; Alvarado, O. C. & Encina, Z. Ch. 2011. Fitoesteroles y fitoestanoles: Propiedades saludables *Revista Horizonte Médico Volumen 11* (2), Julio-diciembre.
- Méndez-Zúñiga SM, Corrales-García JE, Gutiérrez-Grijalva EP, García-Mateos R, Pérez-Rubio V, Heredia JB. Fatty Acid Profile, Total Carotenoids, and Free Radical-Scavenging from the Lipophilic Fractions of 12 Native Mexican Avocado Accessions. *Plant Foods Hum Nutr*. 2019 Dec;74(4):501-507. doi: 10.1007/s11130-019-00766-2. PMID: 31482386.
- Panche, A. N., Diwan, A. D., & Chandra, S. R. (2016). Flavonoids: An overview. *Journal of Nutritional Science*, 5.
- Pauker, Bernstein, Poelf, & Rosenthal, 1992. California Avocado Society 1992 Yearbook 76: 137-144
- Potter N. N. 1978. Ciencia de los alimentos. Acribia (Ed.). Zaragoza España.
- Ramos-Aguilar, A.L., Ornelas-Paz, J., Tapia-Vargas, L. M., Gardea- Béjar, A. A., Yahia, E. M., de Jesús Ornela-Paz, J., ...& Ibarra-Junquera, V. (2021).

- Comparative study on the phytochemical and nutrient composition of ripe fruit of Hass and Hass type avocado cultivars. *Journal of Food Composition and Analysis*, vol. 97.
- Restrepo, A.; M.; Rojano, B. 2009. Determinacion de la vida útil de fresa (*Fragaria ananassa* Duch.) fortificada con vitamina E. *DYNA*, (S.I.), v. 76, n. 159, p. 163-175, jul. 2009. ISSN 2346-2183. 24 enero 2023.
- Rodríguez-Pérez, C., Morales, A., & Sánchez, J. (2020). Aplicación de la liofilización en la industria alimentaria para la preservación de productos perecederos. *Journal of Food Preservation*, 45(3), 1-12.
- Rodríguez-Pérez, J. R., Torres, P. M., & Fernández, A. G. (2020). Optimización de la liofilización como técnica de conservación de productos perecederos. *Journal of Food Preservation*, 44(5), e14435.
- Rodríguez-Rodríguez, R., García-Fajardo, J. A. y Espinosa-Andrews, H. (2016) Ácidos grasos: clasificación e importancia en la salud humana. En H. Espinosa A., E. García M. y E. Gastélum M. (Eds.) *Los compuestos bioactivos y tecnologías de extracción* (pp. 9-32). Zapopan, México: CIATEJ.
- S. Pérez JDL, Jaimes-Lara MG, Salgado-Garciglia R, López Meza JE (2009) Extractos de raíz de aguacate mexicano (*Persea americana* var. *Drymifolia*) inhiben el crecimiento micelial del oomiceto *Phytophthora cinnamomi*. *Eur J Plant Pathol* 124:595– 601. .
- SAGARPA (Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo rural, P. y A. (2011). Monografía de cultivos. Aguacate.
- SAGARPA (Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo rural, P. y A. (2017). Planeación agrícola nacional 2017-2030. Aguacate mexicano. In *Planeación Agrícola Nacional 2017-2030*.
- Sharma, O. P., & Bhat, T. K. (2009). DPPH antioxidant assay revisited. *Food Chemistry*, 113(4), 1202–1205.

SIAP. (2020a). Aguacate.

SIAP. (2020b). Aguacate criollo

Scora, R. W., & Bergh, B. (1990). The origins and taxonomy of avocado (*Persea americana*) Mill Lauraceae. *Acta Horticulturae*, 275, 387–394.

Secretaría de Agricultura, Ganadería Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación (SAGARPA). 2007.

Smith, C. E. J. 1966. Archeological evidence for selection in avocado. *Economic Botany*. 20: 169-175.

Souza, D. S., Marques, L. G., Gomes, E. D. B., & Narain, N. (2015). Lyophilization of avocado (*Persea americana* Mill.): effect of freezing and lyophilization pressure on antioxidant activity, texture, and browning of pulp. *Drying technology*, 33(2), 194-204.

Sánchez-Santillán, R., Pérez-González, M., & Gómez-Díaz, L. (2016). Factores que afectan la eficiencia de la liofilización en alimentos. *Revista Mexicana de Ingeniería Química*, 15(3), 789–798.

Taxonomy and botany. *The Avocado: Botany, Production and Uses*, January, 31–50.

Velázquez P., J. A. 2006. Identificación del aguacate como un rubro importante de grandes oportunidades comerciales, según los acuerdos de integración, los nuevos tratados comerciales y el comercio mundial globalizado. Secretaría de productividad y competitividad-Gobernación de Antioquía, Colombia. 103 p.

Villanueva, M., & Verti, S. (2007). El aguacate: Oro verde de México, orgullo de Michoacán. In *Proceedings of the VI World Avocado Congress* (p. 7). Viña del Mar, Chile.

Valdez, A. R.C.; V. M.M.; Cruz, M.A.; Sandoval, C.E.; Orozco, O.A. & Calderón V. C. 2017. Caracterización nutricional de colectas de aguacate de Guasave,

Sinaloa con Alto Contenido de Aceite. Memorias del V Congreso Latinoamericano del aguacate. Ciudad Guzmán, Jalisco, México. Pp 345-352.

### **3 DESARROLLO DE UN PRODUCTO ESTABLE Y SENSORIALMENTE ACEPTABLE ELABORADO A BASE DE AGUACATE CRIOLLO LIOFILIZADO**

#### **3.1 Introducción**

El aguacate criollo de raza mexicana (*Persea americana* var. *drymifolia*) representa una herencia biológica y cultural única para México, país que se posiciona como el principal productor, consumidor y exportador de aguacate a nivel mundial. En 2020, la superficie cultivada de este frutal alcanzó las 241,140 hectáreas, siendo el segundo frutal con mayor extensión en el país, después del limón. Con un volumen anual de producción de casi 2.4 millones de toneladas, un valor económico superior a los 49 mil millones de pesos y exportaciones que superaron los 64 mil millones de pesos, el aguacate ocupa un lugar destacado en la economía agrícola mexicana (Corrales-García *et al.*, 2022).

Sin embargo, la mayor parte de la atención comercial se centra en la variedad "Hass", reconocida por su resistencia a daños físicos y su prolongada vida de anaquel, características que facilitan su exportación a mercados internacionales. En contraste, el aguacate criollo, ampliamente consumido desde épocas prehispánicas, ha quedado relegado a mercados locales debido a su alta perecibilidad, atribuida a su cáscara delgada y fragilidad frente a daños físicos (López-López & Morales-Sánchez, 2016). A pesar de estas limitaciones, existen evidencias científicas que destacan las propiedades nutraceuticas superiores del aguacate criollo en comparación con la variedad "Hass". Estas incluyen un mayor contenido de compuestos bioactivos como antocianinas, ácidos grasos monoinsaturados y poliinsaturados, así como un contenido elevado de aceite y vitamina E, lo que le confiere propiedades antioxidantes, antiinflamatorias y beneficiosas para la salud cardiovascular (Corrales-García *et al.*, 2019; Méndez-Zúñiga *et al.*, 2019; Valdez *et al.*, 2017).

El desafío radica en cómo conservar y aprovechar estas ventajas nutraceuticas frente a la naturaleza perecedera del fruto. El pardeamiento enzimático, causado por la oxidación de compuestos fenólicos al entrar en contacto con el oxígeno, limita significativamente la vida útil del aguacate criollo, incluso bajo condiciones de refrigeración o congelación (Pauker *et al.*, 1992). Esto ha impulsado la búsqueda de alternativas tecnológicas que permitan estabilizar este fruto, preservando su valor sensorial y nutraceutico.

En este contexto, la liofilización se presenta como una alternativa prometedora para prolongar la vida útil del aguacate criollo. Este proceso, basado en la sublimación del agua contenida en el producto bajo condiciones de vacío, ha demostrado ser efectivo para preservar las características originales de alimentos altamente perecederos, incluyendo sabor, textura, color y actividad biológica (Bergh & Lahav, 1996; Brennan *et al.*, 1998). Además, al reducir el contenido de agua sin alterar significativamente el volumen, la liofilización facilita la comercialización de alimentos en mercados internacionales y prolonga su estabilidad en almacenamiento (Souza *et al.*, 2015; Marques & Freire, 2005).

Los estudios realizados en aguacates, principalmente en la variedad "Hass", han mostrado resultados alentadores respecto al uso de la liofilización como método de conservación. Este método permite obtener productos de alta calidad sensorial y nutraceutica, con una estructura ligera y porosa que facilita su transporte y rehidratación (Alvarez-Castro *et al.*, 2014). Sin embargo, hasta ahora, no se han explorado de manera exhaustiva los beneficios de esta tecnología en el aguacate criollo de raza mexicana. La falta de estudios específicos sobre este tema deja una brecha de conocimiento respecto a la viabilidad técnica y comercial de liofilizar esta variedad de aguacate.

Por lo tanto, el objetivo principal de esta investigación es evaluar el impacto de la liofilización en las características sensoriales, nutraceuticas y de estabilidad del aguacate criollo de raza mexicana. Se busca desarrollar un producto alimenticio que sea sensorialmente aceptable, con una vida de anaquel prolongada y con mínimas alteraciones en su composición bioactiva. Este estudio no solo tiene

implicaciones económicas al agregar valor a una variedad subutilizada, sino también sociales, al rescatar y promover el consumo de un recurso tradicional con alto potencial en mercados internacionales.

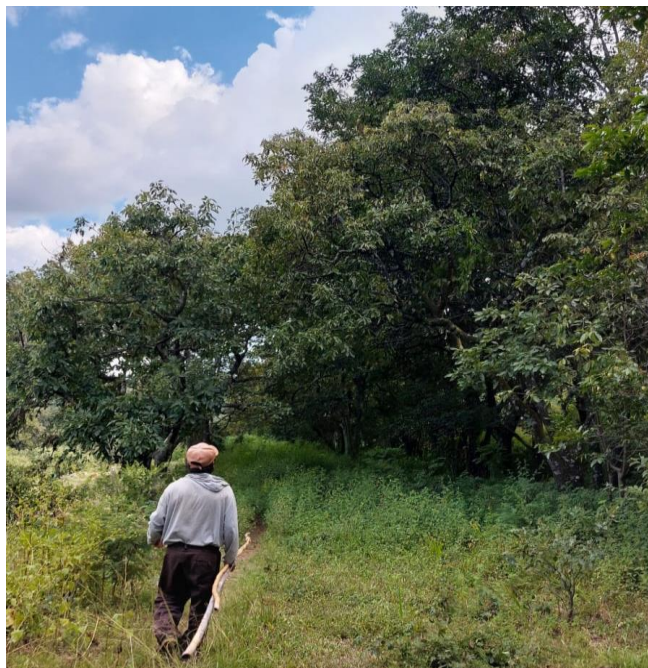
En conclusión, la investigación plantea una estrategia innovadora para incrementar la producción, comercialización y consumo del aguacate criollo, superando las limitaciones asociadas a su perecibilidad mediante el uso de tecnologías avanzadas de conservación en frío. Si se demuestra que la liofilización es eficaz, podría abrirse un nuevo panorama para el aprovechamiento de este valioso recurso agrícola mexicano, beneficiando tanto a productores como a consumidores.

## **3.2 Materiales y métodos**

### **3.2.1 Origen del material vegetal**

Se recolectaron 250 frutos de aguacate criollo *Persea americana* var. *drymifolia* de cinco diferentes árboles en un huerto establecido en el valle de Tochimilco, Puebla; entre las coordenadas 18° 50' - 19° 02' de latitud norte y 97° 18' - 97° 26' de longitud oeste (Anexo A-1 se muestra el aspecto visual de estos árboles con sus respectivas coordenadas). El valle posee un clima templado subhúmedo con precipitaciones concentradas en el verano (Cwb), definido por una temperatura promedio al año de 19.4 °C y una precipitación media anual de 882 mm (Sánchez *et al.*, 2019).

La recolección y el traslado de la fruta se realizaron en jvas de madera cubiertas con papel, cuidando siempre que los frutos estuvieran divididos e identificados en cinco diferentes grupos de acuerdo con el árbol del cual fueron cosechados. Posteriormente, se colocaron en bandejas de plástico para su manipulación dentro del laboratorio frigorífico experimental, ubicado en el Departamento de Ingeniería Agroindustrial de la Universidad Autónoma Chapingo.



**Figura 2** Árboles de aguacate criollo en Tochimilco, Puebla.

### **3.2.2 Liofilización de las muestras**

La primera operación que se llevó a cabo fue el lavado, el cual se realizó sumergiendo la fruta en una solución de cloro a 200 ppm durante 30 minutos, para retirar posibles impurezas y así evitar que afectara el experimento. Luego de esto, se continuó con el secado del fruto y después el pesado del aguacate, utilizando una balanza digital y anotando los pesos respectivos de las muestras. El proceso se llevó a cabo con alta higiene para evitar cualquier tipo de contaminación cruzada. Cada grupo de frutos se consideró como un tratamiento, definiéndose los tratamientos de acuerdo con el árbol del cual fueron cosechados y se identificaron como: T1, T2, T3, T4 y T5, respectivamente. Para realizar los cortes del fruto, se usaron cuchillos de acero inoxidable, bien afilados y previamente esterilizados. Se hicieron rodajas con un grosor uniforme de  $0.5 \text{ cm} \pm 0.1 \text{ cm}$ . Posteriormente, las rodajas se sumergieron en una solución de ácido ascórbico al 5 %, con el propósito de prevenir el pardeamiento enzimático. Este tratamiento se realiza para inhibir la actividad de la polifenoloxidas (PPO), reduciendo la oxidación de compuestos fenólicos responsables del oscurecimiento, y ayudar a conservar la apariencia y calidad del producto.

Posteriormente las rodajas de aguacate se sometieron a congelación rápida (con nitrógeno líquido), ya que al utilizar este método se evitó romper el tejido del fruto o causar algún daño que afectara su estructura y propiedades nutricionales. Luego de la congelación, las muestras se llevaron al equipo de liofilización, modelo 7670520 (LABCONCO, Kansas, USA) a  $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$  y 0.05 mbar, durante 12 horas.

Una vez que se estabilizaron los parámetros del proceso de liofilización ( $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$  y 0.05 mbar), los frascos que contenían las rebanadas congeladas de aguacate criollo se conectaron a la cámara de secado del equipo. Durante 12 horas, se registraron cada hora tanto el peso de las muestras como su actividad acuosa ( $a_w$ ). Una porción de las muestras liofilizadas se almacenó a temperatura ambiente en bolsas herméticas tipo Ziploc®, diseñadas para minimizar el contacto con el oxígeno, y se guardó en un lugar fresco, alejado de la luz solar directa, hasta su análisis, realizado 90 días después. La otra parte del producto liofilizado se utilizó inmediatamente después de haber sido liofilizado.



**Figura 3** Proceso de liofilización de pulpa de aguacate criollo: a) corte y despulpe, b) congelación y c) liofilización.

### 3.2.3 Preparación de la muestra para análisis químicos

Se tomó 1 g de pulpa en base seca y se mezcló con 10 mL de una solución de acetona/agua (70:30 v/v). Las muestras fueron agitadas en un vórtex a 3,000 rpm durante 3 minutos y posteriormente sometidas a ultrasonido por 15 minutos. Luego se congelaron a -4 °C por 15 minutos y se centrifugaron a 7,000 rpm. El sobrenadante obtenido fue filtrado, y el proceso de extracción se repitió una vez más. Los sobrenadantes de ambas extracciones se combinaron y el volumen total se ajustó a 25 mL.

### 3.2.4 Determinación de fenoles totales

Se determinó la concentración de fenoles totales en microplacas por medio del ensayo de Folin-Ciocalteu de acuerdo con la metodología de Herald *et al.* (2012) con modificaciones. Se mezclaron tanto el ácido gálico a distintas concentraciones como los extractos de aguacate criollo (25 µL) con una solución al 20 % de carbonato de sodio (Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>, 30 µL), agua destilada (125 µL) y el reactivo de Folin-Ciocalteu (20 µL, diluido previamente 1:10 con agua destilada). Después de 30 minutos de reacción, se determinó la absorbancia a 760 nm utilizando un lector de microplacas multidetector Synergy® HT con inyectores, operado mediante el software de análisis Gen5 (Biotek Instruments Inc., Winooski, VT, USA).

### 3.2.5 Extracción de aceite

La extracción de aceite se realizó para cada uno de los cinco tratamientos, cada uno con tres repeticiones, utilizando 20 g de pulpa seca por repetición. La extracción se llevó a cabo mediante maceración en 100 mL de hexano durante 48 horas. Después de la maceración, se aisló la fase líquida del resto de sólido y se concentró utilizando un rotavapor. Luego, el aceite obtenido se recolectó en frascos color ámbar, se pesó y se almacenó en refrigeración hasta su posterior análisis. La Ecuación (1) muestra el cálculo del porcentaje de lípidos totales:

$$\text{Porcentaje de lípidos totales} = 1 + \frac{\text{Peso del aceite}}{\text{Peso de la pulpa seca}} \times 100$$

Donde:

Peso del aceite: es la diferencia de peso del frasco con el aceite y el peso inicial del frasco vacío.

Peso de la pulpa seca: es 20 g aprox. (pulpa base seca utilizada por repetición).

### **3.2.6 Determinación de índice de acidez**

El índice de acidez del aceite se evaluó siguiendo la metodología establecida en la norma mexicana NMX-F-101-SCFI-2012. Esta norma indica que, en la mayoría de las grasas y aceites, el porcentaje de ácidos grasos libres se calcula en términos de ácido oleico; sin embargo, en el caso de los aceites de coco, se expresa generalmente como ácido láurico, mientras que en el aceite de palma se utiliza el ácido palmítico como referencia. La Ecuación (2) presenta el cálculo para determinar el porcentaje de ácidos grasos libres.

$$\text{Porcentaje de ácidos grasos libres} = 1 + \frac{VxNx28.2}{Pm}$$

En donde:

- Meq: Representa el miliequivalente El compuesto químico utilizado como referencia para los ácidos grasos fue el ácido oleico, con un valor de 0.282.
- N: Este valor representa la normalidad de la solución de hidróxido de sodio empleada en el proceso de titulación.
- V: Indica el volumen, en mililitros, de la solución valorada de hidróxido de sodio consumida durante la titulación de la muestra.
- Pm: Se refiere a la masa de la muestra, expresada en gramos.

### **3.2.7 Determinación de índice de peróxidos**

La prueba se basa en la co-oxidación de Fe (II) a Fe (III) mediante hidroperóxidos de la muestra (grasa) y la formación del complejo rojizo de Fe (III)-tiocianato que

se lee a 500 nm en un espectrofotómetro. Se introducen varias modificaciones para permitir la determinación (Semeniuc, 2009; Shantha, 1994). Los reactivos se preparan de acuerdo con la norma ISO 3976 IDF 74:2006, con algunas modificaciones. Los resultados se expresan en mEq O<sub>2</sub>/Kg de grasa. La Ecuación (3) muestra el cálculo para el valor de peróxidos.

$$\text{Valor de peróxidos (PV)} = \frac{\text{Abs}}{(55.84) (w)} \times \frac{1}{b} [\text{mEq O}_2/\text{Kg de grasa}]$$

En donde:

- w: Peso de la muestra (g)
- Abs: Absorbancia
- 55.84: Peso atómico de Fe<sup>3+</sup>
- b: La pendiente de la curva de calibración de Fe (III)

### 3.2.8 Evaluación sensorial

Se llevó a cabo una prueba de aceptación utilizando una escala hedónica de 9 puntos para evaluar la aceptabilidad general de cinco tratamientos de un producto (dip) desarrollado con aguacate criollo de raza mexicana liofilizado. El dip fue preparado siguiendo el siguiente procedimiento: Para analizar la cinética de rehidratación, se utilizó 1 gramo de aguacate liofilizado, realizando mediciones minuto a minuto durante los primeros 3 minutos de inmersión del producto en agua purificada a una temperatura constante de 25 °C. Posteriormente, se tomaron medidas a intervalos regulares, incrementando un minuto adicional con cada medición, hasta identificar el punto en el cual el producto alcanzó estabilidad en su peso. Este procedimiento permitió determinar el momento en que dejó de absorber agua, estableciendo así que se había logrado la rehidratación máxima. La evaluación sensorial se llevó a cabo a ciegas con la participación de 100 consumidores. Se utilizaron muestras de pulpa de aguacate criollo liofilizadas, evaluadas tras 90 días de almacenamiento a 25 °C y en oscuridad. Además, se ofrecieron agua y galletas para enjuagar el paladar entre la degustación de cada muestra. Las muestras fueron codificadas con tres dígitos y presentadas de

manera monádica (una a la vez) a cada panelista, quien consumió la porción completa (aproximadamente 2 g) antes de emitir su evaluación. La escala hedónica empleada abarcó del 1, que representaba "me gusta extremadamente", al 9, que indicaba "me disgusta extremadamente". Este diseño experimental aseguró la objetividad y precisión en la recopilación de los datos sensoriales.

### **3.2.9 Análisis estadístico**

La planificación de la investigación y el análisis de los resultados se llevaron a cabo utilizando un diseño completamente al azar (DCA), en el cual cada árbol de aguacate se consideró como un tratamiento. Los datos obtenidos fueron sometidos a un análisis de varianza (ANOVA) y se realizaron comparaciones de medias mediante la prueba de Tukey ( $\alpha = 0.05$ ) utilizando el software SAS (Statistical Analysis System 9.0 para Windows). Para la evaluación sensorial, se empleó un diseño de bloques completamente al azar, complementado con una comparación de medias utilizando la prueba de diferencia mínima significativa (LSD).

## **3.3 Resultados y discusión**

### **3.3.1 Contenido de fenoles totales**

Los valores de fenoles totales obtenidos en los cinco tratamientos de pulpa de aguacate criollo liofilizada oscilaron entre 2.37 y 2.55 mg equivalentes de ácido gálico por gramo de base seca (mg EAG g<sup>-1</sup> bs), sin encontrar diferencias significativas entre tratamientos (Cuadro 1). Estos resultados sugieren que, dentro de esta muestra, el contenido de fenoles es bastante uniforme, lo que indica que factores adicionales o variaciones genéticas no parecen influir significativamente en los árboles analizados. Según estudios previos, los niveles de fenoles totales en aguacates suelen estar influenciados principalmente por la variedad y el estado de madurez, lo que refuerza la hipótesis de uniformidad observada en este caso (López-Cervantes *et al.*, 2020).

**Cuadro 1** . Contenido total de fenoles (mg EAG g<sup>-1</sup> bs) y actividad antioxidante (mMol ET g<sup>-1</sup> bs) en pulpa liofilizada de aguacate criollo de raza mexicana. (Media  $\pm$  Desviación estándar).

| Fenoles totales y actividad antioxidante |                                                  |                                                          |
|------------------------------------------|--------------------------------------------------|----------------------------------------------------------|
| Pulpa Liofilizada                        | Contenido de fenoles (mg EAG g <sup>-1</sup> bs) | Actividad antioxidante ABTS (mMol ET g <sup>-1</sup> bs) |
| T1                                       | 2.44 $\pm$ 0.12 a                                | 7.08 $\pm$ 0.21 a                                        |
| T2                                       | 2.40 $\pm$ 0.11 a                                | 7.20 $\pm$ 0.22 a                                        |
| T3                                       | 2.37 $\pm$ 0.32 a                                | 6.82 $\pm$ 0.46 a                                        |
| T4                                       | 2.55 $\pm$ 0.19 a                                | 7.32 $\pm$ 0.56 a                                        |
| T5                                       | 2.48 $\pm$ 0.06 a                                | 7.54 $\pm$ 0.28 a                                        |

De acuerdo con la prueba de Tukey ( $p \leq 0.05$ ), no hay diferencias significativas entre los valores que comparten la misma letra en las columnas. bs: base seca. mg EAG: miligramos equivalentes de ácido gálico. mMol ET: milimoles equivalentes de Trolox.

Resultados similares fueron reportados por Chávez-García *et al.* (2024), donde encontraron que el contenido de fenoles totales en la pulpa de aguacate criollo variaba entre 1.5 y 3.0 mg EAG g<sup>-1</sup> bs, dependiendo del árbol de origen y las condiciones específicas de cultivo. La variabilidad en los resultados entre ambos estudios podría deberse, en parte, a diferencias en las metodologías de extracción y cuantificación empleadas.

En el presente estudio, el contenido de fenoles totales fue determinado mediante el método de Folin-Ciocalteu en microplacas, usando extractos obtenidos al extraer de 1 g de pulpa liofilizada en 10 mL de una mezcla de acetona/agua (70:30 v/v). Este método mide el contenido total de compuestos antioxidantes, lo que podría incluir algunos compuestos no fenólicos, y podría resultar en una ligera sobreestimación del contenido de fenoles en comparación con el HPLC-

MS. En el estudio de Chávez-García *et al.* (2024), los compuestos fenólicos fueron cuantificados específicamente mediante HPLC-MS, una técnica que permite identificar y cuantificar individualmente cada fenol, ofreciendo mayor precisión. Estas diferencias metodológicas entre el HPLC-MS y el Folin-Ciocalteu podrían explicar parte de la variabilidad observada en los resultados.

Otros estudios han reportado valores menores de fenoles en la pulpa de aguacate Hass. Por ejemplo, Soong y Barlow (2004) encontraron 1.3 mg EAG g<sup>-1</sup> bs, Corral-Aguayo *et al.* (2008) reportaron 1.18 mg EAG g<sup>-1</sup> bh, y Matsusaka y Kawabata (2010) informaron 1.0 mg EAG g<sup>-1</sup> bs. En este contexto, los valores de este proyecto, que varían entre 2.37 y 2.55 mg EAG g<sup>-1</sup> bs, superan los valores reportados para el aguacate Hass, lo que resalta el alto contenido de compuestos fenólicos en el aguacate criollo de raza mexicana. Estos resultados subrayan la importancia de preservar las variedades criollas de aguacate, que no solo representan una fuente potencialmente superior de compuestos antioxidantes, sino que también reflejan la rica diversidad fitoquímica de las variedades nativas de México. La conservación y promoción del aguacate criollo podrían aportar beneficios tanto para la salud de los consumidores como para la biodiversidad y el patrimonio cultural del país.

El beneficio de los compuestos fenólicos para la salud ha sido ampliamente documentado. Carmona-Hernández *et al.* (2018) destacan que estos nutraceuticos poseen una gran capacidad antioxidante, lo cual contribuye a propiedades anticancerígenas, antiinflamatorias, antivirales, antimicrobianas y al fortalecimiento del sistema inmunológico (Soto-Hernández *et al.*, 2017).

La variación en el contenido de fenoles totales en aguacates puede estar influenciada por factores como la variedad, el estado de madurez, las condiciones agronómicas y el manejo postcosecha (Kosińska *et al.*, 2012). Esto sugiere que, para lograr una evaluación más precisa del contenido de fenoles, es esencial estandarizar estos factores y los métodos de extracción y cuantificación.

### 3.3.2 Actividad antioxidante de la pulpa

No se observaron diferencias estadísticamente significativas entre las accesiones de aguacate criollo. Los valores obtenidos en este estudio oscilaron entre 7.10 y 7.60 mMol ET g<sup>-1</sup> bs. Aunque la actividad antioxidante medida en la pulpa de todos los tratamientos es alta, se encuentra por debajo de los valores reportados por Rodríguez-Carpena *et al.* (2011) para los cultivares Hass y Fuerte (9.42 y 7.82 mMol ET g<sup>-1</sup> pf, respectivamente).

Estas diferencias podrían explicarse por la metodología empleada y la base de peso utilizada para expresar los resultados. En este estudio, los valores se calcularon en base seca, lo cual elimina la variabilidad causada por el contenido de agua de la muestra. Por el contrario, los valores reportados por Rodríguez-Carpena *et al.* (2011) se expresaron en base de peso fresco, lo que incluye tanto los sólidos como el agua presente en la pulpa, diluyendo potencialmente la concentración de antioxidantes. Al deshidratar la muestra mediante liofilización, la actividad antioxidante parece concentrarse, lo que podría justificar las diferencias observadas.

Además, la metodología analítica utilizada puede influir significativamente en los resultados obtenidos. En este estudio, se empleó un método de extracción basado en una mezcla de acetona/agua (70:30 v/v), seguido de la cuantificación de la actividad antioxidante mediante el ensayo ABTS en microplacas. Por otro lado, Rodríguez-Carpena *et al.* (2011) utilizaron una metodología diferente, utilizando una mezcla de metanol al 80 % como solvente para la extracción de compuestos antioxidantes. Estas diferencias en las condiciones de extracción y en los solventes usados, junto con la base de peso utilizada para expresar los resultados (peso seco en este estudio y peso fresco en el de Rodríguez-Carpena), son factores clave que podrían explicar la variabilidad observada entre ambos estudios.

Por otro lado, los valores de actividad antioxidante obtenidos en este estudio, que oscilan entre 7.10 y 7.60 mMol ET g<sup>-1</sup> b.s., son notablemente superiores a los reportados por Chávez-García *et al.* (2024), quienes informaron un rango de 1.5 a 3.0 mMol ET g<sup>-1</sup> bs para aguacates criollos de Parras de la Fuente, Coahuila. Estas diferencias pueden atribuirse a varios factores, como la alta variabilidad genética característica de los aguacates criollos, que influye en la biosíntesis de compuestos antioxidantes, así como a las diferencias en las condiciones edafoclimáticas y de cultivo. Además, la metodología utilizada en ambos estudios podría ser un factor determinante en las diferencias observadas. En este trabajo, se utilizó 1 g de muestra en base seca extraído con una mezcla de acetona/agua (70:30 v/v) y se cuantificó la actividad antioxidante mediante el método ABTS en microplacas. Por otro lado, en el estudio de Chávez-García *et al.* (2024), se usaron 0.5 g de muestra mezclados con 10 mL de una solución de metanol al 80 % (v/v). Estas diferencias en la cantidad de muestra y en los solventes empleados para la extracción podrían haber influido en la eficiencia de extracción de los compuestos antioxidantes, posiblemente limitando la recuperación de estos en el estudio de Chávez-García (2024) en comparación con el protocolo utilizado en este trabajo.

Wang, Zheng, Khuong y Lovatt (2012) informaron que la dimension del fruto puede afectar el contenido de sustancias antioxidantes, debido a que los frutos de menor tamaño tienden a acumular una mayor cantidad de metabolitos. Este hallazgo resalta la importancia de ampliar la investigación, evaluando un mayor número de muestras provenientes de diferentes regiones, con el objetivo de identificar el perfil de compuestos fenólicos y flavonoides, además de analizar las variaciones en el contenido de estos nutraceuticos a lo largo del proceso de maduración del fruto.

Numerosos estudios han destacado que factores como las condiciones del suelo y el clima, las características genéticas, el estado fisiológico y las prácticas de manejo agronómico tienen un impacto significativo en los niveles de compuestos antioxidantes o nutraceuticos presentes en los tejidos vegetales (Gahukar, 2014).

En este estudio, los frutos recolectados provenían de sitios con diferencias en altitud, temperatura y precipitación anual, asimismo de la alta variabilidad genética característica de las accesiones de aguacate criollo. Estas condiciones podrían explicar las ligeras variaciones observadas en los contenidos de compuestos antioxidantes entre los tratamientos evaluados (Darré, 2019). Esto resalta la importancia de continuar identificando y evaluando árboles de aguacate criollo con alta actividad antioxidante, ya que está comprobado que esta especie presenta una riqueza genética significativa que podría aprovecharse para fines nutraceuticos y de conservación.

### 3.3.3 Índice de peróxidos

El índice de peróxidos en el aceite de aguacate criollo de raza mexicana mostró diferencias significativas ( $p \leq 0.05$ ), presentando valores de 7.90 a 9.70 mEq  $O_2$ /kg de grasa a 1 día después de haber sido liofilizado. A los 90 días de liofilización, se observó un aumento en todos los tratamientos durante el período de almacenamiento, con resultados que oscilaron entre 11.8 y 12.7 mEq  $O_2$ /kg de grasa (Cuadro 2) lo cual indica una mayor oxidación lipídica con el tiempo.

**Cuadro 2.** Índice de peróxidos del aceite extraído mediante solventes de la pulpa de aguacate criollo de raza mexicana.

| Índice de peróxidos (mEq $O_2$ /kg de grasa) |                        |                          |
|----------------------------------------------|------------------------|--------------------------|
| Tratamientos                                 | 1 día de liofilización | 90 días de liofilización |
| T1                                           | 8.76 $\pm$ 0.58 b      | 12.57 $\pm$ 0.76 a       |
| T2                                           | 8.67 $\pm$ 0.10 b      | 12.33 $\pm$ 0.13 ab      |
| T3                                           | 9.61 $\pm$ 0.38 a      | 12.62 $\pm$ 0.13 a       |
| T4                                           | 7.94 $\pm$ 0.33 c      | 11.72 $\pm$ 0.65 b       |
| T5                                           | 8.44 $\pm$ 0.08 bc     | 11.86 $\pm$ 0.47 b       |

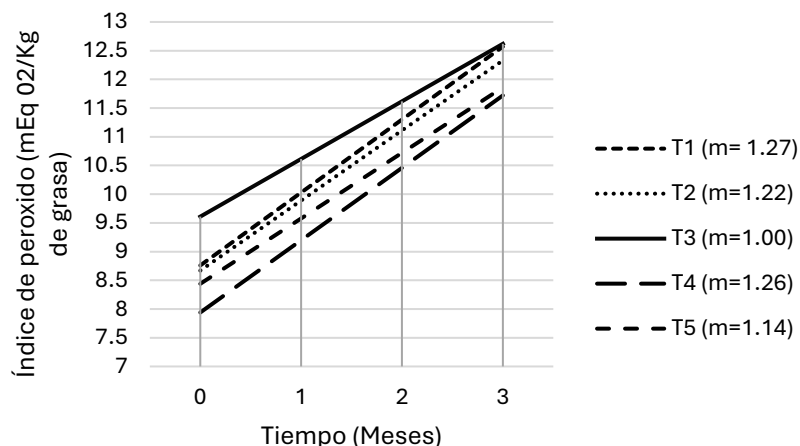
De acuerdo con la prueba de Tukey ( $p \leq 0.05$ ), no hay diferencias significativas entre los valores que comparten la misma letra en las columnas. mEq: miliequivalentes. kg: kilogramo.

Estos valores fueron inferiores a los reportados para el aceite de aguacate Hass por Restrepo *et al.* (2012), quienes encontraron que el aceite extraído por fluidos supercríticos presentó un índice de peróxidos de 16.87 mEq O<sub>2</sub>/kg, mientras que el aceite obtenido por prensado en frío mostró un índice de 22.86 mEq O<sub>2</sub>/kg. Ambos resultados superan el límite establecido por la norma mexicana NMX-F-811-SCFI-2021, que permite un máximo de 10 mEq O<sub>2</sub>/kg para la comercialización de aceites de aguacate.

Es importante destacar que de acuerdo con Restrepo *et al.* (2012) el índice de peróxidos puede variar debido a factores genéticos, como la variedad del aguacate, y al método de extracción del aceite. Asimismo, la exposición continua al oxígeno, las altas temperaturas y la incidencia directa de la luz solar pueden favorecer el incremento del índice de peróxidos en los aceites.

La figura 4 presenta la variación del índice de peróxidos en distintos tratamientos aplicados al aceite de aguacate criollo a lo largo de un período de tres meses. Cada línea representa un tratamiento (T1 a T5), y las pendientes indican el incremento en el índice de peróxidos, un indicador clave de la oxidación lipídica. T1 ( $m = 1.27$ ) y T4 ( $m = 1.26$ ) tienen las pendientes más pronunciadas, sugiriendo una rápida oxidación y menor estabilidad oxidativa. T2 ( $m = 1.22$ ) y T5 ( $m = 1.14$ ) presentan pendientes intermedias, lo que indica una oxidación moderada, mientras que T3 ( $m = 1.00$ ) tiene la pendiente más baja, lo que a primera vista podría sugerir una mejor estabilidad. Sin embargo, es el tratamiento con el índice de peróxidos más alto, lo que lo convierte en el peor en términos de calidad. Por lo tanto, los tratamientos que valen la pena darles seguimiento son T4 y T5, ya que muestran una oxidación más controlada. Realizar mediciones más frecuentes, en lugar de mensuales, es crucial para detectar cambios sutiles en el índice de peróxidos y tomar decisiones informadas sobre almacenamiento y preservación.

La valorización del contenido genético de T4 y T5 es esencial para identificar más árboles con estas propiedades deseables, mejorando así la calidad y la vida útil del aceite de aguacate criollo.



**Figura 4.** Comportamiento del índice de peróxidos en aceite de aguacate criollo a lo largo de tres meses.

De acuerdo con la norma NMX-F-811-SCFI-2021, que establece un límite máximo de 10 mEq  $O_2$ /kg para la comercialización de aceites de aguacate, podemos observar en la gráfica anterior que el tratamiento T1 alcanza su punto máximo de oxidación dentro de los primeros 40 días de almacenamiento, por lo tanto, no es apto para la comercialización después de ese período. En contraste, otros tratamientos como T4 y T5 muestran un tiempo de oxidación más prolongado, lo que sugiere que pueden mantenerse dentro de los límites aceptables de calidad durante más tiempo, por ello serían más adecuados para la comercialización. Esto resalta la importancia de seleccionar tratamientos que ofrezcan una mayor estabilidad oxidativa y cumplan con las regulaciones para asegurar la calidad del producto.

### 3.3.4 Índice de acidez

El porcentaje de acidez del aceite extraído del aguacate criollo de raza mexicana se presenta en el cuadro 3, donde se observa que los valores fluctuaron entre 1.10 % y 1.45 % de ácido oleico en muestras de aceite extraídas un día después

de haber sido liofilizadas. Por otro lado, las muestras de aceite extraído de aguacate liofilizado y almacenado durante 90 días mostraron un aumento en el contenido de ácido oleico, alcanzando valores de 1.45 % a 1.75 %. El índice de acidez en el aceite de aguacate criollo mostró diferencias significativas entre los tratamientos ( $p \leq 0.05$ ). Los tratamientos con mayor acidez fueron T3 y T2, mientras que T4 y T5 presentaron los índices de acidez más bajos. Nuestros resultados son consistentes con los reportados por Jiménez *et al.* (2001), quienes determinaron el índice de acidez del aceite de aguacate Hass, utilizando pulpa secada en microondas y extracción con éter de petróleo, encontrando un valor inferior al 2 %. Sin embargo, nuestros resultados son superiores a los reportados por Moreno *et al.* (2003), quienes encontraron valores de ácido oleico menores al 2 % en aceite extraído de pulpa de aguacate Hass mediante microondas-prensado y microondas-hexano (0.44 % y 0.27 %).

Es importante señalar que los valores pueden variar significativamente según el método de extracción de aceite y los solventes utilizados.

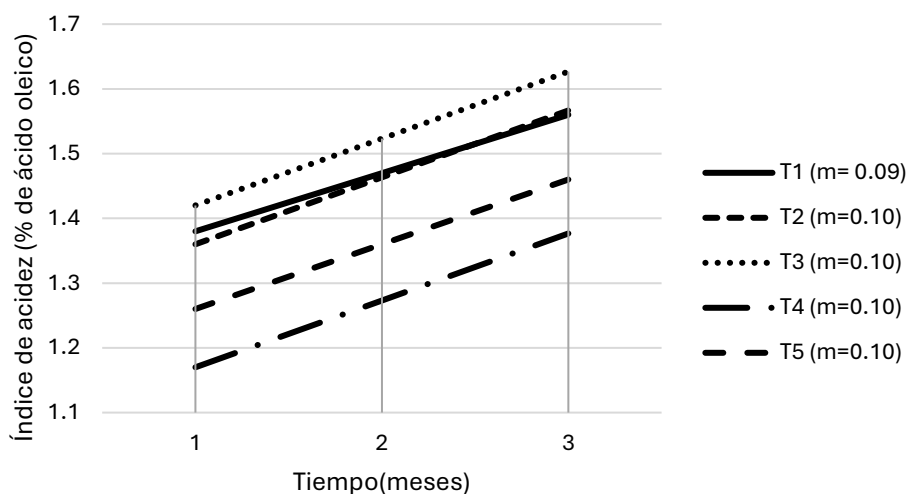
**Cuadro 3.** Índice de acidez del aceite extraído mediante solventes de la pulpa de aguacate criollo de raza mexicana.

| Tratamientos | Índice de acidez (% de ácido oleico) |                          |
|--------------|--------------------------------------|--------------------------|
|              | 1 día de liofilización               | 90 días de liofilización |
| T1           | 1.38 ± 0.13 a                        | 1.65 ± 0.15 a            |
| T2           | 1.36 ± 0.02 a                        | 1.67 ± 0.04 a            |
| T3           | 1.42 ± 0.05 a                        | 1.73 ± 0.06 a            |
| T4           | 1.17 ± 0.05 c                        | 1.48 ± 0.05 b            |
| T5           | 1.26 ± 0.06 b                        | 1.56 ± 0.06 b            |

De acuerdo con la prueba de Tukey ( $p \leq 0.05$ ), no hay diferencias significativas entre los valores que comparten la misma letra en las columnas.

Todos los tratamientos evaluados un día después de ser liofilizados presentaron valores por debajo de los límites establecidos en la norma mexicana para el aceite de aguacate (1.5 %) según la NMX-F-052-SCFI-2008, así como los del CODEX STAN-19-1981, que especifica un límite de 2 % de ácido oleico para grasas y aceites no descritos individualmente. No obstante, a lo largo del tiempo de almacenamiento, se observó un incremento en el índice de acidez.

La figura 5 muestra el comportamiento del índice de acidez en diferentes tratamientos de aceite de aguacate criollo a lo largo de un período de tres meses. Según la norma NMX-F-052-SCFI-2008, el límite permitido para el ácido oleico en aceites de aguacate es del 1.5%. Asimismo, el CODEX STAN-19-1981, que se aplica a grasas y aceites no descritos individualmente, establece un límite de 2 %. En la gráfica, podemos observar que los tratamientos T1 y T2 alcanzan y superan el límite de 1.5 % de ácido alrdeor de los 40 dias, mientras que T4 y T5 permanecen por debajo de este umbral durante todo el período de estudio.



**Figura 5.** Comportamiento del índice de acidez en aceite de aguacate criollo a lo largo de tres meses.

A medida que avanza el tiempo, se evidencia un aumento en el índice de acidez en todos los tratamientos. Sin embargo, T1 se destaca por tener el índice más bajo ( $m = 0.09$ ), esto lo convierte en el tratamiento más adecuado en términos de calidad en comparación con T2 y T3, que muestran un aumento más pronunciado

en su índice de acidez. A pesar de que todos los tratamientos presentan un incremento en su índice de acidez, la vigilancia continua es esencial, especialmente para T4 y T5, que mantienen niveles de acidez más bajos. Estos tratamientos destacan por su relevancia para preservar y dar seguimiento, debido a su estabilidad y el valor de su contenido genético, lo que sugiere un alto potencial para mantener la calidad del aceite de aguacate de forma sostenida en el tiempo.

Es importante señalar que el manejo adecuado de los métodos de extracción y los factores que influyen en la oxidación y la acidez del aceite es fundamental, ya que los valores pueden variar considerablemente según el proceso utilizado. Esto subraya la importancia de realizar un monitoreo constante para garantizar la calidad y la comercialización del aceite de aguacate.

### 3.3.5 Contenido de aceite

No se encontraron diferencias significativas en el contenido de aceite de la pulpa entre los diferentes tratamientos de aguacate criollo estudiados. Sin embargo, se observa una tendencia general a la disminución del porcentaje de aceite en la pulpa de aguacate de los tratamientos provenientes de la región de Tochimilco, Puebla, durante el periodo de almacenamiento de tres meses (Cuadro 4).

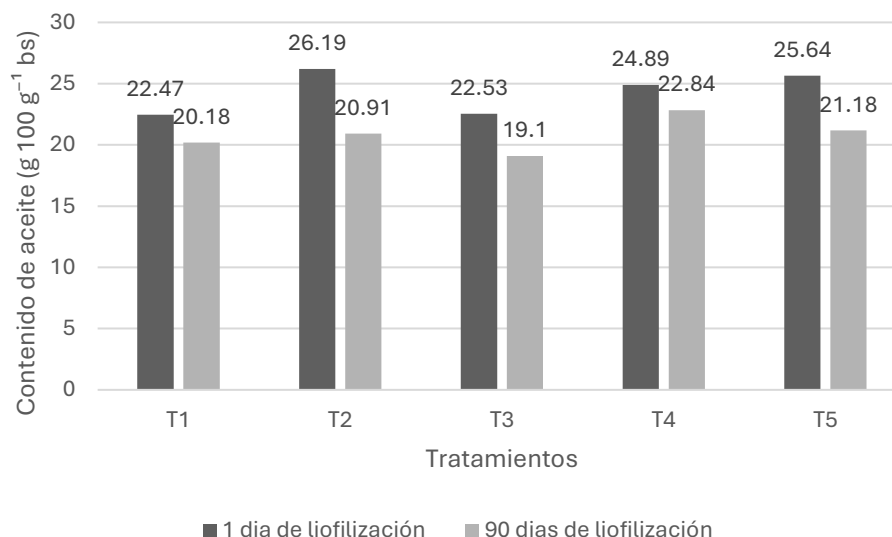
**Cuadro 4.** Contenido de aceite extraído mediante solventes a partir de la pulpa de aguacate criollo de raza mexicana.

| Contenido de aceite (g 100 g <sup>-1</sup> bs) |                        |                          |
|------------------------------------------------|------------------------|--------------------------|
| Tratamientos                                   | 1 día de liofilización | 90 días de liofilización |
| T1                                             | 22.47 ± 2.14 a         | 20.18 ± 0.78 a           |
| T2                                             | 26.19 ± 1.29 a         | 20.91 ± 2.59 a           |
| T3                                             | 22.53 ± 3.69 a         | 19.10 ± 2.50 a           |

|    |                |                |
|----|----------------|----------------|
| T4 | 24.89 ± 0.87 a | 22.84 ± 1.19 a |
| T5 | 25.64 ± 0.04 a | 21.18 ± 1.28 a |

De acuerdo con la prueba de Tukey ( $p \leq 0.05$ ), no hay diferencias significativas entre los valores que comparten la misma letra en las columnas. g: gramos. bs: base seca.

El porcentaje de aceite en la pulpa osciló entre 22.4 % y 26.5 % p.s. un día después de haber sido liofilizada, mientras que a los 90 días este porcentaje fluctuó entre 20.1 % y 22.9 % p.s., lo que indica una disminución en el contenido de aceite durante el tiempo de almacenamiento (Figura 6). Este cambio sugiere posibles procesos de degradación o pérdida de lípidos, que podrían estar relacionados con las condiciones de conservación empleadas. La disminución observada en el contenido de aceite de la pulpa de aguacate liofilizada durante el almacenamiento puede atribuirse a procesos de oxidación lipídica. Según García-Rojas *et al.* (2016), los aldehídos, como el hexanal y el E-2-hexenal, predominan entre los compuestos orgánicos volátiles en el aguacate y se generan a partir de la degradación de lípidos, lo que sugiere que la oxidación lipídica es una causa probable de la reducción en el contenido de aceite durante el almacenamiento.



**Figura 6.** Comparación de la cantidad de aceite extraído de la pulpa liofilizada de aguacate criollo de raza mexicana: extracción realizada al día 1 vs el día 90 después de la liofilización.

Campos-Hernández *et al.* (2011) reportaron que el contenido de aceite en la pulpa de aguacates criollos mexicanos fluctúa entre 16.20 % y 32.32 % en peso fresco, con la accesión Hueyapan 2 presentando el mayor valor. Estos valores son comparables a los obtenidos en el presente estudio al día 1 de liofilización, indicando que los aguacates de Tochimilco poseen un contenido de aceite dentro del rango esperado para esta variedad.

La USDA (2014) informó que las variedades comerciales cultivadas en California y Florida, principalmente del cultivar Hass, presentan un promedio de 14.66 g de aceite por cada 100 g de muestra fresca. De manera similar, Ozdemir y Topuz (2004) analizaron el contenido de aceite en los frutos de las variedades Hass y Fuerte, encontrando rangos de 14.36 % a 20.21 % y de 11.02 % a 19.57 %, respectivamente. Estos valores son inferiores a los obtenidos en el presente estudio, lo que sugiere que los aguacates criollos de Tochimilco podrían tener un mayor potencial para la extracción de aceite en comparación con las variedades comerciales.

Cabe mencionar que el contenido de aceite en el aguacate está influenciado por diversos factores, entre ellos la variedad, la época de cosecha y el tiempo de maduración posterior a la recolección (Ozdemir y Topuz, 2004). Las condiciones ambientales y las prácticas agrícolas en Tochimilco, Puebla, Afectan de manera notable el nivel de aceite presente en los aguacates criollos cultivados en la zona. El clima templado subhúmedo, caracterizado por temperaturas promedio de 12 °C a 18 °C y una precipitación anual que oscila entre 800 y 1,000 mm, junto con una altitud cercana a los 2,000 metros sobre el nivel del mar, proporciona un entorno ideal para la acumulación de aceite en el fruto, gracias a la moderación térmica y una adecuada disponibilidad de agua (INEGI, 2010).

Además, las prácticas agrícolas tradicionales, como el uso de abonos orgánicos, la conservación de la cobertura vegetal, el riego complementario durante períodos de sequía y el manejo adecuado del dosel mediante podas regulares, optimizan la fertilidad del suelo, la penetración de la luz solar y la circulación de aire, factores clave que favorecen la síntesis de compuestos lipídicos en los frutos. Estas características reflejan cómo las condiciones específicas de Tochimilco y el manejo agrícola local contribuyen a la calidad del aguacate criollo, especialmente en términos de su contenido de aceite (Ozdemir y Topuz, 2004).

El contenido de aceite en la pulpa de aguacate puede variar significativamente según la metodología de extracción empleada (Campos-Hernández *et al.*, 2011). En este estudio, se utilizó hexano como solvente para la extracción de lípidos, método ampliamente reconocido por su eficiencia en la recuperación de aceites. Sin embargo, presenta desventajas como riesgos ambientales y de salud debido a su toxicidad y volatilidad, además de ser poco selectivo al extraer compuestos no deseados junto con los lípidos. Existen alternativas más sostenibles y eficientes, como la extracción con dióxido de carbono supercrítico (CO<sub>2</sub>-SC), que utiliza CO<sub>2</sub> en estado supercrítico para realizar extracciones selectivas y libres de residuos tóxicos, preservando la calidad del aceite (Casas *et al.*, 2015).

Según Restrepo Duque *et al.* (2012), la extracción de aceite de aguacate mediante el método Soxhlet con hexano resultó en un rendimiento del 17.11 % respecto a la pulpa. Sin embargo, este método puede inducir la formación de ácidos grasos trans debido a las condiciones de extracción, lo que podría afectar la calidad nutricional del aceite obtenido.

Por otro lado, técnicas como la extracción por fluidos supercríticos han demostrado ser más eficientes y preservar mejor la calidad del aceite. Restrepo Duque *et al.* (2012) reportaron que esta metodología alcanzó un rendimiento superior (18.9 %) y mantuvo una mejor calidad del aceite en comparación con métodos convencionales.

La extracción enzimática ha sido estudiada como una opción viable para obtener aceite de aguacate. Buelvas Salgado *et al.* (2012) analizaron el rendimiento de extracción de aceite en aguacate *Hass* mediante tratamientos enzimáticos y concluyeron que el uso de la enzima Pectinex, a una concentración de 200 mL/t<sup>-1</sup>, proporcionó los mejores resultados. En el estado de madurez E3-M (maduro), lograron un rendimiento de extracción de aceite del 60 %.

Es importante considerar que la elección del método de extracción no solo influye en el rendimiento, sino también en la composición y calidad del aceite obtenido. Por ejemplo, la extracción con hexano puede dejar residuos de solvente en el producto final, lo que no es deseable para aplicaciones alimentarias o cosméticas. En contraste, métodos como la extracción por prensado en frío o por fluidos supercríticos suelen producir aceites de mayor pureza y calidad.

### **3.3.6 Evaluación sensorial**

Los resultados del análisis de varianza para un diseño en bloques completamente al azar se presentan en el cuadro 5, bloques son los panelistas. Para este caso se trabajó con un  $\alpha = 0.05$  y la hipótesis nula fue  $\mu_1 = \mu_2 = \mu_3 = \mu_4 = \mu_5$ . Se observa que la  $Pr > F$  fue 0.9980, este valor es la probabilidad ( $p$ ) obtenida para el valor de  $F$  calculado (0.03). Dado que el  $p$  obtenido del análisis de varianza fue mayor que el alfa inicialmente establecida (0.05), no se rechaza  $H_0$  y se concluye que no

hay diferencias significativas en la aceptabilidad entre los tratamientos de guacamole.

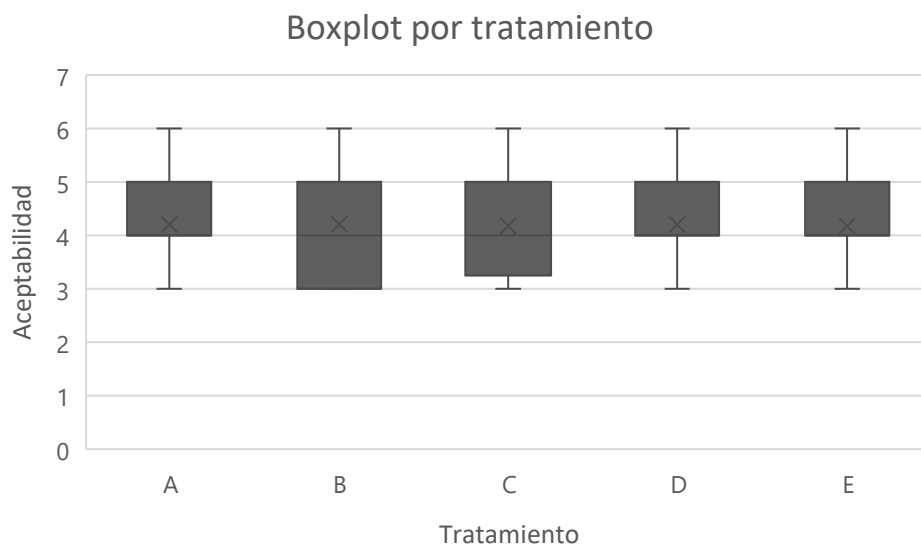
Los valores de desviación estándar son relativamente bajos (0.89–0.95). Esto significa que las respuestas de los panelistas para cada tratamiento fueron consistentes, con poca variabilidad entre ellos, lo cual respalda la confiabilidad de las calificaciones.

**Cuadro 5.** Aceptabilidad sensorial de diferentes tratamientos de guacamole

| Tratamiento | Promedio Aceptabilidad (Escala hedónica) |
|-------------|------------------------------------------|
| 1           | 4.20 ± 0.91 a                            |
| 2           | 4.21 ± 0.95 a                            |
| 3           | 4.18 ± 0.92 a                            |
| 4           | 4.20 ± 0.89 a                            |
| 5           | 4.17 ± 0.89 a                            |

De acuerdo con la prueba de Tukey ( $p \leq 0.05$ ), no hay diferencias significativas entre los valores que comparten la misma letra en las columnas.

La figura 7 muestra la distribución de las puntuaciones de aceptabilidad sensorial para cinco tratamientos de guacamole elaborados con aguacate criollo de raza mexicana liofilizado (T1, T2, T3, T4 y T5), destacando la similitud en las medianas, cercanas al valor 4, lo que indica evaluaciones entre "me gusta poco" y "ni me gusta ni disgusta". Los rangos intercuartílicos son consistentes entre tratamientos, y no se observan valores extremos ni diferencias visuales significativas, lo que respalda los resultados estadísticos que concluyeron la ausencia de diferencias significativas en la aceptabilidad ( $p > 0.05$ ). Esta homogeneidad podría explicarse por las propiedades organolépticas uniformes del aguacate criollo, tal como lo reportaron Campos-Hernández *et al.* (2011), y por la preservación de compuestos volátiles clave gracias al uso de la liofilización, como señalaron Buelvas Salgado *et al.* (2012).



**Figura 7.** Distribución de la aceptabilidad de diferentes tratamientos de guacamole evaluada mediante boxplot.

La ausencia de diferencias perceptibles entre tratamientos podría atribuirse a la homogeneidad en las formulaciones, el uso de panelistas no entrenados y las propiedades únicas del aguacate criollo que podrían enmascarar variaciones sutiles.

### 3.4 Conclusiones

Este estudio evidenció que el aguacate criollo de raza mexicana presenta características superiores a las variedades comerciales como Hass y Fuerte en aspectos clave como el contenido de fenoles totales y la capacidad antioxidante. Los tratamientos T4 y T5 destacaron como los más prometedores debido a su mejor estabilidad oxidativa (índices de peróxidos y acidez más bajos) y su capacidad para conservar un alto contenido de aceite tras el almacenamiento, lo que los posiciona como opciones ideales para aplicaciones comerciales.

En cuanto al contenido de aceite, los aguacates criollos de Tochimilco mostraron valores superiores a los reportados para variedades comerciales, destacando su potencial para la extracción de aceites de alta calidad. Sin embargo, la disminución en el contenido de aceite durante el almacenamiento sugiere la

necesidad de mejorar las condiciones de conservación y explorar métodos avanzados de extracción que preserven mejor la calidad del producto.

Los resultados del análisis sensorial mostraron que no hubo diferencias significativas en la aceptabilidad entre los tratamientos, destacando la uniformidad de las propiedades organolépticas del aguacate criollo liofilizado. Este estudio demuestra que al día 90 la mayoría de las personas calificaron el producto entre "me gusta poco" y "ni me gusta ni disgusta". En futuros estudios, sería esencial evaluar sensorialmente desde el día 1 y en intervalos más frecuentes para determinar hasta qué punto es aceptable sensorialmente. Esto permitirá tomar decisiones más informadas sobre su viabilidad y optimización como producto final.

Este trabajo representa un paso inicial en el desarrollo de un producto basado en aguacate criollo de raza mexicana. Aunque se han logrado avances significativos en la caracterización de sus propiedades, aún es necesario un seguimiento más detallado para optimizar las etapas finales del desarrollo. La superioridad del aguacate criollo en comparación con el Hass en ciertas propiedades, como el contenido de fenoles y la capacidad antioxidante, destaca su valor como recurso agrícola y su potencial para aplicaciones funcionales. Por ello, los tratamientos T4 y T5 deben preservarse y valorarse como base para futuras investigaciones, priorizando la conservación genética y el desarrollo sostenible de esta valiosa variedad.

### **3.5 Agradecimientos**

Se agradece al Consejo Nacional de Humanidades, Ciencias y Tecnologías (CONAHCYT) número de apoyo 822658, a la Dirección General de Investigación y Posgrado (DGIP) y a la Universidad Autónoma Chapingo por el apoyo y los recursos proporcionados que hicieron posible la realización de este estudio.

### 3.6 Bibliografía

- Buelvas Salgado, A. F., Restrepo Duque, J., & Rivera Palma, R. (2012). Evaluación de rendimiento enzimático en extracción de aceite de aguacate Hass. *Revista de Ciencia y Tecnología Alimentaria*, 13(2), 45-53.
- Campos-Hernández, M. A., Escalona-Buendía, H. B., & León-González, F. (2011). Composición química y propiedades sensoriales de accesiones de aguacates criollos mexicanos. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 2(3), 67-75.
- Carmona-Hernández, F. C., & Porras-Loaiza, C. A. (2018). Propiedades nutraceuticas de compuestos fenólicos en alimentos. *Nutrición y Salud*, 10(3), 25-32.
- Casas, L., Mantell, C., Rodríguez, M., Ossa, E. J., Roldán, A., & de la Ossa, E. M. (2010). Comparative extraction of carotenoids and chlorophylls from microalgae by supercritical carbon dioxide and conventional solvents. *The Journal of Supercritical Fluids*, 55(1), 164-170. <https://doi.org/10.1016/j.supflu.2010.06.007>
- Chávez-García, E. I., Sánchez-Vargas, N., & Delgado-Aparicio, M. (2024). Propiedades nutrimentales, fitoquímicas y sensoriales de frutos de aguacate criollo de Parras de la Fuente, Coahuila. *Food Chemistry*, 325, 126868.
- Codex Alimentarius. (2015). Norma para grasas y aceites comestibles no regulados por normas individuales (CODEX STAN 19-1981). Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura.
- Corral-Aguayo, R. D., Yahia, E. M., Carrillo-López, A., & González-Aguilar, G. A. (2008). Phenolic compounds and antioxidant activity of fruit extracts. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 56(4), 1044-1049.
- Darré, R. A. (2019). Impacto de factores genéticos y ambientales en la biosíntesis de compuestos antioxidantes en frutos. *Acta Horticulturae*, 1234, 67-74.

- Gahukar, R. T. (2014). Quality and safety of organic fruits and vegetables: A review. *Journal of Food Quality and Safety*, 36(2), 97-104.
- García-Rojas, M., Siller-Cepeda, J., & López-Malo, A. (2016). Perfil de compuestos orgánicos volátiles y ácidos grasos del aguacate (*Persea americana*) y sus beneficios a la salud. *Ciencia UAT*, 16(1), 162-175. <https://doi.org/10.29059/cienciauat.v16i1.1483>.
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). (2020). México en cifras: Información por entidad y municipio. INEGI. Recuperado de [https://www.inegi.org.mx/contenidos/app/mexicocifras/datos\\_geograficos/21/21188.pdf](https://www.inegi.org.mx/contenidos/app/mexicocifras/datos_geograficos/21/21188.pdf)
- International Organization for Standardization (ISO). (2006). ISO 3976:2006 (IDF 74:2006) – Milkfat products – Detection of foreign fats by gas chromatography of triglycerides (Reference method).
- Jiménez, R., & Castellanos, J. A. (2001). Métodos de extracción y calidad de aceite de aguacate. *Ciencia e Investigación Agraria*, 28(3), 13-20.
- Herald, T. J., Gadgil, P., & Tilley, M. (2012). Folin-Ciocalteu method for the determination of total phenolic content in foods and bioactive compounds. *Journal of Food Science*, 77(8), C1159–C1164.
- Kosińska, A., & Andlauer, W. (2012). Factors affecting phenolic compound stability in food products. *Food Research International*, 49(1), 92-101.
- López-Cervantes, J., Sánchez-Machado, D. I., & Campas-Baypoli, O. N. (2020). Perfil de compuestos orgánicos volátiles y ácidos grasos del aguacate (*Persea americana*) y sus beneficios a la salud. *Ciencia UAT*, 16(1), 162-175. <https://doi.org/10.29059/cienciauat.v16i1.1483>
- Matsusaka, N., & Kawabata, Y. (2010). Analysis of polyphenols in avocado varieties. *Food Science and Technology Research*, 16(3), 215-220.

- Moreno, A. O., & Ramírez, J. (2003). Evaluación del contenido de aceite en aguacate mediante diferentes métodos de extracción. *Grasas y Aceites*, 54(2), 21-25.
- NMX-F-811-SCFI-2021. (2022). Aceites y grasas - Aceite de aguacate - Especificaciones. Diario Oficial de la Federación.
- NMX-F-052-SCFI. (2008). Aceites y grasas. Aceite de aguacate. Especificaciones (pp. 10). México: Diario Oficial de la Federación.
- Ozdemir, M., & Topuz, A. (2004). Changes in quality of avocado oils during storage. *Journal of Food Science*, 69(2), 67-72.
- Restrepo Duque, J., & Ortiz López, E. (2012). Estudio de aceites extraídos por fluidos supercríticos en variedades de aguacate. *Journal of Supercritical Fluids*, 62, 45-53.
- Rodríguez-Carpena, J. G., Morcuende, D., & Estévez, M. (2011). Phenolic extracts from avocado: Antioxidant activity and applications in foods. *Journal of Food Composition and Analysis*, 24(6), 716-726.
- Sánchez, J., López, M., & Pérez, R. (2019). Caracterización climática del valle: clima templado subhúmedo con lluvias en verano. *Revista de Ciencias Ambientales*, 15(2), 45–52.
- Semeniuc, C. A. (2009). Evaluation of lipid oxidation by the thiocyanate method: Application in food systems. *Food Analysis Journal*, 25(4), 245–253.
- Shantha, N. C., & Decker, E. A. (1994). Rapid, sensitive, iron-based spectrophotometric methods for determination of peroxide values of food lipids. *Journal of AOAC International*, 77(2), 421–424.
- Soong, Y. Y., & Barlow, P. J. (2004). Antioxidant activity and phenolic content of selected fruit seeds. *Food Chemistry*, 88(3), 411-417.

- Soto-Hernández, M., Aguilar-Rodríguez, M., & Trejo-Tapia, G. (2017). Potencial antioxidante de compuestos fenólicos en frutas tropicales. *Revista Iberoamericana de Tecnología Postcosecha*, 18(1), 12-25.
- USDA. (2014). Nutritional content of avocados. U.S. Department of Agriculture Database. Retrieved from <https://fdc.nal.usda.gov/>.
- Wang, M., Zheng, Y., Khuong, T., & Lovatt, C. J. (2012). Effect of harvest date on the nutritional quality and antioxidant capacity in 'Hass' avocado during storage. *Food Chemistry*, 135(2), 694-698. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.foodchem.2012.05.022>

## 4 ANEXOS



### **Árbol de aguacate criollo #1**

Latitud: 18.895340075574804

Longitud: -98.57079986609949



### **Árbol de aguacate criollo #2**

Latitud: 18.8949773829

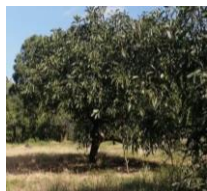
Longitud: -98.57072076205368



### **Árbol de aguacate criollo #3**

Latitud: 18.895247963223902

Longitud: -98.57090330985173



### **Árbol de aguacate criollo #4**

Latitud: 18.89519615000424

Longitud: -98.57056863888867



### **Árbol de aguacate criollo #5**

Latitud: 18.895426430857746

Longitud: -98.57069033742069

**Anexo 1.** Árboles de aguacate criollo de raza mexicana con coordenadas geográficas en Tochimilco, Puebla, utilizados para colecta de frutos para el experimento.