



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA CHAPINGO
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA AGROINDUSTRIAL
POSGRADO EN CIENCIA Y TECNOLOGÍA AGROALIMENTARIA

**“DAÑO POR FRÍO Y VIDA DE ANAQUEL DEL AGUACATE
CRIOLLO REFRIGERADO”**

TESIS

**Que como requisito parcial
para obtener el grado de:**

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



Presenta:

ING. NICOLÁS RAFAEL FRANCISCO ROBLES VALDERRAMA

Bajo la supervisión de: **José Joel Enrique Corrales García, Dr.**



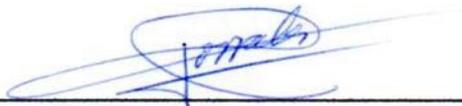
Chapingo, Estado de México, noviembre de 2021

**DAÑO POR FRÍO Y VIDA DE ANAQUEL DEL AGUACATE CRIOLLO
REFRIGERADO**

Tesis realizada por **NICOLÁS RAFAEL FRANCISCO ROBLES
VALDERRAMA** bajo la supervisión 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

ASESOR:



DRA. MARÍA TERESA BERYL COLINAS LEÓN

ASESOR:



DRA. MA. CARMEN YBARRA MONCADA

Chapingo, Estado de México, noviembre de 2021

CONTENIDO

1. INTRODUCCIÓN GENERAL	14
2. REVISIÓN DE LITERATURA	18
2.1. Origen y distribución del aguacate (<i>Persea americana</i> Mill.)	18
2.2. Taxonomía de la especie <i>Persea americana</i> Mill.....	20
2.3. Cultivares usados históricamente.....	20
2.4. Razas de aguacate.....	21
2.5. Aguacates criollos de raza mexicana.....	24
2.5.1. Cultivo de aguacates criollos de raza mexicana.....	25
2.5.2. Producción y valor comercial de los aguacates criollos de raza mexicana.....	28
2.5.3. Composición química de los aguacates criollos de raza mexicana	30
2.5.4. Cosecha y manejo poscosecha de los aguacates criollos mexicanos.....	33
2.6. Refrigeración como tratamiento poscosecha	35
2.7. Refrigeración en frutos de aguacate	35
2.8. Daños por frío	36
2.9. Literatura citada.....	37
3. identificación de variables correlacionadas con los daños por frío en aguacate criollo mexicano	41
3.1. Introducción.....	43
3.2. Materiales y métodos	46
3.2.1. Material experimental.....	46
3.2.2. Tratamientos.....	46
3.2.3. Daños por frío como variable de referencia: escala hedónica 47	
3.2.4. Variables fisiológicas.....	48

3.2.5. Variables físicas	50
3.2.6. Variables fisicoquímicas.....	51
3.2.7. Variables bioquímicas	52
3.2.8. Análisis estadístico	55
3.3. Resultados y discusión.....	55
3.3.1. Daños por frío.....	55
3.3.2. Pérdida de peso.....	57
3.3.3. Patrón de respiración	59
3.3.4. Producción de etileno	62
3.3.5. Color.....	64
3.3.6. Firmeza	67
3.3.7. Fuga de electrolitos (%) - Permeabilidad de membrana.....	69
3.3.8. Actividad de Súperóxido Dismutasa (SOD).....	71
3.3.9. Actividad Glutación Reductasa (GR)	72
3.3.10. Actividad de Piruvato Descarboxilasa (PDC).....	73
3.3.11. Actividad de Alcohol Deshidrogenasa (ADH)	74
3.3.12. Correlación de variables fisiológicas, físicas, fisicoquímicas y bioquímicas con los DF	75
3.4. Conclusiones	76
3.5. Literatura citada.....	77

LISTA DE CUADROS

Cuadro 1. Clasificación taxonómica del aguacate (<i>Persea americana</i> Mill.)	20
Cuadro 2. Algunas características de los árboles y los frutos de las tres diferentes razas de aguacate.....	24
Cuadro 3. Principales cultivares y variedades de aguacate cultivado en México en la primera mitad de la década de los 70.	26
Cuadro 4. Tratamientos aplicados.	47
Cuadro 5. Efecto de los tratamientos sobre los daños por frío en frutos de aguacate criollo de raza mexicana madurados a temperatura ambiente después de diferentes periodos (0, 2, 5 y 10 d) de frigoconservación ($3 \text{ y } 6 \pm 1 \text{ }^\circ\text{C}$, $90 \pm 10 \text{ \% HR}$).	56
Cuadro 6. Correlación entre daños por frío (DF) y variables respuesta (fisiológicas, físicas, fisicoquímicas y bioquímicas) en frutos de aguacate criollo de raza mexicana madurados a temperatura ambiente después de diferentes periodos (0, 2, 5 y 10 d) de frigoconservación ($3 \text{ y } 6 \pm 1 \text{ }^\circ\text{C}$, $90 \pm 10 \text{ \% HR}$).....	76

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Distribución del aguacate en el mundo después de la conquista y hasta antes de 1915.	19
Figura 2. Posibles centros de origen de las tres razas de aguacate.	22
Figura 3. Razas o variedades botánicas de aguacate. (A) <i>Persea americana</i> var. <i>guatemalensis</i> (raza guatemalteca), (B) <i>Persea americana</i> var. <i>drymifolia</i> (raza mexicana) y (C) <i>Persea americana</i> var. <i>americana</i> (raza antillana). ...	22
Figura 4. Porcentaje de hectáreas sembradas de aguacate criollo de raza mexicana respecto al área total sembrada en Estado de México, Guanajuato, Morelos, Puebla y Veracruz, en el periodo 2008-2020.	27
Figura 5. Porcentaje de hectáreas sembradas de aguacate criollo de raza mexicana respecto al área total sembrada de aguacate en México, en el periodo 2006-2020.	27
Figura 6. Volumen de producción de aguacate criollo mexicano en el periodo 2005-2020.	28
Figura 7. Porcentaje de producción de aguacate criollo mexicano respecto a la producción total de aguacate en México, en el periodo 2005-2020.	29
Figura 8. Precio Medio Rural (PMR) del aguacate criollo mexicano en el periodo 2005-2020.	30
Figura 9. Escala visual de 5 puntos de daños por frío en aguacate criollo mexicano (<i>Persea americana</i> var. <i>drymifolia</i> Blake).	49
Figura 10. Pérdida de peso (%) en frutos de tres accesiones (Zen-1, Zen-2 y Zen-3) de aguacate criollo de raza mexicana madurados a temperatura ambiente después de diferentes periodos (0, 2, 5 y 10 d) de frigoconservación (3 y 6 ± 1 °C, 90 ± 10 % HR). Cada punto representa la media de tres repeticiones y las líneas verticales la desviación estándar.	58

Figura 11. Patrón de respiración en frutos de tres accesiones (Zen-1, Zen-2 y Zen-3) de aguacate criollo de raza mexicana madurados a temperatura ambiente después de diferentes periodos (0, 2, 5 y 10 d) de frigoconservación a dos temperaturas (3 y 6 ± 1 °C, 90 ± 10 % HR). Cada punto representa la media de tres repeticiones y las líneas verticales la desviación estándar. ...60

Figura 12. Producción de etileno en frutos de tres accesiones (Zen-1, Zen-2 y Zen-3) de aguacate criollo de raza mexicana madurados a temperatura ambiente después de diferentes periodos (0, 2, 5 y 10 d) de frigoconservación a dos temperaturas (3 y 6 ± 1 °C, 90 ± 10 % HR). Cada punto representa la media de tres repeticiones y las líneas verticales la desviación estándar. ...63

Figura 13. Ángulo de tono (Hue) en pulpa, en frutos de tres accesiones (Zen-1, Zen-2 y Zen-3) de aguacate criollo de raza mexicana, madurados a temperatura ambiente después de diferentes periodos (0 [Testigo], 2, 5 y 10 d) de frigoconservación a dos temperaturas (3 y 6 ± 1 °C, 90 ± 5 % HR). Cada barra representa la media de tres repeticiones y las líneas verticales la desviación estándar. *Letras iguales corresponden a tratamientos estadísticamente iguales (Tukey, $p < 0.05$).....65

Figura 14. Índice de saturación de color (Chroma) en pulpa, en frutos de tres accesiones (Zen-1, Zen-2 y Zen-3) de aguacate criollo de raza mexicana, madurados a temperatura ambiente después de diferentes periodos (0 [Testigo], 2, 5 y 10 d) de frigoconservación a dos temperaturas (3 y 6 ± 1 °C, 90 ± 5 % HR). Cada barra representa la media de tres repeticiones y las líneas verticales la desviación estándar. *Letras iguales corresponden a tratamientos estadísticamente iguales (Tukey, $p < 0.05$).....66

Figura 15. Luminosidad en pulpa, en frutos de tres accesiones (Zen-1, Zen-2 y Zen-3) de aguacate criollo de raza mexicana, madurados a temperatura ambiente después de diferentes periodos (0 [Testigo], 2, 5 y 10 d) de frigoconservación a dos temperaturas (3 y 6 ± 1 °C, 90 ± 5 % HR). Cada barra representa la media de tres repeticiones y las líneas verticales la desviación

estándar. *Letras iguales corresponden a tratamientos estadísticamente iguales (Tukey, $p < 0.05$).67

Figura 16. ‘Firmeza en fruto completo’ en frutos de tres accesiones (Zen-1, Zen-2 y Zen-3) de aguacate criollo de raza mexicana, madurados a temperatura ambiente después de diferentes periodos (0 [Testigo], 2, 5 y 10 d) de frigoconservación a dos temperaturas (3 y 6 ± 1 °C, 90 ± 5 % HR). Cada barra representa la media de tres repeticiones y las líneas verticales la desviación estándar. *Letras iguales corresponden a tratamientos estadísticamente iguales (Tukey, $p < 0.05$)......68

Figura 17. Fuga de electrolitos (%) en pulpa y cáscara, en frutos de dos accesiones (Mnd-1 y Mnd-2) de aguacate criollo de raza mexicana, madurados a temperatura ambiente después de diferentes periodos (0 [Testigo], 2, 5 y 10 d) de frigoconservación a dos temperaturas (3 y 6 ± 1 °C, 90 ± 5 % HR). Cada barra representa la media de tres repeticiones y las líneas verticales la desviación estándar. *Letras iguales corresponden a tratamientos estadísticamente iguales (Tukey, $p < 0.05$)......70

Figura 18. Actividad de Superóxido Dismutasa (SOD) en pulpa, en frutos de dos accesiones (Mnd-1 y Mnd-2) de aguacate criollo de raza mexicana, madurados a temperatura ambiente después de diferentes periodos (0 [Testigo], 2, 5 y 10 d) de frigoconservación a dos temperaturas (3 y 6 ± 1 °C, 90 ± 5 % HR). Cada barra representa la media de tres repeticiones y las líneas verticales la desviación estándar. *Letras iguales corresponden a tratamientos estadísticamente iguales (Tukey, $p < 0.05$)......71

Figura 19. Actividad de Glutación Reductasa (GR) en pulpa, en frutos de dos accesiones (Mnd-1 y Mnd-2) de aguacate criollo de raza mexicana, madurados a temperatura ambiente después de diferentes periodos (0 [Testigo], 2, 5 y 10 d) de frigoconservación a dos temperaturas (3 y 6 ± 1 °C, 90 ± 5 % HR). Cada barra representa la media de tres repeticiones y las líneas

verticales la desviación estándar. *Letras iguales corresponden a tratamientos estadísticamente iguales (Tukey, $p < 0.05$).....72

Figura 20. Actividad de Piruvato Descarboxilasa (PDC) en pulpa, en frutos de dos accesiones (Mnd-1 y Mnd-2) de aguacate criollo de raza mexicana, madurados a temperatura ambiente después de diferentes periodos (0 [Testigo], 2, 5 y 10 d) de frigoconservación a dos temperaturas (3 y 6 ± 1 °C, 90 ± 5 % HR). Cada barra representa la media de tres repeticiones y las líneas verticales la desviación estándar. *Letras iguales corresponden a tratamientos estadísticamente iguales (Tukey, $p < 0.05$).....73

Figura 21. Actividad de Alcohol Deshidrogenasa (ADH) en pulpa, en frutos de dos accesiones (Mnd-1 y Mnd-2) de aguacate criollo de raza mexicana, madurados a temperatura ambiente después de diferentes periodos (0 [Testigo], 2, 5 y 10 d) de frigoconservación a dos temperaturas (3 y 6 ± 1 °C, 90 ± 5 % HR). Cada barra representa la media de tres repeticiones y las líneas verticales la desviación estándar. *Letras iguales corresponden a tratamientos estadísticamente iguales (Tukey, $p < 0.05$).....74

DEDICATORIA

A mi madre Ofelia Valderrama, por ser el motor que siempre me impulsa a ser mejor persona y crecer en el ámbito académico y profesional, por su sacrificio y apoyo incondicional ante cada camino que emprendo.

A mi padre Severo Robles Castro, por ser un ejemplo como trabajador incansable, siempre demostrándome que nunca hay que darse por vencido y siempre hay que cumplir a cabalidad, que hay que trabajar honestamente.

A mi tía Gladys y mi prima Isabella, por ser ese motivo para salir adelante y luchar por un mejor futuro, por su apoyo en este proceso.

A mis abuelos Rosalba y 'Lolo', por siempre entregarme su cariño con sus mejores recetas cuando tuve la oportunidad de visitar mi país en vacaciones.

A mis tíos Eliana y Juan Camilo por su apoyo y por darme el regalo que es mi primo y futuro ahijado Juan José.

A mi novia Valentina, por su amor, apoyo y compañía, y porque de algún modo fue quien me impulsó a emprender este camino lejos de casa y ahora me motiva a finalizarlo exitosamente.

A mis amigos, la familia que he elegido por el camino, por su amistad incondicional y siempre ser portadores de una carcajada y un mensaje de apoyo, en especial a Cristian y Juan Pablo, mis mejores amigos.

A todos los amigos que me dejó la linda experiencia de vivir en México, especialmente a Eder, 'Calcio' y 'Chucho'.

Al Dr. Joel, por haberme acogido más allá de lo académico y por haberme contagiado su amor a la ciencia.

Finalmente a esos amigos que a pesar de las dificultades, se volvieron mi familia durante estos dos años, 'Juancho', 'Gauss' y Gélimer.

AGRADECIMIENTOS

Al pueblo Mexicano por recibirme, hacerme sentir como uno más de ustedes y por permitirme cursar mis estudios de postgrado.

A la siempre gloriosa Universidad Autónoma Chapingo, en especial al Programa de Posgrado en Ciencia y Tecnología Agroalimentaria, que a través de la Maestría en Ciencia y Tecnología Agroalimentaria me ha permitido seguir creciendo como persona y como profesional.

Al Dr. José Joel Enrique Corrales García, por haber aceptado guiarme en este camino, aportando siempre su entrega y apoyo durante todo este proceso, por sus enseñanzas y su paciencia.

A la Dra. Ma. Carmen Ybarra Moncada, le agradezco su participación como asesora de la presente tesis, pero más que nada le agradezco el valioso aporte a mi vida académica y profesional durante el curso de Métodos Estadísticos.

A la Dra. María Teresa Colinas León, por su participación como asesora en la presente tesis y por su total disposición en atender mis dudas e inquietudes durante el desarrollo de esta investigación.

Al Dr. Teodoro Espinosa Solares, Perita, Areli, Melchor Negrete y Flor Ponce, por su colaboración en los procesos administrativos durante mis estudios de maestría.

Al Dr. Crescenciano Saucedo Veloz, por siempre haber estado en la disposición de colaborar en el desarrollo de la presente investigación, permitiendo el uso de su laboratorio y equipos en el Colegio de Posgraduados.

Al Sr. Efraín, por su entrega y constante disposición para recibirme y acompañarme en la colecta del material experimental, gracias por siempre ser tan amable y servicial.

Al Sr. Cecilio Bautista Bañuelos, profesional encargado del laboratorio de la Dra. Colinas, por su valiosa ayuda y todo el tiempo entregado en el desarrollo de la fase experimental.

A mi novia Valentina, por apoyarme en el trabajo de laboratorio cuando más lo necesité.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT), por brindar los recursos económicos para solventar mi manutención y hospedaje durante mis estudios de maestría.

A todos los compañeros que no mencioné en este documento, pero que de alguna manera me ayudaron a llegar de manera exitosa al final de este camino.

DATOS BIOGRÁFICOS



DATOS PERSONALES

Nombre	Nicolás Rafael Francisco Robles Valderrama
Fecha de nacimiento	30 de enero de 1995
Lugar de nacimiento	Villavicencio, Meta, Colombia
CURP	ROVN950130HNEBLC06
Profesión	Ingeniero Agroindustrial
Matrícula profesional (COPNIA – Colombia)	091016-0511254 CND

DESARROLLO ACADÉMICO

Bachillerato	Liceo General Serviez, Colombia.
Licenciatura	Universidad de los Llanos, Colombia.

1. INTRODUCCIÓN GENERAL

El aguacate (*Persea americana* Mill.) es el nombre por el cual se conoce al fruto obtenido de las plantas con el mismo nombre, las cuales pertenecen a la familia *Lauraceae* y son dicotiledóneas de hoja perenne, cuyo origen está establecido en Mesoamérica, razón por la cual estos frutos son característicos de zonas con climas tropicales y subtropicales (Galindo-Tovar, Ogata-Aguilar, y Arzate-Fernández, 2008; Tan, 2019). Los aguacates poseen una piel exterior resistente, un interior comestible suave y una semilla dura en el centro, y se componen principalmente por ácidos grasos, fibras solubles e insolubles (Dreher y Davenport, 2013). Estos frutos poseen propiedades nutricionales que pueden resultar benéficas a la salud humana, situación que ha propiciado que su consumo se haya vuelto extremadamente popular (Farley et al., 2020).

Ecológicamente se distinguen tres razas diferentes de aguacate, nombradas por su presunto lugar de origen: guatemalteca (*Persea americana* var. *guatemalensis* Williams), mexicana (*Persea americana* var. *drymifolia* Blake) y antillana (*Persea americana* var. *americana* Mill) (Bergh y Ellstrand, 1986). A partir de las anteriores, se han realizado procesos de selección en busca de frutos con las mejores características comerciales, de este modo han surgido cultivares descendientes de cada una de las razas o híbridos entre éstas. A inicios del siglo XX en México se comercializaban en su mayoría frutos criollos de raza mexicana, pero debido al proceso de selección mencionado se encontraron cultivares con mejores características y se cambió a la comercialización de aguacate cv. 'Fuerte' y posteriormente al cv. 'Hass', el cual ha ido desplazando progresivamente a los cultivares utilizados anteriormente (Sánchez-Colín, Mijares-Oviedo, López-López, y Barrientos-Priego, 2002).

Actualmente la demanda y producción de aguacate, en su mayoría cv. 'Hass', han crecido exponencialmente; entre los años 2014 y 2019, los mayores productores de aguacate a nivel mundial fueron México y República

Dominicana, respectivamente; por su parte Perú, Colombia e Indonesia han oscilado entre el tercer y quinto puesto (FAO, 2021). La oferta de este producto se ha visto correspondida por diferentes países que importan este alimento, por ejemplo, en Estados Unidos, donde su consumo e importaciones han crecido más del doble entre los años 2008 y 2018 (Economic Research Service, 2021).

En localidades donde tradicionalmente se cultivan los aguacates criollos de raza mexicana (*Persea americana* var. *drymifolia* Blake), conocidos comúnmente en México como criollos, se ha podido evidenciar que estos han venido relegándose con el paso del tiempo a un consumo local, debido a que los volúmenes de producción de aguacate cv. 'Hass' han conllevado a que progresivamente los agricultores que se dedicaban a su cultivo, vayan reemplazando sus árboles de aguacate criollo por el cultivar más rentable económicamente, situación que está generando una tendencia negativa de desaparición de materiales genéticos con un posible alto potencial nutracéutico (Corrales Garcia y Méndez-Zúñiga, 2020; Sánchez-Colín, Mijares-Oviedo, López-López, y Barrientos-Priego, 2002; Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera, 2021).

Méndez-Zúñiga et al. (2019) afirman que los aguacates criollos de raza mexicana presentan un mayor potencial nutracéutico en comparación con el cv. 'Hass'. Los mismos autores argumentan que lo anterior podría generar un gran interés en mercados sofisticados y muy exigentes de países con alto poder adquisitivo, puesto que, de los aguacates criollos se consume incluso la cáscara gracias a su agradable sabor; aunado a ello, otro factor a favor de estos, es la tendencia actual de buscar alimentos que aporten mejores condiciones a la salud (Boccia y Punzo, 2020).

A pesar de lo mencionado en el párrafo anterior, este mayor potencial nutracéutico de los aguacates criollos de raza mexicana aún no se ha dado a conocer ampliamente en los mercados sofisticados. Al respecto se prevé que cuando esto ocurra, la demanda de éstos va a crecer de manera importante. Sin embargo, dado que la vida de anaquel de estos aguacates es muy corta,

va a ser necesario prolongarla al máximo mediante la principal técnica postcosecha de que se dispone para tal fin, que es la frigoconservación, siendo su principal limitante los daños por frío que presentan algunos frutos, principalmente los de origen tropical o subtropical como lo es el aguacate (Saucedo-Veloz, 1991).

Los daños por frío son alteraciones celulares, fisiológicas y bioquímicas que ocurren al almacenar un producto hortofrutícola a temperaturas por debajo de su umbral crítico, el cual es específico para cada uno. Con los daños por frío generalmente se estimula la tasa respiratoria y la emisión de etileno, hay interferencia en la producción de energía, aumenta la permeabilidad de las membranas, se inactivan algunas enzimas y se altera la estructura celular, entre otras cosas (Artés-Calero y Artés-Hernández, 2002; Rai, Kumari, y Vashistha, 2021).

La limitación de los aguacates criollos de raza mexicana al consumo en mercados locales ha conllevado también, a que anteriormente no se generara el interés por tener una tecnología poscosecha que permita prolongar al máximo su vida de anaquel. Dado el posible interés de mercados más distantes, se hace necesario avanzar en este camino, y ya que la frigoconservación es la principal técnica postcosecha de que se dispone para tal fin, se debe encontrar el umbral crítico que permita almacenar y prolongar la vida de anaquel de los aguacates criollos mexicanos sin provocar daños por frío, pero para lograr esto es necesario primero contar con herramientas que permitan medir de manera precisa la manifestación de estos daños.

El objetivo del presente estudio fue determinar, de un grupo de variables fisiológicas, físicas, fisicoquímicas y bioquímicas, cuáles presentan correlación con los daños por frío en frutos de aguacate criollo refrigerados. Con esto se busca dar un primer paso en el desarrollo de una tecnología para el manejo poscosecha de estos frutos con la finalidad de prolongar su muy corta vida de anaquel y así abrir la posibilidad de alcanzar mercados importantes pero distantes, y a la par, preservar el material genético de los árboles de aguacate criollo de raza mexicana.

La presente investigación está conformada por tres capítulos. El primer capítulo incluye la introducción general donde se hace una breve contextualización del problema de investigación. El segundo capítulo consistió en la revisión de literatura, donde se plasman inicialmente aspectos generales como el origen, la distribución y clasificación de los aguacates, para luego ahondar en las propiedades nutraceuticas de los aguacates criollos de raza mexicana y finalmente en los posibles efectos de la frigoconservación sobre estos. El tercer capítulo corresponde al artículo científico, donde se tuvo como objetivo determinar la correlación de algunas variables con los daños por frío en aguacates criollos de raza mexicana.

2. REVISIÓN DE LITERATURA

2.1. Origen y distribución del aguacate (*Persea americana* Mill.)

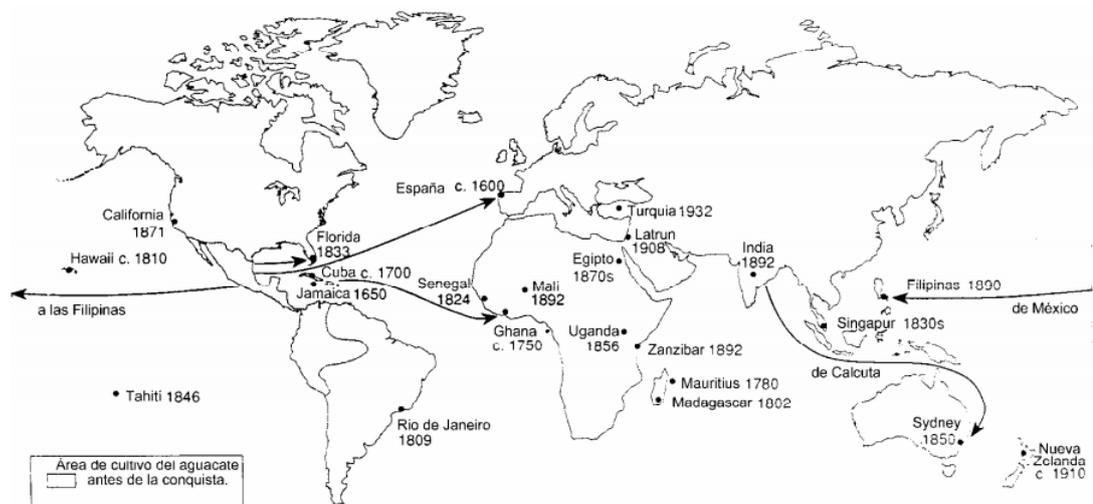
El aguacate (*Persea americana*) tiene su centro de origen en las partes altas del centro y este de México y las partes altas de Guatemala (Sánchez-Colín et al., 2002). Esta especie pertenece a la gran familia *Lauraceae*, cuyos antepasados se originaron en Gondwana (actualmente África) y emigraron a Laurasia (actualmente América del Norte, Europa y Asia); de allí una parte de la familia, incluido el clado del género *Persea*, emigró hacia América del Norte (Galindo-Tovar, Arzate-Fernández, Ogata-Aguilar, y Landero-Torres, 2007). Galindo-Tovar et al. (2007) también afirman que posteriormente, cuando se formó América Central y surgieron las grandes formaciones montañosas, surgieron nuevos hábitats y se produjo la especiación debido al aislamiento geográfico, provocando que los ancestros del aguacate migraran de América del Norte hacia el sur y se establecieran en los hábitats más hospitalarios de Mesoamérica. Finalmente, la evidencia sugiere que la compleja historia geológica de México ha sido el principal factor evolutivo del aguacate.

De acuerdo con varios autores, el ancestro silvestre de los aguacates cultivados comercialmente en la actualidad era una especie de árbol polimórfico que se extendía por una amplia área geográfica desde las tierras altas del este y centro de México a través de Guatemala hasta la costa del Pacífico de América Central (H. Chen, Morrell, Ashworth, de la Cruz, y Clegg, 2009).

Dado que muchos documentos con información sobre la historia prehispánica del aguacate fueron destruidos por los españoles en su esfuerzo por cristianizar las culturas que habitaban Mesoamérica, los datos iconográficos han aportado información importante sobre la relación entre el aguacate y algunas culturas mesoamericanas (Galindo-Tovar et al., 2007). De acuerdo con estos autores, ejemplos de lo anterior son: 1) el calendario civil Maya (800 a 300 a.C.), donde el nombre de cada mes se basa en eventos agrícolas y

uno de ellos está representado por un aguacate; y 2) las inscripciones en la tumba de Pakal en Palenque, Chiapas (650 d.C.), donde hay figuras representando a los antepasados de Pakal y cada una tiene detrás un árbol con frutos que incluyen al aguacate.

Galindo-Tovar et al. (2007) afirman que hay evidencia de que en Mesoamérica existió una amplia red de intercambio comercial en la que el aguacate pudo servir como moneda de cambio, y esto propició su distribución a otras zonas del continente. Por ejemplo, los Olmecas (México) tuvieron contacto con los Papayecas (Honduras) entre los años 1200 y 1000 a.C, tiempo que coincide con los restos de aguacate encontrados en territorio hondureño, lo cual sugiere su uso como producto comercial; de igual manera, el aguacate y otros cultivos fueron llevados de México a Ecuador y el norte Peruano en la época pre-colombina por la cultura Valdivia (del oeste de Ecuador), quienes en sus viajes en bote hasta Perú y el sur de México (desde el 2200 a.C) dispersaron gran cantidad de plantas, entre ellas el aguacate (Galindo-Tovar et al., 2007). Por su parte Sánchez-Colín et al. (2002) manifiestan que, durante la época de la conquista, los españoles se encargaron de introducir el aguacate a otros países americanos y a Europa, y consecuentemente se distribuyó por diferentes partes del mundo con el paso del tiempo (Figura 1).



Fuente: Sánchez-Colin et al. (2002).

Figura 1. Distribución del aguacate en el mundo después de la conquista y hasta antes de 1915.

2.2. Taxonomía de la especie *Persea americana* Mill.

El aguacate es una planta dicotiledónea de hoja perenne que pertenece a la gran familia *Lauraceae* y al género *Persea* (Cuadro 1), el cual está conformado actualmente por un aproximado de 100 especies que se encuentran distribuidas en su mayoría, desde el sur de los Estados Unidos de América (*Persea borbonia*) hasta Chile (*Persea lingue*) (Barrientos-Priego y López-López, 1998; Bergh y Ellstrand, 1986; Endress y Ingersheim, 1997; Sánchez-Colín et al., 2002; Tan, 2019).

Cuadro 1. Clasificación taxonómica del aguacate (*Persea americana* Mill.)

Reino: Plantae

División: Angiospermae o Magnoliophyta

Clase: Dicotyledoneae o Magnoliopsida

Orden: Laurales

Familia: Lauraceae

Género: *Persea*

Especie: *americana*

Fuente: Barrientos-Priego y López-López, 1998; Bergh y Ellstrand, 1986; Endress y Ingersheim, 1997; Sánchez-Colín et al., 2002; Tan, 2019.

2.3. Cultivares usados históricamente

México es históricamente reconocido como el país donde se originó el aguacate y actualmente es el mayor productor y exportador (Tan, 2019). De acuerdo con Sánchez-Colín et al. (2002), en territorio nacional se iniciaron actividades de exploración y colecta a inicios del siglo XX por parte de la California Avocado Society (CAS), quienes encontraron que la producción se basaba en aguacates criollos de las razas mexicana y antillana; pero es hasta 1927 que la Dirección General de Agricultura de México genera las primeras estadísticas sobre producción y superficie, concordando con la CAS.

Sánchez-Colín et al. (2002) afirman que la producción basada en material criollo se mantuvo aproximadamente hasta la década de los cuarenta, cuando surgió la necesidad de tener cultivares de mejor calidad, rendidores y con características comerciales. A raíz de lo anterior surgió el cultivar 'Fuerte', que se obtuvo en estado silvestre en Atlixco, Puebla, y que luego sería reproducido por clonación para consolidarse por muchos años como el cultivar comercial en México y también convertirse en la base de la industria aguacatera en California (Dalsaso y Guevara, 1988; Sánchez-Colín et al., 2002).

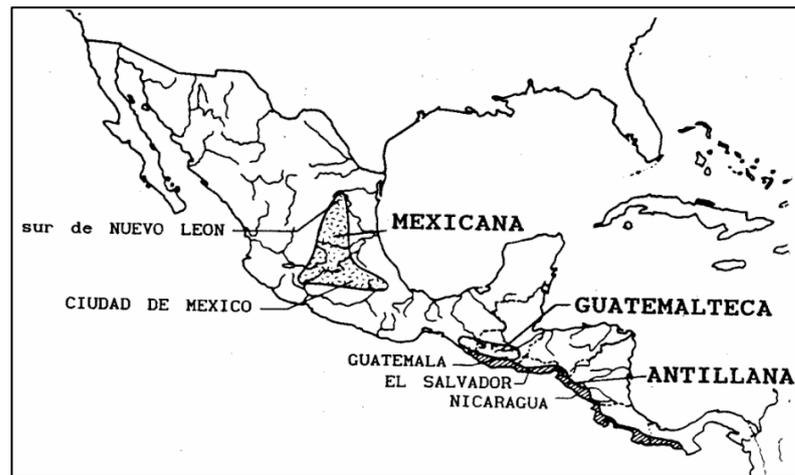
Durante las décadas de los 50, 60 y 70 se empezaron a cultivar comercialmente también los aguacates Bacon, Rincón, Zutano, Criollos de raza mexicana y Hass (Sánchez-Colín et al., 2002). Los mismos autores manifiestan que para el año de 1963 aparecieron los primeros viveros comerciales del cultivar Hass, y al año siguiente se establecieron los primeros huertos comerciales del mismo. El aguacate cv. Hass se posicionó en el mercado sustituyendo así a los demás cultivares presentes, y actualmente es el más demandado a nivel nacional e internacional (Dalsaso y Guevara, 1988; Ramírez-Gil, Gilchrist-Ramelli, y Morales-Osorio, 2017; Sánchez-Colín et al., 2002).

2.4. Razas de aguacate

Existen diferentes tipos de aguacates, los cuales se diferencian en aspectos tan importantes como el tiempo transcurrido desde la floración hasta su madurez hortícola, el grosor de la cáscara, la tolerancia a las bajas temperatura, entre otros (Bergh y Ellstrand, 1986).

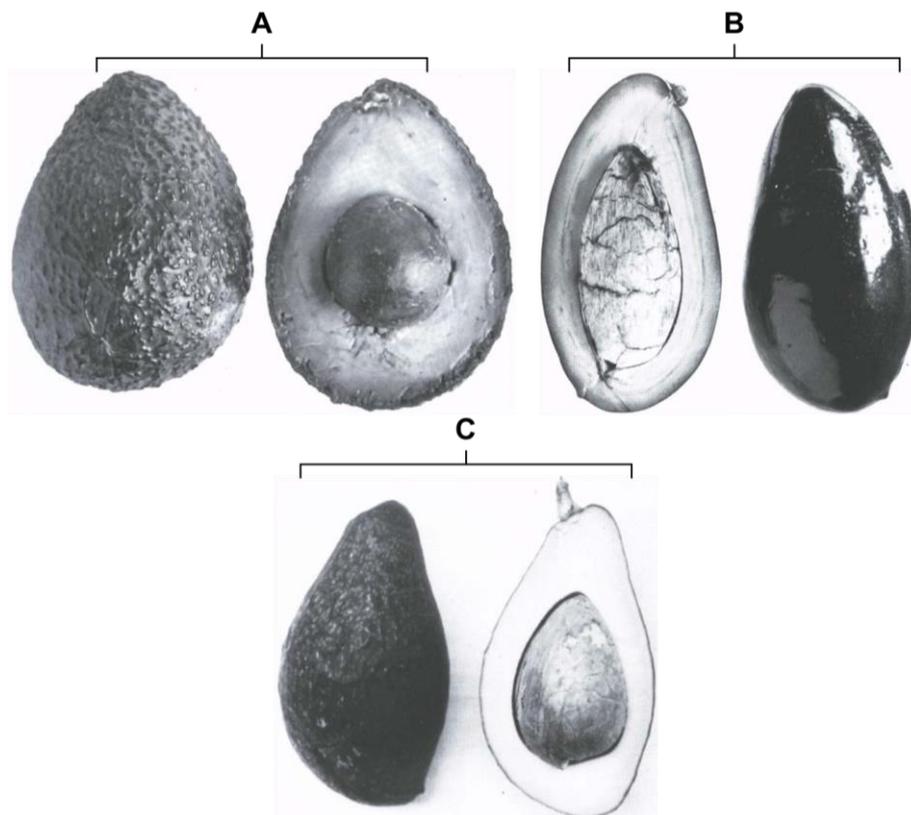
De acuerdo con Bergh y Ellstrand (1986), ecológicamente se distinguen tres razas nombradas por su presunto lugar de origen (Figura 2): guatemalteca (*Persea americana* var. *guatemalensis* Williams), mexicana (*Persea americana* var. *drymifolia* Blake) y antillana (*Persea americana* var. *americana* Mill). Una de las primeras evidencias que se tienen de lo anterior proviene del Códice Florentino (siglo XVI) donde se mencionaban tres tipos de aguacate: aoacaquauitl, tlacacolaoacatl y quilaoacatl, los cuales, de acuerdo con su

descripción, podrían tratarse de las razas mexicana, antillana y guatemalteca respectivamente (Figura 3).



Fuente: Sánchez-Colín et al. (2002).

Figura 2. Posibles centros de origen de las tres razas de aguacate.



Fuente: Bergh y Ellstrand (1986).

Figura 3. Razas o variedades botánicas de aguacate. (A) *Persea americana* var. *guatemalensis* (raza guatemalteca), (B) *Persea americana* var. *drymifolia* (raza mexicana) y (C) *Persea americana* var. *americana* (raza antillana).

Bergh y Ellstrand (1986) mencionan que la clasificación botánica de estas razas tuvo variaciones en sus inicios. Por ejemplo, Kopp (1966) aceptaba el postulado de que el aguacate de raza mexicana era una especie aparte, pero concluyó que las otras dos razas se diferenciaban en menor grado de la mexicana, por lo que no eran especies diferentes sino sólo subespecies diferentes. Por su parte Williams (1977) separó la raza guatemalteca en su propia especie (*Persea nubigena*) y a las otras dos las siguió clasificando como *P. americana*.

La clasificación taxonómica de las diferentes razas de aguacate se vio beneficiada y esclarecida con el uso de electroforesis enzimática, a partir de lo cual se obtuvieron datos concluyentes que demostraron que tanto Kopp como Williams estaban equivocados, ya que las tres razas de aguacate están relacionadas por igual cada una con las otras dos (Bergh y Ellstrand, 1986). Con lo anterior, los mismos autores afirman además que las tres razas no son lo suficientemente diferentes como para ser consideradas especies diferentes, pero a su vez son lo suficientemente diferentes como para considerarlas simplemente formas separadas de la misma especie, por lo cual se definen como tres subespecies o tres “variedades” botánicas. En el Cuadro 2 se aprecian algunas características de los árboles y frutos de las tres razas de aguacate.

Sumado a lo anterior, es importante aclarar que la palabra “variedad”, abreviada como “var.”, se debe utilizar para referirse a alguna de las tres subespecies, lo cual es el término botánico correcto, mientras que la palabra “cultivar”, abreviada como “cv.”, se usa para clones específicos, es decir, frutos cuyas propiedades comerciales llevaron a la industria a producirlos en masa mediante reproducción clonal, como lo son el Fuerte y el Hass (Bergh y Ellstrand, 1986). Es por lo anterior, que es incorrecto hablar de las variedades Fuerte y Hass, se deben mencionar como los cultivares Fuerte y Hass. Adicionalmente, Bergh y Ellstrand (1986) sustituyen la palabra variedad por la palabra comparable “raza”.

Cuadro 2. Algunas características de los árboles y los frutos de las tres diferentes razas de aguacate.

Rasgo		Raza		
Árbol		Guatemalteca	Mexicana	Antillana
Clima		Subtropical	"Semitropical" a templado	Tropical
Altitud (m.s.n.m.)		1000 m < Alt. < 2000 m	2000 m < Alt.	Alt. < 1000 m
Tolerancia al frío	al	Intermedia	Mayor	Menor
Fruto				
Tamaño		Intermedios	Variable, tendiente a pequeños	Variable, tendiente a grandes
Pedicelo		Cónico y grosor voluminoso	Cilíndricos y grosor mediano	Forma de cabeza de clavo y poco grosor
Cáscara		Gruesa, quebradiza y rugosa	Delgada, lisa y suave	Grosor mediano, flexible y suave
Semilla		Adherida y cotiledones lisos	Adherida o suelta, cotiledones lisos o ligeramente rugosos	Suelta y cotiledones rugosos
Aceite		Contenido intermedio	Contenido alto	Contenido bajo
Sabor		Ligero, en ocasiones nogado	A especia y por lo general a anís	Ligero y frecuentemente dulce, con un ligero amargor al final
Tiempo de flor a fruto		10 a 16 meses	6 a 9 meses	5 a 9 meses

Fuente: Modificado de Barrientos-Priego y López-López (1998).

2.5. Aguacates criollos de raza mexicana

Los aguacates de raza mexicana (*Persea americana* var. *drymifolia* Blake) son conocidos comúnmente en México como 'aguacates criollos', y al igual que la mayoría de las especies de la familia *Lauraceae*, tienen un follaje que desprende aroma cuando se aplasta, y en este caso es un olor a anís; los árboles de esta raza pueden estar ubicados desde zonas con climas "semitropicales" a templados, generalmente a más de 2000 m.s.n.m., por lo cual tienen una mayor tolerancia al frío en comparación con las otras dos razas; sus frutos son de tamaño variable, con una piel muy delgada, un alto contenido de aceite y un sabor también a anís (Bergh y Ellstrand, 1986).

Corrales Garcia y Méndez-Zúñiga (2020) definen a los aguacates criollos de raza mexicana como una subespecie hipervariable de aguacate, debido a su

alto grado de polimorfismo genético. Al ser su forma de reproducción por polinización abierta, el tamaño de su genoma es muy grande en comparación con otras especies, lo que contribuye a que las características fenotípicas de su progenie sean impredecibles y con un alto grado de polimorfismo morfológico (Corrales Garcia y Méndez-Zúñiga, 2020). Lo anterior se traduce en frutos con marcadas diferencias respecto a su tamaño, forma, color, sabor, contenido de compuestos fitoquímicos, entre otras características.

2.5.1. Cultivo de aguacates criollos de raza mexicana

El aguacate criollo de raza mexicana se cultiva en diferentes sistemas agrícolas intensivos, pero principalmente en huertas pequeñas y patios traseros, con un manejo agronómico mínimo, sin la aplicación de agroquímicos y muchas veces sometido a altos grados de estrés causados por factores bióticos y abióticos; las situaciones anteriores son las que han permitido que los ejemplares de la raza mexicana prosperaran en una gran cantidad de microclimas, contribuyendo así a la dispersión, hibridación y variabilidad genética de la subespecie (Corrales Garcia y Méndez-Zúñiga, 2020; Gutiérrez-Díez, Sánchez-González, Torres-Castillo, Cerda-Hurtado, y Ojeda-Zacarías, 2015).

De acuerdo con Sánchez-Colín et al. (2002), datos del FIRA (Fideicomisos Instituidos en Relación con la Agricultura) registran que para la primera mitad de la década de los 70, algunos estados basaban su producción de aguacate principalmente en criollos de raza mexicana, ya que, del total de árboles sembrados, el porcentaje de criollos superaba el 50 % (Cuadro 3).

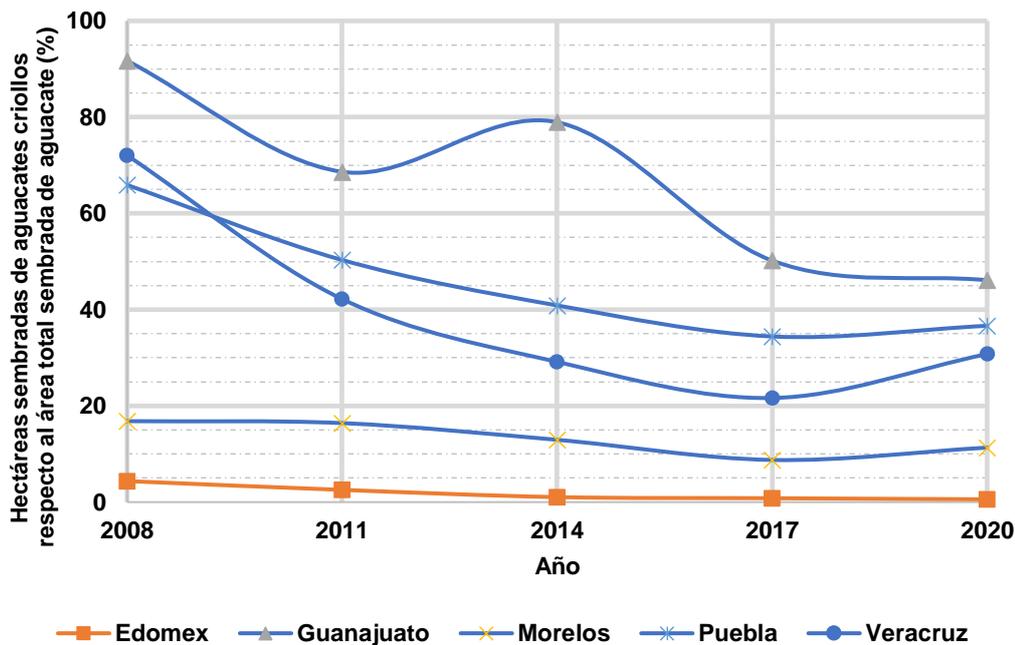
Corrales Garcia y Méndez-Zúñiga (2020) afirman que los productores anteriormente dedicados al cultivo de aguacate criollo de raza mexicana, han optado por introducir cultivares de mayor valor en el mercado, como el 'Hass' y el 'Fuerte', en sus huertas donde antes tenían criollos. Lo anterior concuerda con los datos del Servicio de Información de Agroalimentaria y Pesquera, SIAP (2021), donde se reporta que, para el año 2008, la superficie cultivada de aguacates criollos en algunos de los principales estados productores

reportados en el Cuadro 3, como Estado de México, Guanajuato, Morelos, Puebla y Veracruz, representó el 4.36, 91.72, 16.82, 65.90 y 72.06 %, respectivamente, de la superficie total cultivada de aguacate, y actualmente los mismos estados finalizaron el 2020 con una superficie sembrada de aguacates criollos correspondiente al 0.58, 46.11, 11.32, 36.65 y 30.77 % de la superficie total cultivada de aguacate (Figura 4). Respecto al porcentaje de hectáreas sembradas de aguacate criollo a nivel nacional, desde el año 2006 hasta el año 2020, éste se ha reducido en un 2.89 % (Figura 5).

Cuadro 3. Principales cultivares y variedades de aguacate cultivado en México en la primera mitad de la década de los 70.

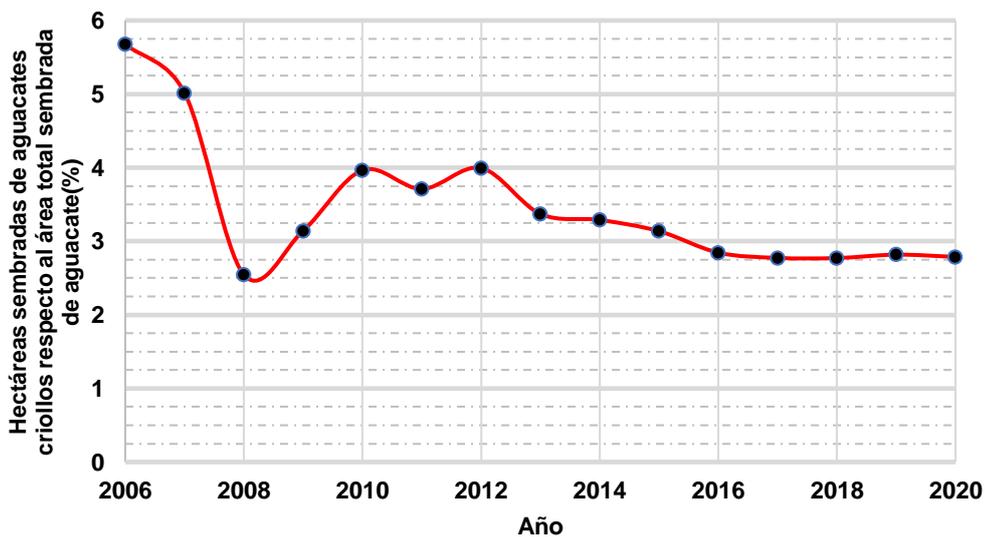
Estado	Cultivar/Variedad	% total de árboles
Estado de México	Cv. Fuerte y Cv. Hass	60
	Criollo de raza mexicana	40
Guanajuato	Criollo de raza mexicana	100
Michoacán	Cv. Hass	85
	Cv. Fuerte	8
	Cv. Bacon, Cv. Wurtz, Cv. Rincón y Criollo de raza mexicana	7
Morelos	Criollo de raza mexicana	95
	Cv. Fuerte	5
Nayarit	Cv. Boot 7 y Cv. Boot 8	85
	Cv. Choquette	8
	Cv. Hass	5
	Criollo de raza mexicana	2
Puebla	Criollo de raza mexicana	65
	Cv. Fuerte	32
	Cv. Hass, Cv. Bacon y Cv. Rincón	3
Veracruz	Criollo de raza mexicana	75
	Cv. Fuerte	15
	Cv. Lula y Cv. Rincón Hall	10

Fuente: Sánchez-Colín et al. (2002).



Fuente: SIAP, 2021.

Figura 4. Porcentaje de hectáreas sembradas de aguacate criollo de raza mexicana respecto al área total sembrada en Estado de México, Guanajuato, Morelos, Puebla y Veracruz, en el periodo 2008-2020.

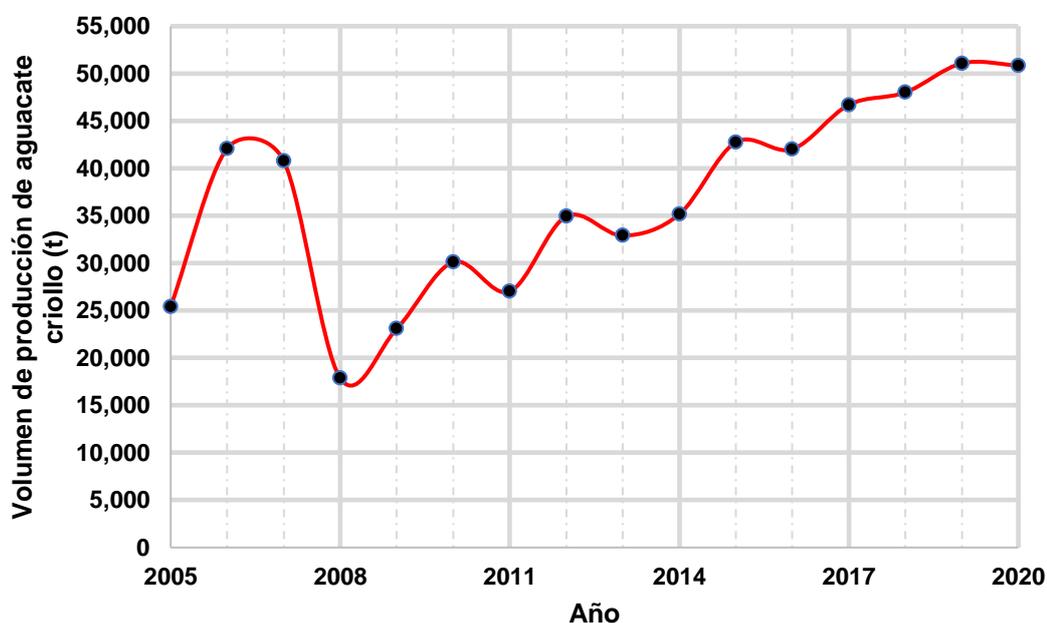


Fuente: SIAP, 2021.

Figura 5. Porcentaje de hectáreas sembradas de aguacate criollo de raza mexicana respecto al área total sembrada de aguacate en México, en el periodo 2006-2020.

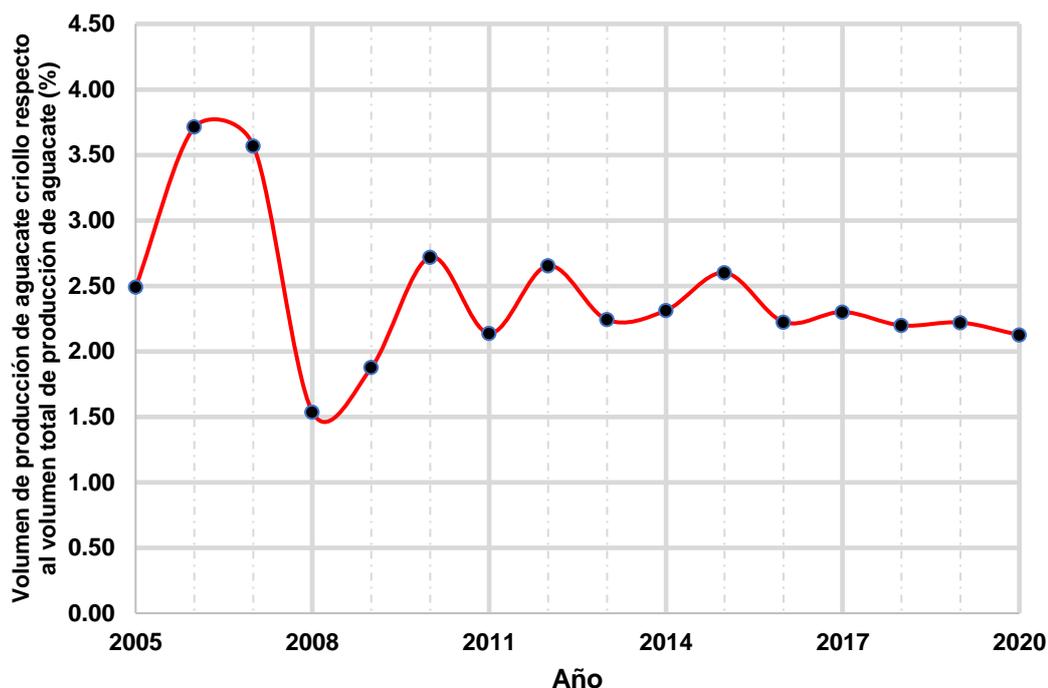
2.5.2. Producción y valor comercial de los aguacates criollos de raza mexicana

El aguacate criollo de raza mexicana tuvo una disminución considerable en toneladas cosechadas entre los años 2006 y 2012, sin embargo, desde entonces su producción ha aumentado constantemente hasta la actualidad (Figura 6). Esto no quiere decir que los aguacates criollos estén tomando mucha importancia entre los productores, ya que este aumento de volumen es proporcional y consecuente con el aumento en el volumen de producción total de aguacates en México. En la Figura 7, se puede observar que el volumen de producción de aguacate criollo respecto al volumen de producción total de aguacate en México, representa porcentajes que se han mantenido constantes durante los últimos 15 años, oscilando entre el 1.5 y el 3.7 %.



Fuente: SIAP, 2021.

Figura 6. Volumen de producción de aguacate criollo mexicano en el periodo 2005-2020.

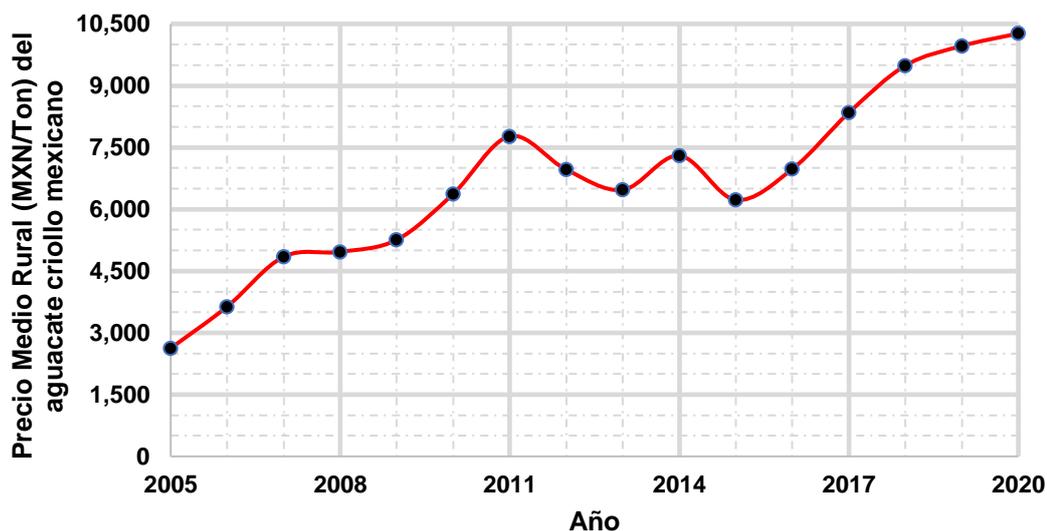


Fuente: SIAP, 2021.

Figura 7. Porcentaje de producción de aguacate criollo mexicano respecto a la producción total de aguacate en México, en el periodo 2005-2020.

Los aguacates criollos de raza mexicana poseen una piel muy delgada que los hace muy susceptibles a los daños mecánicos y adicionalmente su vida de anaquel es muy corta. Sumado a ello, el tamaño de los aguacates criollos y su variabilidad respecto la relación pulpa-hueso, que suele ser baja, hacen que los consumidores opten por el cv. Hass cuya relación pulpa hueso es mayor y además ofrece precios que compiten con los del aguacate criollo (Ramos-Aguilar et al., 2021).

De acuerdo con cifras del SIAP (2021), el aguacate criollo mexicano tuvo un crecimiento en su PMR (Precio Medio Rural) entre los años 2005 y 2009, pasando de los \$ 2600 MXN a los \$ 5258 MXN por tonelada, para luego permanecer constante entre el 2010 y el 2015, oscilando entre los \$ 6200 MXN y los \$ 7800 MXN por tonelada aproximadamente, y durante los últimos 5 años su PMR ha ido aumentando hasta cerrar el 2020 a \$ 10268 MXN por tonelada (Figura 8).



Fuente: SIAP, 2021.

Figura 8. Precio Medio Rural (PMR) del aguacate criollo mexicano en el periodo 2005-2020.

2.5.3. Composición química de los aguacates criollos de raza mexicana

Dependiendo de la variedad y el cultivar, los aguacates además de su forma y color presentan también variaciones en su composición química. La información disponible acerca del contenido nutricional de los aguacates criollos de raza mexicana es escasa, pero de manera general en la pulpa de aguacate se suelen presentar valores aproximados de 67 a 78 % de humedad, 13.5 a 24 % de lípidos, 0.8 a 4.8 % de carbohidratos, 1 a 3 % de proteína, 0.8 a 1.5 % de ceniza, 1.4 a 3 % de fibra y una densidad energética en un rango de 140 a 228 Kcal (Fonseca-Duarte, Alves-Cháves, Dellinghausen-Borges, y Barboza-Mendonça, 2016). Adicionalmente, los aguacates son una fuente rica en potasio, con concentraciones que van desde los 340 hasta los 723 mg 100⁻¹ g⁻¹ de peso fresco (Cowan y Wolstenholme, 2016).

A pesar de la información presentada en el párrafo anterior, (Ramos-Aguilar et al., 2021) reportaron en frutos de cuatro accesiones de aguacate criollo mexicano un porcentaje de humedad entre el 64.87 y el 69.89 %, donde sólo los frutos de una accesión se encontraban dentro del rango establecido por Fonseca-Duarte et al. (2016), de igual manera los contenidos de azúcares totales determinados por Ramos-Aguilar et al. (2021) para los frutos de las

cuatro accesiones de criollo se encuentran por debajo del rango reportado por Fonseca-Duarte et al. (2016), con valores desde 0.2 hasta 0.79 % en pulpa.

Contenido de aceite

El contenido de aceite en la pulpa de los aguacates criollos de raza mexicana, al igual que la mayoría de sus propiedades, varía entre accesiones y se han reportado valores que oscilan entre un 16.20 y un 32.32 % de peso fresco (Corrales-García et al., 2019; Ramos-Aguilar et al., 2021), mientras que el aguacate cv. Hass presenta contenidos de aceite en pulpa alrededor del 15.80 % de peso fresco (Rodríguez-Carpena, Morcuende, Andrade, Kylli, y Estévez, 2011). El contenido de aceite en pulpa, de los frutos de las accesiones de aguacate criollo analizadas, supera en gran medida a los del cv. Hass, llegando incluso a duplicar el valor en algunos ejemplares obtenidos de poblaciones cercanas a las municipalidades de Zacatlán y Atlixco, en el estado de Puebla (Corrales-García et al., 2019).

Composición de ácidos grasos

Corrales-García et al. (2019) y Méndez-Zúñiga et al. (2019) han estudiado los frutos de diferentes accesiones de aguacate criollo mexicano determinando las proporciones porcentuales de los ácidos grasos presentes en la pulpa: saturados (SFA), monoinsaturados (MUFA) y poliinsaturados (PUFA). En relación con los SFAs, los anteriores autores reportaron valores que oscilan entre 13.56 y 26.02 %, de los cuales la mayoría superan el 16 % reportado para el cv. Hass (Corrales-García et al., 2019; Dreher y Davenport, 2013; Méndez-Zúñiga et al., 2019).

Por su lado, los valores de MUFAs en pulpa de aguacates criollos mexicanos van desde 49.07 hasta 75.96 %, siendo los ácidos grasos más abundantes en esta variedad y concordando también con lo reportado para el cv. Hass, que presenta una proporción porcentual de MUFAs del 71 % (Corrales-García et al., 2019; Dreher y Davenport, 2013; Méndez-Zúñiga et al., 2019). Los MUFAs suscitan gran interés gracias a los beneficios que aportan a la salud, se sabe por ejemplo, que los ácidos oleico (omega-9) y palmitoleico (omega-7) disminuyen los niveles de colesterol total y de lipoproteínas de baja densidad

en pacientes diabéticos, lo que a su vez puede conllevar a la prevención de complicaciones cardiovasculares, que son las comorbilidades comunes en la diabetes (Traber y Atkinson, 2007).

Finalmente, en lo concerniente a los valores presentados por los PUFAs, Méndez-Zúñiga et al. (2019) reportaron proporciones aproximadas del 6 al 19 % en los frutos de 12 accesiones analizadas, concordando con lo reportado por otros autores para el cv. Hass (13 %) (Yepes-Betancur, Sánchez-Giraldo, y Márquez-Cardozo, 2017); por su parte Corrales-García et al. (2019) reportaron valores entre 9.48 y 37.13 % en frutos de 11 accesiones de criollo estudiadas, de las cuáles solamente una presentó una menor proporción porcentual que la reportada para el cv. Hass. Esta información es de destacar, ya que estos ácidos grasos son precursores de mediadores lipídicos antiinflamatorios y una alta ingesta dietética de los mismos ha sido relacionada con un menor riesgo de enfermedad cardiovascular, debido a que conservan los niveles de lipoproteínas de alta densidad y actúan como antioxidantes (Richard, Kefi, Barbe, Bausero, y Visioli, 2008; Villa-Rodríguez, Molina-Corral, Ayala-Zavala, Olivas, y González-Aguilar, 2011).

Actividad antioxidante

Méndez-Zúñiga et al. (2019) determinaron la actividad antioxidante de la fracción lipofílica de la pulpa, en frutos de 12 accesiones de aguacate criollo mexicano mediante el método ABTS, y obtuvieron resultados significativamente diferentes entre accesiones con valores que van desde 7.58 hasta 88.62 mMol TE * 100 g⁻¹ p.f.; este último valor supera el reportado para el cv. Hass y el cv. Fuerte, que presentan valores de 64 y 56 mMol TE * 100 g⁻¹ p.f., respectivamente (Rodríguez-Carpena et al., 2011).

A diferencia de cultivares más comerciales como el Hass y el Fuerte, en los frutos de aguacate criollo mexicano la cáscara es delgada, comestible y de sabor aromática y agradable, razón por la cual en México estos frutos se han consumido con todo y su cáscara desde tiempos prehispánicos; lo anterior es relevante debido a que el color oscuro característico de la cáscara se debe a

la presencia de antocianinas, las cuales son compuestos antioxidantes (Corrales-García et al., 2019).

Corrales-García et al. (2019) evaluaron la actividad antioxidante en la cáscara de los frutos de 11 accesiones de aguacate criollo mexicano mediante el método DPPH, obteniendo resultados que oscilaron entre 53.31 y 307.33 mMol TE * 100 g⁻¹ p.f.; dos de las accesiones analizadas mostraron en la cáscara de sus frutos, valores de actividad antioxidante mayores que los reportados (165.10 mMol TE * 100 g⁻¹ p.f.) para los extractos de cáscara de aguacate cv. Hass analizados por el mismo método (Moreno, Ortiz, y Restrepo, 2014).

2.5.4. Cosecha y manejo poscosecha de los aguacates criollos mexicanos

La producción de aguacates criollos de raza mexicana se ha llevado a cabo en la naturaleza y en los traspatios desde la época prehispánica hasta la actualidad (Corrales Garcia y Méndez-Zúñiga, 2020). La mayor parte de los huertos son familiares, y para su manejo utilizan tecnologías tradicionales con bajo uso de insumos agrícolas en condiciones de riego por inundación; la distancia entre hileras y árboles varía en cada huerta, además, es común la siembra de cultivos como maíz y sorgo, y frutales como el nogal entre las hileras de los árboles (Acosta-Díaz, Hernández-Torres, y Almeyda-León, 2012).

Al igual que su producción, la cosecha y manejo poscosecha de los frutos de aguacate criollo se realiza de manera tradicional. A diferencia del aguacate cv. Hass, que es podado constantemente para un mejor manejo, los árboles de criollo suelen ser ejemplares muy longevos (más de 50 años) y que no han tenido un manejo agronómico, razón por la cual alcanzan dimensiones de gran tamaño tanto en altura como en diámetro de copa, dificultando de este modo su cosecha (Ramos-Aguilar et al., 2021).

Tradicionalmente los aguacates son recolectados con la ayuda de una vara larga que tiene forma de 'Y' en la punta para desprender los frutos, bien sea de la rama (se obtiene fruto + parte del pedúnculo) o del pedúnculo (se obtiene el fruto sin pedúnculo), y actualmente, aunque se ha sofisticado el procedimiento, el principio sigue siendo el mismo. Sin embargo, para el caso del aguacate criollo de raza mexicana cuyos árboles en su mayoría son de gran tamaño, la cosecha no es tarea sencilla debido a que los frutos muchas veces se encuentran a gran altura.

Actualmente en la localidad de Tochimilco, en el municipio de Atlixco, Puebla, los productores de aguacate criollo utilizan una vara larga o incluso dos varas largas unidas en un extremo, con una punta rígida que termina en forma de 'Y', y por practicidad y velocidad, cosechan los frutos tirando de ellos con un suave golpe en seco y dejándolos caer al suelo, el cual es un poco lodoso y blando, algunos productores también utilizan mallas para atrapar los frutos desprendidos.

Los frutos de la variedad *Drymifolia* son consumidos localmente y tienen mucha demanda, es decir, su comercialización suele realizarse en los mercados de pueblos cercanos a su lugar de cosecha (Rincón-Hernández, Sánchez-Pérez, y Espinosa-García, 2011). A causa de lo anterior y de lo mencionado en el párrafo de arriba, los productores no se han visto en la necesidad de mejorar sus condiciones de cultivo y cosecha, así mismo en la literatura tampoco se encuentran trabajos encaminados a la creación de una tecnología poscosecha que permita prolongar significativamente su vida de anaquel.

De acuerdo con lo reportado por Acosta-Díaz et al. (2012) para 29 accesiones de aguacate criollo ubicadas al sur del estado de Nuevo León, la vida de anaquel de sus frutos a 20 °C varía entre 4.3 a 13 días, mientras que para aguacates cv. Hass a la misma temperatura la vida de anaquel es de aproximadamente 11.8 a 14 días (Arpaia, Collin, Sievert, y Obenland, 2018; Bowen et al., 2018).

2.6. Refrigeración como tratamiento poscosecha

Los objetivos principales en la investigación sobre la fisiología y tecnología poscosecha de productos hortofrutícolas siempre han sido mantener la calidad y minimizar al máximo las pérdidas de estos (Ponce-Valadez et al., 2016). Para tales fines, la frigoconservación ha sido y sigue siendo la tecnología poscosecha más ampliamente usada (Inestroza-Lizardo, Pereira-da Silva, Pinzetta-Junior, y Mattiuz, 2021), debido a que la temperatura está directamente relacionada con la energía interna de los sistemas alimentarios (Chaomuang, Flick, Denis, y Laguerre, 2019). Con niveles bajos de energía molecular en productos frescos almacenados bajo refrigeración, los procesos metabólicos como la respiración, transpiración y producción de etileno, se ven reducidos prolongando con ello la vida de anaquel. Adicionalmente, la frigoconservación por sí sola se destaca por evitar el uso de conservadores artificiales que podrían inducir cambios drásticos en las propiedades sensoriales de los productos (Hoffmann, Ronzoni, da Silva, Bertoli, y de Souza, 2021).

2.7. Refrigeración en frutos de aguacate

Los aguacates son frutos provenientes de zonas tropicales y subtropicales, son climatéricos y de un alto valor comercial, pero su vida de anaquel suele ser corta (Chen, Liu, Li, Li, y Yuan, 2017). La frigoconservación es efectiva para extender la vida útil de los aguacates, retrasando su maduración cuando son almacenados a bajas temperaturas (2 – 5 °C) a nivel industrial como el caso del cv. Hass, sin embargo, estos también son susceptibles a los daños por frío, que suelen asociarse con la decoloración de la pulpa, ablandamiento y mal sabor (Ortiz-Viedma et al., 2018).

Los daños por frío son un gran problema en el manejo poscosecha de frutos tropicales y subtropicales como lo es el aguacate. La relación ‘tiempo de exposición’ – ‘temperatura’ está asociada a la incidencia de los daños por frío, y adicionalmente algunos cultivares presentan más sensibilidad que otros, provocando que las condiciones de almacenamiento recomendadas sean muy

diferentes, aspecto que también se ve influenciado por factores como el grado de madurez, el estado nutricional y condiciones agroclimáticas de desarrollo (Saucedo-Hernández, Martínez-Damián, Colinas-León, Barrientos-Priego, y Aguilar- Melchor, 2005).

2.8. Daños por frío

De acuerdo con algunos autores, así como las bajas temperaturas disminuyen la actividad metabólica y con ello retrasan la maduración de muchos frutos de manera satisfactoria, también se corre el riesgo de que dichas condiciones generen perturbaciones indeseadas cuando se almacena por debajo del umbral crítico; el umbral crítico es propio de cada especie e incluso de cada variedad, y se refiere a la temperatura más baja a la que pueden estar expuestos los frutos sin presentar daños por frío (Artés-Calero y Artés-Hernández, 2002; Rai et al., 2021). Existen varias disfunciones celulares y alteraciones fisiológicas y bioquímicas producto de la frigoconservación; cuando ocurren daños por frío generalmente se estimula la tasa respiratoria y la emisión de etileno, se reduce la fotosíntesis, hay interferencia en la producción de energía, se aumenta la energía de activación, aumenta la permeabilidad de las membranas, se inactivan algunas enzimas, se desregula la membrana y se altera la estructura celular (Artés-Calero y Artés-Hernández, 2002).

2.9. Literatura citada

- Acosta-Díaz, E., Hernández-Torres, I., y Almeyda-León, I. H. (2012). Evaluación de aguacates criollos en Nuevo León, México: región sur. *Revista mexicana de ciencias agrícolas*, 3(2), 245-257.
- Arpaia, M. L., Collin, S., Sievert, J., y Obenland, D. (2018). 'Hass' avocado quality as influenced by temperature and ethylene prior to and during final ripening. *Postharvest Biology and Technology*, 140, 76-84. doi:https://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2018.02.015
- Artés-Calero, F., y Artés-Hernández, F. (2002). Daños por frío en la postrecolección de frutas y hortalizas. *Avances en Ciencias y Técnicas del Frío*, 299-310.
- Barrientos-Priego, A. F., y López-López, L. (1998). Historia y genética del aguacate. *Memoria Fundación Salvador Sánchez Colín CICTAMEX S.C., Coatepec Harinas, México*.
- Bergh, B., y Ellstrand, N. (1986). Taxonomy of the avocado. *California Avocado Society Yearbook*, 70, 135-145.
- Boccia, F., y Punzo, G. (2020). Nutraceuticals: Some remarks by a choice experiment on food, health and new technologies. *Food Research International*, 130. doi:https://doi.org/10.1016/j.foodres.2019.108888
- Bowen, J., Billing, D., Connolly, P., Smith, W., Cooney, J., y Burdon, J. (2018). Maturity, storage and ripening effects on anti-fungal compounds in the skin of 'Hass' avocado fruit. *Postharvest Biology and Technology*, 146, 43-50. doi:https://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2018.08.005
- Chaomuang, N., Flick, D., Denis, A., y Laguerre, O. (2019). Experimental analysis of heat transfer and airflow in a closed refrigerated display cabinet. *Journal of Food Engineering*, 244, 101-114. doi:https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2018.09.009
- Chen, H., Morrell, P. L., Ashworth, V. E. T. M., de la Cruz, M., y Clegg, M. T. (2009). Tracing the Geographic Origins of Major Avocado Cultivars. *Journal of Heredity*, 100(1), 56-65. doi:10.1093/jhered/esn068
- Chen, J., Liu, X., Li, F., Li, Y., y Yuan, D. (2017). Cold shock treatment extends shelf life of naturally ripened or ethylene-ripened avocado fruits. *PLOS ONE*, 12(12). doi:10.1371/journal.pone.0189991
- Corrales-García, J. E., García-Mateos, M. d. R., Martínez-López, E., Barrientos-Priego, A. F., Ybarra-Moncada, M. C., Ibarra-Estrada, E., . . . Becerra-Morales, D. (2019). Anthocyanin and Oil Contents, Fatty Acids Profiles and Antioxidant Activity of Mexican Landrace Avocado Fruits. *Plant Foods for Human Nutrition*, 74(2), 210-215. doi:10.1007/s11130-019-00721-1
- Corrales Garcia, J., y Méndez-Zúñiga, S. (2020). Criollo avocado of mexican race (*Persea americana* var. *drymifolia*): an underutilized species in horticulture. 4. doi:10.15406/hij.2020.04.00186
- Cowan, A. K., y Wolstenholme, B. N. (2016). Avocado. In B. Caballero, P. M. Finglas, & F. Toldrá (Eds.), *Encyclopedia of Food and Health* (pp. 294-300). Oxford: Academic Press.
- Dalsaso, L., y Guevara, E. (1988). Multiplicación clonal in vitro del aguacate (*Persea americana*) cv. "Fuerte". *Agronomía Costarricense*, 13(1), 61-71.

- Dreher, M. L., y Davenport, A. J. (2013). Hass avocado composition and potential health effects. *Critical reviews in food science and nutrition*, 53(7), 738-750. doi:10.1080/10408398.2011.556759
- Economic Research Service, U. S. D. A. (2021). Fruit and Tree Nuts Yearbook Tables. Retrieved from <https://www.ers.usda.gov/data-products/fruit-and-tree-nuts-data/fruit-and-tree-nuts-yearbook-tables/>
- Endress, P. K., y Ingersheim, A. (1997). Gynoecium diversity and systematics of the Laurales. *Botanical Journal of the Linnean Society*, 125(2), 93-168.
- FAO. (2021). Crops and livestock products. Retrieved from <https://www.fao.org/faostat/en/#data/QCL/visualize>
- Farley, K. X., Aizpuru, M., Boden, S. H., Wagner, E. R., Gottschalk, M. B., y Daly, C. A. (2020). Avocado-related knife injuries: Describing an epidemic of hand injury. *The American journal of emergency medicine*, 38(5), 864-868. doi:10.1016/j.ajem.2019.06.051
- Fonseca-Duarte, P., Alves-Cháves, M., Dellinghausen-Borges, C., y Barboza-Mendonça, C. R. (2016). Avocado: characteristics, health benefits and uses. *Ciência Rural*, 46(4), 747-754.
- Galindo-Tovar, M. E., Arzate-Fernández, A. M., Ogata-Aguilar, N., y Landero-Torres, I. (2007). The avocado (*Persea americana*, Lauraceae) crop in Mesoamerica: 10,000 years of history. *Harvard Papers in Botany*, 12(2), 325-334. doi:10.3100/1043-4534(2007)12[325:TAPALC]2.0.CO;2
- Galindo-Tovar, M. E., Ogata-Aguilar, N., y 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. doi:10.1007/s10722-007-9250-5
- Gutiérrez-Díez, A., Sánchez-González, E. I., Torres-Castillo, J. A., Cerda-Hurtado, I. M., y Ojeda-Zacarias, M. D. C. (2015). Genetic diversity of mexican avocado in Nuevo Leon, Mexico. *Molecular Approaches to Genetic Diversity; Mahmut, Ç., Halil, K., Gül, CÖ, Birgul, O., Eds*, 141-159.
- Hoffmann, T. G., Ronzoni, A. F., da Silva, D. L., Bertoli, S. L., y de Souza, C. K. (2021). Impact of household refrigeration parameters on postharvest quality of fresh food produce. *Journal of Food Engineering*, 306. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2021.110641>
- Inestroza-Lizardo, C., Pereira-da Silva, J., Pinzetta-Junior, J. S., y Mattiuz, B. H. (2021). Hyperbaric pressure combined with refrigeration vs conventional refrigeration: Ripening and senescence processes of tomatoes. *Scientia Horticulturae*, 289. doi:<https://doi.org/10.1016/j.scienta.2021.110463>
- Kopp, L. E. (1966). A taxonomic revision of the genus *Persea* in the Western Hemisphere (*Persea: Lauraceae*). *Memoirs of the New York Botanical Garden*, 14(1), 1-120.
- Méndez-Zúñiga, S. M., Corrales-García, J. E., Gutiérrez-Grijalva, E. P., García-Mateos, R., Pérez-Rubio, V., y Heredia, J. B. (2019). Fatty Acid Profile, Total Carotenoids, and Free Radical-Scavenging from the Lipophilic Fractions of 12 Native Mexican Avocado Accessions. *Plant Foods for Human Nutrition*, 74(4), 501-507. doi:10.1007/s11130-019-00766-2

- Moreno, E., Ortiz, B. L., y Restrepo, L. P. (2014). Contenido total de fenoles y actividad antioxidante de pulpa de seis frutas tropicales. *Revista Colombiana de Química*, 43, 41-48.
- Ortiz-Viedma, J., Rodríguez, A., Vega, C., Osorio, F., Defillipi, B., Ferreira, R., y Saavedra, J. (2018). Textural, flow and viscoelastic properties of Hass avocado (*Persea americana* Mill.) during ripening under refrigeration conditions. *Journal of Food Engineering*, 219, 62-70. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2017.09.014>
- Ponce-Valadez, M., Escalona-Buendía, H. B., Villa-Hernández, J. M., de León-Sánchez, F. D., Rivera-Cabrera, F., Alia-Tejacal, I., y Pérez-Flores, L. J. (2016). Effect of refrigerated storage (12.5 °C) on tomato (*Solanum lycopersicum*) fruit flavor: A biochemical and sensory analysis. *Postharvest Biology and Technology*, 111, 6-14. doi:<https://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2015.07.010>
- Rai, A., Kumari, K., y Vashistha, P. (2021). Umbrella review on chilling injuries: Post-harvest issue, cause, and treatment in tomato. *Scientia Horticulturae*, 293. doi:<https://doi.org/10.1016/j.scienta.2021.110710>
- Ramírez-Gil, J. G., Gilchrist-Ramelli, E., y Morales-Osorio, J. G. (2017). Economic impact of the avocado (cv. Hass) wilt disease complex in Antioquia, Colombia, crops under different technological management levels. *Crop Protection*, 101, 103-115. doi:<https://doi.org/10.1016/j.cropro.2017.07.023>
- Ramos-Aguilar, A. L., Ornelas-Paz, J., Tapia-Vargas, L. M., Gardea-Bejar, A. A., Yahia, E. M., Ornelas-Paz, J. d. J., . . . Escalante-Minakata, P. (2021). Metabolomic analysis and physical attributes of ripe fruits from Mexican Creole (*Persea americana* var. *Drymifolia*) and 'Hass' avocados. *Food Chemistry*, 354. doi:<https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2021.129571>
- Richard, D., Kefi, K., Barbe, U., Bausero, P., y Visioli, F. (2008). Polyunsaturated fatty acids as antioxidants. *Pharmacological Research*, 57(6), 451-455. doi:<https://doi.org/10.1016/j.phrs.2008.05.002>
- Rincón-Hernández, C. A., Sánchez-Pérez, J. D. L. L., y Espinosa-García, F. J. (2011). Caracterización química foliar de los árboles de aguacate criollo (*Persea americana* var. *drymifolia*) en los bancos de germoplasma de Michoacán, México. *Revista mexicana de biodiversidad*, 82(2), 395-412.
- Rodríguez-Carpena, J.-G., Morcuende, D., Andrade, M. J., Kylli, P., y Estévez, M. (2011). Avocado (*Persea americana* Mill.) Phenolics, In Vitro Antioxidant and Antimicrobial Activities, and Inhibition of Lipid and Protein Oxidation in Porcine Patties. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 59(10), 5625-5635. doi:10.1021/jf1048832
- Sánchez-Colín, S., Mijares-Oviedo, P., López-López, L., y Barrientos-Priego, A. F. (2002). Historia del aguacate en México. *Memoria Fundación Salvador Sánchez Colín*, 171-187.
- Saucedo-Hernández, L., Martínez-Damián, M. T., Colinas-León, M. T., Barrientos-Priego, A. F., y Aguilar-Melchor, J. J. (2005). Aplicaciones foliares de nitrato de calcio en la maduración y daños por frío en

- aguacate 'Fuerte'. *REVISTA CHAPINGO SERIE HORTICULTURA*, 11(1), 149-157.
- Saucedo-Veloz, C. (1991). Tecnologías de conservación del aguacate preventivas a daños por frío y almacenamiento. *Memorias del Seminario Internacional del Aguacate*, 75-85.
- Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera, S. I. A. P. (2021). Avance de Siembras y Cosechas Resumen por Estado. Retrieved from http://infosiap.siap.gob.mx:8080/agricola_siap_gobmx/ResumenProducto.do
- Tan, C. X. (2019). Virgin avocado oil: An emerging source of functional fruit oil. *Journal of Functional Foods*, 54, 381-392. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jff.2018.12.031>
- Traber, M. G., y Atkinson, J. (2007). Vitamin E, antioxidant and nothing more. *Free Radical Biology and Medicine*, 43(1), 4-15.
- Villa-Rodríguez, J. A., Molina-Corral, F. J., Ayala-Zavala, J. F., Olivas, G. I., y González-Aguilar, G. A. (2011). Effect of maturity stage on the content of fatty acids and antioxidant activity of 'Hass' avocado. *Food Research International*, 44(5), 1231-1237. doi:<https://doi.org/10.1016/j.foodres.2010.11.012>
- Williams, L. O. (1977). The botany of the avocado and its relatives. *Proc. 1st international Tropical fruit Short Course, The Avocado., University of Florida, Gainesville, Florida. USA.*, 9-15.
- Yepes-Betancur, D. P., Sánchez-Giraldo, L., y Márquez-Cardozo, C. J. (2017). Extracción termomecánica y caracterización fisicoquímica del aceite de aguacate (*Persea americana* Mill. cv. Hass). *Informador Técnico*, 81(1), 75-85. doi:[10.23850/22565035.728](https://doi.org/10.23850/22565035.728)

3. IDENTIFICACIÓN DE VARIABLES CORRELACIONADAS CON LOS DAÑOS POR FRÍO EN AGUACATE CRIOLLO MEXICANO

Resumen

Los aguacates criollos de raza mexicana (*Persea americana* var. *Drymifolia*) son frutos originarios de Mesoamérica, por lo cual son característicos de zonas con climas tropicales y subtropicales. Estos frutos presentan un mayor potencial nutracéutico en comparación con el cv. 'Hass' que es el cultivar más comercial actualmente, lo cual podría generar un gran interés en mercados sofisticados y muy exigentes de países con alto poder adquisitivo. Sin embargo, la vida de anaquel de estos aguacates es muy corta, por lo cual va a ser muy necesario prolongarla al máximo mediante la principal técnica postcosecha que es la frigoconservación, cuya principal limitante son los daños por frío (DF) que presentan algunos frutos, como es el caso de estos aguacates. Con el propósito de avanzar en el manejo poscosecha de estos frutos, el objetivo del presente estudio fue medir un conjunto de variables fisiológicas, físicas, fisicoquímicas y bioquímicas, y determinar el grado de correlación que tiene cada una con los daños por frío. Los aguacates se almacenaron durante 2, 5 y 10 d a 3 y 6 ± 1 °C, además de un tratamiento Testigo a temperatura ambiente; posterior a su almacenamiento los frutos se mantuvieron a temperatura ambiente hasta alcanzar su madurez de consumo, momento en el cual se midieron las diferentes variables. La evaluación visual de los DF se midió a través de una escala hedónica de cinco puntos, la medición se realizó en la pulpa tras un corte longitudinal a los frutos. En muestras de los frutos se determinó pérdida de peso, tasa de respiración, producción de etileno, Luminosidad (L*), ángulo de tono (Hue), Chroma, firmeza, fuga de electrolitos, actividad enzimática de superóxido dismutasa (SOD), glutatión reductasa (GR), alcohol deshidrogenasa (ADH) y piruvato descarboxilasa (PDC). De estas variables, la pérdida de peso (%PP), el patrón de respiración y la producción de etileno al alcanzar la madurez de consumo, la firmeza y la actividad enzimática de SOD, GR, PDC y ADH tuvieron una correlación significativa con los DF ($r_s = 0.622, -0.331, -0.388, -0.429, 0.758, 0.439, 0.457$ y -0.362) y pueden ser propuestos como herramientas confiables para medir DF en aguacates criollos de raza mexicana.

Palabras clave: *Persea americana*, *Drymifolia*, daños por frío, poscosecha, refrigeración.

IDENTIFICATION OF VARIABLES CORRELATED WITH CHILLING INJURY IN MEXICAN CRIOLLO AVOCADOS

Abstract

Criollo avocados of Mexican breed (*Persea americana* var. *Drymifolia*) are fruits originated in Mesoamerica, whereby they are characteristic of areas with tropical and subtropical climates. These fruits have a higher nutraceutical potential compared with cv. 'Hass', which actually is the most commercial cultivar; this characteristic might generate a big interest in sophisticated and very demanding markets in countries with high purchasing power. However, the shelf life of these avocados is very short, so it will be necessary to extend it to the maximum through the main postharvest technique that is the refrigeration, which main problems are the chilling injuries (CI) that some fruits suffer, as is the case of the criollo avocados. In order of moving forward in the postharvest management of these fruits, the objective of this study was to measure a set of physiological, physical, physical-chemical and biochemical variables, and to determine the correlation degree between each one and the CI. The avocados were stored during 2, 5 y 10 d at 3 y 6 ± 1 °C, plus a control treatment at room temperature; after the storage, the fruits were kept at room temperature until they achieve their consumption maturity, and then the different variables were measured. The visual evaluation of the CI was measured through a five points hedonic scale, the measurement was conducted in the pulp after a longitudinal cut to the fruits. Weight loss, respiration rate, ethylene production, Lightness (L*), Hue, Chroma, firmness, electrolyte leakage, Superoxide dismutase activity (SOD), glutathione reductase activity (GR), alcohol dehydrogenase activity (ADH) and pyruvate decarboxylase activity (PDC) were analyzed in fruit samples. Of these variables, weight loss, respiration rate and ethylene production at commercial ripening stage, firmness and the SOD, GR, PDC and ADH activities had a significant correlation with CI (DF (r_s = 0.622, -0.331, -0.388, -0.429, 0.758, 0.439, 0.457 y -0.362) and can be proposed as trustable tools to measure the CI in criollo avocados of Mexican breed.

Key words: *Persea americana*, *Drymifolia*, chilling injury, postharvest, refrigeration.

3.1. Introducción

Los aguacates (*Persea americana* Mill.) son los frutos obtenidos de los árboles con el mismo nombre, los cuales pertenecen a la familia *Lauraceae* y son dicotiledóneas de hoja perenne, cuyo origen está establecido en Mesoamérica, razón por la cual estos frutos son característicos de zonas con climas tropicales y subtropicales (Galindo-Tovar, Ogata-Aguilar y Arzate-Fernández, 2008; Tan, 2019). Los aguacates poseen propiedades nutricionales que pueden resultar benéficas a la salud humana, situación que ha propiciado que su consumo se haya vuelto extremadamente popular (Farley et al., 2020). El aguacate criollo de raza mexicana (*Persea americana* var. *drymifolia* Blake), es una de las tres variedades que se distinguen ecológicamente en la actualidad, junto con las razas guatemalteca y antillana, y de la cual se han obtenido cultivares comerciales como el Hass y el Fuerte (Bergh y Ellstrand, 1986; Sánchez-Colín, Mijares-Oviedo, López-López y Barrientos-Priego, 2002).

Los frutos de la variedad *Drymifolia* presentan un mayor potencial nutracéutico en comparación con los frutos de los cultivares más comerciales, ya que en algunas accesiones se ha encontrado que el contenido de aceite en pulpa duplica el reportado para el cv. Hass, y también la proporción porcentual de ácidos grasos mono y poliinsaturados llega a superar la de los frutos de dicho cultivar; no obstante, lo que más hace sobresalir a los frutos de la variedad *Drymifolia* es que su cáscara se consume gracias a que es delgada y de agradable sabor, y su color oscuro característico se debe a la presencia de antocianinas, las cuales son compuestos antioxidantes (Corrales-García et al., 2019; Dreher y Davenport, 2013; Méndez-Zúñiga et al., 2019; Ramos-Aguilar et al., 2021; Rodríguez-Carpena, Morcuende, Andrade, Kylli, y Estévez, 2011; Yepes-Betancur, Sánchez-Giraldo, y Márquez-Cardozo, 2017).

Lo mencionado en el párrafo anterior, en conjunto con la tendencia actual de buscar alimentos que aporten mejores condiciones a la salud, podría generar un gran interés en mercados sofisticados y muy exigentes de países con alto poder adquisitivo (Boccia y Punzo, 2020). Sin embargo, su piel delgada también representa una desventaja para estos frutos, pues los hace muy

susceptibles a los daños mecánicos y adicionalmente su vida de anaquel es muy corta (Acosta-Díaz, Hernández-Torres, y Almeyda-León, 2012). Debido a lo anterior y a otras características como el tamaño y la relación mesocarpio/fruto, los aguacates criollos mexicanos se han visto relegados a un consumo local mientras que el cv. Hass ha dominado el mercado gracias a sus características comerciales, generando una tendencia negativa de desaparición de materiales genéticos con un posible alto potencial nutracéutico (Corrales Garcia y Méndez-Zúñiga, 2020; Sánchez-Colín et al., 2002; Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera, 2021).

Este elevado potencial nutracéutico de los aguacates criollos de raza mexicana se ha determinado muy recientemente y aún no se ha dado a conocer ampliamente en los mercados sofisticados, pero se prevé que cuando esto ocurra, la demanda de éstos va a crecer de manera importante. Sin embargo, dado que su vida de anaquel es muy corta, va a ser muy necesario prolongarla al máximo mediante la principal técnica postcosecha de que se dispone para tal fin, que es la frigoconservación, cuya principal limitante son los daños por frío que presentan algunos frutos, principalmente los de origen tropical o subtropical como lo es el aguacate (Saucedo-Veloz, 1991).

Los daños por frío son disfunciones celulares y alteraciones fisiológicas y bioquímicas producto de la frigoconservación por debajo de un umbral crítico de temperatura, que es específico para cada producto, y cuando estos ocurren generalmente se estimula la tasa respiratoria y la emisión de etileno, se reduce la fotosíntesis, hay interferencia en la producción de energía, se aumenta la energía de activación, aumenta la permeabilidad de las membranas, se inactivan algunas enzimas, se desarregla la membrana y se altera la estructura celular (Artés-Calero y Artés-Hernández, 2002). Determinar el umbral crítico para la frigoconservación de un producto permite almacenarlo y prolongar su vida de anaquel sin provocar daños por frío, pero para lograr esto, es necesario primero contar con herramientas que permitan medir de manera precisa, objetiva y fidedigna la manifestación de estos daños, esto porque la evaluación de daños por frío sólo se ha hecho de manera subjetiva (Rai, Kumari y Vashistha, 2021).

Variables como la pérdida de peso, el patrón de respiración, la producción de etileno, el color, la firmeza y la permeabilidad de las membranas han sido relacionadas con los DF en diferentes productos hortofrutícolas, razón por la cual es conveniente evaluarlas en frutos de aguacate criollo mexicano, ya que podrían algunas podrían convertirse en herramientas para medir de manera precisa este tipo de daños (Ghanem, Kehel, Marrou y Sinclair, 2020; Guimarães-Sanches et al., 2021; Herrera-González, Salazar-García, Martínez-Flores y Ruiz-García, 2014; Quiroz-González et al., 2017; Saucedo-Hernández, Martínez-Damián, Colinas-León, Barrientos-Priego y Aguilar-Melchor, 2005).

La actividad enzimática es un factor importante para considerar cuando se habla de DF. Algunas enzimas se activan en respuesta al almacenamiento con diferentes propósitos; se ha reportado que la superóxido dismutasa (SOD) se activa para disminuir los síntomas de senescencia generados por el estrés oxidativo, la reductasa (GR) también ha sido asociada con la tolerancia al frío de algunos productos hortofrutícolas, y enzimas como la piruvato descarboxilasa (PDC) y la alcohol deshidrogenasa (ADH) catalizan la formación de acetaldehído y etanol en frutos, generando cavidades en la cáscara (Balois-Morales, 2007; Kader, 2003; Wang et al. 2006). De acuerdo con lo anterior es posible suponer que estas enzimas se ven afectadas en frutos dañados por frío.

Es debido a lo anterior, que el objetivo del presente estudio fue determinar, de un grupo de variables fisiológicas, físicas, fisicoquímicas y bioquímicas, cuáles presentan correlación con los daños por frío en frutos de aguacate criollo refrigerados. Con esto se busca dar un primer paso en el desarrollo de una tecnología para el manejo poscosecha de estos frutos con la finalidad de prolongar su muy corta vida de anaquel y así abrir la posibilidad de alcanzar mercados importantes pero distantes, y de este modo preservar el material genético de los ejemplares productores de aguacate criollo de raza mexicana.

3.2. Materiales y métodos

3.2.1. Material experimental

Para la obtención del material experimental se contactaron productores de aguacate criollo de raza mexicana (*Persea americana* var. *drymifolia* Blake) en localidad de Tochmilco, en el municipio de Atlixco, Estado de Puebla. Se cosecharon frutos en madurez fisiológica con buena apariencia externa, libre de daños mecánicos, plagas o enfermedades, de cinco accesiones diferentes. Las muestras fueron nombradas con una clave según el huerto y orden de recolección, las accesiones Zen-1, Zen-2 y Zen-3 se recolectaron en el huerto del productor Zenón Cantero y las accesiones Mnd-1 y Mnd-2 en un huerto ubicado en la colonia Mendoza; las coordenadas de las accesiones son las siguientes:

- **Zen-1:** 18° 53' 37.82" Lat. N, 98° 34' 22.61" Long. O.
- **Zen-2:** 18° 53' 37.64" Lat. N, 98° 34' 21.56" Long. O.
- **Zen-3:** 18° 53' 37.66" Lat. N, 98° 34' 21.30" Long. O.
- **Mnd-1:** 18° 53' 21.00" Lat. N, 98° 34' 26.30" Long. O.
- **Mnd-2:** 18° 53' 22.10" Lat. N, 98° 34' 26.00" Long. O.

3.2.2. Tratamientos

Los frutos fueron transportados (por carretera, dos horas) hasta el laboratorio de Fruticultura del Colegio de Posgraduados – Campus Montecillo en condiciones de temperatura ambiente. A su llegada al laboratorio los frutos fueron lavados y desinfectados en una solución de hipoclorito a 200 ppm. Las muestras de cada accesión se organizaron en unidades experimentales de 2 frutos cada una y se distribuyeron para tener 3 repeticiones por tratamiento. Estos últimos consistieron en la combinación de dos temperaturas y tres periodos de almacenamiento, tal y como se muestra en el Cuadro 4, además de un tratamiento testigo a temperatura ambiente.

Cuadro 4. Tratamientos aplicados.

Tratamiento	Temperatura (°C)	Periodo de almacenamiento (días)
1		2
2	3 ± 1	5
3		10
4		2
5	6 ± 1	5
6		10

Los frutos de las accesiones Zen-1, Zen-2 y Zen-3 se emplearon para las pruebas de pérdida de peso, patrón de respiración, patrón de producción de etileno, firmeza en fruto completo y color en pulpa. De cada unidad experimental sometida al tratamiento testigo un fruto fue utilizado diariamente hasta alcanzar madurez de consumo, para monitorear su peso y tomar muestras de gas dentro de una cámara de respiración, y con el fruto restante se midió firmeza y color en pulpa al llegar a madurez de consumo. Con las unidades experimentales almacenadas en refrigeración, se realizó el mismo procedimiento a partir de que éstas terminaran su tratamiento.

Los frutos de las accesiones Mdz-1 y Mdz-2 se emplearon para las pruebas de fuga de electrolitos y actividad enzimática. Los frutos bajo el tratamiento testigo fueron evaluados al alcanzar madurez de consumo, un fruto fue utilizado para medir fuga de electrolitos en pulpa y cáscara, y con el fruto restante se midió actividad enzimática en pulpa. Con las unidades experimentales almacenadas en refrigeración, se realizó el mismo procedimiento a partir de que éstas terminaran su tratamiento.

3.2.3. Daños por frío como variable de referencia: escala hedónica

Tras alcanzar madurez de consumo se realizó un corte longitudinal en los frutos para examinar la pulpa. Los frutos utilizados para las pruebas de color en pulpa y actividad enzimática en pulpa se cortaron antes de obtener los datos de color y la muestra de pulpa, respectivamente; los frutos destinados a las pruebas de pérdida de peso, patrón de respiración, patrón de producción

de etileno, firmeza y fuga de electrolitos se cortaron después de haber realizado las respectivas mediciones y de haber tomado la respectivas muestras.

Los daños por frío se evaluaron de manera visual y se clasificaron según el pardeamiento de los haces vasculares, de acuerdo con métodos de estadística no paramétrica, a través de una escala hedónica de 5 puntos, donde 0 = 0% de pardeamiento de haces vasculares, 1 = pardeamiento de haces vasculares en menos del 15 % de la pulpa, 2 = pardeamiento de haces vasculares en más del 15 % y menos del 25% de la pulpa, 3 = pardeamiento de haces vasculares en más del 25 % y menos del 35% de la pulpa y 4 = pardeamiento de haces vasculares en más del 35 % de la pulpa (Figura 9).

3.2.4. Variables fisiológicas

Pérdida de peso

La pérdida de peso se determinó en una balanza electrónica con una precisión de 0.01 g, en la cual se midió la masa de los frutos antes de iniciar cada tratamiento (P_i) y después al finalizarlo, diariamente hasta madurez de consumo (P_f). Los resultados se reportaron como porcentaje de pérdida de peso acumulada y se obtuvieron diariamente mediante la siguiente ecuación:

$$PP (\%) = \frac{P_i - P_f}{P_i} * 100$$

FOTOGRAFÍA	VALOR	DESCRIPCIÓN
	0	0 % de la pulpa con los haces vasculares pardeados
	1	Haces vasculares pardeados en menos del 15 % de la pulpa
	2	Haces vasculares pardeados en más del 15 % y menos del 25 % de la pulpa
	3	Haces vasculares pardeados en más del 25 % y menos del 35 % de la pulpa
	4	Haces vasculares pardeados en más del 35 % de la pulpa

Figura 9. Escala visual de 5 puntos de daños por frío en aguacate criollo mexicano (*Persea americana* var. *drymifolia* Blake).

Patrón de respiración y producción de etileno

Estas variables se determinaron mediante cromatografía de gases siguiendo la técnica de espacio de cabeza propuesta por Davis y Chase (1969). Se colocaron frutos de peso conocido durante una hora en el interior de un recipiente hermético de volumen de 530 mL al cual se le adaptó un septum; y posteriormente se extrajeron con una jeringa 5 mL de muestra gaseosa del espacio de cabeza, que luego se inyectaron en un recipiente plástico sellado al vacío (vacutainer) de 8 mL, para finalmente almacenarlos en refrigeración a 4 °C hasta su evaluación.

Para la evaluación, con una jeringa se tomó 1 mL de muestra gaseosa de cada vacutainer y se inyectó en un cromatógrafo de gases Agilnet 7890B, equipado con una columna capilar 19094PQO4 (30 m de largo, 0.530 mm de diámetro y 40 μm de espesor) y con detectores de ionización de flama (FID) y de conductividad térmica (TCD). Se empleó nitrógeno como gas de arrastre, con un flujo de 32.3 mL min^{-1} . Los flujos de los gases portadores N_2 , aire y H_2 fueron 25, 499 y 45 mL min^{-1} , respectivamente. El inyector y el detector se mantuvieron a una temperatura de 120 y 180 °C, respectivamente. Se emplearon curvas estándar previamente elaboradas con sus respectivas ecuaciones tanto para respiración (CO_2) como para etileno (C_2H_4), así mismo se tuvo en cuenta el factor de dilución al inyectar las muestras en los vacutainers. Los resultados se expresaron en mL de $\text{CO}_2\cdot\text{kg}^{-1} \text{ h}^{-1}$ para respiración y en μL de $\text{C}_2\text{H}_4\cdot\text{kg}^{-1} \text{ h}^{-1}$ para etileno.

3.2.5. Variables físicas

Mediciones de color

El color fue medido con un colorímetro HunterLab MiniScan EZ (MSEZ-4500L, USA), con geometría 45/0 referido al iluminante D65 y ángulo de visión 10°, las lecturas se tomaron en la pulpa y se registraron en la escala CIE $L^* a^* b^*$, donde L^* mide la luminosidad de la muestra, a^* mide si la muestra es de color rojo (a^* positivo) o verde (a^* negativo), y b^* mide si la muestra es de color

amarillo (b^* positivo) o azul (b^* negativo). A partir de lo anterior se reportaron los valores de luminosidad (L^*), ángulo de todo (Hue) e índice de saturación de color (Chroma), de acuerdo con las siguientes ecuaciones propuestas por McGuire (1992):

1. **Luminosidad:** Corresponde a los valores de L^* obtenidos de manera directa.

2. **Ángulo de tono (Hue):**

$$Hue = Arc \tan \left(\frac{b^*}{a^*} \right)$$

3. **Índice de saturación de color (Chroma):**

$$Chroma = \sqrt{a^{*2} + b^{*2}}$$

Firmeza

Esta variable se midió con un texturómetro marca Wagner, modelo Force Five FDV-30 adaptado con una punta cónica de 5 mm y anclado a una base de metal Chatillon. Los resultados se reportaron como la fuerza (N) necesaria para penetrar los frutos de aguacate.

3.2.6. Variables fisicoquímicas

Permeabilidad de membrana

Esta variable se midió de acuerdo con la metodología propuesta por Seliem, El-Mahrouk, El-Banna, Hafez y Dewir (2021), con modificaciones. Con un sacabocados de cobre se obtuvieron ocho porciones circulares de 1 cm de diámetro de cada fruto destinado para esta prueba (4 en el diámetro ecuatorial, 2 en el polo superior o apical y 2 en el polo inferior o basal del fruto), tomando cáscara y pulpa. Las muestras se mantuvieron en 45 mL de agua desionizada por 24 h en un tubo de ensayo de 80 mL, posteriormente se midió la conductividad eléctrica (CE) con un conductivímetro marca HANNA, modelo HI98129 (USA), esta medición se llamó 'CE_i'; después las muestras se

sometieron a baño maría (80 °C) por 30 min, se dejaron enfriar hasta 21 °C y se les volvió a medir la CE, esta medición se llamó 'CE_f'. Los resultados se reportaron como porcentaje de electrolitos fugados FE(%) y se calcularon mediante la siguiente ecuación:

$$FE(\%) = \frac{CE_i}{CE_f} * 100$$

3.2.7. Variables bioquímicas

Preparación de polvo de acetona

Para determinar la actividad enzimática se preparó polvo de acetona (PAC) siguiendo la metodología propuesta por Alia-Tejacal, Colinas-León, Martínez-Damián y Soto-Hernández (2005) con modificaciones. Se extrajeron 40 g de pulpa y se adicionaron 100 mL de acetona fría (-15 °C) grado reactivo, se homogeneizaron en una licuadora durante 15 s; el macerado se filtró al vacío, y el procedimiento se repitió 3 veces más y se dejó secar a temperatura ambiente (22.3 ± 0.2 °C) durante media hora. Posteriormente los extractos se conservaron en un congelador a -20 °C hasta su uso.

Proteína

La proteína se determinó por el método de Bradford (1976). El extracto de proteína se preparó a partir de 0.1 g de polvo de acetona con 5 mL de solución extractora tris-HCl (Sigma, USA) 0.1 M (pH 7.1), la mezcla se trituró durante 15 s a 10 000 rpm con un homogeneizador de tejidos IKA T 25 ULTRA-TURRAX; el homogeneizado se centrifugó a 3174 g durante 20 min a 5 °C, con una centrífuga marca Sorvall modelo RC-6 Plus Superspeed, y el sobrenadante fue usado como extracto para la determinación de proteína.

Para el ensayo se tomaron 0.1 mL del sobrenadante, 0.9 mL de tris-HCl y 4 mL de reactivo de Bradford previamente preparado (100 mg de Coomassie Brilliant Blue [Sigma], 50 mL de etanol al 95 % [J. T. Baker, USA] y 100 mL de ácido fosfórico, esta solución se diluyó a un volumen final de 1 L de agua destilada). Las muestras se agitaron y se dejaron reposar por 12 minutos y se

leyó su absorbancia a 595 nm en un espectrofotómetro digital marca Thermo Fisher Scientific, modelo Genesys 10-S Vis. La cuantificación se realizó por medio de una curva de calibración con albúmina de bovino (Sigma, Alemania) como proteína estándar, y los resultados se reportaron como mg de proteína por gramo de peso fresco ($\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$ peso fresco).

Actividad de Superóxido dismutasa (SOD)

Esta variable se evaluó con el método propuesto por Beyer y Fridovich (1987) con modificaciones. La enzima se extrajo a partir de 0.1 g de polvo de acetona con 5 mL de solución extractora (amortiguadora de fosfatos [J. T. Baker, México]) 0.1 M (pH 7.8). El polvo en solución amortiguadora se trituró durante 15 s a 10 000 rpm con un homogeneizador de tejidos IKA T 25 ULTRA-TURRAX; seguido a esto, la mezcla se centrifugó a 3174 g durante 20 min a 5 °C, con una centrífuga marca Sorvall modelo RC-6 Plus Superspeed. A 3 mL de solución, amortiguadora de fosfatos (J.T. Baker, México) 0.1 M (pH 7.8) con EDTA (J.T. Baker, USA) 0.01 mM, 3.66 mL de L-metionina (Sigma, USA), 2.44 mL de NBT y 1.83 mL de Triton X-100 (Sigma, USA) en un volumen final de 66 mL, se le adicionaron 0.5 mL del sobrenadante y 0.03 ml de riboflavina (Sigma, USA), y se iluminaron durante 7 min con una lámpara con luz fluorescente para proceder a leer la absorbancia a 560 nm en un espectrofotómetro digital marca Thermo Fisher Scientific, modelo Genesys 10-S Vis. La actividad enzimática se reportó en unidades internacionales por miligramo de proteína ($\text{U SOD} \cdot \text{mg}^{-1}$ proteína), cada unidad de SOD es igual a la cantidad del sobrenadante que fotoinhibe la formación de 50 % de azul de nitro tetrazolium formazan.

Actividad Glutación reductasa (GR)

La actividad de la GR se evaluó por el método empleado por Hodges, Andrews, Johnson y Hamilton (1997) con modificaciones. La enzima se extrajo a partir de 0.1 g de polvo de acetona con 5 mL de solución extractora (amortiguadora de fosfatos [J. T. Baker, México]) 0.1 M (pH 7.8) con polivinilpirrolidona (Sigma, USA) al 1 %. El polvo en solución amortiguadora se trituró durante 15 s a 10 000 rpm con un homogeneizador de tejidos IKA T

25 ULTRA-TURRAX; seguido a esto, la mezcla se centrifugó a 3174 g durante 20 min a 5 °C, con una centrífuga marca Sorvall modelo RC-6 Plus Superspeed.

Para la determinación de la actividad de la GR, 0.730 mL de buffer fosfatos (J. T. Baker, USA) 100 mM (pH 7.8), 0.1 mL de L-Glutatión oxidado (Sigma, USA) 0.1 M, 0.1 mL de EDTA (J.T. Baker, USA) 15 mM, 0.02 mL de NADPH (Sigma, USA) 10 mM y 0.05 mL del sobrenadante del extracto enzimático se colocaron en una celda de cuarzo de 1 mL; la actividad fue determinada con lecturas de absorbancia a 340 nm en un espectrofotómetro digital marca Thermo Fisher Scientific, modelo Genesys 10-S Vis y las unidades se reportaron en unidades internacionales por miligramo de proteína (U GR · mg⁻¹ proteína), cada unidad de GR es igual a la cantidad de enzima que cataliza la oxidación de 1 μM de NADPH por minuto.

Actividad Alcohol deshidrogenasa (ADH) y Piruvato descarboxilasa (PDC)

Para la actividad de la PDC y la ADH se siguió el método empleado por Botondi, Russo y Mencarelli (2012) con modificaciones. El extracto enzimático se preparó a partir de 0.1 g de polvo de acetona con, 5 mL de solución extractora (amortiguadora de fosfatos [J. T. Baker, México]) 0.1 M (pH 7.5) con la adición de 2 mM de tiamina pirofosfato (TPP, Sigma, Germany), 2 mM de MgCl₂ (Sigma, China) y 1 mM de 2-mercaptoetanol; la mezcla se trituró durante 15 s a 10 000 rpm con un homogeneizador de tejidos IKA T 25 ULTRA-TURRAX; el homogeneizado fue centrifugado a 3174 g durante 20 min a 5 °C, con una centrífuga marca Sorvall modelo RC-6 Plus Superspeed, y el sobrenadante fue usado como extracto enzimático para medir actividad de PDC y ADH.

La actividad de PDC fue analizada por acoplamiento de la descarboxilación del piruvato con la oxidación de NADPH por la Lactato Deshidrogenasa (LDH) y se evaluó por medio del registro del decremento de la absorbancia a 340 nm; el ensayo se llevó a cabo con 0.4 mL de la mezcla pH 7.5 0.1 M, 0.1 mL de TPP 10 mM, 0.1 mL de MgCl₂ 10 mM, 0.1 mL de NADH 2.6 mM, 0.1 mL de

LDH (con 2 U/mL; Sigma, USA), 0.1 mL del extracto enzimático y la subsecuente adición de 0.1 mL de piruvato de sodio (Sigma, USA) 0.2 M. La actividad de ADH se evaluó a través de la reducción del NAD⁺ a 340 nm, con 0.680 mL de buffer con KOH (Merck, México) y glicina (Sigma, USA) 0.1 M (pH 9.0), 0.07 mL de NAD⁺ 11.4 mM (Sigma, USA), 0.150 mL de etanol 2 M (J. T. Baker, USA) y 0.1 mL del extracto enzimático.

Para estos análisis se utilizó un espectrofotómetro digital marca Thermo Fisher Scientific, modelo Genesys 10-S Vis, y estas enzimas se reportaron como U·mg⁻¹ proteína.

3.2.8. Análisis estadístico

Los análisis se realizaron por triplicado, para asignar los tratamientos a las unidades experimentales se siguió un diseño en bloques completamente al azar, como unidad experimental se consideraron dos frutos. Se realizó un ANOVA con una prueba Tukey ($p \leq 0.05$) para la comparación de medias entre tratamientos y una correlación de Spearman entre los DF y las diferentes variables, con el paquete estadístico Minitab (Versión 19).

3.3. Resultados y discusión

3.3.1. Daños por frío

El efecto de los tratamientos sobre los frutos fue estadísticamente significativo. La manifestación de los DF en los frutos de aguacate criollo fue evidente en todos aquellos que fueron almacenados en frigoconservación tanto a 3 ± 1 °C como a 6 ± 1 °C (Cuadro 5), pero su intensidad fue mayor en los frutos almacenados durante 10 d en ambas temperaturas (T3 y T6), cuyo efecto fue estadísticamente igual. Los frutos almacenados durante 5 d a ambas temperaturas (T2 y T5), así como los almacenados 2 d a 3 ± 1 °C (T1), presentaron daños por frío estadísticamente iguales, siendo los segundos

más afectados. Aquellas muestras almacenadas 2 d a 6 ± 1 °C (T4) fueron las que presentaron la menor intensidad en los DF.

Cuadro 5. Efecto de los tratamientos sobre los daños por frío en frutos de aguacate criollo de raza mexicana madurados a temperatura ambiente después de diferentes periodos (0, 2, 5 y 10 d) de frigoconservación (3 y 6 ± 1 °C, 90 ± 10 % HR).

Tratamiento	DF
Testigo (T° ambiente)	0.0000 ± 0.000 d*
T1 (3 °C - 2 d)	1.8667 ± 0.834 b
T2 (3 °C - 5 d)	2.0000 ± 0.926 b
T3 (3 °C - 10 d)	3.1333 ± 0.990 a
T4 (6 °C - 2 d)	1.2000 ± 0.775 c
T5 (6 °C - 5 d)	2.0000 ± 0.655 b
T6 (6 °C - 10 d)	2.86667 ± 0.834 a

*Medias con letra diferente son significativamente diferentes ($p < 0.05$), (media \pm desviación estándar, $n = 3$).

La manifestación de estos daños al alcanzar la madurez de consumo concuerda con lo reportado para otros productos como pitahaya, melón, tomate y aguacate ‘Hass’, en los cuales los DF se manifiestan o se incrementan una vez que los productos son transferidos de una temperatura de frigoconservación a una temperatura más calurosa, igual o superior a los 15 °C (Quiroz-González, Corrales-García, Colinas-León e Ybarra-Moncada, 2017; Rai et al., 2022; Woolf, Cox, White y Ferguson, 2003).

Por su parte, Sevillano, Sánchez-Ballesta, Romojaro y Flores (2008) afirman que en frutos de aguacate, la tolerancia a los DF es mayor en etapas posclimatéricas, es decir, cuando los frutos se encuentran en las últimas etapas de maduración. Esto explica lo mencionado en el párrafo anterior y también es la razón de que se presentaran DF en todos los frutos que fueron refrigerados, pues se esperaba que los DF fuesen visibles estos.

Los DF desencadenan una serie de síntomas primarios y secundarios. Los síntomas primarios conducen a los cambios metabólicos que ocurren cuando la temperatura de almacenamiento cae por debajo del umbral de temperatura específico para cada fruto y se con ellos se inicia una cascada de eventos

secundarios que finalmente son visibles como síntomas de DF (Rai et al., 2022).

Estos resultados evidencian que, a mayor estrés, es decir, a menor temperatura y mayor periodo de exposición al frío, los frutos de aguacate criollo mexicano presentan una mayor incidencia de DF.

3.3.2. Pérdida de peso

La pérdida de peso para los frutos sometidos a la temperatura de 6 °C en cualquiera de los tres periodos siempre fue sustancialmente mayor que la de los frutos almacenados a 3 °C (Figura 10). Sin embargo, al llegar a los 10 d de almacenamiento la diferencia incrementó. Esto se debe a las condiciones de temperatura y humedad en que se almacenaron los frutos, ya que estas en conjunto generan un déficit de presión de vapor (DPV) entre el aire de la atmósfera seca que circunda al fruto y el aire del interior húmedo de los frutos (Ghanem, Kehel, Marrou y Sinclair, 2020). Los mismos autores afirman que el DPV es una de las variables críticas que conducen a la evapotranspiración en productos hortofrutícolas, generando así la pérdida de peso de los mismos.

Cuando dos ambientes tienen la misma humedad relativa, pero su temperatura de bulbo seco es diferente, aquel en que la temperatura sea mayor tendrá una humedad absoluta mayor, es decir, la capacidad del aire para admitir vapor de agua es mayor que la del otro ambiente, y es esto lo que generó un DPV mayor en el ambiente de los frutos almacenados a 6 °C, provocando que estos tuvieran un % PP mayor que aquellos almacenados a 3 °C (Shallcross, 2008).

Respecto al %PP acumulado cuando los frutos alcanzaron madurez de consumo, aquellos sometidos al tratamiento 6 (6 ± 1 °C por 10d) fueron los que tuvieron el %PP acumulado estadísticamente superior, seguido por los tratamientos 3 y 5 (3 ± 1 °C por 10d y 6 °C por 5d, respectivamente) que fueron estadísticamente iguales. El T5 también fue estadísticamente igual a los tratamientos restantes incluido el Testigo. En el presente estudio se encontró

una marcada correlación positiva ($r_s = 0.622, p = 0.000$) entre el la pérdida de peso y los DF, sin embargo, Muy-Rangel, Siller-Cepeda, Díaz-Pérez y Valdéz-Torres (2004) al igual que Quiroz-González et al. (2017), afirman que estos resultados pueden deberse más al DPV que a los propios DF, por lo cual esta variable no podría considerarse como una herramienta para medir los DF.

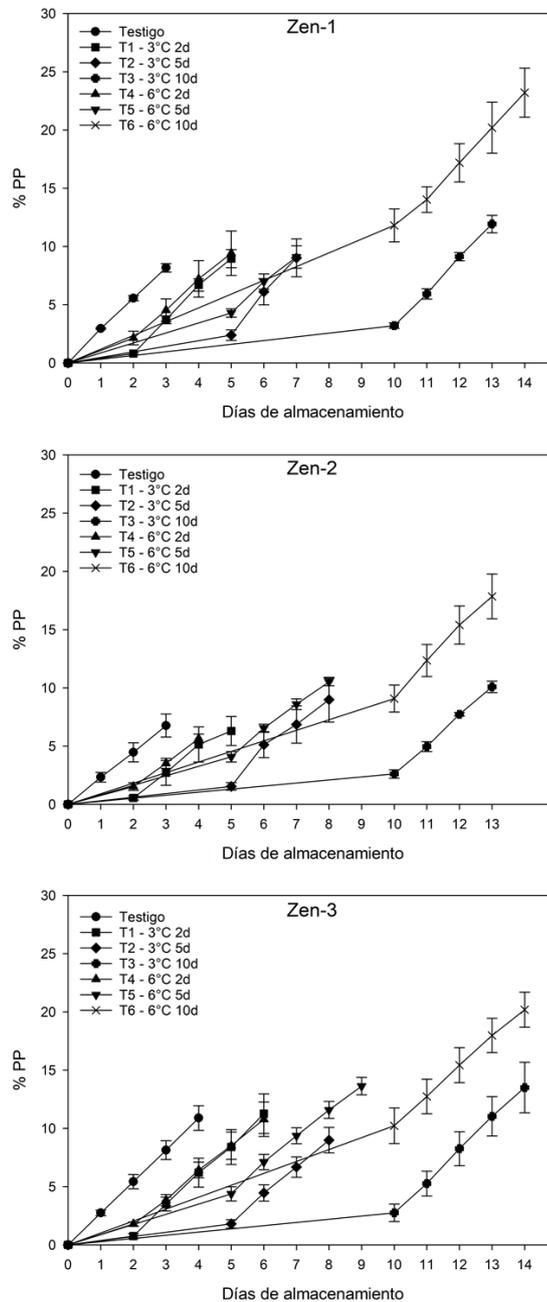


Figura 10. Pérdida de peso (%) en frutos de tres accesiones (Zen-1, Zen-2 y Zen-3) de aguacate criollo de raza mexicana madurados a temperatura ambiente después de diferentes periodos (0, 2, 5 y 10 d) de frigoconservación (3 y 6 ± 1 °C, 90 ± 10 % HR). Cada punto representa la media de tres repeticiones y las líneas verticales la desviación estándar.

Al igual que los tratamientos, las accesiones también tuvieron un efecto significativo en la pérdida de peso. Los frutos de la accesión Zen-3 fueron los que mayor %PP acumulada presentaron, seguidos de los frutos de la accesión Zen-1 y finalmente los que menor %PP acumulada presentaron fueron los de la accesión Zen-2. Estas diferencias se deben a la variabilidad genética que hay entre especímenes de esta variedad (Corrales-García y Méndez-Zúñiga, 2020).

3.3.3. Patrón de respiración

Los frutos de las tres accesiones presentaron un patrón de respiración similar de acuerdo a cada tratamiento aplicado (Figura 11). En las tres accesiones se puede apreciar que los frutos sometidos al tratamiento testigo presentaron un patrón de respiración constante en un rango de 50 a 100 mL CO₂·kg⁻¹·h⁻¹, a excepción de los frutos de la accesión Zen-3, los cuales eran más voluminosos y tardaron más en llegar a su madurez de consumo, logrando así apreciar el aumento al máximo climaterio en un rango de 150 a 200 mL CO₂·kg⁻¹·h⁻¹.

Los frutos que presentaron un mayor pico en su climaterio fueron aquellos sometidos a los tratamientos 1 y 4, cuyo periodo de conservación fue corto (3 ± 1 °C por 2d y 6 ± 1 °C por 2d, respectivamente); cuando estos frutos fueron extraídos de la refrigeración, su tasa de respiración fue sustancialmente menor (entre 0 y 50 mL CO₂·kg⁻¹·h⁻¹) que la del día 0, y al día siguiente su tasa de respiración aumentó abruptamente hasta un rango de 150 a 250 mL CO₂·kg⁻¹·h⁻¹.

Los frutos frigoconservados por más de 2 d bajo los tratamientos 2, 3, 5 y 6 (tratamientos cuya frigoconservación fue más prolongada) presentaron una disminución en su tasa de respiración el día que fueron extraídos de refrigeración, y luego presentaron un aumento al día siguiente, sin embargo, para estos tratamientos el aumento no fue tan abrupto como el de los frutos de los tratamientos 1 y 4, los frutos del tratamiento 6 alcanzaron un máximo de 150 mL CO₂·kg⁻¹·h⁻¹.

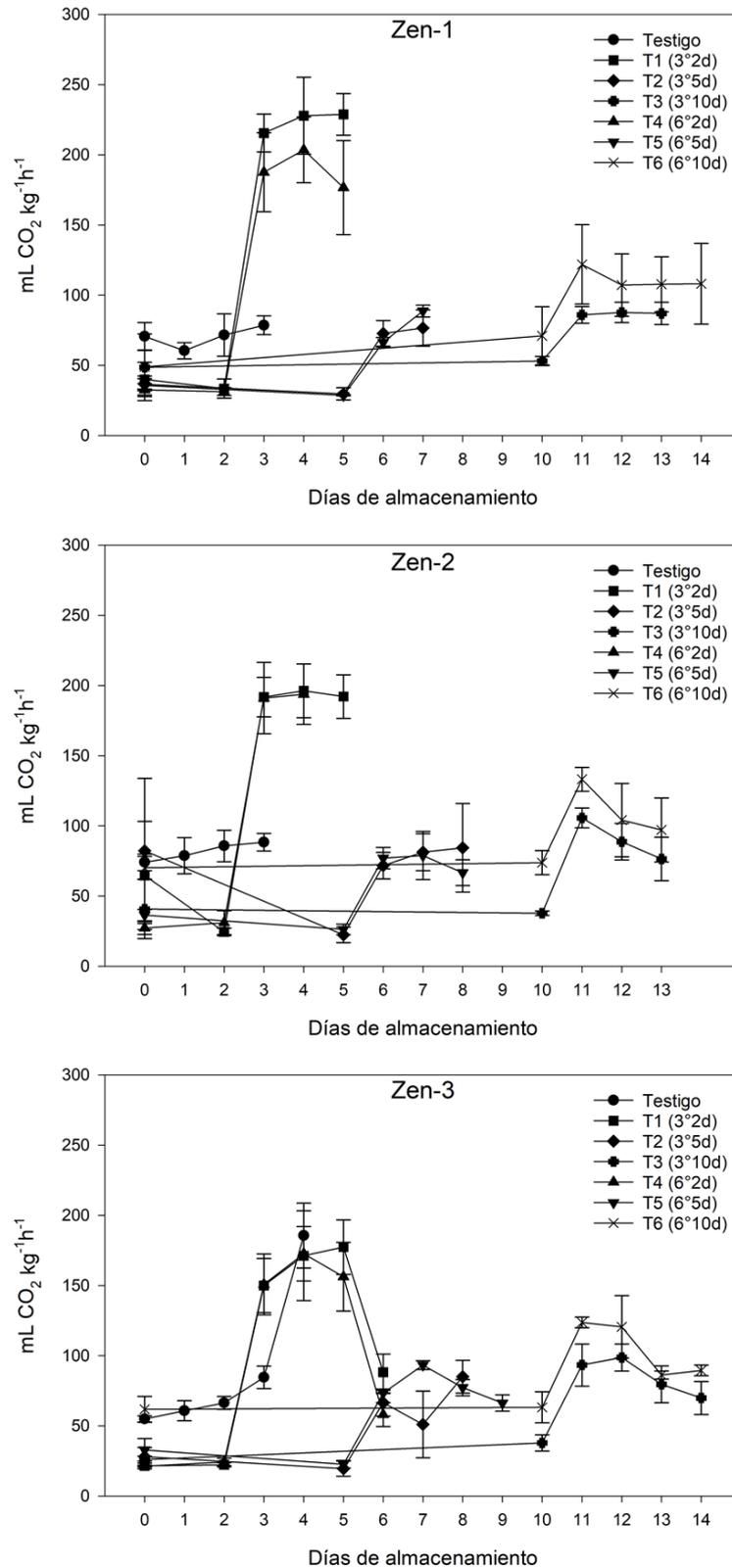


Figura 11. Patrón de respiración en frutos de tres accesiones (Zen-1, Zen-2 y Zen-3) de aguacate criollo de raza mexicana madurados a temperatura ambiente después de diferentes periodos (0, 2, 5 y 10 d) de frigoconservación a dos temperaturas (3 y 6 ± 1 °C, 90 ± 10 % HR). Cada punto representa la media de tres repeticiones y las líneas verticales la desviación estándar.

Actualmente no se cuenta con información publicada referente a esta variable en aguacates criollos de raza mexicana. Sin embargo, los resultados obtenidos en el presente estudio muestran un patrón que concuerda con los datos reportados para aguacates cv. 'Hass', cv. 'Fuerte' y cv. 'Méndez' almacenados en un rango de temperaturas entre 5 y 5.5 °C durante diferentes periodos, en los cuales, el máximo climaterio se presenta al día siguiente de ser extraídos de la frigoconservación (Herrera-González, Salazar-García, Martínez-Flores y Ruiz-García, 2014; Saucedo-Hernández, Martínez-Damián, Colinas-León, Barrientos-Priego y Aguilar-Melchor, 2005).

De acuerdo con lo reportado por Herrera-González et al. (2014), en aguacates 'Hass' y 'Méndez' el máximo climaterio depende también del estado de madurez en que los frutos sean cosechados además del periodo de frigoconservación; en los frutos almacenados durante 28 días a 5.5 °C y posteriormente trasladados a temperatura ambiente hasta su madurez de consumo, su máximo climaterio fue mayor que el de los frutos almacenados durante 0, 7 y 14 d. Este máximo se alcanzó el día después de ser extraídos de refrigeración y obtuvo valores alrededor de los 100 y 200 mL CO₂·kg⁻¹·h⁻¹ para 'Hass' y 'Méndez', respectivamente.

En la presente investigación se esperaba que los frutos de aguacate criollo sometidos a los tratamientos 3 y 6 (10 d a 3 y 6 °C, respectivamente) presentaran los mayores picos en el climaterio tras ser extraídos de frigoconservación, ello, como respuesta a las bajas temperaturas, sin embargo no fue así. Por el contrario, los frutos almacenados a temperatura ambiente y los sometidos a los tratamientos 1 y 4 (2 d a 3 y 6 °C, respectivamente), fueron los que alcanzaron los valores más altos en la tasa de respiración.

Se evaluó la correlación entre los DF y los resultados de la tasa de respiración de dos maneras. Inicialmente se abordó el análisis empleando los datos obtenidos el día en que los frutos alcanzaron madurez de consumo, encontrando con estos una correlación negativa ($r_s = -0.331, p = 0.008$), es decir, que a mayor incidencia de daños por frío, menor tasa de respiración en

la etapa de madurez de consumo de los frutos. También se abordó el análisis empleando los datos del máximo climaterio presentado por los frutos sometidos a cada tratamiento, en este caso el efecto de los tratamientos explica en un 77.37 % la variabilidad de los datos, pero no existe correlación entre el máximo climaterio y los DF. En conclusión, la tasa de respiración en la etapa de madurez de consumo resulta una variable útil para medir los DF en aguacates criollos de raza mexicana.

El efecto de las accesiones no es significativo en la tasa de respiración del día en que los frutos alcanzan madurez de consumo ni en el máximo climaterio que estos presentan.

3.3.4. Producción de etileno

Los datos de producción de etileno obtenidos siguen un patrón similar al patrón de respiración (Figura 12). Al igual que con la tasa de respiración, Herrera-González et al. (2014) y Saucedo-Hernández et al. (2005) reportaron que para aguacates cv. 'Hass', cv. 'Fuerte' y cv. 'Méndez' almacenados en un rango de temperaturas entre 5 y 5.5 °C durante diferentes periodos, el máximo pico de producción de etileno se presenta al día siguiente de ser extraídos de la frigoconservación.

Hay una coincidencia lógica entre la máxima emisión de etileno y la máxima tasa de respiración para los frutos de las 3 accesiones. Esta similitud en el comportamiento ya ha sido reportada para otros frutos incluido el aguacate, y se afirma que el incremento en la tasa de respiración de estos es consecuencia de un previo aumento en la concentración de etileno (Chen, Liu, Li, Li y Yuan, 2017; Hershkovitz, Friedman, Goldschmidt y Pesis, 2010). Ibarra-Laclette et al. (2015) reportaron que el máximo pico de producción de etileno en aguacates criollos de raza mexicana es en el tercer día durante su maduración, esto es apreciable en la Figura 12 Zen-3, accesión cuyos frutos del tratamiento testigo a temperatura ambiente alcanzaron su máxima producción de etileno al tercer día.

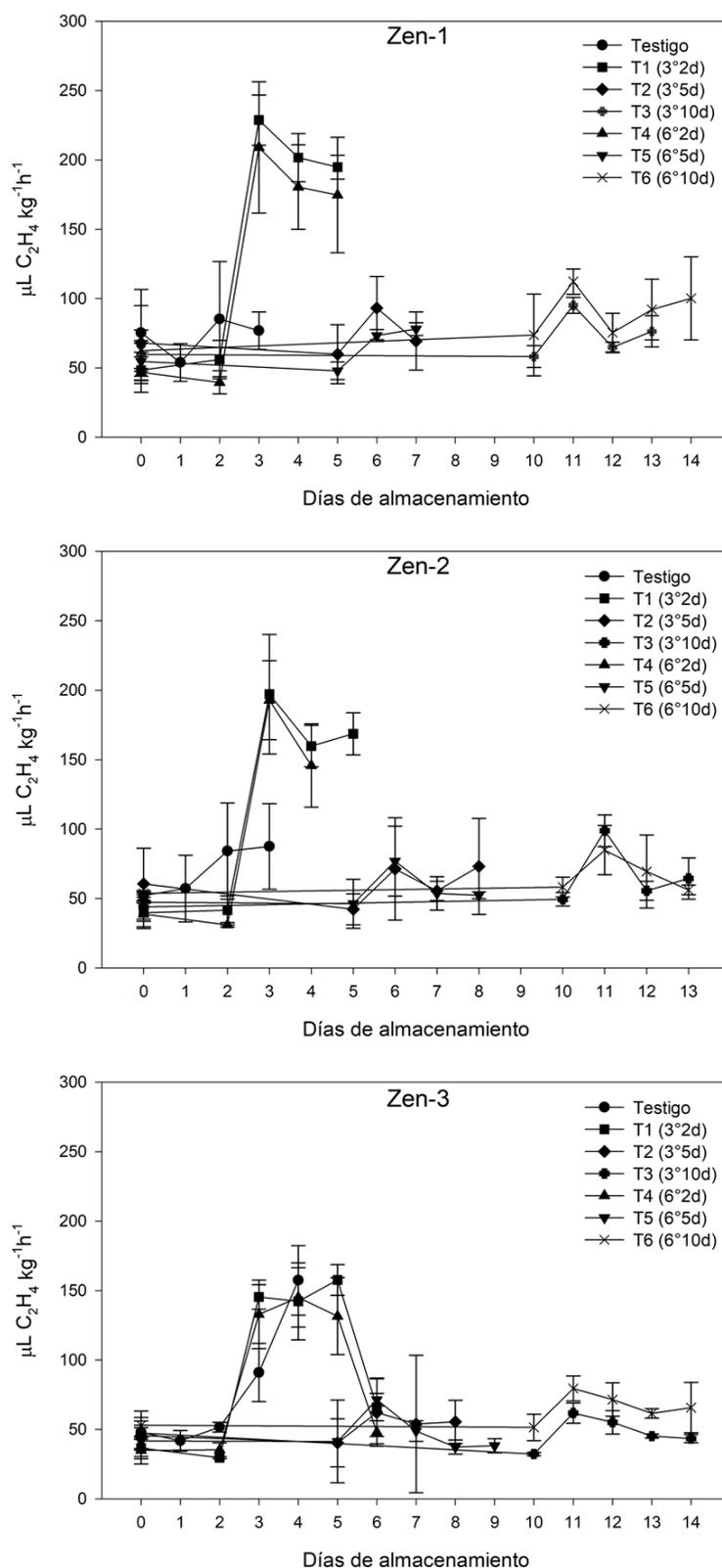


Figura 12. Producción de etileno en frutos de tres accesiones (Zen-1, Zen-2 y Zen-3) de aguacate criollo de raza mexicana madurados a temperatura ambiente después de diferentes periodos (0, 2, 5 y 10 d) de frigoconservación a dos temperaturas (3 y 6 ± 1 °C, 90 ± 10 % HR). Cada punto representa la media de tres repeticiones y las líneas verticales la desviación estándar.

Alhassan, Golding, Wills, Bowyer y Pristijono (2019) afirman que los niveles de etileno atmosférico a temperaturas de refrigeración reducidas mantienen la calidad de los productos hortofrutícolas, por lo tanto es probable que los aguacates hayan sido refrigerados por encima del umbral de temperatura que les corresponde, y por ello la producción de etileno no se incrementó a causa de las bajas temperaturas como era de esperarse.

Se evaluó la correlación entre los DF y los resultados de la producción de etileno de dos maneras. Inicialmente se abordó el análisis empleando los datos obtenidos el día en que los frutos alcanzaron madurez de consumo, encontrando con estos una correlación negativa ($r_s = -0.388, p = 0.002$), es decir, que a mayor incidencia de daños por frío, menor producción de etileno en la etapa de madurez de consumo de los frutos. También se abordó el análisis empleando los datos del máximo climaterio presentado por los frutos sometidos a cada tratamiento, en este caso el efecto de los tratamientos explica en un 74.51 % la variabilidad de los datos, pero no existe correlación entre estos y los DF. En conclusión, la producción de etileno en la etapa de madurez de consumo resulta una variable útil para medir los DF en aguacates criollos de raza mexicana.

3.3.5. Color

En primera instancia, los valores de a^* y b^* medidos indicaban frutos con un color de pulpa amarillo (b^* positivo) con una pequeña tendencia al verde (a^* negativo), esto se pudo comprobar al realizar los cálculos respectivos para obtener los valores del ángulo de tono (Hue), los cuales oscilaron entre 95.72° y 97.78° . Los tratamientos no tuvieron un efecto significativo en el ángulo de tono de la pulpa de los aguacates criollos de raza mexicana analizados, con una media general de 96.79° , que corresponde a una tonalidad amarilla verdosa. En contraste, Hue resultó diferente ($p < 0.05$) entre accesiones, siendo Zen-3 la de mayor Hue, seguida de Zen-2 y por último Zen-1.

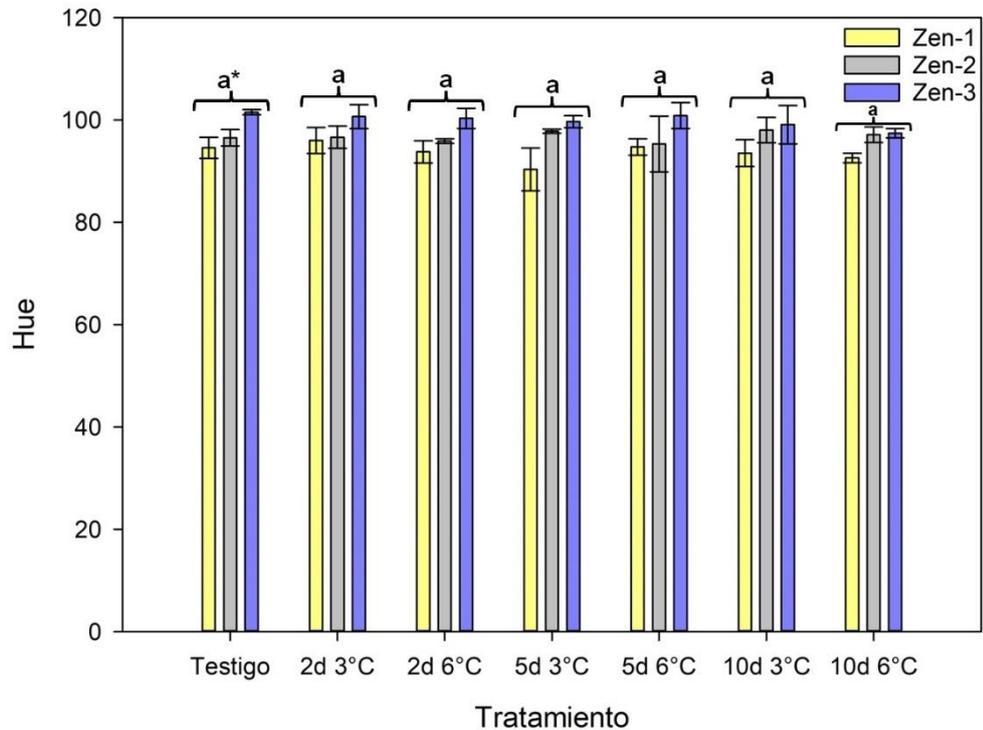


Figura 13. Ángulo de tono (Hue) en pulpa, en frutos de tres accesiones (Zen-1, Zen-2 y Zen-3) de aguacate criollo de raza mexicana, madurados a temperatura ambiente después de diferentes periodos (0 [Testigo], 2, 5 y 10 d) de frigoconservación a dos temperaturas (3 y 6 ± 1 °C, 90 ± 5 % HR). Cada barra representa la media de tres repeticiones y las líneas verticales la desviación estándar. *Letras iguales corresponden a tratamientos estadísticamente iguales (Tukey, $p < 0.05$).

En las respuestas de Chroma y Luminosidad los tratamientos tampoco tuvieron un efecto significativo, por lo cual las mediciones de estas dos variables también resultaron estadísticamente iguales entre tratamientos, reportando valores medios de 37.72 y 63.11 %, respectivamente. Lo anterior indica una cromaticidad caracterizada por una baja pureza del color y una luminosidad que establece un color medianamente brillante. Sin embargo, las accesiones Zen-2 y Zen-3 mostraron cromaticidad significativamente igual y superior ($p < 0.05$) a aquella de Zen-1; y para Luminosidad las accesiones Zen-1 y Zen-2 resultaron estadísticamente iguales y superiores a Zen-3.

Los datos obtenidos indican un color medianamente puro y brillante (Figuras 14 y 15) en la pulpa de los aguacates, ya que el valor de Chroma oscila entre 36.17 y 39.26, y el valor de Luminosidad entre 60.44 y 65.16 %, y el valor máximo para ambas variables es de 100 %.

Los resultados obtenidos en las variables de color, concuerdan con los datos reportados por Ramos-Aguilar et al. (2021) para aguacates criollos de raza mexicana obtenidos de árboles localizados en Michoacán, presentando valores de Hue desde 98.58° hasta 109.7°, es decir, pulpas amarillas verdosas; con relación a los valores de Chroma, dichos autores reportan datos desde 23.53 hasta 39.54; y finalmente, de Luminosidad reportaron valores que van desde 48.97 hasta 65.99.

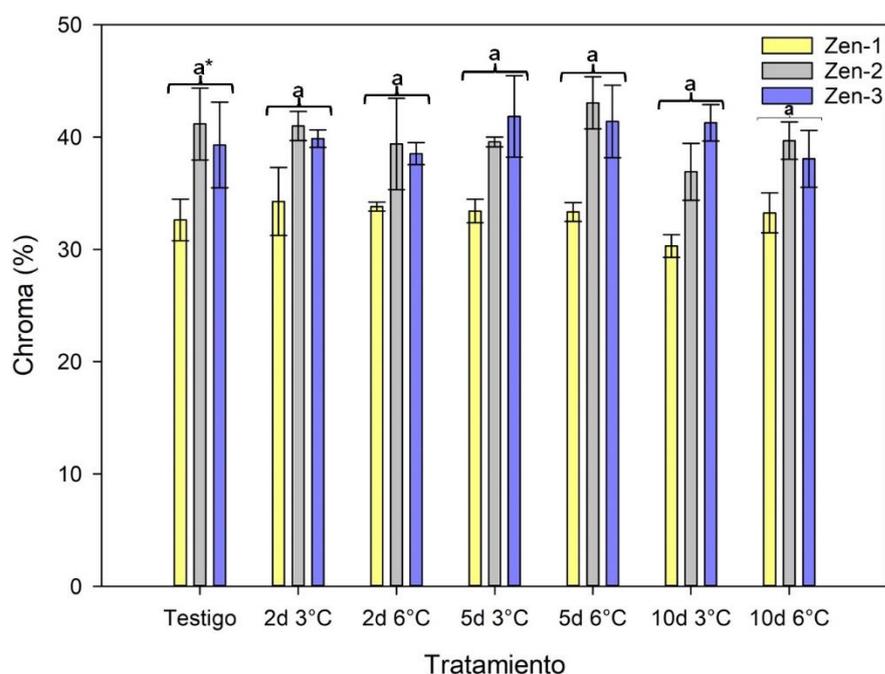


Figura 14. Índice de saturación de color (Chroma) en pulpa, en frutos de tres accesiones (Zen-1, Zen-2 y Zen-3) de aguacate criollo de raza mexicana, madurados a temperatura ambiente después de diferentes periodos (0 [Testigo], 2, 5 y 10 d) de frigoconservación a dos temperaturas (3 y 6 ± 1 °C, 90 ± 5 % HR). Cada barra representa la media de tres repeticiones y las líneas verticales la desviación estándar. *Letras iguales corresponden a tratamientos estadísticamente iguales (Tukey, $p < 0.05$).

A pesar de que en frutas como el mango los DF afectan las diferentes variables de color, de las estudiadas en este trabajo, la única que presenta correlación con los DF es Chroma, sin embargo su coeficiente de correlación es bajo ($r_s = -0.257$) y el p-value de la correlación es de 0.042 (Guimarães-Sanches et al., 2021), por lo tanto, lo evidenciado en el presente estudio conlleva a proponer que ninguna de las variables de color resulta útil para medir los DF en aguacate criollo mexicano.

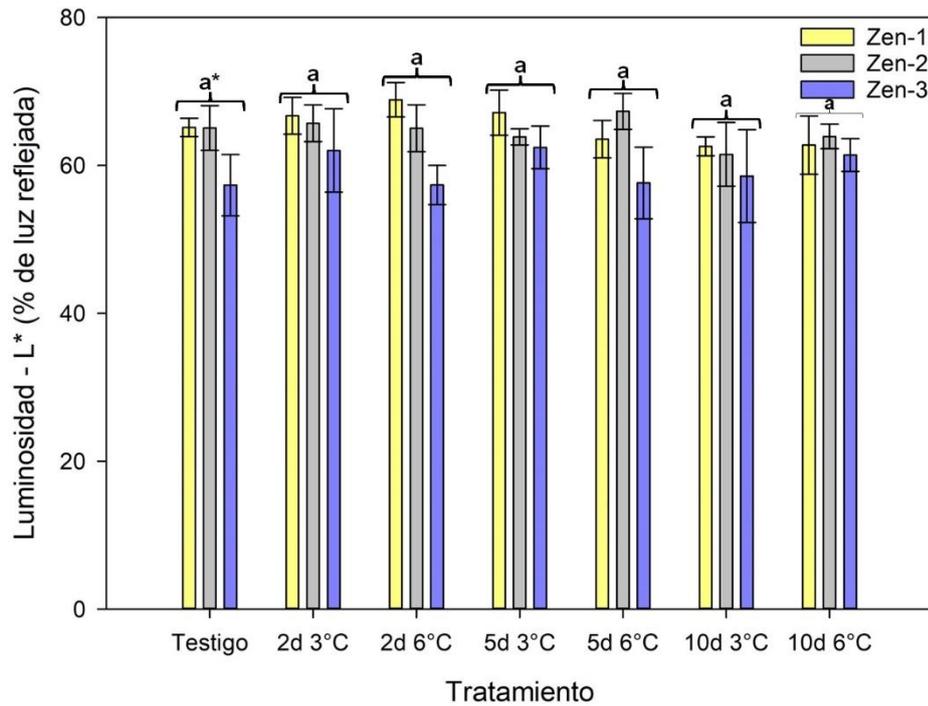


Figura 15. Luminosidad en pulpa, en frutos de tres accesiones (Zen-1, Zen-2 y Zen-3) de aguacate criollo de raza mexicana, madurados a temperatura ambiente después de diferentes periodos (0 [Testigo], 2, 5 y 10 d) de frigoconservación a dos temperaturas (3 y 6 ± 1 °C, 90 ± 5 % HR). Cada barra representa la media de tres repeticiones y las líneas verticales la desviación estándar. *Letras iguales corresponden a tratamientos estadísticamente iguales (Tukey, $p < 0.05$).

3.3.6. Firmeza

Como era de esperarse, los frutos sometidos a los tratamientos testigo fueron los que presentaron un promedio significativamente mayor en lo que a firmeza se refiere, con respecto a los frutos que fueron sometidos a bajas temperaturas. En el presente estudio se pudo determinar que los tratamientos tuvieron un efecto significativo en la firmeza de los frutos, como puede apreciarse en la Figura 16, donde los valores de esta variable disminuyeron gradualmente a medida que aumentó el tiempo de refrigeración.

La disminución de la firmeza en los aguacates criollos de raza mexicana sometidos a refrigeración coincide con lo reportado por Guimarães-Sanches et al. (2021) en mango, donde los frutos almacenados a 8 °C por diferentes periodos de tiempo y posteriormente transferidos a temperatura ambiente por

7 d, presentaron una mayor disminución en su firmeza que aquellos que fueron evaluados durante los mismos periodos en refrigeración.

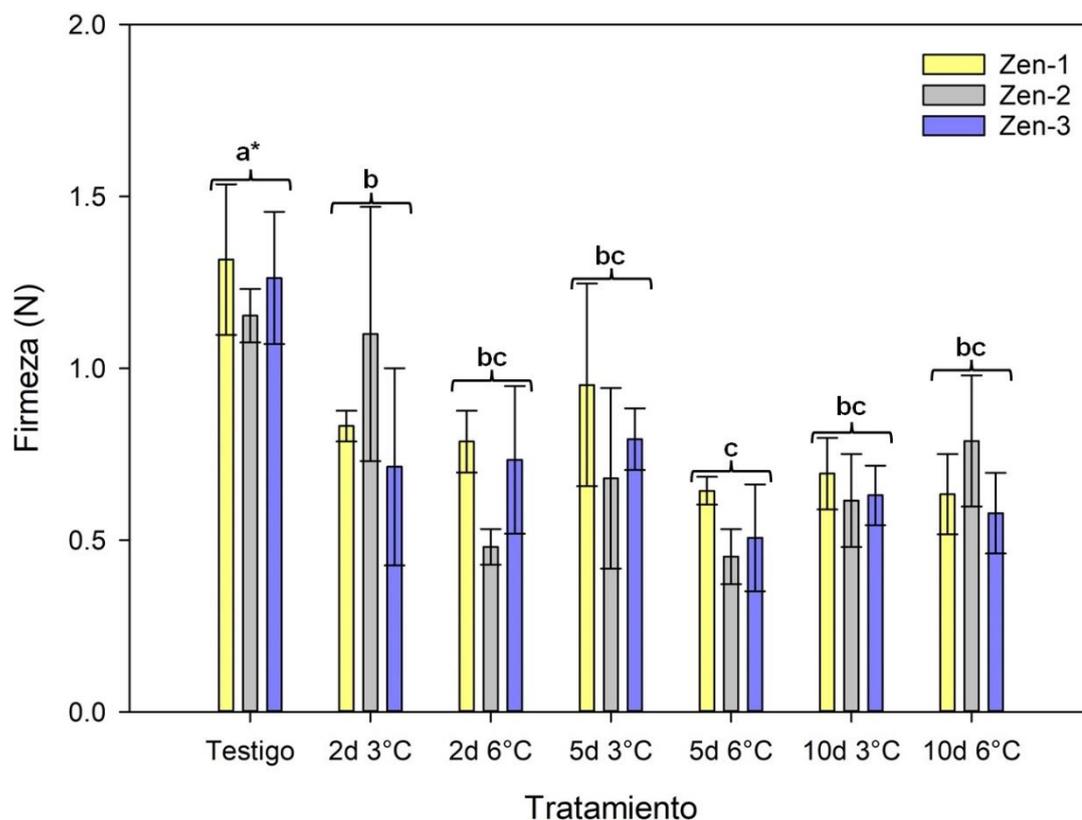


Figura 16. ‘Firmeza en fruto completo’ en frutos de tres accesiones (Zen-1, Zen-2 y Zen-3) de aguacate criollo de raza mexicana, madurados a temperatura ambiente después de diferentes periodos (0 [Testigo], 2, 5 y 10 d) de frigoconservación a dos temperaturas (3 y 6 ± 1 °C, 90 ± 5 % HR). Cada barra representa la media de tres repeticiones y las líneas verticales la desviación estándar. *Letras iguales corresponden a tratamientos estadísticamente iguales (Tukey, $p < 0.05$).

La firmeza en productos hortofrutícolas está estrechamente relacionada con la composición de la pared celular, y de acuerdo con los resultados obtenidos, se puede inferir que las bajas temperaturas promueven el ablandamiento de los productos hortofrutícolas, situación que siempre viene acompañada de la remodelación de los polisacáridos de la pared celular, especialmente la degradación de la pectina. Además, se sabe que las enzimas que degradan la pared celular, incluidas la poligalacturonasa (PG), la pectinestearasa (PE) y la celulasa, entre otras, desempeñan un papel importante en el des

ensamblaje de los polisacáridos de la pared celular y están involucradas en la reestructuración de la pared celular relacionada con la maduración del fruto (He et al., 2022).

Durante la presente investigación se encontró que la firmeza presenta una correlación negativa ($r_s = -0.429, p = 0.000$) con los DF, es decir, entre mayor es la incidencia de los DF en los frutos su firmeza es menor. Los frutos sometidos al tratamiento Testigo fueron los que tuvieron una firmeza estadísticamente superior a los demás, seguidos por los de los tratamientos 1, 2, 3, 4 y 6, que fueron estadísticamente iguales entre sí. De estos últimos, los frutos sometidos a los tratamientos 2, 3, 4 y 6 también tuvieron firmeza estadísticamente igual a la encontrada en los frutos del tratamiento 5, que fue significativamente menor a la encontrada en los tratamientos Testigo y 1. Con base en estos hallazgos, la Firmeza puede utilizarse como una herramienta para medir los DF en aguacates criollos de raza mexicana.

3.3.7. Fuga de electrolitos (%) - Permeabilidad de membrana

La permeabilidad de membrana también se ve afectada por la reestructuración de las paredes celulares y la degradación de polisacáridos. El aumento en la permeabilidad de las membranas, medido como electrolitos liberados (EL), suele ser un proceso normal que llega para evidenciar la senescencia de los productos hortofrutícolas (Quiroz-González et al., 2017). Los mismos autores determinaron en pitahaya, que la permeabilidad de la membrana permanece estable mientras los frutos se mantengan en refrigeración, pero que ésta aumenta y manifiesta el daño a las membranas cuando los productos son transferidos de la refrigeración a temperatura ambiente, y que estos cambios implican un desorden fisiológico irreversible.

La Figura 17 muestra que los frutos almacenados en frigoconservación por el periodo más largo (10 d) fueron los que presentaron un mayor porcentaje de fuga de electrolitos. Esto se confirmó con la comparación de medias ($p < 0.05$), pues los tratamientos 3 y 6 (3 y 6 ± 1 °C por 10d) fueron los que presentaron una FE(%) significativamente mayor, junto con los frutos

almacenados 5d a 3 °C (T5). No obstante, los frutos del tratamiento 5 también obtuvieron resultados estadísticamente iguales a los de los demás tratamientos, los cuales fueron significativamente menores que los de los tratamientos 3 y 6.

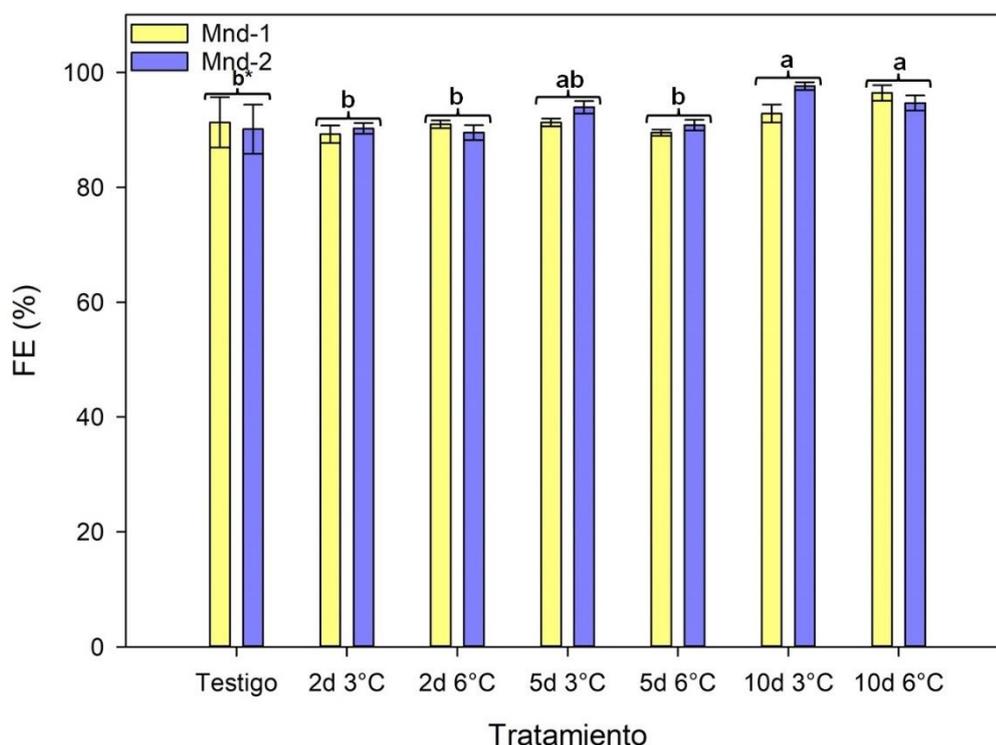


Figura 17. Fuga de electrolitos (%) en pulpa y cáscara, en frutos de dos accesiones (Mnd-1 y Mnd-2) de aguacate criollo de raza mexicana, madurados a temperatura ambiente después de diferentes periodos (0 [Testigo], 2, 5 y 10 d) de frigoconservación a dos temperaturas (3 y 6 ± 1 °C, 90 ± 5 % HR). Cada barra representa la media de tres repeticiones y las líneas verticales la desviación estándar. *Letras iguales corresponden a tratamientos estadísticamente iguales (Tukey, $p < 0.05$).

En el caso del presente estudio, aunque los tratamientos tienen un efecto significativo en el porcentaje de fuga de electrolitos de los frutos, los daños por frío no se manifestaron de manera homogénea, es decir, los frutos sometidos a un mismo tratamiento no presentaron el mismo valor de DF entre ellos, causando que esta variable no presente correlación con los DF ($r_s = -0.163$; $p = 0.301$). El efecto de las accesiones no fue significativo en la FE (%).

3.3.8. Actividad de Súperóxido Dismutasa (SOD)

La actividad de la SOD no mostró un patrón que denote relación directa con los tratamientos aplicados. La Figura 18 muestra que, en comparación con los frutos sometidos al tratamiento testigo, aquellos sometidos a los tratamientos 1 y 4 (3 y 6 ± 1 °C por 2d) presentaron una actividad de SOD notablemente mayor. No obstante, los frutos que duraron hasta el quinto día de almacenamiento en los tratamientos 2 y 5 (3 y 6 ± 1 °C por 5d) tuvieron una actividad de SOD menor que la de los anteriores, y finalmente los frutos almacenados durante 10 d tuvieron la mayor actividad de SOD. Este comportamiento concuerda con lo reportado para la misma variable medida en plátano y mango, donde tras los primeros días de refrigeración la actividad de SOD aumenta considerablemente pero después empieza a disminuir (Chen et al, 2021; Guimarães-Sanches et al., 2021).

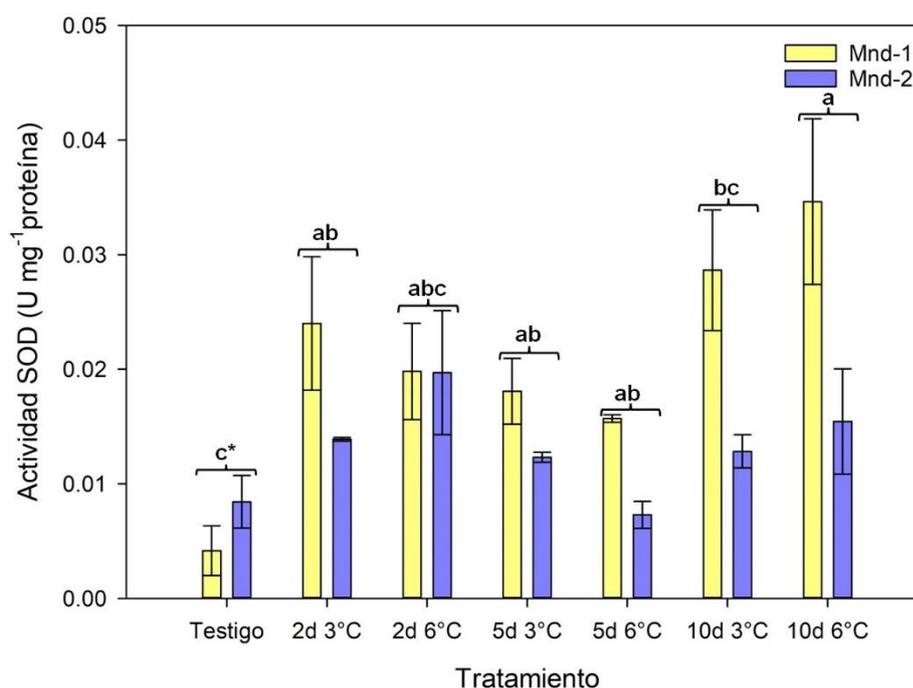


Figura 18. Actividad de Superóxido Dismutasa (SOD) en pulpa, en frutos de dos accesiones (Mnd-1 y Mnd-2) de aguacate criollo de raza mexicana, madurados a temperatura ambiente después de diferentes periodos (0 [Testigo], 2, 5 y 10 d) de frigoconservación a dos temperaturas (3 y 6 ± 1 °C, 90 ± 5 % HR). Cada barra representa la media de tres repeticiones y las líneas verticales la desviación estándar. *Letras iguales corresponden a tratamientos estadísticamente iguales (Tukey, $p < 0.05$).

Quiroz-González et al. (2017) evidenciaron que en frutos de pitahaya la actividad de la SOD aumenta levemente cuando los frutos están refrigerados, pero cuando estos son transferidos a temperatura ambiente, esta variable presenta un aumento pronunciado, además determinaron que entre menor sea la temperatura de almacenamiento, mayor es el aumento en la actividad de la SOD cuando los frutos son transferidos a temperatura ambiente.

La actividad de SOD presentó una correlación positiva ($r_s = 0.785, p = 0.000$) con los DF, por lo cual, apoyado también en la evidencia científica, es posible proponer esta variable como confiable para la medición de los DF.

3.3.9. Actividad Glutación Reductasa (GR)

La actividad de GR resultó similar en su comportamiento a la actividad de SOD, pues primero hay un aumento proporcional entre esta medición y los días de refrigeración de los frutos, para luego presentar datos menores (Figura 19).

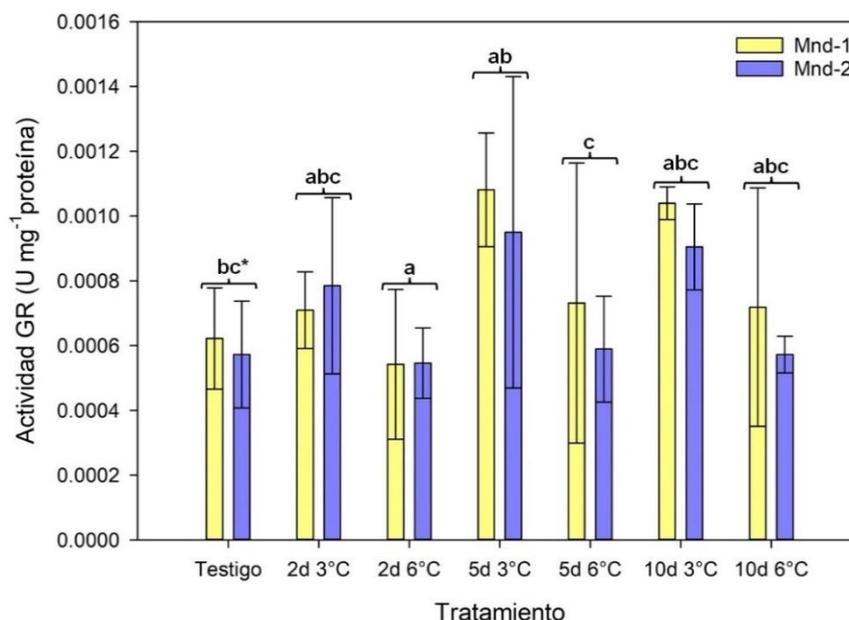


Figura 19. Actividad de Glutación Reductasa (GR) en pulpa, en frutos de dos accesiones (Mnd-1 y Mnd-2) de aguacate criollo de raza mexicana, madurados a temperatura ambiente después de diferentes periodos (0 [Testigo], 2, 5 y 10 d) de frigoconservación a dos temperaturas (3 y 6 ± 1 °C, 90 ± 5 % HR). Cada barra representa la media de tres repeticiones y las líneas verticales la desviación estándar. *Letras iguales corresponden a tratamientos estadísticamente iguales (Tukey, $p < 0.05$).

La Figura 19 muestra que la actividad de GR en los frutos almacenados a 3 °C fue mayor para los frutos almacenados durante 5 d que para los frutos almacenados 2 d y los almacenados a temperatura ambiente; sin embargo, aquellos frutos almacenados durante 10 d presentaron una actividad enzimática menor o similar que los almacenados durante 5 d. Lo anterior apoya lo encontrado por Yao et al. (2021) en pimientos almacenados a 4 °C, donde el comportamiento de la actividad de GR fue similar, presentando primero un incremento y luego una disminución.

Esta variable presentó una correlación positiva con los DF ($r_s = 0.439, p = 0.004$), por lo cual se sugiere utilizar esta variable como herramienta para medir de manera confiable los DF en aguacates criollos mexicanos.

3.3.10. Actividad de Piruvato Descarboxilasa (PDC)

El efecto de los tratamientos fue significativo ($p < 0.05$) en la actividad de la PDC (Figura 20).

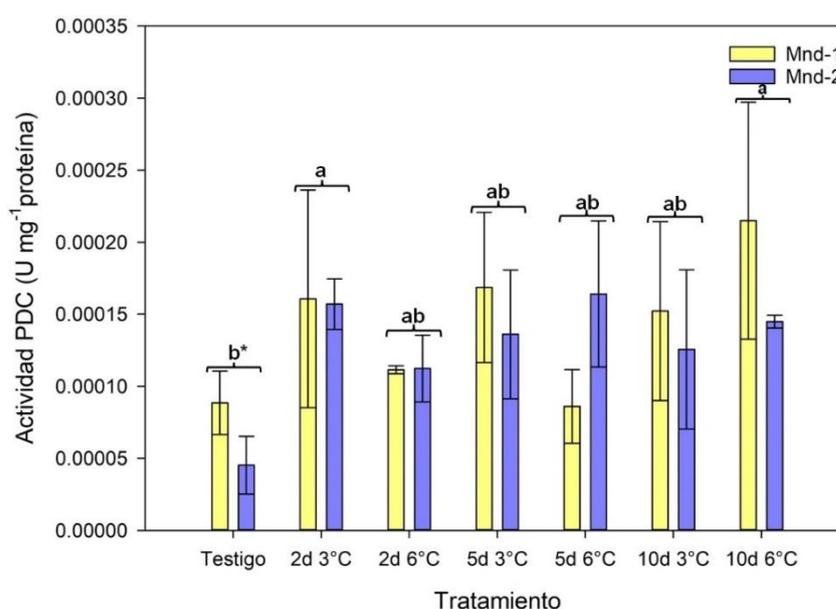


Figura 20. Actividad de Piruvato Descarboxilasa (PDC) en pulpa, en frutos de dos accesiones (Mnd-1 y Mnd-2) de aguacate criollo de raza mexicana, madurados a temperatura ambiente después de diferentes periodos (0 [Testigo], 2, 5 y 10 d) de frigoconservación a dos temperaturas (3 y 6 ± 1 °C, 90 ± 5 % HR). Cada barra representa la media de tres repeticiones y las líneas verticales la desviación estándar. *Letras iguales corresponden a tratamientos estadísticamente iguales (Tukey, $p < 0.05$).

Sin embargo, el efecto de todos los tratamientos bajo frigoconservación resultó significativamente igual ($p < 0.05$). El efecto del tratamiento Testigo fue significativamente inferior al de los tratamientos 1 y 6 (3 ± 1 °C por 2d y 6 ± 1 °C por 10d). Esta variable tiene una correlación positiva con los DF ($r_s = 0.457$, $p = 0.002$), por lo cual se sugiere esta variable como herramienta para medir de manera confiable los DF en aguacates criollos de raza mexicana.

3.3.11. Actividad de Alcohol Deshidrogenasa (ADH)

De acuerdo con la Figura 21, se observa que los frutos de la accesión Mnd-2 presentan un aumento consistente en cuestión de la actividad de ADH en su pulpa. Por su parte, los frutos de la accesión Mnd-1 presentaron una actividad de ADH constante. Sin embargo, el efecto de todos los tratamientos bajo frigoconservación resultó significativamente igual ($p < 0.05$). El efecto del tratamiento testigo resultó significativamente inferior al de los tratamientos 3 y 5 (3 ± 1 °C por 5d y 6 ± 1 °C por 10d).

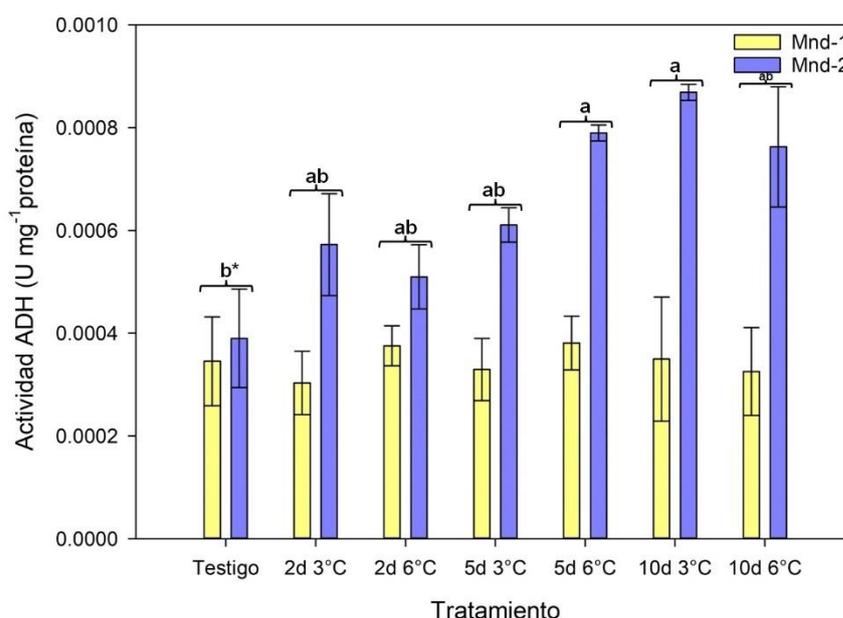


Figura 21. Actividad de Alcohol Deshidrogenasa (ADH) en pulpa, en frutos de dos accesiones (Mnd-1 y Mnd-2) de aguacate criollo de raza mexicana, madurados a temperatura ambiente después de diferentes periodos (0 [Testigo], 2, 5 y 10 d) de frigoconservación a dos temperaturas (3 y 6 ± 1 °C, 90 ± 5 % HR). Cada barra representa la media de tres repeticiones y las líneas verticales la desviación estándar. *Letras iguales corresponden a tratamientos estadísticamente iguales (Tukey, $p < 0.05$).

En discrepancia con lo anterior, Díaz de León-Sánchez et al. (2009) encontraron que para tomate la variable disminuye a mayor tiempo de refrigeración, también observaron una mayor actividad de esta enzima en frutos almacenados a 10 °C en comparación con otros frutos almacenados a 20 °C. Dado que la ADH es responsable de la reducción de acetaldehído a etanol (Botondi et al., 2012), se esperaba también que existiera una correlación de la actividad de ADH con los DF.

Efectivamente, de acuerdo con lo último mencionado, la actividad de ADH mostró una correlación negativa ($r_s = -0.362, p = 0.018$) entre ella y los DF, por lo cual se sugiere esta variable como herramienta para medir los DF en aguacates criollos de raza mexicana.

3.3.12. Correlación de variables fisiológicas, físicas, fisicoquímicas y bioquímicas con los DF

Como lo reportan Artés-Calero y Artés-Hernández (2002), encontrar el umbral crítico de temperatura sobre el cual un producto hortofrutícola no se vea afectado por los DF es imprescindible. De las variables analizadas en la presente investigación, se pudo determinar que la pérdida de peso, el patrón de respiración y la producción de etileno al alcanzar madurez de consumo, la firmeza y la actividad enzimática de SOD, GR, PDC y ADH, están significativamente correlacionadas con los DF (Cuadro 10).

Sin embargo, dada la escasa disponibilidad de material experimental, es deseable analizar dichas variables altamente correlacionadas de manera individual, para poder someter a tratamientos más diferenciados una mayor cantidad de frutos, con el fin de analizar las variables en más periodos de almacenamiento y hacerlo durante y después de la refrigeración.

Cuadro 6. Correlación entre daños por frío (DF) y variables respuesta (fisiológicas, físicas, fisicoquímicas y bioquímicas) en frutos de aguacate criollo de raza mexicana madurados a temperatura ambiente después de diferentes periodos (0, 2, 5 y 10 d) de frigoconservación (3 y 6 ± 1 °C, 90 ± 10 % HR).

Variabes	$r_s(\text{DF-X}_i)^*$	p-value
Fisiológicas		
Pérdida de peso	0.622	0.000
Patrón de respiración (Madurez de consumo)	-0.331	0.008
Patrón de respiración (Máximo climaterio)	-0.200	0.116
Producción de etileno (Madurez de consumo)	-0.388	0.002
Producción de etileno (Máximo climaterio)	-0.249	0.050
Físicas		
Luminosidad (L*)	-0.158	0.217
Ángulo de tono (Hue)	-0.185	0.147
Chroma	-0.257	0.042
Firmeza	-0.429	0.000
Fisicoquímicas		
FE(%)	0.163	0.301
Bioquímicas		
Actividad Superóxido Dismutasa (SOD)	0.785	0.000
Actividad Glutación Reductasa (GR)	0.439	0.004
Actividad Piruvato Descarboxilasa (PDC)	0.457	0.002
Actividad Alcohol Deshidrogenasa (ADH)	-0.362	0.018

* r_s : Correlación de Spearman; DF: Daños por frío; X: Variable respuesta.

3.4. Conclusiones

Las variables altamente correlacionadas con los DF en aguacates criollos mexicanos fueron la pérdida de peso (%PP), patrón de respiración y producción de etileno en madurez de consumo, firmeza y la actividad enzimática de superóxido dismutasa (SOD), glutación reductasa (GR), piruvato descarboxilasa (PDC) y alcohol deshidrogenasa (ADH). Las anteriores variables pueden ser consideradas herramientas confiables en la medición de los DF en aguacates criollos de raza mexicana.

3.5. Literatura citada

- Acosta-Díaz, E., Hernández-Torres, I., y Almeyda-León, I. H. (2012). Evaluación de aguacates criollos en Nuevo León, México: región sur. *Revista mexicana de ciencias agrícolas*, 3(2), 245-257.
- Alia-Tejacal, I., Colinas-León, M. T., Martínez-Damián, M. T., y Soto-Hernández, R. M. (2005). Daños por frío en zapote mamey (*Pouteria sapota* (Jacq.) H. E. Moore and Stearn). II. cambios en fenoles totales y actividad enzimática. *Revista Fitotecnia Mexicana*, 28(1), 25-32.
- Arpaia, M. L., Collin, S., Sievert, J., y Obenland, D. (2018). 'Hass' avocado quality as influenced by temperature and ethylene prior to and during final ripening. *Postharvest Biology and Technology*, 140, 76-84. doi:<https://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2018.02.015>
- Artés-Calero, F., y Artés-Hernández, F. (2002). Daños por frío en la postrecolección de frutas y hortalizas. *Avances en Ciencias y Técnicas del Frío*, 299-310.
- Bergh, B., y Ellstrand, N. (1986). Taxonomy of the avocado. *California Avocado Society Yearbook*, 70, 135-145.
- Beyer, W. F., y Fridovich, I. (1987). Assaying for superoxide dismutase activity: Some large consequences of minor changes in conditions. *Analytical Biochemistry*, 161(2), 559-566. doi:[https://doi.org/10.1016/0003-2697\(87\)90489-1](https://doi.org/10.1016/0003-2697(87)90489-1)
- Boccia, F., y Punzo, G. (2020). Nutraceuticals: Some remarks by a choice experiment on food, health and new technologies. *Food Research International*, 130. doi:<https://doi.org/10.1016/j.foodres.2019.108888>
- Botondi, R., Russo, V., y Mencarelli, F. (2012). Anaerobic metabolism during short and long term storage of kiwifruit. *Postharvest Biology and Technology*, 64(1), 83-90. doi:<https://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2011.09.017>
- Bradford, M. M. (1976). A rapid and sensitive method for the quantitation of microgram quantities of protein utilizing the principle of protein-dye binding. *Analytical Biochemistry*, 72(1), 248-254. doi:[https://doi.org/10.1016/0003-2697\(76\)90527-3](https://doi.org/10.1016/0003-2697(76)90527-3)
- Chen, J., Liu, X., Li, F., Li, Y., y Yuan, D. (2017). Cold shock treatment extends shelf life of naturally ripened or ethylene-ripened avocado fruits. *PLOS ONE*, 12(12). doi:10.1371/journal.pone.0189991
- Chen, L. L., Shan, W., Cai, D. L., Chen, J. Y., Lu, W. J., Su, X. G., y Kuang, J. F. (2021). Postharvest application of glycine betaine ameliorates chilling injury in cold-stored banana fruit by enhancing antioxidant system. *Scientia Horticulturae*, 287. doi:<https://doi.org/10.1016/j.scienta.2021.110264>
- Corrales-García, J. E., García-Mateos, M. d. R., Martínez-López, E., Barrientos-Priego, A. F., Ybarra-Moncada, M. C., Ibarra-Estrada, E., . . . Becerra-Morales, D. (2019). Anthocyanin and Oil Contents, Fatty Acids Profiles and Antioxidant Activity of Mexican Landrace Avocado Fruits. *Plant Foods for Human Nutrition*, 74(2), 210-215. doi:10.1007/s11130-019-00721-1

- Corrales Garcia, J., y Méndez-Zúñiga, S. (2020). Criollo avocado of mexican race (*Persea americana* var. *drymifolia*): an underutilized species in horticulture. 4. doi:10.15406/hij.2020.04.00186
- Davis, P. L., y Chace, W. G. (1969). Determination of alcohol in citrus juice by gas chromatographic analysis of headspace. *Hortscience*.
- Díaz de León-Sánchez, F., Pelayo-Zaldívar, C., Rivera-Cabrera, F., Ponce-Valadez, M., Ávila-Alejandre, X., Fernández, F. J., . . . Pérez-Flores, L. J. (2009). Effect of refrigerated storage on aroma and alcohol dehydrogenase activity in tomato fruit. *Postharvest Biology and Technology*, 54(2), 93-100. doi:<https://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2009.07.003>
- Dreher, M. L., y Davenport, A. J. (2013). Hass avocado composition and potential health effects. *Critical reviews in food science and nutrition*, 53(7), 738-750. doi:10.1080/10408398.2011.556759
- Farley, K. X., Aizpuru, M., Boden, S. H., Wagner, E. R., Gottschalk, M. B., y Daly, C. A. (2020). Avocado-related knife injuries: Describing an epidemic of hand injury. *The American journal of emergency medicine*, 38(5), 864-868. doi:10.1016/j.ajem.2019.06.051
- Galindo-Tovar, M. E., Ogata-Aguilar, N., y 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. doi:10.1007/s10722-007-9250-5
- Ghanem, M. E., Kehel, Z., Marrou, H., y Sinclair, T. R. (2020). Seasonal and climatic variation of weighted VPD for transpiration estimation. *European Journal of Agronomy*, 113. doi:<https://doi.org/10.1016/j.eja.2019.125966>
- Guimarães-Sanches, A., Dantas-Pedrosa, V. M., Vantini-Checchio, M., Silva-Fernandes, T. F., Mayorquin-Guevara, J. E., Lupino-Gratão, P., y de Almeida-Teixeira, G. H. (2021). Polyols can alleviate chilling injury in 'Palmer' mangoes during cold storage. *Food Control*, 129. doi:<https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2021.108248>
- He, M., Wu, Y., Wang, Y., Hong, M., Li, T., Deng, T., y Jiang, Y. (2022). Valeric acid suppresses cell wall polysaccharides disassembly to maintain fruit firmness of harvested 'Waizuili' plum (*Prunus salicina* Lindl). *Scientia Horticulturae*, 291. doi:<https://doi.org/10.1016/j.scienta.2021.110608>
- Hershkovitz, V., Friedman, H., Goldschmidt, E. E., y Pesis, E. (2010). Ethylene regulation of avocado ripening differs between seeded and seedless fruit. *Postharvest Biology and Technology*, 56(2), 138-146. doi:<https://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2009.12.012>
- Hodges, D. M., Andrews, C. J., Johnson, D. A., y Hamilton, R. I. (1997). Antioxidant Enzyme and Compound Responses to Chilling Stress and their Combining Abilities in Differentially Sensitive Maize Hybrids. *Crop Science*, 37(3), 857-863. doi:<https://doi.org/10.2135/cropsci1997.0011183X003700030027x>
- Ibarra-Laclette, E., Méndez-Bravo, A., Pérez-Torres, C. A., Albert, V. A., Mockaitis, K., Kilaru, A., . . . Herrera-Estrella, L. (2015). Deep sequencing of the Mexican avocado transcriptome, an ancient angiosperm with a high content of fatty acids. *BMC Genomics*, 16(1). doi:10.1186/s12864-015-1775-y

- McGuire, R. G. (1992). Reporting of objective color measurements. *Hortscience*, 27(12), 1254-1255.
- Méndez-Zúñiga, S. M. (2020). *Aguacate criollo mexicano: Caracterización física, fisiológica, fitoquímica y variabilidad genética con marcadores ISSR*. (Tesis de Doctorado), Universidad Autónoma Chapingo,
- Méndez-Zúñiga, S. M., Corrales-García, J. E., Gutiérrez-Grijalva, E. P., García-Mateos, R., Pérez-Rubio, V., y Heredia, J. B. (2019). Fatty Acid Profile, Total Carotenoids, and Free Radical-Scavenging from the Lipophilic Fractions of 12 Native Mexican Avocado Accessions. *Plant Foods for Human Nutrition*, 74(4), 501-507. doi:10.1007/s11130-019-00766-2
- Muy-Rangel, D., Siller-Cepeda, J., Díaz-Pérez, J., y Valdéz-Torres, B. (2004). Efecto de las condiciones de almacenamiento y el encerado en el estatus hídrico y la calidad poscosecha de pepino de mesa. *Revista Fitotecnia Mexicana*, 27(2), 157-165.
- Perez, K., Mercado, J., y Soto-Valdez, H. (2004). Note. Effect of Storage Temperature on the Shelf Life of Hass Avocado (*Persea Americana*). *Food Science and Technology International*, 10(2), 73-77. doi:10.1177/1082013204043763
- Quiroz-González, B., Corrales-García, J. E., Colinas-León, M. T., y Ybarra-Moncada, M. C. (2017). Identification of variables correlated with chilling injury in Pitahaya (*Hylocereus undatus* Haworth). *Agrociencia*, 51(2), 153-172.
- Rai, A., Kumari, K., y Vashistha, P. (2022). Umbrella review on chilling injuries: Post-harvest issue, cause, and treatment in tomato. *Scientia Horticulturae*, 293. doi:<https://doi.org/10.1016/j.scienta.2021.110710>
- Ramos-Aguilar, A. L., Ornelas-Paz, J., Tapia-Vargas, L. M., Gardea-Bejar, A. A., Yahia, E. M., Ornelas-Paz, J. d. J., . . . Escalante-Minakata, P. (2021). Metabolomic analysis and physical attributes of ripe fruits from Mexican Creole (*Persea americana* var. *Drymifolia*) and 'Hass' avocados. *Food Chemistry*, 354. doi:<https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2021.129571>
- Rodríguez-Carpena, J.-G., Morcuende, D., Andrade, M. J., Kylli, P., y Estévez, M. (2011). Avocado (*Persea americana* Mill.) Phenolics, In Vitro Antioxidant and Antimicrobial Activities, and Inhibition of Lipid and Protein Oxidation in Porcine Patties. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 59(10), 5625-5635. doi:10.1021/jf1048832
- Sánchez-Colín, S., Mijares-Oviedo, P., López-López, L., y Barrientos-Priego, A. F. (2002). Historia del aguacate en México. *Memoria Fundación Salvador Sánchez Colín*, 171-187.
- Saucedo-Veloz, C. (1991). Tecnologías de conservación del aguacate preventivas a daños por frío y almacenamiento. *Memorias del Seminario Internacional del Aguacate*, 75-85.
- Seliem, M. K., El-Mahrouk, M. E., El-Banna, A. N., Hafez, Y. M., y Dewir, Y. H. (2021). Micropropagation of *Philodendron selloum*: Influence of copper sulfate on endophytic bacterial contamination, antioxidant enzyme activity, electrolyte leakage, and plant survival. *South African Journal of Botany*, 139, 230-240. doi:<https://doi.org/10.1016/j.sajb.2021.01.024>

- Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera, S. I. A. P. (2021). Avance de Siembras y Cosechas Resumen por Estado. Retrieved from http://infosiap.siap.gob.mx:8080/agricola_siap_gobmx/ResumenProducto.do
- Shallcross, D. C. (2008). Psychrometric charts for water vapour in natural gas. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 61(1), 1-8.
- Tan, C. X. (2019). Virgin avocado oil: An emerging source of functional fruit oil. *Journal of Functional Foods*, 54, 381-392. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jff.2018.12.031>
- Taylor, J., Muller, M., y Minnaar, A. (2016). Improved storage and eat-ripe quality of avocados using a plant protein-based coating formulation. *Institute for Food, Nutrition and Well-being and Department of Food Science, University of Pretoria*.
- Woolf, A. B., Cox, K. A., White, A., y Ferguson, I. B. (2003). Low temperature conditioning treatments reduce external chilling injury of 'Hass' avocados. *Postharvest Biology and Technology*, 28(1), 113-122. doi:[https://doi.org/10.1016/S0925-5214\(02\)00178-3](https://doi.org/10.1016/S0925-5214(02)00178-3)
- Yao, M., Ge, W., Zhou, Q., Zhou, X., Luo, M., Zhao, Y., . . . Ji, S. (2021). Exogenous glutathione alleviates chilling injury in postharvest bell pepper by modulating the ascorbate-glutathione (AsA-GSH) cycle. *Food Chemistry*, 352. doi:<https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2021.129458>
- Yepes-Betancur, D. P., Sánchez-Giraldo, L., y Márquez-Cardozo, C. J. (2017). Extracción termomecánica y caracterización fisicoquímica del aceite de aguacate (*Persea americana* Mill. cv. Hass). *Informador Técnico*, 81(1), 75-85. doi:10.23850/22565035.728