



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA CHAPINGO

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA AGROINDUSTRIAL

**CAMBIOS FISIOLÓGICOS, DAÑOS POR FRÍO, PERFIL
QUÍMICO Y EXTRACCIÓN DE CAPSAICINOIDES DE
FRUTOS DE CHILE SERRANO (*Capsicum annuum* L.)
DURANTE SU DESARROLLO Y EN POSCOSECHA**

TESIS

Que como requisito parcial para obtener el grado de:

DOCTOR EN CIENCIAS AGROALIMENTARIAS

Presenta:

M.C. FRANCISCO DANIEL MIRANDA MOLINA

Bajo la supervisión de:

SALVADOR VALLE GUADARRAMA, DR.



Chapingo, México, junio de 2020

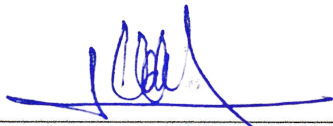


**CAMBIOS FISIOLÓGICOS, DAÑOS POR FRÍO, PERFIL
QUÍMICO Y EXTRACCIÓN DE CAPSAICINOIDES DE FRUTOS
DE CHILE SERRANO (*Capsicum annuum* L.) DURANTE SU
DESARROLLO Y EN POSCOSECHA**

Tesis realizada por **M.C. Francisco Daniel Miranda Molina** bajo la supervisión del Comité Asesor indicado, aprobada por el mismo y aceptada como requisito parcial para obtener el grado de:

DOCTOR EN CIENCIAS AGROALIMENTARIAS

DIRECTOR:



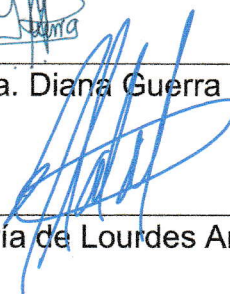
Dr. Salvador Valle Guadarrama

ASESOR:



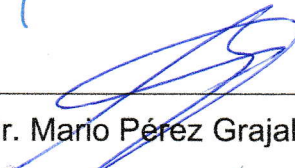
Dra. Diana Guerra Ramírez

ASESOR:



Dra. Maria de Lourdes Arévalo Galarza

ASESOR:



Dr. Mario Pérez Grajales

LECTOR EXTERNO:



Dr. Iran Alia Tejacal

ÍNDICE GENERAL

LISTA DE CUADROS	vii
LISTA DE FIGURAS	viii
AGRADECIMIENTOS	xi
DEDICATORIAS	xiii
DATOS BIOGRÁFICOS	xiv
RESUMEN GENERAL	xv
ABSTRACT	xvi
1 INTRODUCCIÓN GENERAL	1
2 REVISIÓN DE LITERATURA	7
2.1 Origen y distribución del chile (<i>Capsicum annuum</i> L.)	7
2.2 Taxonomía del chile	8
2.3 El cultivo del chile	9
2.4 Chiles picantes	10
2.5 Panorama mundial y nacional de la producción de chile	11
2.6 El chile Serrano	12
2.6.1 Variables de calidad del fruto de chile Serrano	14
2.6.2 Contenido nutrimental y nutracéutico del chile Serrano	14
2.7 Capsaicinoides	15
2.8 Almacenamiento a bajas temperaturas y daño por frío	16
2.9 Enzimas relacionadas al daño por frío	21
2.10 Literatura citada	23
3 CHILES PUNGENTES MEXICANOS: UNA REVISIÓN DEL ESTADO DEL ARTE: CULTIVO, USOS Y MANEJO POSTCOSECHA DE ESTOS FRUTOS	31
3.1 Resumen	31
3.2 Abstract	32

3.3	Introducción	33
3.4	Clasificación taxonómica	34
3.5	Capsaicinoides, el picor de los chiles	36
3.6	Chiles picantes	37
3.6.1	<i>Capsicum annuum</i>	38
3.6.2	<i>Capsicum baccatum</i>	39
3.6.3	<i>Capsicum chinense</i>	39
3.6.4	<i>Capsicum frutescens</i>	40
3.6.5	<i>Capsicum pubescens</i>	41
3.7	Clasificación basada en la pungencia de los chiles	43
3.8	Manejo poscosecha en chile pimientos	43
3.9	Trastornos fisiológicos posteriores a la cosecha	44
3.10	Trastornos patológicos poscosecha	44
3.11	Beneficios del consumo de chile	45
3.12	Usos alimenticios del chile	45
3.13	Usos industriales del chile	46
3.14	Conclusiones y perspectivas	46
3.15	Literatura citada	47
4	ATRIBUTOS DE CALIDAD Y PROPIEDADES ANTIOXIDANTES DE LOS PIMIENTOS DE CHILE SERRANO (<i>Capsicum annuum</i> L.) AFECTADOS POR LAS CONDICIONES TÉRMICAS EN EL PERIODO POSTERIOR A LA COSECHA.....	52
4.1	Resumen	52
4.2	Abstract.....	53
4.3	Introduction	54
4.4	Materials and methods.....	55
4.4.1	Plant material	55
4.4.2	Experimental organization.....	55
4.4.3	Cumulative weight loss.....	56
4.4.4	Color.....	56

4.4.5	Firmness	56
4.4.6	Total soluble solids.....	56
4.4.7	Acidity.....	56
4.4.8	Total soluble phenols	57
4.4.9	Capsaicin content.....	57
4.4.10	Antioxidant activity.....	58
4.4.11	Data analysis.....	58
4.5	Results and discussion	59
4.5.1	Cumulative weight loss.....	59
4.5.2	Color.....	61
4.5.3	Firmness	65
4.5.4	Total soluble solids and titratable acidity	66
4.5.5	Total soluble phenols	67
4.5.6	Capsaicin	68
4.5.7	Antioxidant activity.....	69
4.6	Conclusions	70
4.7	References	70
5	USO DE ELICITORES PARA PREVENIR DAÑO POR FRÍO EN FRUTOS DE CHILE SERRANO (<i>Capsicum annuum</i> L.).....	75
5.1	Resumen	75
5.2	Abstract.....	76
5.3	Introducción	77
5.4	Materiales y métodos.....	78
5.4.1	Material vegetal.....	78
5.4.2	Organización experimental.....	78
5.4.3	Pérdida de peso acumulada.....	79
5.4.4	Color.....	79
5.4.5	Firmeza	79
5.4.6	Sólidos solubles totales.....	79
5.4.7	Acidez	80

5.4.8	Fenoles solubles totales	80
5.4.9	Contenido de capsaicina	80
5.4.10	Actividad antioxidante	81
5.4.11	Proteína soluble	81
5.4.12	Fuga de electrolitos	82
5.4.13	Actividad de la enzima polifenol oxidasa.....	82
5.4.14	Actividad de la enzima peroxidasa	82
5.4.15	Análisis de datos	83
5.5	Resultados y discusión	83
5.5.1	Pérdida de peso acumulada.....	83
5.5.2	Color.....	86
5.5.3	Firmeza	91
5.5.4	Sólidos solubles totales y acidez titulable	93
5.5.5	Fenoles solubles totales.....	96
5.5.6	Contenido de capsaicina	98
5.5.7	Actividad antioxidante	100
5.5.8	Proteína soluble	104
5.5.9	Fuga de electrolitos	104
5.5.10	Actividad de la enzima polifenol oxidasa.....	106
5.5.11	Actividad de la enzima peroxidasa	107
5.6	Conclusiones	110
5.7	Referencias.....	110
6	CONCLUSIONES GENERALES.....	115
7	Anexos	116
7.1	Publicaciones.....	116

LISTA DE CUADROS

Cuadro 1. Clasificación taxonómica del chile Serrano (<i>C. annuum</i> L.).	9
Cuadro 2. Principales países productores de chile verde, expresado en toneladas.	11
Cuadro 3. Principales países exportadores de chile verde, producción expresada en toneladas.	12
Cuadro 4. Contenido nutrimental del chile Serrano en 100 g de fruto fresco...	15
Cuadro 5. Especies y variedades de <i>Capsicum</i> diferenciadas de acuerdo a sus características fenotípicas.	35
Cuadro 6. Percentile values of the Fisher distribution ($F_{0.05}$) and F values corresponding to the analysis of variance of the postharvest behavior of Serrano chili peppers (<i>Capsicum annuum</i> L.) stored at 4 °C, 8 °C and 25 °C for 33 d...	60
Cuadro 7. Valores percentiles de la distribución de Fisher ($F_{0.05}$) y valores F correspondientes al análisis de varianza del comportamiento poscosecha de frutos de chile Serrano almacenados a 4, 8 y 25 °C y tratados con MeJa y AS.	84

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Distribución de <i>Capsicum annuum</i> , <i>C. baccatum</i> , <i>C. chinense</i> , y <i>C. frutescens</i> . Fuente (Pickersgill, 1971).	8
Figura 2. Clasificación de chiles de acuerdo con la escala Scoville. Fuente: SIAP, (2019).	10
Figura 3. Ruta propuesta para la biosíntesis de los capsaicinoides en el género <i>Capsicum</i> . Fuente: Vázquez et al. (2007).	17
Figura 4. Vía esquemática de los eventos que conducen a lesiones por frío en tejidos vegetales sensibles. Fuente: Vázquez et al.(2007).	20
Figura 5. Modification of cumulative weight loss (A), firmness (B), total soluble solids (C), and acidity (D) in Serrano chili peppers stored at 4, 8, and 25 °C for 33 d in postharvest.....	61
Figura 6. Variation of lightness (A), chroma (B), and hue angle (C) in Serrano chili peppers stored at 4, 8, and 25°C for 33 d in postharvest.	64
Figura 7. A: Serrano chili peppers without the presence of chilling injury (A). B: Serrano chili peppers stored at 4°C with symptoms of chilling injury (darkening of seeds and surrounding tissue) (B).	65
Figura 8. Modification of the content of total soluble phenols (A), capsaicin content (B), antioxidant activity evaluated by the ABTS method (C) and antioxidant activity evaluated by the FRAP (D) method in Serrano chili fruit stored at 4, 8, and 25°C for 33 d in postharvest.	68
Figura 9. Pérdida de peso acumulada en frutos de chile Serrano almacenados a 25, 8 y 4 °C (A, B y C respectivamente) y tratados con MeJa (MJ 25, 50 y 100) y AS (AC50, 100 y 200).	85

Figura 10. Variación de luminosidad en frutos de chile Serrano almacenados a 25, 8 y 4 °C (A, B y C respectivamente) y tratados con MeJa (MJ 25, 50 y 100) y AS (AC50, 100 y 200).	88
Figura 11. Variación de cromaticidad en frutos de chile Serrano almacenados a 25, 8 y 4 °C (A, B y C respectivamente) y tratados con MeJa (MJ 25, 50 y 100) y AS (AC50, 100 y 200).	89
Figura 12. Variación de ángulo de matiz en frutos de chile Serrano almacenados a 25, 8 y 4 °C (A, B y C respectivamente) y tratados con MeJa (MJ 25, 50 y 100) y AS (AC50, 100 y 200).	90
Figura 13. Variación de la firmeza en frutos de chile Serrano almacenados a 25, 8 y 4 °C (A, B y C respectivamente) y tratados con MeJa (MJ 25, 50 y 100) y AS (AC50, 100 y 200).	92
Figura 14. Variación del contenido de sólidos solubles totales en frutos de chile Serrano almacenados a 25, 8 y 4 °C (A, B y C respectivamente) y tratados con MeJa (MJ 25, 50 y 100) y AS (AC50, 100 y 200).	94
Figura 15. Modificación de la acidez titulable en frutos de chile Serrano almacenados a 25, 8 y 4 °C (A, B y C respectivamente) y tratados con MeJa (MJ 25, 50 y 100) y AS (AC50, 100 y 200).	95
Figura 16. Modificación del contenido de fenoles solubles totales (mg GAE 100 g ⁻¹) en frutos de chile Serrano almacenados a 25, 8 y 4 °C (A, B y C respectivamente) y tratados con MeJa (MJ 25, 50 y 100) y AS (AC50, 100 y 200)	97
Figura 17. Modificación del contenido de capsaicina en frutos de chile Serrano almacenados a 25, 8 y 4 °C (A, B y C respectivamente) y tratados con MeJa (MJ 25, 50 y 100) y AS (AC50, 100 y 200).	99
Figura 18. Modificación de actividad antioxidante (μmol TE 100 g ⁻¹) evaluada por el método FRAP en frutos de chile Serrano almacenados a 25, 8 y 4 °C (A, B y C, respectivamente) y tratados con MeJa (MJ 25, 50 y 100) y AS (AC50, 100 y 200).	101

Figura 19. Modificación de actividad antioxidante ($\mu\text{mol TE } 100 \text{ g}^{-1}$) evaluada por el método ABTS en frutos de chile Serrano almacenados a 25, 8 y 4 ° C (A, B y C respectivamente) y tratados con MeJa (MJ 25, 50 y 100) y AS (AC50, 100 y 200).....	102
Figura 20. Modificación del contenido de proteína en frutos de chile Serrano almacenados a 25, 8 y 4 ° C (A, B y C respectivamente) y tratados con MeJa (MJ 25, 50 y 100) y AS (AC50, 100 y 200).	103
Figura 21. Cambio en el porcentaje de fuga de electrolitos en frutos de chile Serrano almacenados a 25, 8 y 4 ° C (A, B y C respectivamente) y tratados con MeJa (MJ 25, 50 y 100) y AS (AC50, 100 y 200).....	105
Figura 22. Síntomas de daño por frío en frutos de chile Serrano almacenados a 4 °C.....	106
Figura 23. Actividad enzimática (UAE mg^{-1}) de la enzima polifenoloxidasas en frutos de chile Serrano almacenados a 25, 8 y 4 ° C (A, B y C respectivamente) y tratados con MeJa (MJ 25, 50 y 100) y AS (AC50, 100 y 200).	108
Figura 24. Actividad enzimática (UAE mg^{-1}) de la enzima peroxidasa en frutos de chile Serrano almacenados a 25, 8 y 4 ° C (A, B y C respectivamente) y tratados con MeJa (MJ 25, 50 y 100) y AS (AC50, 100 y 200).....	109

AGRADECIMIENTOS

A Dios por darme la fortaleza para realizar este trabajo.

A mi Alma Mater, la Universidad Autónoma Chapingo por todas las oportunidades que me ha brindado a lo largo de mi vida académica, siempre estaré agradecido.

Al Programa de Posgrado en Ciencia y Tecnología Agroalimentaria, en especial al Doctorado en Ciencias Agroalimentarias de la Universidad Autónoma Chapingo, por la oportunidad de seguir desarrollándome profesionalmente.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por el apoyo económico brindado durante la realización de este proyecto.

Al Dr. Salvador Valle Guadarrama por brindarme un espacio dentro de su grupo de trabajo para realizar mi investigación, por la confianza en mí y en mi trabajo y por todo el apoyo que me brindó durante estos 4 años en la realización y asesoramiento en cada una de las etapas de este trabajo. Gracias.

A la Dra. Ma. Lourdes Arévalo Galarza por siempre estar dispuesta a apoyarme en la realización de mi trabajo, por sus consejos y comentarios oportunos en cada una de las etapas de este trabajo. Gracias

A la Dra. Diana Guerra Ramírez por su apoyo incondicional durante todo mi trabajo, por toda su confianza y consejos, por sus conocimientos compartidos, por la amistad que me brindó en este tiempo y por siempre estar impulsándome en mi trabajo. Gracias.

Al Dr. Mario Pérez Grajales, por compartirme su experiencia en el manejo del cultivo de chile y brindarme sus conocimientos para realizar de la mejor forma este trabajo.

A la Dr. Francisco Artés Hernández y al Dr. Gines Benito Martínez Hernández por su apoyo para la realización de mi estancia de investigación en la Universidad Politécnica de Cartagena. Gracias compartir sus conocimientos y por apoyarme durante esta etapa de mi trabajo.

A Ara y Ale que me brindaron su amistad y todo su apoyo durante mi estancia en el laboratorio de atmosferas controladas.

A Invernaderos Apatzeo SPR de RL por su apoyo con el material vegetal para la realización de este trabajo. Gracias

A todos los trabajadores del Posgrado en Ciencia y Tecnología Agroalimentaria que siempre estuvieron dispuestos a apoyarme durante la realización de este trabajo. A la Sra. Esperanza, por su paciencia y apoyo incondicional siempre que lo necesitamos. A Arely y Melchor por su apoyo en todos los trámites administrativos durante estos más de cuatro años.

A mis compañeros y amigos de generación: Deysi, Vere, Sergio y Flor, por su apoyo en los momentos más complicadas de este trayecto, por siempre brindarnos una mano cuando lo necesitábamos y por todas las vivencias que tuvimos en este tiempo. Gracias.

A los que no mencioné en este documento, pero de alguna manera estuvieron presentes durante mi transcurso en el Doctorado, Muchas Gracias.

DEDICATORIAS

A mis hijos Daniela y Diego, porque ellos son mi razón para seguir adelante cada día.

A mi esposa Diana, por siempre animarme a seguir adelante en este camino. Por todo el apoyo que me has brindado, por la confianza y todo el amor y dedicación que tienes con nuestra familia Te amo.

A mis padres Francisco y Natalia a quienes les debo todo mi ser, gracias por todo su apoyo y consejos en todo este tiempo y por siempre ser un gran ejemplo para mí y para mis hijos. Los amo.

A mis hermanos, Ernesto, Marisa, María y Moisés, porque a pesar de no estar cerca todo el tiempo siempre están al pendiente de mí y de mi familia y me apoyan en todas las decisiones que tomo. Gracias por su apoyo lo quiero mucho.

A mis suegros, Guillermo y Marisol, y a mi cuñada Itzel, porque en todo momento contamos con ustedes. Gracias por nunca dejarnos solos. ¡¡¡Gracias por todo su apoyo!!!

¡¡¡¡A todas las personas que la vida ha cruzado en este camino y de que alguna u otra manera han dejado huella en mi vida, muchas gracias!!!!

DATOS BIOGRÁFICOS



Datos personales

Nombre: Francisco Daniel Miranda Molina

Fecha de nacimiento: 13 de agosto de 1989

Lugar de nacimiento: Querétaro, México

CURP: MIMF890813HQTRLR04

Profesión: Ingeniero Agroindustrial

Desarrollo académico

Licenciatura: Ingeniería Agroindustrial, Universidad Autónoma Chapingo,

Maestría: Maestría en Ciencia y Tecnología de los Alimentos, Universidad Autónoma de Querétaro.

Estancia de investigación en la Universidad Politécnica de Cartagena, España.

Participó como ponente en el XVI Congreso Internacional de los alimentos y XXXI Reunión Nacional de Microbiología, 2014. También participó como ponente en el II Congreso Internacional y XVI Congreso Nacional de Ciencias Agronómicas, 2014.

RESUMEN GENERAL

Cambios fisiológicos, daños por frío, perfil químico y extracción de capsaicinoides de frutos de chile serrano (*Capsicum annuum* L.) durante su desarrollo y en poscosecha

Resumen

El chile Serrano (*Capsicum annuum* L.) es un cultivo de importancia en México; se consume principalmente en fresco y la forma de conservación más común es el uso de bajas temperaturas. Sin embargo, si el manejo no es adecuado el fruto puede experimentar daño por frío (DPF). El objetivo de este trabajo fue evaluar el efecto del almacenamiento a bajas temperaturas y el uso de elicitores (jasmonato de metilo y ácido salicílico) sobre los atributos de calidad de frutos de chile Serrano cv. Camino Real durante su desarrollo y el periodo de poscosecha. En los frutos manejados a 4 y 8 °C se observaron cambios menores en pérdida de peso, textura y ángulo de matiz, pero con manejo a 4 °C se identificó oscurecimiento de semillas y tejido interno, lo cual se asoció con DPF. El manejo de frutos a 25 °C causó incremento de fenoles solubles totales y capsaicina, pero estos compuestos se mantuvieron sin cambios a 4 y 8 °C cuando no se utilizaron elicitores. La aplicación de jasmonato de metilo (25 y 100 ppm) logró incrementar el contenido de fenoles, capsaicinoides y la actividad antioxidante de los frutos, mientras que el ácido salicílico no mostro ningún efecto en las variables analizadas, aunque ninguno de los dos elicitores mostro un efecto positivo en la inhibición del DPF. La fuga de electrolitos fue menor en frutos almacenados a 8 y 25 °C, mientras que en frutos a 4 °C se tuvo ablandamiento significativo en superficie, así como presencia de hongos en frutos dañados. El manejo a 8 °C permitió mantener en condiciones óptimas los frutos de chile Serrano durante los 33 días de almacenamiento, mientras que el uso de jasmonato de metilo favoreció la biosíntesis de compuestos fenólicos y capsaicina.

Palabras clave: *Capsicum annuum*, chile Serrano, daño por frío, poscosecha, refrigeración.

Tesis de Doctorado en Ciencias Agroalimentarias, Programa de Posgrado en Ciencia y Tecnología Agroalimentaria, Universidad Autónoma Chapingo.

Autor: Francisco Daniel Miranda Molina.

Director de Tesis: Salvador Valle Guadarrama, Dr.

ABSTRACT

Physiological changes, chilling injury, chemical profile and extraction of capsaicinoids from fruits of serrano chilli pepper (*Capsicum annuum* L.) during development and postharvest

The Serrano chili (*Capsicum annuum* L.) is an important crop in Mexico; it is consumed mainly fresh and the most common preservation form is the use of low temperatures. However, if handling is not adequate, the fruit may experience chilling injury (CI). The objective of this work was to evaluate the effect of storage at low temperatures and the use of elicitors (methyl jasmonate and salicylic acid) on the quality attributes of Serrano fruits cv. Camino Real during development and the postharvest period. In fruits handled at 4 and 8 °C, minor changes in weight loss, texture and hue angle were observed, but with handling at 4 °C, darkening was observed in seeds and internal tissue, which was associated with CI. Fruit handling at 25 °C showed increases of total soluble phenols and capsaicin, but these compounds remained unchanged at 4 and 8 °C when elicitors were not used. The application of methyl jasmonate (25 and 100 ppm) caused increment of soluble phenols, capsaicinoids and antioxidant activity of the fruits, although the salicylic acid did not show any effect on the variables analyzed, although none of the two elicitors showed a positive effect on the inhibition of the IC. Electrolyte leakage was lower in fruits stored at 8 and 25 °C, while in fruits at 4 °C there was significant softening at the surface, as well as presence of fungi in damaged fruits. Handling at 8 °C allowed the Serrano pepper fruits to be kept in optimal conditions during the 33 days of storage, while the use of methyl jasmonate increased the content of beneficial compounds for health.

Key words: *Capsicum annuum*, postharvest, refrigeration, Serrano chili pepper

Thesis of Doctorado en Ciencias Agroalimentarias, Programa de Posgrado en Ciencia y Tecnología Agroalimentaria, Universidad Autónoma Chapingo.

Author: Francisco Daniel Miranda Molina.

Thesis Director: Salvador Valle Guadarrama, Dr.

1 INTRODUCCIÓN GENERAL

El chile (*Capsicum* spp.) es uno de los cultivos más consumidos a nivel mundial y ello se debe principalmente al sabor característico que aporta a los alimentos. México es el segundo productor mundial de chile y el primer exportador de este fruto en el mundo, por lo cual este cultivo tiene una gran importancia económica para el país (FAOSTAT, 2019).

Aproximadamente se han reconocido 25 especies de este fruto; sin embargo, sólo cinco se han cultivado de manera más extensa y tienen un mayor valor económico: *C. annuum* L., *C. frutescens* L., *C. baccatum* L., *C. pubescens* Ruiz. & Pav., y *C. chinense* Jacq. (Perry et al., 2007). Estas especies han sido domesticadas en el continente americano (Pickersgill, 2007) y particularmente *C. annuum* es la de mayor importancia económica por la gran variedad frutos que produce.

Dentro de las principales diferencias, entre las variedades de *C. annuum* se encuentran el tamaño de los frutos, la forma, la textura, el grosor y el color de éstos. Además de estas diferencias, existe gran contraste en el contenido de compuestos con potencial nutracéutico, como lo son las vitaminas C y E, compuestos fenólicos, carotenoides y la capsaicina, esta última responsable de la pungencia de los frutos (Alvarez et al., 2011). Dentro de esta especie podemos encontrar frutos con bajo contenido de capsaicinoides como es el caso del pimiento, así como frutos con una alta presencia de estos compuestos, como es el caso del chile Serrano.

El contenido de este tipo de compuestos puede verse afectado por diversos factores como la variedad, la posición del fruto en la planta, el estado de madurez, las prácticas culturales, condiciones ambientales y manejo poscosecha (Naves et al., 2019).

La aplicación de bajas temperaturas en los vegetales reduce la velocidad de las reacciones metabólicas. Artés & Artés-Hernández (2003) mencionan que los frutos expuestos a bajas temperaturas sufren alteraciones en la respiración y la síntesis de etileno. Además, las bajas temperaturas interfieren en la producción de energía, retrasan la fluidez del protoplasma, aumentan la permeabilidad de la membrana, inactivan algunas enzimas, desacoplan la membrana y alteran la estructura celular (Wang, 1982). También se ha comprobado un aumento en la biosíntesis de ácido 1-aminociclopropano-1-carboxílico, ácido abscísico y putrescina en pimiento (Serrano et al., 1997).

El efecto de las bajas temperaturas no congelantes se manifiesta inmediatamente sobre la estructura y composición de las biomembranas vegetales, aumentando la micro viscosidad de la matriz lipídica y la rigidez de las membranas, que adquieren una estructura gel-cristalina, y se redistribuyen las proteínas integradas, que son expulsadas de las zonas lipídicas rígidas. Los cambios en la temperatura del medio afectan también al funcionamiento de las enzimas y de los transportadores incluidos en la matriz lipídica de las membranas y con esto a los intercambios a través de ella, lo que altera la permeabilidad y perturba las funciones celulares que, en los casos más graves, produce un trasvase de electrolitos y metabolitos entre los diversos compartimentos celulares y entre las células y el medio, llegando incluso a la ruptura de las membranas, necrosis y muerte (Lyons, 1973).

Estas enfermedades o desórdenes fisiológicos se denominan daños por frío (DPF) y suceden tras una cierta permanencia de los productos a temperaturas por debajo de la temperatura crítica de almacenamiento. Inicialmente se pensó que este fenómeno sucedía sólo en los productos de origen tropical, pero también los productos de clima templado desarrollan estos desórdenes fisiológicos. En el desarrollo de los DPF intervienen una serie de factores genéticos, fisiológicos y bioquímicos e incluso las labores del cultivo (Naves et al., 2019).

Los síntomas de DPF en los frutos de chile Serrano son: el ablandamiento de la superficie, el pardeamiento interno de las semillas y la fuga de electrolitos, los

cuales disminuyen de manera importante la calidad comercial de los frutos (Fung et al., 2004). Actualmente existen diferentes alternativas para controlar la aparición de los síntomas del DPF, las cuales se basan en aumentar la tolerancia de los productos o en retrasar el desarrollo de los síntomas (Wang, 1990). El uso de elicitores se ha convertido en un método eficaz para retrasar la aparición de los síntomas de DPF. El jasmonato de metilo (MeJa) y el ácido salicílico (ACS) son compuestos que se pueden encontrar de manera natural y su función consiste en regular los diferentes procesos biológicos de las plantas (Wang et al., 2015). En investigaciones recientes se han utilizado estos compuestos para prevenir la aparición de los síntomas de DPF en varios cultivos hortícolas como limón, níspero, tomate y pepino, mostrando un efecto positivo en el retraso de la aparición de los síntomas. (Cao et al., 2009; Siboya & Bertling, 2013; Wang et al., 2015; Zhang & Yang, 2015).

A la fecha, no existe información científica publicada acerca del efecto del almacenamiento a bajas temperaturas, en combinación con el uso de elicitores como MeJa y ACS, en frutos de chile Serrano y cómo estos compuestos pueden ayudar a prevenir los síntomas del DPF.

En este contexto, en este trabajo de investigación se presentan las siguientes hipótesis y objetivos:

Hipótesis

El almacenamiento a bajas temperaturas induce la presencia de síntomas de daño por frío en los frutos de chile Serrano.

La temperatura de 8 °C permite preservar por mayor tiempo la calidad comercial y nutrimental de los frutos de chile Serrano.

La aplicación de jasmonato de metilo y ácido salicílico retrasa la aparición de los síntomas de daño por frío en los frutos y ayuda a mejorar la síntesis de compuestos nutraceuticos.

Objetivos

Objetivo general

Evaluar los cambios físicos y químicos en frutos de chile Serrano cv. 'Camino Real' en poscosecha a distintas temperaturas de almacenamiento.

Objetivos específicos

- Evaluar el comportamiento de los frutos de chile Serrano en condiciones de refrigeración y tipificar el daño por frío en este producto.
- Determinar el contenido de compuestos nutraceuticos como capsaicina, compuestos fenólicos y capacidad antioxidante de frutos de chile Serrano y los cambios que sufren éstos durante el almacenamiento.
- Evaluar el uso de los elicitores jasmonato de metilo y acido salicílico como una forma de prevención de daño por frío y su efecto en la síntesis de compuestos nutraceuticos.

Para lograr lo anterior, esta investigación se desarrolló en dos etapas, descritas a partir del **Capítulo 3** de la presente tesis Doctoral.

En el **Capítulo 1** se desarrolló la introducción del trabajo, en ella se ubicó el contexto de la investigación y se presentaron los objetivos que se pretendía cumplir durante el desarrollo del trabajo.

En el **Capítulo 2** se hizo una revisión bibliográfica exhaustiva acerca del chile Serrano, se identificó de manera general la importancia de este cultivo en México, las formas de producción y de conservación, así como las principales causas de la pérdida de la calidad durante el periodo de poscosecha.

En el **Capítulo 3** se hizo una investigación del estado del arte de los chiles pungentes, con el fin de recopilar información de diversos aspectos, tales como: clasificación, beneficio de su consumo y los distintos usos de estas especies. Como resultado de esta revisión, se pudo observar el potencial que tienen

algunas especies que no han sido estudiadas a fondo y las posibles líneas de investigación que se pueden desarrollar en un futuro.

En el **Capítulo 4** se evaluó el efecto de la temperatura de almacenamiento sobre los cambios físicos y químicos que experimentan los frutos de chile Serrano. Se formaron tres grupos de 33 lotes cada uno con 250 g de frutos y se colocaron en cámaras frigoríficas de almacenamiento a 4 °C (± 2), 8 °C (± 2) y 25 °C (± 2). Se evaluaron los cambios cada 72 h durante 33 días. Se observó que el almacenamiento a 8 °C permitió el mantenimiento de los chiles Serranos en condiciones óptimas durante todo el periodo posterior a la cosecha, mientras que, el almacenamiento a 4 °C provocó síntomas de daño por frío en los frutos. Este capítulo fue publicado en International Food Research Journal (Miranda-Molina, et al., 2019). Debido a esto, el contenido es el mismo de la publicación y por ello se presenta en idioma inglés y con el formato de la revista.

En el **Capítulo 5** se evaluaron tres condiciones de almacenamiento de los frutos de chile Serrano, a bajas temperaturas en combinación con la aplicación de los elicitores jasmonato de metilo (MeJa) y ácido salicílico (AS), con el fin de determinar si estos compuestos disminuyen la incidencia de daños por frío en los frutos y sus efectos en la biosíntesis de compuestos benéficos para la salud. En precosecha, a los 15, 30 y 45 días después de la floración, se aplicaron diferentes concentraciones de jasmonato de metilo (25, 50 y 100 ppm) y ácido salicílico (50, 100 y 200 ppm), respectivamente, además de un testigo que no recibió ningún tratamiento. Posterior a la aplicación de los elicitores, se cosecharon los frutos de cada tratamiento y se formaron tres grupos de 61 lotes cada uno con 5 frutos y se colocaron en cámaras frigoríficas de almacenamiento a 4 °C (± 2), 8 °C (± 2) y 25 °C (± 2). Se evaluaron los cambios cada 155 h durante 30 d. De acuerdo con los resultados, el almacenamiento de los frutos de chile Serrano a 8 °C permitió su mantenimiento en condiciones óptimas durante todo el periodo posterior a la cosecha, mientras que a 4 °C los frutos presentaron síntomas de daño por frío, pero un incremento importante en el contenido de compuestos benéficos para la salud.

2 REVISIÓN DE LITERATURA

2.1 Origen y distribución del chile (*Capsicum annuum* L.)

Los chiles son una de las primeras plantas domesticadas en América. El chile (nombre derivado del idioma náhuatl), es miembro del género *Capsicum*, cultivado inicialmente en las Américas y, luego del contacto europeo, en todo el mundo. Los exploradores españoles descubrieron este cultivo en Sudamérica, América Central e islas del Caribe. A partir de ahí, se trasplantó a Europa, donde las variedades menos picantes prosperaron en el clima más frío (Attokaran, 2017a).

El chile es probablemente un cultivo nativo de México desde donde se extendió al resto de América Latina (Figura 1). La evidencia arqueológica indica que en México los humanos han estado usando los chiles silvestres como fuente de alimento posiblemente desde 8000 a. C., no sólo como condimentos ocasionales, sino también como parte de una dieta compleja y sofisticada (Araceli et al., 2009). La evidencia más antigua de chiles domesticados se encontró en una cueva en el Valle de Tehuacán (centro-sur de México), aproximadamente 5000–6000 a. C. (Pickersgill, 2011). El uso de esta especia picante en México se registra ya en 7000 a. C. Hay evidencia histórica de que los aztecas usaban esta especia. Una investigación reciente que combina el modelo de distribución de especies y la paleobiolingüística documenta claramente que la domesticación se produjo en el norte o centro-este de México (Kraft et al., 2014).

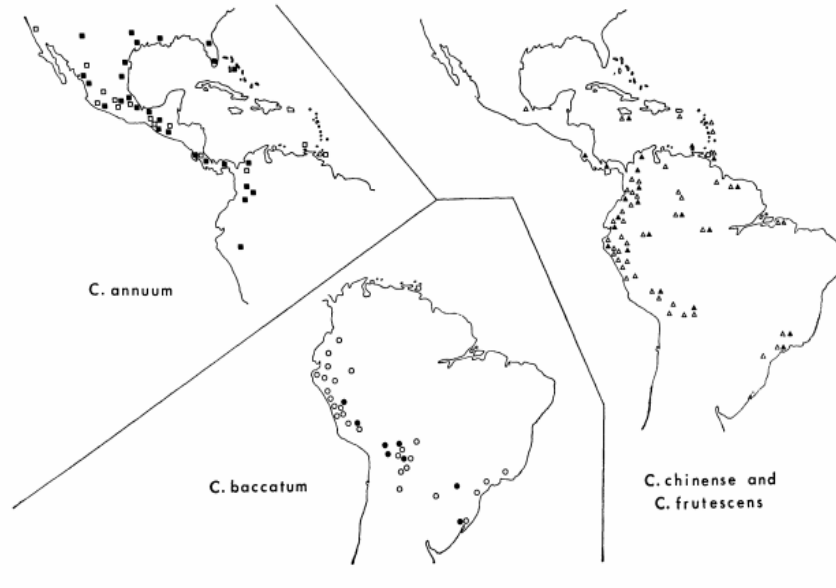


Figura 1. Distribución de *Capsicum annum*, *C. baccatum*, *C. chinense*, y *C. frutescens*. Fuente (Pickersgill, 1971).

De las aproximadamente 25 especies de chile reconocidas a nivel mundial, las cinco más notables económicamente son *C. annum*, *C. frutescens* L., *C. baccatum* L., *C. pubescens* Ruiz. & Pav., y *C. chinense* Jacq. (Perry et al., 2007). Se cree que estas especies de chiles han sido domesticadas independientemente en al menos dos regiones del Nuevo Mundo: en Mesoamérica (*C. annum* y *C. frutescens*) y en América del Sur (*C. baccatum*, *C. pubescens* y *C. chinense*) (Pickersgill, 2007).

2.2 Taxonomía del chile

El chile es una planta de comportamiento anual y perenne, tiene tallos erectos, herbáceos y ramificados de color verde oscuro, el sistema de raíces llega a profundidades de 0.70 a 1.20 m, y lateralmente hasta 1.20 m, la altura promedio de la planta es de 60 cm, las hojas son planas, simples y de forma ovoide alargada, las flores son perfectas (hermafroditas), formándose en las axilas de las ramas; son de color blanco y a veces púrpura (Pickersgill, 1971).

Los frutos de chile pertenecen al género *Capsicum*, de la familia de las solanáceas (Cuadro 1). Existen diferentes variedades cultivadas de la especie *C. annuum* las cuales pertenecen a varias subespecies o variedades botánicas, todas ellas destacando por su conocido picor (Pickersgill, 1971).

Capsicum sp. está dotado de una multitud de formas, colores y tamaños de frutas. Los frutos inmaduros son verdes, amarillos, blancos o morados, en tanto que los frutos maduros pueden ser rojos, anaranjados, marrones, amarillos, verdes o blancos, con tonos intermedios. Sus formas pueden ser redondas, cónicas, alargadas, achatadas o acampanadas (Pickersgill, 1971). Botánicamente hablando, las vainas son bayas, pero los horticultores las llaman frutas. Cuando se cosecha en la etapa verde, las vainas se consideran vegetales; mientras que al ser cosechados en los colores maduros secos se convierten en una especia.

Cuadro 1. Clasificación taxonómica del chile Serrano (*C. annuum* L.).

Reino	<i>Plantae</i>
Sub Reino	<i>Tracheobionta</i>
Superdivisión	<i>Spermatophyta</i>
División	<i>Magnoliophyta</i>
Clase	<i>Magnoliopsida</i>
Subclase	<i>Asteridae</i>
Orden	<i>Solanales</i>
Familia	<i>Solanaceae</i>
Genero	<i>Capsicum</i>
Especie	<i>C. annuum</i> L

Pickersgill, (1971).

2.3 El cultivo del chile

El chile se desarrolla bien en diferentes tipos de suelo, desde los ligeros hasta los pesados. Los óptimos son los franco-arenosos, con buena aireación, excelente drenaje y alta retención de humedad. La planta presenta mediana tolerancia a la salinidad, no obstante, es aconsejable buscar terrenos sin problemas de sal y con un mínimo de 70 cm de profundidad para favorecer el establecimiento del sistema radicular. Para lograr buenos resultados en la germinación, establecimiento del cultivo y rendimiento, se debe tener una cama

de siembra mullida y suelta de unos 30 cm de profundidad aproximadamente. Es conveniente que la superficie del terreno esté libre de terrones y piedras que pueden obstaculizar la emergencia y/o el crecimiento de las plántulas (Avila et al., 2010).

2.4 Chiles picantes

En México, los tipos de chile más sembrados son los Serranos, de árbol, jalapeños, guajillos pasilla, anchos, piquines, habanero y manzano todos ellos considerados como chiles picantes. Sin embargo, se desconoce la distribución geográfica precisa y no se ha estudiado la diversidad genética de un conjunto de chiles nativos (Morán-Bañuelos et al., 2008).

En 1912, el químico Wilbur Scoville desarrolló la escala Scoville que mide el grado de picor de un chile. Scoville asignó un valor de cero a los pimientos dulces, que no pican y en el otro extremo de la escala ubicó a la capsaicina a la que le dio un valor de dieciséis millones como la sustancia más picante (Figura 2).

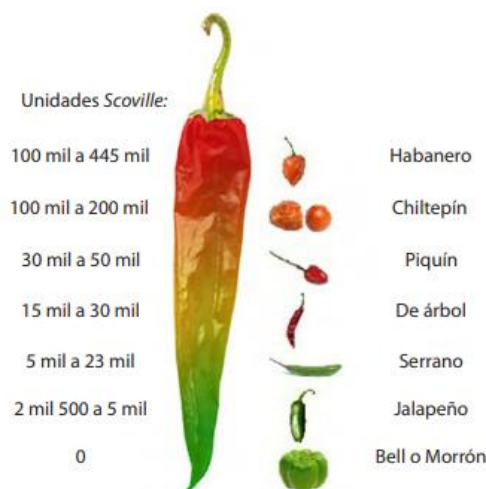


Figura 2. Clasificación de chiles de acuerdo con la escala Scoville. Fuente: SIAP, (2019).

2.5 Panorama mundial y nacional de la producción de chile

Debido a la gran popularidad que tiene la comida mexicana, el chile ha empezado a ser comercializado en gran parte del mundo, esto se debe principalmente a la gran variedad de productos en los que se puede ofrecer este fruto como las salsas y las conservas, las cuales han comenzado a llegar a los mercados internacionales más exigentes como el norteamericano, el europeo y el asiático (FAOSTAT, 2019).

En 2017 la producción mundial de chile fue de 30 millones de toneladas (FAOSTAT, 2019), siendo el principal país productor China, seguido de México y Turquía (Cuadro 2).

Cuadro 2. Principales países productores de chile verde, expresado en toneladas.

Países	2013	2014	2015	2016	2017
China	15,826,586	16,137,063	17,025,109	17,421,382	17,821,238
México	2,294,400	2,382,989	2,389,829	2,737,028	3,296,875
Turquía	2,159,348	2,127,944	2,191,888	2,457,822	2,608,172
Indonesia	1,733,215	1,882,106	1,915,016	1,961,598	2,359,441
España	999,600	1,130,340	1,102,522	1,175,635	1,277,908

Fuente: FAOSTAT (2019).

El consumo de chile ha tenido un aumento importante en el mundo. Las exportaciones a nivel mundial al igual que la producción van en aumento debido a la fuerte demanda de mercados como el norteamericano y el Europeo, estos mercados son el destino final de la mayoría de las exportaciones, siendo México el principal exportador a nivel mundial, con una participación de 949,662 toneladas en el 2016 (Cuadro 3) (FAOSTAT, 2019).

Cuadro 3. Principales países exportadores de chile verde, producción expresada en toneladas.

Países	2012	2013	2014	2015	2016
México	767,860	793,501	818,040	856,890	949,662
España	531,448	583,827	893,590	698,183	734,088
Holanda	462,554	407,823	407,329	410,583	396,061
Canadá	107,518	115,605	124,332	126,106	152,703
E.U.A.	109,373	118,605	116,366	110,563	116,514

Fuente: FAOSTAT (2019)

En México los principales estados productores de chile a nivel nacional son Chihuahua, Sinaloa y Zacatecas, que juntos suman más del 50% de la producción nacional (SIAP, 2019).

2.6 El chile Serrano

Este tipo de vaina probablemente se originó en las montañas del norte de Puebla e Hidalgo, México; Serrano significa "de la montaña o la montaña". La planta varía en hábitos de compacta a erecta, con un número intermedio de tallos, y crece de 45 cm a 1.5 m de altura. Las hojas varían de verde claro a oscuro y miden de 5 a 10 cm de largo y de 3 a 5 cm de ancho. Las vainas son cilíndricas, colgantes y puntiagudas, miden entre 5 y 15 cm de largo y de 1 a 2 cm de ancho, con hasta cincuenta vainas creciendo en una sola planta. El color de las vainas varía de verde claro a verde oscuro en estado inmaduro que se tornan color rojo al madurar. El fruto en algunas variedades de chile Serrano se hace curvo cuando se acerca a la madurez (SIAP, 2019). El nivel de picor del chile Serrano es más alto que el chile jalapeño, con Serranos que miden entre 10,000 y 20,000 SHU (De Witt & Bosland, 2009).

La época de siembra del chile Serrano depende de los riesgos de daños por heladas tardías o por sequías (dependiendo de la zona donde se pretende cultivar) del rendimiento y calidad del fruto óptimos, así como de la época en que se desea cosechar el producto. La siembra de chile Serrano se puede realizar en tres épocas: Siembra temprana, siembra intermedia y siembra tardía. La siembra temprana generalmente comprende la siembra en el mes de febrero, debido a

que la temporada fuerte de heladas está por terminar, aunque el riesgo que se corre aún es alto; se puede tener una cosecha anticipada y por lo tanto se logra un mejor precio del mercado (Enrique et al., 2010).

La siembra inmediata también se puede dar en los primeros 15 días de marzo, ya que es en este momento que las heladas fuertes han casi terminado y las probabilidades de una son demasiado bajas. Es la época preferida para la siembra, aunque no se garantiza una buena posición en el mercado al momento de la cosecha, dado que la gran mayoría de los productores realizan la siembra en estas fechas. La siembra tardía puede ser desde los últimos 15 días de marzo hasta el final del mes de mayo, aunque se puede retrasar aún más la fecha de siembra. Su limitante más grande es la temporada de lluvias; sin embargo, se puede tener éxito si se cuenta con sistema riego y se realiza un buen manejo del cultivo durante todo el ciclo (Enrique et al., 2010).

Los mejores meses para sembrar son abril y mayo, ya que cuando la planta es muy pequeña no se corre el riesgo de ahogamiento por exceso de humedad provocado por las lluvias, y dado que la planta se encuentra en plena etapa de crecimiento en los meses de junio y julio se puede aprovechar que ha iniciado la temporada de lluvias para ahorrar costos de riego (Enrique et al., 2010).

Para la mayoría de los cultivos de chile Serrano se recurre a la producción de plántulas bajo invernadero para su posterior trasplante. Las plántulas se producen en charolas bajo condiciones de invernadero o malla sombra; se utilizan preferentemente charolas de 200 cavidades, las cuales se llenan con un material estéril como sustrato. Después de llenar las charolas, se hacen los hoyos para la siembra y se depositan una a dos semillas por cavidad y se cubre con el propio material para facilitar la emergencia de las plántulas; se cubren con plástico para mantener la humedad, elevar la temperatura y acelerar la germinación. El trasplante se realiza cuando las plántulas alcanzan una altura de 15 a 20 cm en los módulos de germinación, aproximadamente a 60 días después de la siembra, las plantas alcanzarán el tamaño apropiado para ser trasplantadas. Se realiza colocando de tres a cuatro plantas por metro en dos

hileras ubicadas a ambos lados de la cintilla y a unos 25-30 cm una de otra. Los mejores rendimientos se obtienen con una población de 36 a 43 mil plantas por hectárea (Enrique et al., 2010). Existen diferentes variedades de chile Serrano de acuerdo con las características deseadas de los frutos, el rendimiento, las ventajas de manejo y la zona donde se pretende llevar acabo el cultivo.

2.6.1 Variables de calidad del fruto de chile Serrano

Los consumidores comienzan a demandar hortalizas de mayor calidad y a precios razonables. Dentro del concepto de calidad, se incluye la presentación del producto, la calidad gustativa, las formas, los colores, la ausencia de residuos de pesticidas y la producción sustentable (Abbott, 1999).

Las variables de calidad para el chile Serrano son peso (g), diámetro (cm), longitud (cm), firmeza, porcentaje de llenado de placenta, grosor de pericarpio (mm), el color del epicarpio y el porcentaje de pérdida fisiológica de peso (Vázquez et al., 2010). Por lo que es necesario considerar estas variables para determinar si algún método de conservación logra mantener la calidad de los frutos.

2.6.2 Contenido nutrimental y nutracéutico del chile Serrano

Los frutos de chile son reconocidos por aportar a la dieta humana vitaminas como la A, C y E, y ser fuente de compuestos fenólicos y capsaicina et al., 2019) (Cuadro 4). Estos compuestos son sintetizados durante el periodo de desarrollo y maduración de los frutos. Además de sus propiedades nutrimentales, el chile está considerado como alimento nutracéutico, y dentro de esta categoría entra cualquier alimento o ingrediente de los alimentos que ejerce una acción benéfica en la salud y en la prevención de enfermedades en el ser humano (Birute et al., 2009).

Cuadro 4. Contenido nutrimental del chile Serrano en 100 g de fruto fresco.

Nutrimento	Cantidad	Nutrimento	Cantidad
Agua	91%	Azufre	17 mg
Carbohidratos	5.1 g	Calcio	9 mg
Proteínas	1.3 g	Cloro	37 mg
Grasas	0.3 g	Cobre	0.10 mg
Fibra	1.4 g	Fósforo	23 mg
Vitamina A	1000 UI	Hierro	0.5 mg
Vitamina B1	0.03 mg	Magnesio	11 mg
Vitamina B2	0.05 mg	Manganeso	0.26 mg
Vitamina B5	0.20 mg	Potasio	234 mg
Vitamina B12	0.45 mg	Sodio	58 mg
Vitamina C	120 mg	Yodo	0.001 mg

Fuente: SIAP (2019).

A los compuestos nutraceuticos de chile se les han atribuido una actividad biológica antioxidante, efectos terapéuticos en el tratamiento de úlceras gástricas y artritis reumatoide; además de que su consumo regular, reduce el riesgo de enfermedades cardiovasculares y algunos tipos de cáncer (Kim et al., 2011; Vera et al., 2011). El contenido de estos metabolitos considerados como secundarios en las plantas es dependiente del genotipo, de las condiciones ambientales y de la nutrición (Naves et al., 2019).

2.7 Capsaicinoides

El consumo del chile se debe principalmente a su sabor picante, causado por la presencia de capsaicinoides (CAP's), un grupo de amidas ácidas derivadas de la vainillilamina, que se sintetizan y acumulan en el tejido de la placenta. Las diferentes especies de *Capsicum* pueden variar en grado de picor, lo que se relaciona con su capacidad de acumular CAP's. (Vázquez et al., 2007). El chile habanero (*C. chinense*) es considerado el de mayor picor; sin embargo, algunas variedades de *C. annuum* pueden alcanzar niveles similares, en función de las condiciones en que se cultiven (Cázares et al., 2005). Debido a su localización

en el tejido de la placenta, se supone que los CAP's tienen un papel en la protección química de las semillas (Vázquez et al., 2007). No obstante, las aves son insensibles a los CAP's, lo que ha permitido la dispersión de las semillas silvestres (Tewksbury et al., 2006).

Se conocen más de 20 diferentes CAP's cuya estructura química consiste en un núcleo fenólico unido mediante un enlace amida a un ácido graso (Figura 3). La porción fenólica es la vainillilamina, que se forma a partir de la fenilalanina por medio de la ruta de los fenilpropanoides. El ácido graso se forma a partir de aminoácidos de cadena lateral ramificada, ya sea valina o leucina. Las diferencias estructurales de los diversos CAP's residen precisamente en la naturaleza de la cadena lateral, que puede ser de 9 u 11 carbonos de largo, con un número variable de enlaces dobles colocados en diferentes posiciones (Vázquez et al., 2007).

2.8 Almacenamiento a bajas temperaturas y daño por frío

La susceptibilidad al daño por temperaturas extremas varía no sólo con la especie y el cultivo, sino también con la ubicación geográfica y la estación, las prácticas culturales, el momento de la cosecha durante el día y otros factores. Las plantas tropicales y subtropicales exhiben una marcada disfunción fisiológica cuando se exponen a temperaturas bajas o sin congelación por debajo de los 10° a 12 °C. Esta disfunción se conoce como DPF. Los síntomas de la lesión por frío varían con el tejido de la planta y la gravedad del daño. Los síntomas más evidentes de preocupación general son picaduras en la superficie, áreas necróticas y decoloración externa (Lyons, 1973).

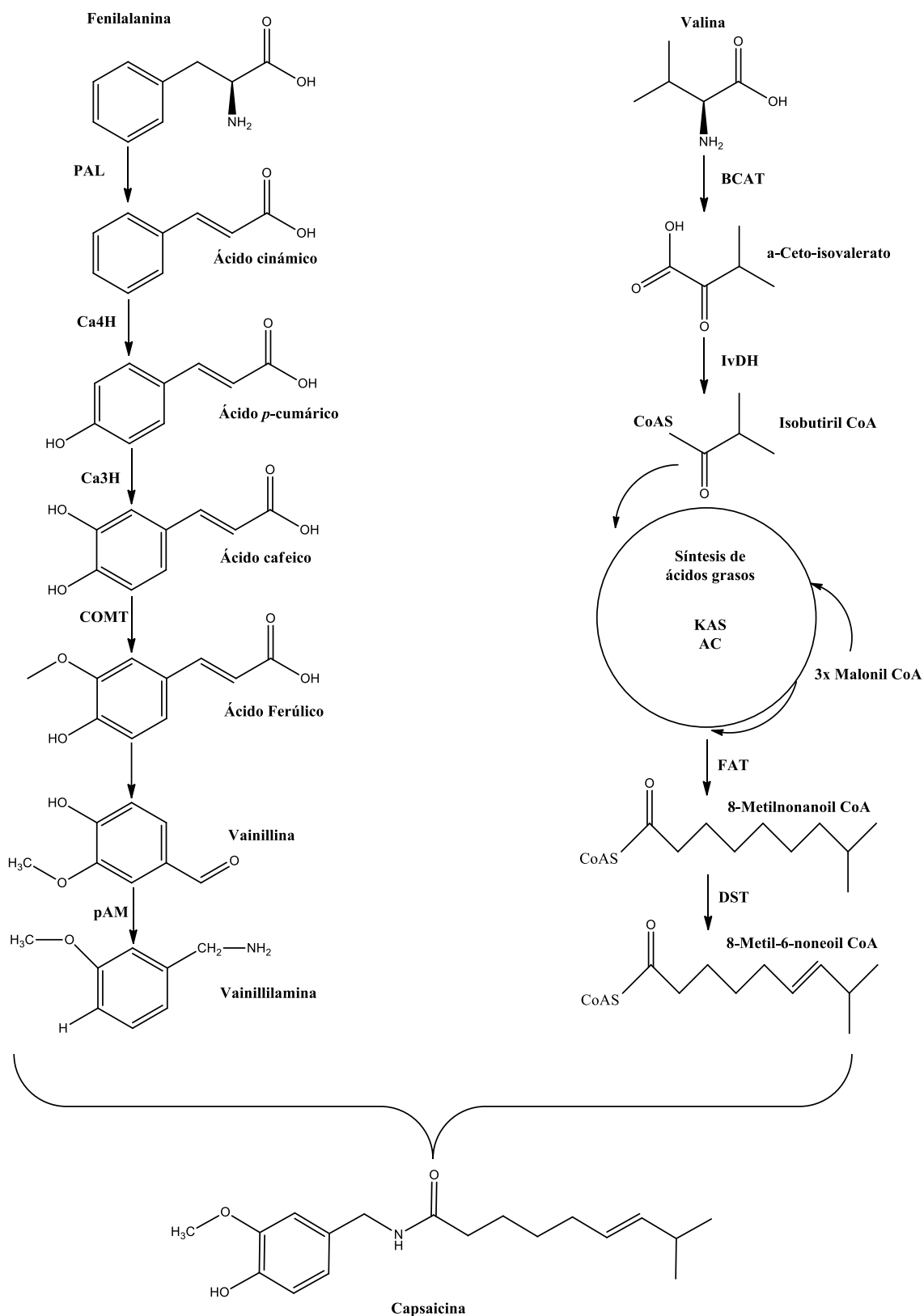


Figura 3. Ruta propuesta para la biosíntesis de los capsaicinoides en el género *Capsicum*. Fuente: Vázquez et al. (2007).

Los pimientos son susceptibles al DPF durante el almacenamiento a temperaturas de 7 °C e inferiores (Handerburg, Watada, & Wang, 1988). El desarrollo de los síntomas del DPF es un problema durante el almacenamiento poscosecha de pimientos y muchos otros cultivos hortícolas. La sintomatología del DPF en frutos de pimiento se caracteriza por una maduración anormal y desuniforme, pérdida de agua, depresiones superficiales laminares y circulares, pardeamiento de semilla, desarrollo de patógenos, aumento de producción de CO₂ y etileno al trasladarla a temperatura ambiente, mayor susceptibilidad a enfermedades y mayor permeabilidad de membranas celulares provocando salida de iones, siendo el daño progresivamente más severo durante el almacenamiento por largos periodos a bajas temperaturas (Li, Hall, & Saltveit Jnr, 1993; Lurie, Ronen, & Aloni, 2019).

Anterior a la manifestación de los síntomas de DPF en los frutos, como respuesta a la exposición a las bajas temperaturas, la permeabilidad de las membranas celulares aumenta y se observan alteraciones en la velocidad de respiración y producción de etileno, acumulación de sustancias tóxicas, cambios en la estructura celular y en la síntesis y activación de enzimas; estas respuestas primarias del tejido susceptible propician la aparición de los síntomas característicos del DPF (Lyons, 1973).

El efecto dañino del enfriamiento a menudo se revela en la destrucción de los sistemas de membrana de las células, lo que lleva a la pérdida de la compartimentación celular. Los cambios en el estado de las membranas pueden conducir a reacciones secundarias o irreversibles, dependiendo de la temperatura, la duración de la exposición y la sensibilidad de la especie (Lyons, 1973).

Después de un enfriamiento prolongado, estos cambios causan la pérdida de la integridad de la membrana y la compartimentación, la fuga de solutos, la disminución de la actividad oxidativa de las mitocondrias, el aumento de la energía de activación de las enzimas unidas a la membrana causará una

interrupción y desequilibrio del metabolismo, la acumulación de sustancias tóxicas y los síntomas de DPF (Lyons, 1973).

Un cambio en la fase (líquido-cristalino a gel) (Figura 4) o la fluidez de una membrana afecta tanto la permeabilidad al agua y la actividad de las enzimas incrustadas en la bicapa lipídica. El aumento de la permeabilidad, se manifiesta como una mayor tasa de fuga de electrolitos, en frutas sensibles al enfriamiento (Yi Wang, 1994). Lyons (1973) propuso originalmente que la permeabilidad de la membrana aumentaría a temperaturas de enfriamiento, pero el aumento en la fuga de electrolitos, sólo se observa después de varios días de enfriamiento para la mayoría de los cultivos de vegetales. Los cambios en la permeabilidad darían como resultado cambios en los niveles citosólicos de calcio, ya que la concentración de calcio en la pared celular y la vacuola es mayor que en el citosol.

Se ha observado una estimulación inicial en la producción de etileno en varios tejidos vegetales después del almacenamiento en frío, este aumento en la biosíntesis de etileno fue asociado con un aumento en la síntesis de ácido 1-aminociclopropano-l-carboxílico (ACC), el precursor metabólico del etileno y la actividad de la síntesis de ACC después del almacenamiento en frío (Chien, Wang & Adams, 1980). Asimismo, parecía haber una estimulación en la producción de ARNm que codifica una nueva proteína durante el almacenamiento en frío, pero el proceso de traducción no se completó hasta la transferencia a temperaturas más cálidas. Después del aumento inicial de etileno, la producción se detuvo incluso en presencia de altos niveles endógenos de ACC por lo que las temperaturas frías parecían dañar el paso de conversión entre ACC y etileno. (Chien, Wang & Adams, 1980). Este proceso ayuda a explicar el hecho de que muchas frutas no maduren normalmente después de ser almacenadas en frío durante largos periodos de tiempo.

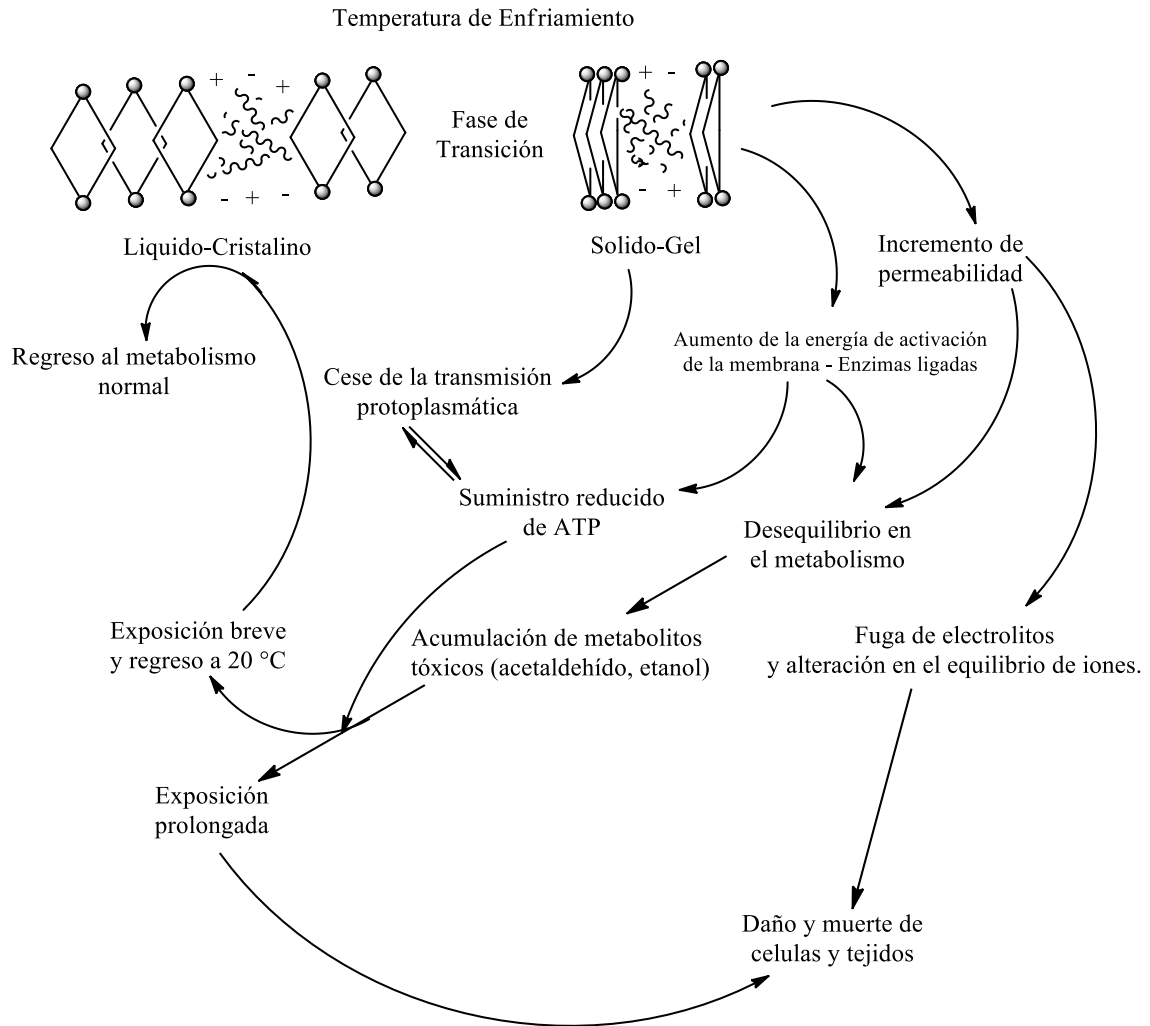


Figura 4. Vía esquemática de los eventos que conducen a lesiones por frío en tejidos vegetales sensibles. Fuente: Vázquez et al.(2007).

Lyons (1973) sugirió una teoría conocida como “teoría membranaria”, la cual señala que las modificaciones de los lípidos membranares constituyen el evento primario de los desórdenes debidos al frío. En efecto el frío provoca modificaciones de la organización molecular y estructural de la matriz lipídica de las membranas. Al principio se pensó que el efecto inmediato de las bajas temperaturas era un aumento global de la microviscosidad de la matriz. Por debajo de una temperatura crítica denominada “temperatura de transición”, este fenómeno induce una organización de los lípidos membranares en estructura rígida, denominada sólido-gel. Cuando la duración de esta perturbación por el frío ha sido lo suficientemente prolongada, provoca una gran extensión de zonas

rígidas en las membranas, lo que conduce a rupturas, pérdidas de elasticidad, agua, iones y metabolitos.

2.9 Enzimas relacionadas al daño por frío

El estrés oxidativo se produce cuando la generación de especies activas de oxígeno sobrepasa a la capacidad del vegetal para mantener la homeostasis del potencial redox, o simplemente, cuando la producción de especies reactivas de oxígeno sobrepasa la capacidad de la planta para capturarlas (Toivonen, 2004). Es importante señalar que el fenómeno del estrés oxidativo puede detectarse, tanto en frutas como en hortalizas de forma directa, como la acumulación de especies reactivas de oxígeno (ERO), aumento de la peroxidación lipídica, aumento de la permeabilidad de la membrana o acumulación de pigmentos marrón por pardeamiento enzimático, indirecta como cambios en los niveles de componentes de actividad antioxidante o en los sistemas enzimáticos antioxidantes (Toivonen, 2004).

Los organismos poseen una serie de mecanismos de defensa con carácter antioxidante cuya misión es la de combatir las alteraciones oxidativas, intentando minimizar de esta manera las alteraciones y lesiones celulares. Estos mecanismos actúan con el objetivo de mantener el equilibrio pro-oxidante/antioxidante desplazado a favor de estos últimos. El termino antioxidante puede definirse como cualquier sustancia que, estando presente a una concentración más baja comparada con el sustrato oxidable, inhibe o retrasa de un modo significativo la oxidación de dicho sustrato (Halliwell, 1989).

Los antioxidantes impiden que otras moléculas se unan al oxígeno, debido a que estos reaccionan o interactúan más rápidamente con las ERO que el resto de las moléculas presentes, en un determinado ambiente: membrana plasmática (vitamina E, carotenoides), citosol (super oxido dismutasa (SOD), catalasa (CAT), peroxidasa (PX), vitamina C), núcleo o líquido extracelular (vitaminas E y C). La acción del antioxidante es en sacrificio de su propia integridad para evitar

alteraciones en otras moléculas funcionalmente vitales: lípidos, proteínas, ADN, entre otros (Reiter, 1995).

Uno de los mecanismos de defensa antioxidante es el sistema de defensa enzimático, el cual está constituido principalmente por enzimas antioxidantes que actúan convirtiendo las ERO en otras especies más estables. Sus actividades están estrechamente relacionadas y requieren la presencia de otras enzimas y sustratos para su correcto funcionamiento (Mittler, 2002). Los mecanismos enzimáticos incluyen a las enzimas superóxido dismutasa (SOD), ascorbato peroxidasa (AP), glutatión peroxidasa (GP) y catalasa (CAT). SOD actúa como la primera línea de defensa en contra de las ERO transformando el $O^{\cdot -}$ en H_2O_2 . Las enzimas AP, GP y CAT subsecuentemente lo detoxifican reduciéndolo a H_2O . A diferencia de la mayoría de los organismos, las plantas tienen múltiples genes que codifican para SOD y AP, las cuales están específicamente localizadas en los cloroplastos, la mitocondria, peroxisomas, citosol y apoplasto (Asada, 2006).

La extensión del estrés oxidativo en una célula está determinada por la cantidad de superóxido, H_2O_2 y radicales hidroxilo. Por lo tanto, el balance de las actividades de SOD, AP y CAT es crucial para suprimir los niveles tóxicos de las ERO en la célula. Si cambia el balance de estas enzimas se inducen mecanismos compensatorios que involucran a otras enzimas, por ejemplo, cuando se reduce la actividad de CAT otras enzimas como ascorbato peroxidasa (AP) y glutatión peroxidasa (GP) son inducidas.

Por ejemplo, en un proceso habitual en la célula, la superóxido dismutasa (SOD) elimina el radical anión superóxido ($O_2^{\cdot-}$) transformándolo en peróxido de hidrógeno, el cual será eliminado posteriormente por acción de la CAT o la GP. La CAT es la encargada de completar el proceso de eliminación del $O_2^{\cdot-}$, catalizando la descomposición del peróxido de hidrógeno en agua y oxígeno (Mittler, 2002).

La GP es una metaloenzima que tiene como función principal la eliminación del H_2O_2 , y para desempeñar su función, requiere la presencia de glutatión reducido (GSH), un tripéptido de glutamato, cisteína y glicina, con un grupo sulfidhirilo ($-SH$). El glutatión reducido es utilizado como donador de un átomo de hidrógeno (electrón) y el radical que se forma se estabiliza reaccionando con otro radical formando disulfuro de glutatión o glutatión oxidado (GSSG). La reducción del GSSG por acción de la enzima glutatión reductasa (GR) regenera el GSH. En esta reducción se invierte una molécula de NADPH, que se regenera por la acción de la glucosa-6-fosfato deshidrogenasa de la vía de la pentosa fosfato (Mittler, 2002).

2.10 Literatura citada

- Abbott, J. A. (1999). Quality measurement of fruits and vegetables. *Postharvest Biology and Technology*, 15(3), 207–225. [https://doi.org/10.1016/S0925-5214\(98\)00086-6](https://doi.org/10.1016/S0925-5214(98)00086-6)
- Abdel-Salam, O. M. E. (2016). Preference for hot pepper: A complex interplay of personal, cultural, and pharmacological effects. *Temperature*, 3(1), 39–40. <https://doi.org/10.1080/23328940.2015.1111289>
- Al-snafi, A. E. (2015). The Pharmacological Importance of *Capsicum* Species (*Capsicum annuum* and *Capsicum frutescens*) Grown in Iraq. *Journal of Pharmaceutical Biology*, 5(3), 124–142.
- Alonso, R. A., Ponce, P., Quiroga, R., Rosales, M. A., Zuart, J. L., Moya, C., & Cabrera, A. (2008). Evaluación In Situ de la variabilidad genética de los chiles silvestres (*Capsicum* spp.) en la región Frailesca del estado de Chiapas, México. *Cultivos Tropicales*, 29(2), 49–55. Retrieved from http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0258-59362008000200008&lng=es&nrm=iso&tlng=es
- Alvarez-Parrilla, E., De, L. A., Rosa, L. A., Amarowicz, R., & Shahidi, F. (2011).

- Antioxidant Activity of Fresh and Processed Jalapeño and Serrano Peppers. *J. Agric. Food Chem*, 59, 163. <https://doi.org/10.1021/jf103434u>
- Antonio, A. S., Wiedemann, L. S. M., & Veiga Junior, V. F. (2018). The genus: *Capsicum*: a phytochemical review of bioactive secondary metabolites. *RSC Advances*, Vol. 8, pp. 25767–25784. <https://doi.org/10.1039/c8ra02067a>
- Antonious, G. F., Lobel, L., Kochhar, T., Berke, T., & Jarret, R. L. (2009). Antioxidants in *Capsicum chinense*: Variation among countries of origin. *Journal of Environmental Science and Health - Part B Pesticides, Food Contaminants, and Agricultural Wastes*, 44(6), 621–626. <https://doi.org/10.1080/03601230903000727>
- Araceli, A. M., Morrell, P. L., Roose, M. L., & Kim, S. C. (2009). Genetic diversity and structure in semiwild and domesticated chiles (*Capsicum annuum* ; Solanaceae) from Mexico. *American Journal of Botany*, 96(6), 1190–1202. <https://doi.org/10.3732/ajb.0800155>
- Asada, K. (2006). Production and scavenging of reactive oxygen species in chloroplasts and their functions. *Plant Physiology*, Vol. 141, pp. 391–396. <https://doi.org/10.1104/pp.106.082040>
- Attokaran, M. (2017a). Natural Food Flavors and Colorants. In *Natural Food Flavors and Colorants*. <https://doi.org/10.1002/9781119114796>
- Attokaran, M. (2017b). *Natural Food Flavors and Colorants*. <https://doi.org/10.1002/9781119114796>
- Avila, J., Luis, V., Rodríguez, A., Bosque, D., Maldonado, N., Rafael, M., & Altamirano, G. (n.d.). *25 Aniversario Ciencia y Tecnología para el Campo Mexicano*.
- Bosland, P. W., & DeWitt, D. (2009). *The Complete Chile Pepper Book: A Gardener's Guide to Choosing, Growing, Preserving, and Cooking* (p. 336). p. 336. Retrieved from <https://books.google.com/books?hl=en&lr=&id=90M5Tw0530gC&pgis=1>
- Cantwell, M. (1998). Bell peppers.
- Cao, S., Zheng, Y., Wang, K., Jin, P., & Rui, H. (2009). Methyl jasmonate reduces chilling injury and enhances antioxidant enzyme activity in postharvest loquat fruit. *Food Chemistry*, 115(4), 1458–1463. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2009.01.082>
- Cázares Sánchez, M., Ramírez Vallejo, E., Castillo González, P., Soto Hernández, F., Marcos, R., González, R., ... Luis, J. (n.d.). *Colegio de Postgraduados*. Retrieved from <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=30239606>
- Ciju, R. (2019). *Chile peppers*. Retrieved from <https://books.google.es/books?hl=es&lr=&id=KVKZDwAAQBAJ&oi=fnd&pg=PT2&dq=Chile+Peppers+->

+Roby+Jose+Ciju&ots=RAf4iDa3Zo&sig=1LDmBlVtJnEN3vwlcLjSFbayyf
Y

- DeWitt, D., & Bosland, P. W. (2009). *The complete chile pepper book: a gardener's guide to choosing, growing, preserving, and cooking*. Timber Press.
- do Rêgo, E. R., do Rêgo, M. M., Finger, F. L., Cruz, C. D., & Casali, V. W. D. (2009). A diallel study of yield components and fruit quality in chilli pepper (*Capsicum baccatum*). *Euphytica*, 168(2), 275–287. <https://doi.org/10.1007/s10681-009-9947-y>
- Enrique, V., Horacio, M., Juan, P., & Moises, R. (2010). *Fertirrigación de chile Serrano con riego por goteo en el sur de Tamaulipas*. Retrieved from <http://biblioteca.inifap.gob.mx:8080/jspui/handle/123456789/2718>
- FAOSTAT. (n.d.). Retrieved October 16, 2019, from <http://www.fao.org/faostat/es/#home>
- Fung, R. W. M., Wang, C. Y., Smith, D. L., Gross, K. C., & Tian, M. (2004). MeSA and MeJA increase steady-state transcript levels of alternative oxidase and resistance against chilling injury in sweet peppers (*Capsicum annuum* L.). *Plant Science*, 166(3), 711–719. <https://doi.org/10.1016/j.plantsci.2003.11.009>
- García-Galindo, H., Ortega-Martínez, J., García-Rosales, M., Martínez, C., & Beristáin, C. (1995). La capsicina, el principio pungente del chile; su naturaleza, absorción, metabolismo y efectos farmacológicos. *Ciencia*, 46, 84–102.
- Halliwell, B. (1989). Current status review: Free radicals, reactive oxygen species and human disease: A critical evaluation with special reference to atherosclerosis. *British Journal of Experimental Pathology*, Vol. 70, pp. 737–757.
- Handerburg, R. E., Watada, A. E., & Wang, C. Y. (1988). Commercial storage of fruits and vegetables and florists and nurseries stocks. *Investigación y Desarrollo (IICA)*. Retrieved from <http://agris.fao.org/agris-search/search.do?recordID=XL2012004833#.XafWw8Ru4ek.mendeley>
- Khovidhunkit, W., & Wittayalertpanya, S. (2009). Pharmacokinetic and The Effect of Capsaicin in *Capsicum frutescens* on Decreasing Plasma Glucose Level. In *Article in Journal of the Medical Association of Thailand = Chotmai het thangphaet*. Retrieved from <https://www.researchgate.net/publication/24176349>
- Kim, J.-S., Ahn, J., Lee, S.-J., Moon, B., Ha, T.-Y., & Kim, S. (2011). Phytochemicals and antioxidant activity of fruits and leaves of paprika (*Capsicum annuum* L., var. special) cultivated in Korea. *Journal of Food Science*, 76(2), C193–8. <https://doi.org/10.1111/j.1750-3841.2010.01891.x>
- Kraft, K. H., Brown, C. H., Nabhan, G. P., Luedeling, E., De Jesús, J., Ruiz, L., ... Gepts, P. (n.d.). *Multiple lines of evidence for the origin of domesticated*

chili pepper, *Capsicum annuum*, in Mexico.
<https://doi.org/10.1073/pnas.1308933111>

- Kraft, K. H., Brown, C. H., Nabhan, G. P., Luedeling, E., De Jesús Luna Ruiz, J., D'Eeckenbrugge, G. C., ... Gepts, P. (2014). Multiple lines of evidence for the origin of domesticated chili pepper, *Capsicum annuum*, in Mexico. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 111(17), 6165–6170. <https://doi.org/10.1073/pnas.1308933111>
- Latournerie, L., Chávez, J. L., Pérez, M., Castañón, G., Rodríguez, S. A., Arias, L. M., & Ramírez, P. (2002). Valoración in situ de la diversidad morfológica de chiles (*Capsicum annuum* L. y *Capsicum chinense* Jacq.) en Yaxcabá, Yucatán. *Fitotecnia Mexicana*, 25(1), 25–33.
- Lim, T. K., & Lim, T. K. (2013a). *Capsicum baccatum* var. *pendulum*. In *Edible Medicinal And Non-Medicinal Plants* (pp. 197–204). https://doi.org/10.1007/978-94-007-5628-1_29
- Lim, T. K., & Lim, T. K. (2013b). *Capsicum chinense*. In *Edible Medicinal And Non-Medicinal Plants* (pp. 205–212). https://doi.org/10.1007/978-94-007-5628-1_30
- Lim, T. K., & Lim, T. K. (2013c). *Capsicum frutescens*. In *Edible Medicinal And Non-Medicinal Plants* (pp. 213–239). https://doi.org/10.1007/978-94-007-5628-1_31
- Lin, W. C., Hall, J. W., & Saltveit Jnr, M. E. (1993). Ripening stage affects the chilling sensitivity of greenhouse-grown peppers. *Journal of the American Society for Horticultural Science*, 118(6), 791–795. <https://doi.org/10.21273/jashs.118.6.791>
- Liu, S., Li, W., Wu, Y., Chen, C., & Lei, J. (2013). De Novo Transcriptome Assembly in Chili Pepper (*Capsicum frutescens*) to Identify Genes Involved in the Biosynthesis of Capsaicinoids. *PLoS ONE*, 8(1). <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0048156>
- López-López, Á., Espinoza-Santana, S., Ceceña-Duran, C., Ruiz-Alvarado, C., Núñez-Ramírez, F., & Araiza-Zúñiga, D. (2015). Biosíntesis, acumulación y efecto del ambiente sobre compuestos antioxidantes del fruto del cultivo de chile (*Capsicum spp.*) / Biosynthesis, accumulation and effect of the environment on antioxidant compounds in the fruit of pepper crop (*Capsicum spp.*). *Biotecnia*, 17(2), 50–57. Retrieved from <http://biotecnia.unison.mx/index.php/biotecnia/article/view/183/170>
- Luo, M., Purdy, H., & Avis, T. J. (2019). Compost bacteria provide antifungal activity against grey mold and Alternaria rot on bell pepper fruit. *Botany*, 97(3), 221–230. <https://doi.org/10.1139/cjb-2018-0180>
- Lurie, S., Ronen, R., & Aloni, B. (2019). Growth-regulator-induced Alleviation of Chilling Injury in Green and Red Bell Pepper Fruit during Storage. *HortScience*, 30(3), 558–559. <https://doi.org/10.21273/hortsci.30.3.558>
- Lyons, J. M. (1973). Chilling Injury in Plants. *Annual Review of Plant Physiology*,

- 24(1), 445–466. <https://doi.org/10.1146/annurev.pp.24.060173.002305>
- Mexicana De Pediatría, R., Guzmán, B., Hernández, J., Ortega, S., Viruegas, R., & Barrita, S. (2009). Los nutraceuticos. Lo que es conveniente saber. In *Artículo de revisión* (Vol. 76). Retrieved from www.medigraphic.com
- Mittler, R. (2002). Oxidative stress, antioxidants and stress tolerance. *Trends in Plant Science*, Vol. 7, pp. 405–410. [https://doi.org/10.1016/S1360-1385\(02\)02312-9](https://doi.org/10.1016/S1360-1385(02)02312-9)
- Morán-Bañuelos, S. H., Aguilar-Rincón, V. H., Corona-Torres, T., Castillo-González, F., Soto-Hernández, R. M., & San Miguel-Chávez, R. (2008). Capsaicinoides en chiles nativos de Puebla, México. *Agrociencia*, 42(7), 807–816. Retrieved from http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1405-31952008000700007&lng=es&nrm=iso&tlng=es
- Moreno, L. L., & Mendoza, H. V. (2011). Los chiles de México y su distribución. In *Revista fitotecnica mexicana* (Vol. 34).
- Naves, E. R., de Ávila Silva, L., Sulpice, R., Araújo, W. L., Nunes-Nesi, A., Peres, L. E. P., & Zsögön, A. (2019). Capsaicinoids: Pungency beyond *Capsicum*. *Trends in Plant Science*, Vol. 24, pp. 109–120. <https://doi.org/10.1016/j.tplants.2018.11.001>
- Pérez-Castañeda, L. M., Castañón-Nájera, G., Ramírez-Meraz, M., & Mayek-Pérez, N. (2015). Avances y perspectivas sobre el estudio del origen y la diversidad genética de *Capsicum spp.* *Ecosistemas y Recursos Agropecuarios*, 2(4), 117–128. Retrieved from http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2007-90282015000100009&lng=es&nrm=iso&tlng=es
- Pérez Castañeda, L. M., Castañón Nájera, G., & Mayek Pérez, N. (2008). Diversidad morfológica de chiles (*Capsicum spp.*) de Tabasco, México. *Cuadernos de Biodiversidad*, (27), 11–22. <https://doi.org/10.14198/cdbio.2008.27.02>
- Perry, L., Dickau, R., Zarrillo, S., Holst, I., Pearsall, D. M., Piperno, D. R., ... Zeidler, J. A. (2007). Starch fossils and the domestication and dispersal of chili peppers (*Capsicum spp.* L.) in the Americas. *Science*, 315(5814), 986–988. <https://doi.org/10.1126/science.1136914>
- Pickersgill, B. (1971). Relationships Between Weedy and Cultivated Forms in Some Species of Chili Peppers. In *Source: Evolution* (Vol. 25).
- Pickersgill, B. (2007). Domestication of plants in the Americas: Insights from Mendelian and molecular genetics. *Annals of Botany*, Vol. 100, pp. 925–940. <https://doi.org/10.1093/aob/mcm193>
- Pickersgill, B. (2011). Society for American Archaeology The Archaeological Record of Chili Peppers (*Capsicum spp.*) and the sequence of plant domestication in Peru (*Capsicum spp.*) and the sequence of plant domestication in Peru. *American Archaeology*, 34(1), 54–61.

- Pol, L. C., Siddiq, M., & Shahzad, T. (2018). *Chili, peppers, and paprika. Handbook of Vegetables and Vegetable Processing* (N. K. Sinha, Ed.). Blackwell Publishing Ltd.
- Reiter, R. J. (1995). Oxidative processes and antioxidative defense mechanisms in the aging brain. *FASEB Journal*, Vol. 9, pp. 526–533. <https://doi.org/10.1096/fasebj.9.7.7737461>
- Riva Ruiz, R. (2019). *Manual de cultivo de Ají Charapita (Capsicum frutescens L.)* (1° edición; D. P. Quispe, Ed.). Universidad Nacional de Ucayali.
- Sanatombi, K., & Rajkumari, S. (2019). Effect of Processing on Quality of Pepper: A Review. *Food Reviews International*, 00(00), 1–18. <https://doi.org/10.1080/87559129.2019.1669161>
- Sánchez-Torres, P., Raigón, M. D., Gammoudi, N., & Gisbert, C. (2016). Effects of grafting combinations on the nutritional composition of pepper fruit. *Fruits*, 71(4), 249–256. <https://doi.org/10.1051/fruits/2016014>
- Sánchez, E. H. (2016). *Manual para la producción de chile manzano en el Valle del Mezquital, Hidalgo*, (G. G. Brigido, Ed.). Tula de Allende, Hgo.
- Serrano, M., Martínez-Madrid, M. C., Pretel, M. T., Riquelme, F., & Romojaro, F. (1997). Modified atmosphere packaging minimizes increases in putrescine and abscisic acid levels caused by chilling injury in pepper fruit. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 45(5), 1668–1672. <https://doi.org/10.1021/jf960866h>
- Siboza, X. I., & Bertling, I. (2013). The effects of methyl jasmonate and salicylic acid on suppressing the production of reactive oxygen species and increasing chilling tolerance in “Eureka” lemon [*Citrus limon* (L.) Burm. F.]. *Journal of Horticultural Science and Biotechnology*, 88(3), 269–276. <https://doi.org/10.1080/14620316.2013.11512965>
- Tewksbury, J. J., Manchego, C., Haak, D. C., & Levey, D. J. (2006a). Where did the chili get its spice? Biogeography of capsaicinoid production in ancestral wild chili species. *Journal of Chemical Ecology*, 32(3), 547–564. <https://doi.org/10.1007/s10886-005-9017-4>
- Tewksbury, J. J., Manchego, C., Haak, D. C., & Levey, D. J. (2006b). Where did the chili get its spice? Biogeography of capsaicinoid production in ancestral wild chili species. *Journal of Chemical Ecology*, 32(3), 547–564. <https://doi.org/10.1007/s10886-005-9017-4>
- Toivonen M, A, P. (2004). Postharvest storage procedures and oxidative stress. *HortScience*, 39(5), 938–942. <https://doi.org/10.13140/2.1.4453.4403>
- Vázquez-Flota, F., Miranda-Ham, M. D. L., Monforte-González, M., Gutiérrez-Carbajal, G., Velázquez-García, C., & Nieto-Pelayo, Y. (2007). Biosynthesis of capsaicinoids, the pungent principle of peppers. *Revista Fitotecnica Mexicana*, 30 (4), 353–360.
- Vázquez-Flota, F., de Lourdes Miranda-Ham, M., Monforte-González, M.,

- Gutiérrez-Carbajal, G., & Velázquez-García Yuriana Nieto-Pelayo, C. (2007). La biosíntesis de capsaicinoides, el principio picante del chile. *Rev. Fitotec. Mex* (Vol. 30).
- Vázquez García, E., Ramírez Meraz, M., Mata Vázquez, H., Ariza Flores, R., & Alía Tejacal, I. (2010a). Revista fitotecnia mexicana publicada por la Sociedad Mexicana de Fitogenética. In *Revista Fitotecnia Mexicana* (Vol. 33). Retrieved from http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0187-73802010000500016&lng=es&nrm=iso&tlng=pt
- Vázquez García, E., Ramírez Meraz, M., Mata Vázquez, H., Ariza Flores, R., & Alía Tejacal, I. (2010b). Revista fitotecnia mexicana publicada por la Sociedad Mexicana de Fitogenética. In *Revista fitotecnia mexicana* (Vol. 33). Retrieved from http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0187-73802010000500016&lng=es&nrm=iso&tlng=pt
- Vera-Guzmán, A. M., Chávez-Servia, J. L., Carrillo-Rodríguez, J. C., & G. López, M. (2011). Phytochemical evaluation of wild and cultivated pepper (*Capsicum annuum* L. and *C. pubescens* Ruiz & Pav.) from Oaxaca, Mexico. *Chilean Journal of Agricultural Research*, 71(4), 578–585. <https://doi.org/10.4067/S0718-58392011000400013>
- Wang, C.Y. (1990). *Alleviation of chilling injury of horticultural crops*, in: *Chilling Injury of Horticultural Crops*. Boca Raton, FL: CRC Press.
- Wang, Chien Yi, & Adams, D. O. (1980). Ethylene Production by Chilled Cucumbers (*Cucumis sativus* L.) . *Plant Physiology*, 66(5), 841–843. <https://doi.org/10.1104/pp.66.5.841>
- Wang, L., Baldwin, E. A., Plotto, A., Luo, W., Raithore, S., Yu, Z., & Bai, J. (2015). Effect of methyl salicylate and methyl jasmonate pre-treatment on the volatile profile in tomato fruit subjected to chilling temperature. *Postharvest Biology and Technology*, 108, 28–38. <https://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2015.05.005>
- Wang, & Y., C. (1982). Physiological and biological responses of plants to chilling stress. *Hort-Science*, 17, 173–168.
- Wang, Y., Gao, L., Wang, Q., & Zuo, J. (2019). Low temperature conditioning combined with methyl jasmonate can reduce chilling injury in bell pepper. *Scientia Horticulturae*, 243, 434–439. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2018.08.031>
- Yamamoto, S., Djarwaningsih, T., & Wiriadinata, H. (2013). *Capsicum pubescens* (Solanaceae) in Indonesia: Its History, Taxonomy, and Distribution. *Economic Botany*, 67(2), 161–170. <https://doi.org/10.1007/s12231-013-9230-y>
- Yáñez, P., Balseca, D., Rivadeneira, L., & Larenas, C. (2015). Características morfológicas y de concentración de capsaicina en cinco especies nativas

del género *Capsicum* cultivadas en Ecuador. *Revista de Ciencias de La Vida*, 22(2), 12–32.

Yi Wang, C. (1994). Chilling Injury of Tropical Horticultural Commodities. In *Hortscience* (Vol. 29).

Zhang, Y., Zhang, M., & Yang, H. (2015). Postharvest chitosan-g-salicylic acid application alleviates chilling injury and preserves cucumber fruit quality during cold storage. *Food Chemistry*, 174, 558–563. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2014.11.106>

3 CHILES PUNGENTES MEXICANOS: UNA REVISIÓN DEL ESTADO DEL ARTE: CULTIVO, USOS Y MANEJO POSTCOSECHA DE ESTOS FRUTOS

3.1 Resumen

El género *Capsicum* está compuesto por una gran diversidad de especies de chiles con distintas características físicas, químicas y organolépticas, algunos de ellos pueden tener beneficios para la salud. Los frutos de este género se clasifican según sus características organolépticas. La pungencia o el picor es una de las clasificaciones más utilizadas para estos frutos. Dentro de esta clasificación se pueden encontrar tres grupos: no picante, moderadamente picante y muy picante. En general, muchos consumidores prefieren especies de chile no pungentes que sólo proporcionan sabor a chile y color a los platillos. Trabajos previos se han enfocado principalmente en el estudio de frutos con baja pungencia, sin considerar el potencial que pueden tener los frutos con alta pungencia y con alto contenido de capsaicinoides, que pueden ser utilizados en distintas áreas de la industria farmacéutica y alimentaria. La presente revisión del estado del arte es una recopilación de la información que existe sobre las diferentes especies de chiles picantes a nivel mundial, clasificación taxonómica, descripción botánica, forma de producción. Se mencionan las principales especies para proporcionar un panorama previo a estudios posteriores.

Palabras clave: *Capsicum*, chiles picantes, pungencia.

³ Tesis de Doctorado en Ciencias Agroalimentarias, Programa de Posgrado en Ciencia y Tecnología Agroalimentaria, Universidad Autónoma Chapingo.

Autor: Francisco Daniel Miranda Molina
Director: Salvador Valle Guadarrama, Dr.

Mexican hot peppers: a review of the cultivation, uses and post-harvest handling of these fruits

3.2 Abstract

The *Capsicum* genus is composed of a great diversity of chilli species with different physical, chemical and organoleptic characteristics, some of them may have benefits for health. The fruits of this genus can be classified according to their organoleptic characteristics. The pungency or hot is one of the most used classifications for these fruits. Within this classification, three groups can be found: not pungent, moderately pungent and very pungent. In general, many consumers prefer non-pungent chilli species that only provide chilli flavor and color to the dishes. Previous work has been carried out principally in the study of low pungency fruits, without considering the potential that can have the fruits with high pungency and with high capsaicinoid content, which can be used in different areas of the pharmaceutical and food industry. The present review of the state of the art is a compilation of the information that exists on the different species of hot chili worldwide, taxonomic classification, botanical description, and form of production. The main species are mentioned to provide an overview prior to further studies.

Key words: *Capsicum annuum*, hot chili, pungency.

⁴Thesis of Doctorado en Ciencias Agroalimentarias, Programa de Posgrado en Ciencia y Tecnología Agroalimentaria, Universidad Autónoma Chapingo.
Author: Francisco Daniel Miranda Molina
Director: Salvador Valle Guadarrama, Dr.

3.3 Introducción

Los chiles (nombre español derivado de la lengua náhuatl (*chillitl*, ají), son miembros del género *Capsicum*, el cual se ha cultivado ampliamente, inicialmente en América y luego del contacto europeo, en todo el mundo (Araceli, 2009). Existen aproximadamente 25 especies reconocidas de estos frutos, sin embargo, sólo cinco tienen importancia económica relevante: *C. annuum*, *C. frutescens* L., *C. baccatum* L., *C. pubescens* (Ruiz & Pav.) y *C. chinense* Jacq (Kraft et al., 2014).

Se cree que estas cinco especies fueron domesticadas en dos diferentes regiones de América, *C. annuum* y *C. frutescens* en Mesoamérica y *C. baccatum*, *C. pubescens* y *C. chinense* en América del Sur (Perry et al., 2007), además de que formaron parte de las primeras plantas domesticadas en este continente, existe evidencia arqueológica de que en México los humanos han estado usando chiles silvestres desde hace aproximadamente 8000 a. C., como parte de una dieta compleja (Araceli et al., 2009). En cuanto a la domesticación de esta planta se encontraron evidencias en el valle de Tehuacán (Centro de México), que datan de aproximadamente 5000-6000 a. C., por lo que las culturas de este continente tenían un arraigo especial por estos frutos (Pickersgill, 2007).

Después del esparcimiento de este cultivo en el mundo posterior a la colonización de América, sólo los frutos menos picantes lograron desarrollarse de mejor forma en los climas más fríos de Europa, por lo que éstos tuvieron una mejor aceptación en los nuevos consumidores y se convirtieron en los más producidos y consumidos en el mundo (Attokaran, 2017b).

La presente revisión resalta la importancia de las especies picantes, las cuales han sido poco estudiadas, resaltando su forma de producción, las características de los frutos, sus usos, los beneficios de su consumo y sus formas de conservación.

3.4 Clasificación taxonómica

La clasificación taxonómica de *Capsicum* se muestra en el Cuadro 1. En el Cuadro 5 se muestran las 33 especies del género *Capsicum* que han sido identificadas, así como 10 variedades, las cuales se han diferenciado de acuerdo a sus características fenotípicas, como la morfología de la flor o del fruto (Latournerie et al., 2002; Alonso et al., 2008; Pérez et al., 2008; Pérez et al., 2015;).

El género *Capsicum* se conforma de una gran variedad de frutos con diferentes formas, tamaños y colores. Dentro de esa gama de colores encontramos frutos verdes, amarillos, blancos, morados, rojos, naranjas y cafés. Estos colores dependen en gran medida de estado de madurez, así como de la variedad cultivada (Bosland & DeWitt, 2009). *C. annuum* forma parte de las cinco variedades domesticadas de mayor importancia económica, además de ser la de mayor diversidad en cuanto a forma, color, tamaño y pungencia de frutos se refiere. Aunque esta especie es la de mayor importancia económica y cuenta con una gran diversidad de frutos, aún no se logra un consenso sobre su lugar de origen, ni de la cantidad de cultivares que se han domesticado a lo largo del tiempo (Perry et al., 2007).

Una de las principales características de clasificación de los frutos del género *Capsicum*, es la pungencia de sus frutos. Una forma común de clasificación se relaciona con la pungencia y el sabor dulce, sin pungencia (Pérez-Castañeda et al., 2015).

Cuadro 5. Especies y variedades de *Capsicum* diferenciadas de acuerdo a sus características fenotípicas.

Especie de <i>Capsicum</i>	Variedad	Especie de <i>Capsicum</i>	Variedad
<i>C. annuum</i> L.	<i>C. annuum</i> var. <i>annuum</i> L	<i>C. galapagoense</i> H.	
	<i>C. annuum</i> var. <i>glabriusculum</i> H & P.	<i>C. geminifolium</i> H.	
<i>C. baccatum</i> L	<i>C. baccatum</i> var. <i>baccatum</i> L	<i>C. hookerianum</i> K.	
	<i>C. baccatum</i> var. <i>praetermissum</i> H.	<i>C. lanceolatum</i> G.	
	<i>C. baccatum</i> var. <i>umbilicatum</i> H & B.	<i>C. leptopodium</i> K.	
<i>C. buforum</i> H.		<i>C. lycianthoides</i> B.	
<i>C. campylopodium</i> S.		<i>C. minutiflorum</i> H.	
<i>C. cardenasii</i> H & P.		<i>C. mirabile</i> M. S.	
<i>C. chacoense</i> H.		<i>C. mositicum</i> T.	
<i>C. chinense</i> Jacq.		<i>C. parvifolium</i> S.	
<i>C. ciliatum</i> K.		<i>C. pubescens</i> R & P.	
<i>C. coccineum</i> H.		<i>C. rhomboideum</i> K	
<i>C. cornutum</i> H.		<i>C. schottianum</i> S.	
<i>C. dimorphum</i> K.		<i>C. scolnikianum</i> H.	
<i>C. dusenii</i> B.		<i>C. tovarii</i> E.	
<i>C. eximium</i> H.	<i>C. eximium</i> var. <i>eximium</i>	<i>C. villosum</i> S.	<i>C. villosum</i> var. <i>muticum</i> Sendtn.
	<i>C. eximium</i> var. <i>tomentosum</i> E & P.		<i>C. villosum</i> var. <i>villosum</i>
<i>C. flexuosum</i> S.		<i>Tubocapsicum anomalum</i> F & S.	
<i>C. frutescens</i> L.		<i>Witheringia stramonifolia</i> K.	

Fuente: Pérez et al. (2015).

3.5 Capsaicinoides, el picor de los chiles

Actualmente existe un incremento en la demanda y consumo de chile a nivel mundial, una de las razones de este incremento tiene que ver con su alto contenido de compuestos benéficos para la salud, dentro de los que destacan las vitaminas A y C, compuestos antioxidantes (como compuestos fenólicos, flavonoides, carotenoides y capsaicina) que tiene un gran potencial nutracéutico. (Liu et al., 2013). El chile presenta también una gran variedad de formas de consumo, se puede consumir fresco, seco, en conserva o como condimento. Es gracias a esta versatilidad de consumo y a su sabor picante característico que estos frutos tienen una gran apreciación por parte del consumidor (Vázquez et al., 2007). El sabor pungente característicos de los frutos de chile está dado por un grupo de compuestos llamados capsaicinoides (CAP's), que son sintetizados por la planta como un mecanismo de protección contra los mamíferos, quienes son sensibles a los chiles pungentes (Vázquez et al., 2007).

El contenido de CAP's en los frutos depende de muchos factores entre los que destacan, las condiciones de desarrollo del cultivo, el estado de madurez y el genotipo (Naves et al., 2019). Dentro de las diferentes especies de *Capsicum*, se puede encontrar una gran variación en el grado de picor, que se relaciona con la capacidad que presenta cada especie para acumular capsaicinoides. Actualmente, el chile habanero (*C. chinense*) es considerado como uno de los chiles más picantes. Hoy en día algunas especies de *C. annuum* pueden alcanzar un grado de picor similar, cuando se someten a condiciones de producción (mayor cantidad luz, estrés hídrico programado y aplicación de compuestos químicos) que ayudan a la planta a acumular una mayor cantidad de capsaicinoides (Naves et al., 2019; Vázquez et al., 2007).

Debido a la cercana localización de los capsaicinoides con las semillas, diversos estudios indican que éstos tienen un papel en la protección química de las semillas (García et al., 2019). Esta protección ha permitido una buena dispersión de estas semillas, protegiéndolas principalmente de mamíferos que pudieran dañarlas durante su paso por el tracto digestivo al consumir los frutos. Las aves,

por otra parte, son animales insensibles a los capsaicinoides, por lo que han sido el principal mecanismo de dispersión de estas plantas (Tewksbury et al., 2006).

Los CAP's poseen una estructura química que consiste en un núcleo fenólico unido mediante un enlace amida a un ácido graso. En el metabolismo de los capsaicinoides, la porción fenólica es la vainillilamina, que se forma a partir de la fenilalanina por medio de la ruta de los fenilpropanoides. El ácido graso se forma a partir de aminoácidos de cadena lateral ramificada, ya sea valina o leucina. Las diferencias estructurales de los diversos CAP's residen precisamente en la naturaleza de la cadena lateral, que puede ser de 9 u 11 carbonos de largo, con un número variable de enlaces dobles colocados en diferentes posiciones (Vázquez et al., 2007).

Actualmente se conocen alrededor de 22 tipos de capsaicinoides diferentes, de los cuales la capsaicina y la dihidrocapsaicina constituyen más de 90 % del total presente en los frutos (Vázquez et al., 2007).

Además de la función de protección de las semillas, los capsaicinoides tienen diversas aplicaciones en diferentes industrias, en la industria farmacéutica los capsaicinoides son muy valorados debido a sus propiedades analgésicas, antiinflamatorias, antioxidantes e incluso anticancerígenas (Al-Snafi, 2015), por lo que su análisis comienza a tomar mayor relevancia en los últimos tiempos, aunque aún hay pocos estudios al respecto.

3.6 Chiles picantes

Los compuestos bioactivos contenidos en los frutos de chiles picantes, pueden proporcionar a la dieta y el beneficios a la salud humana, que incluyen efectos antioxidantes, antiinflamatorios y analgésicos, así como de tipo hipolipidémico e hipoglucémico (Khovidhunkit & Wittayalertpanya, 2009; Sanatombi & Rajkumari, 2019).

Los chiles picantes verdes o rojos del género *Capsicum* son la especia más utilizada en el mundo, por lo que éstos forman parte de cientos de recetas de

comidas en restaurantes y hogares (Abdel-Salam, 2016); sin embargo, la comercialización y producción de muchas especies sólo se practica de manera local, por lo que no existe información acerca de ellos.

A continuación, se describe la taxonomía, características de los frutos, las labores de cultivo, los usos y formas de consumo, así como las más recientes investigaciones de las cinco principales especies domesticadas de chiles picantes.

3.6.1 *Capsicum annuum*

Capsicum annuum es el más popular entre las cinco especies domesticadas de chiles. Sus frutos son los más comunes y los más cultivados en el mundo. El grupo *Capsicum annuum* incluye chiles de una amplia variedad de formas y tamaños con diferentes niveles de color y picor. *Capsicum annuum* es nativo de la región que comprende Mesoamérica (Bosland & DeWitt, 2009; Ciju, 2019).

Los miembros principales de este grupo incluyen chiles jalapeños y chipotles, chiles Serranos, chilaca, chile pasilla, chile Anaheim, pimientos Fresno, chile Mirasol, chile Guajillo, chile Cascabel, pimientos de cayena, pimienta o pimientos de cereza, pimientos de ojo de pájaro, pimientos tailandeses, pimientos Friggitellos y pimientos Peperoncini, pimientos de cera húngara, pimientos de plátano, chile Poblano y chile ancho entre otros (Ciju, 2019).

Descripción de la planta y los frutos

Capsicum annuum es una planta herbácea anual, pero se puede cultivar como una planta perenne arbustiva altamente ramificada. La planta crece hasta una altura de un metro o más y tiene hojas lanceoladas, dependiendo del tipo de cultivar. Las flores son solitarias, de color blanco o blanquecino, a veces de color púrpura dependiendo del cultivar. Las frutas son bayas que pueden ser de color verde, amarillo, naranja o rojo cuando están maduras. El tamaño del fruto, la forma y el nivel de pungencia también varían con el tipo de cultivar (Bosland & DeWitt, 2009; Moreno & Mendoza, 2011; López-López et al., 2015; Ciju, 2019).

3.6.2 *Capsicum baccatum*

Capsicum baccatum es una de las cinco especies domesticadas del género *Capsicum*. Como la mayoría de las otras plantas de Chile, es nativa de América del Sur. Los miembros del grupo *C. baccatum* se conocen comúnmente como pimientos 'aji'. Tres variedades reconocidas de *C. baccatum* son, *C. baccatum* var. *baccatum*, *C. baccatum* var. *pendulum* y *C. baccatum* var. *Microcarpum*. Los principales miembros de *C. baccatum* son pimientos ají amarillo, pimientos ají habanero, pimientos ají cristal, pimientos ají piña, pimientos ají gota limón, pimientos corona de Bishop y pimientos piquante (Bosland & DeWitt, 2009; do Rêgo & Casali, 2009).

Descripción de la planta y los frutos

Capsicum baccatum es un arbusto perenne, de crecimiento alto. Cuando la planta está completamente desarrollada, crece hasta una altura de 1.5 metros. Esta especie es fácil de cultivar y prospera bien en un clima cálido y tropical. En el caso de *C. baccatum* var. *péndulo*, las flores son de color crema con manchas amarillas o verdes y las frutas son alargadas con semillas de color crema. Las flores son polinizadas por insectos o autopolinizadas (Bosland & DeWitt, 2009; Ciju, 2019).

Las frutas son bayas grandes y carnosas, con numerosas semillas en su interior. Las frutas inmaduras generalmente aparecen erectas en la planta y toman una forma pendular a medida que maduran. Existen frutos de diferente forma, color y tamaño dentro de *C. baccatum*, también varían en el picor por lo que van de frutos con escaso picor hasta frutos muy picantes (Ciju, 2019).

3.6.3 *Capsicum chinense*

Capsicum chinense es un miembro del complejo *C. annuum*. Como la mayoría de las otras especies de Chile, *C. chinense* también es nativo de las Américas (más recientemente, América Central, la región de Yucatán en México y las islas del Caribe). Los chiles *C. chinense* son uno de los grupos de pimientos más

picantes del mundo. Son conocidos por sus variados colores y sabores. Tienen un alto valor ornamental debido al atractivo follaje de hoja perenne y frutas multicolores con diferentes tamaños y formas (Antonious et al., 2009; Lim & Lim, 2013b).

Los principales miembros de *C. chinense* son los pimientos habanero (de las islas del Caribe, América Central y México), pimientos Arriba Saia (de Brasil), los pimientos Datil (de Florida), los pimientos Fatalii (del sur de África central), Bhut Jolokia o pimientos fantasma (de Assam, India), pimientos de escorpión de Trinidad (de Trinidad), pimientos de Kambuzi, pimientos de Malawi, pimientos de Carolina Reaper (de Carolina del Sur), pimientos Adjuma (de Surinam) y pimientos Ají (de Puerto Rico, Venezuela) (Bosland & DeWitt, 2009; Ciju, 2019).

Descripción de la planta y los frutos

Las plantas tienen un hábito de crecimiento de tropical a subtropical y no sobreviven en climas fríos de invierno. El hábito de crecimiento de las plantas varía desde un arbusto perenne pequeño y compacto hasta un arbusto perenne alto, muy ramificado, dependiendo del tipo de cultivar. Las flores son pequeñas y blancas con cinco pétalos. Las frutas son bayas carnosas con colores brillantes. Las frutas varían en color y forma según el tipo de cultivar. Los colores más comunes son los colores brillantes como el rojo, naranja, amarillo, marrón y morado (Lim & Lim, 2013b; Ciju, 2019).

3.6.4 *Capsicum frutescens*

Capsicum frutescens es miembro del complejo *Capsicum annuum*. Al igual que otras plantas de Chile, *C. frutescens* también es nativo de América del Sur o Central. La planta es conocida por producir frutos pequeños pero muy picantes. La característica distintiva más importante de *C. frutescens* es que sus pequeños frutos picantes, crecen erguidos en los brotes y pueden producir 100 o más frutos en una estación (Ciju, 2019; Riva, 2019).

Los principales miembros de este grupo son los pimientos Tabasco, los pimientos hawaianos, pimientos Malagueta, pimientos Cabai Rawit (de Indonesia), pimientos Piri Piri (ojo de pájaro africano o diablo africano), los pimientos Siling Labuyo (de Filipinas) y los pimientos Xiaomila (de China) (Bosland & DeWitt, 2009; Ciju, 2019).

Descripción de la planta y los frutos

Las plantas de *C. frutescens* son arbustos perennes de crecimiento compacto. Esta especie se puede cultivar como un cultivo anual en climas templados, y se caracterizan por ser plantas altamente ramificadas, con muchos tallos y un crecimiento de entre 30 cm y 1.5 metros de altura, dependiendo del clima local y las condiciones de crecimiento. Las flores son blancas sin manchas y tienen anteras moradas. Las frutas maduras son bayas pequeñas, muy picantes, de color rojo que crecen erectas en las plantas. La forma del fruto varía de elipsoide-cónica a lanceoloide según el tipo de cultivar. El fruto mide aproximadamente 10–20 mm de largo y 3–7 mm de diámetro (Bosland & DeWitt, 2009; Lim & Lim, 2013c; Ciju, 2019 Riva Ruiz, 2019).

3.6.5 *Capsicum pubescens*

Al igual que otras plantas de Chile, *Capsicum pubescens* también es nativa de América Central y del Sur (particularmente, Bolivia y Perú). Entre las cinco especies de pimiento domesticadas esta es la más difícil de cultivar, debido a sus requisitos específicos de crecimiento. Está estrechamente relacionado con especies silvestres de pimientos como *C. tovarii*, *C. cardenasii* y *C. eximium* (Bosland & DeWitt, 2009; Yamamoto, Djarwaningsih, & Wiriadinata, 2013).

Los rasgos importantes que distinguen a las plantas de *C. pubescens* de otras plantas de Chile son sus hojas peludas, junto con sus semillas negras. Las plantas de *C. pubescens* tienen una vida relativamente larga, hasta 15 años, en comparación con otras plantas de Chile y a veces se convierten en un árbol pequeño, conocido ocasionalmente como "chile de árbol". Con respecto a otras

plantas de Chile, *C. pubescens* soporta temperaturas más frías, crece a mayores elevaciones, pero son sensibles a las heladas. Los principales miembros del grupo *C. pubescens* son los pimientos Rocoto (p. Ej., Rocoto Longo) o los pimientos quechua (del Perú), Locoto incluye 'Canario' (amarillo), 'Rojo' (rojo) y pimiento naranja (Ciju, 2019).

Descripción de la planta y los frutos

C. pubescens son arbustos perennes de crecimiento rápido que a veces crecen como plantas trepadoras altas. En pleno crecimiento, alcanza una altura de 60-75 cm. La planta puede crecer hasta 2.5 - 4 metros de altura bajo condiciones favorables de clima y crecimiento. Las hojas son de color verde brillante, ovadas con puntas puntiagudas con un pecíolo de 5–12 mm de largo. Cada hoja individual mide aproximadamente 5–12 cm de largo y 2.5 a 4 cm de ancho. (Bosland & DeWitt, 2009; Yamamoto et al., 2013).

Las flores púrpuras son solitarias o nacen en pares y se mantienen erguidas de los brotes. Son de cáliz de cinco dientes y tienen corolas moradas, con anteras moradas y blancas. Las frutas son bayas grandes y carnosas que normalmente tienen forma de pera o manzana y contienen numerosas semillas negras en su interior y en general son altamente perecederas debido a su naturaleza carnosa. (Bosland & DeWitt, 2009; Ciju, 2019).

Principales labores de cultivo para el género *Capsicum*

En general las cinco principales especies domesticadas de *Capsicum* tienen un manejo agronómico similar. Son plantas de hábito de crecimiento tropical a subtropical, con requerimiento de climas cálidos, húmedos y libres de heladas, ya que la mayoría de ellas son sensibles a las bajas temperaturas, con excepción de *Capsicum pubescens*, la cual soporta temperaturas de hasta 4.4 °C, pero sin la presencia de heladas. Estas especies se cultivan mediante la propagación por medio de semillas, las cuales son germinadas en almácigos durante un periodo de 3-4 semanas. Las plántulas pueden ser transplantadas cuando alcanzan una

altura entre 8 y 10 cm. En general las especies del género *Capsicum* se desarrollan mejor en suelos arcillosos muy fértiles, ricos en humus y bien drenados, además requieren un buen manejo de la fertilización y el riego durante todo su desarrollo (Bosland & DeWitt, 2009; Lim & Lim, 2013a; Sánchez, 2016; Ciju, 2019; Riva Ruiz, 2019)

3.7 Clasificación basada en la pungencia de los chiles

Las variedades de chile se pueden clasificar en tres grupos en función de la pungencia de los frutos. Estos son: no picante, ligeramente picante y muy picante. La mayoría de los chiles largos y estrechos, como los chiles verdes, son muy picantes, mientras que los chiles cortos y de carne gruesa como los jalapeños son ligeramente picantes. Los pimientos son chiles no picantes. En general, los pimientos *Capsicum frutescens* y *Capsicum chinense* son mucho más picantes que el grupo de pimientos *Capsicum annuum* (Ciju, 2019).

El contenido pungente de los chiles se clasifica en términos de "Unidades Scoville" (SHU). El índice de Scoville se mide en múltiplos de 100 unidades donde los pimientos dulces forman parte de los chiles no picantes con un valor de 0 y la capsaicina pura con un valor de 16,000,000 SHU. El nivel de picor de todos los otros chiles se encuentra entre estos dos extremos (Naves et al., 2019).

Para las siguientes especies cultivadas de chile los niveles de SHU son: *Capsicum chinense* por encima de 1,000,000 SHU; *Capsicum frutescens* hasta 150,000 SHU; *Capsicum annuum* hasta 100,000 SHU; *Capsicum pubescens* hasta 50,000 SHU; *Capsicum baccatum* hasta 30,000 SHU (Yáñez et al., 2015; Ciju, 2019).

3.8 Manejo poscosecha en chile pimientos

Los principales determinantes de la madurez de los frutos de chile son el tamaño, la firmeza y el color. El tamaño de la fruta de los chiles verdes maduros debe ser de mediano a grande (8 a 12 cm) y los frutos deben ser firmes, con un color verde brillante y una apariencia fresca. Los chiles de colores y rojos deben tener una

coloración mínima del 50 % para lograr un desarrollo completo del color. Los principales índices de calidad considerados para los chiles son forma, tamaño y color uniforme, típicos de la variedad (Vázquez et al., 2010b).

Los frutos de chile deben ser firmes al tacto y libres de defectos como grietas, descomposición y quemaduras solares. Los chiles frescos generalmente se comercializan como tales y sólo ocasionalmente se almacenan en frío. Por lo tanto, se dispone de muy poca información publicada sobre este aspecto. En general se sabe que el almacenamiento óptimo es a 7.5 °C (45 ° F) con más del 95 % de HR (humedad relativa,) lo que proporciona una vida útil máxima de 3-5 semanas (Handerburg et al., 1988).

3.9 Trastornos fisiológicos posteriores a la cosecha

Los trastornos abióticos de los chiles incluyen quemaduras solares, lesiones por rozamiento, aparición de marchitez y daño por frío. Uno de los problemas más frecuentes en la poscosecha de los frutos de chiles es el daño por frío. La sintomatología incluye picaduras y ablandamientos en superficie, fuga de electrolitos, ataque de microorganismos (hongos) y pardeamiento interno de semillas y placenta (Lin et al., 1993; Lurie et al., 2019).

3.10 Trastornos patológicos poscosecha

Los principales trastornos patológicos posteriores a la cosecha son la descomposición y la pudrición de los frutos de chile. Los organismos comunes que causan la descomposición son un grupo de hongos como *Botrytis* spp. y *Alternaria* spp. Además de esto, durante el almacenamiento también se observan pudriciones suaves de origen fúngico y bacteriano (Luo, Purdy, & Avis, 2019). El daño mecánico (aplastamiento, pinchazos, raspaduras, etc.) es común en los chiles; las lesiones físicas no sólo disminuyen la calidad visual de los chiles, sino que también causan una mayor pérdida de peso y descomposición (Cantwell, 1998).

3.11 Beneficios del consumo de chile

Los pimientos picantes se cultivan para diferentes propósitos, son utilizados como verduras, especias, condimentos, salsas y encurtidos, además se pueden procesar en chiles secos para fines de exportación y uso a largo plazo. Según diversos trabajos, los chiles son ricos en vitaminas, minerales y fibra dietética total. Son una fuente moderada de proteínas y carbohidratos. También son una buena fuente de capsaicina y compuestos fenólicos, los cuales son antioxidantes de gran importancia. Además se cree que los chiles tienen algunas propiedades medicinales (Sánchez et al., 2016).

El chile es un buen remedio casero para los resfriados, ayuda a aliviar el dolor de garganta y la temperatura. Son conocidos por sus propiedades estimulantes del corazón, además de que se usan con eficacia para aliviar afecciones médicas como diferentes tipos de cáncer (cáncer de próstata, cáncer de piel, cáncer de pulmón, cáncer de estómago), articulaciones dolorosas, dolor de muelas, bronquitis, dolores de cabeza, úlceras (úlceras estomacales, úlceras pépticas), artritis y psoriasis. Estimulan la circulación sanguínea, detienen el sangrado y reducen el colesterol. También se recomienda como una dieta para bajar de peso (Antonio, Wiedemann, & Veiga Junior, 2018).

3.12 Usos alimenticios del chile

Los chiles picantes se pueden comer crudos, salteados o se pueden agregar como ingrediente en otras preparaciones culinarias. Los frutos de chile se pueden usar de diferentes maneras para producir diferentes sabores. Moler las frutas frescas produce un sabor picante particular y sabroso. Moler las frutas secas le da otro sabor fuertemente picante. Tostar o freír frutos secos antes de molerlos produce otro sabor ahumado y menos picante. Remojar las frutas de chile en agua produce otro tipo de sabor (Pol, Siddiq, & Shahzad, 2018). Los chiles verdes frescos se utilizan en diversas preparaciones alimenticias para agregar sabor y pungencia a los platillos. Se pueden picar o cortar en rodajas o dividir en mitades. En ocasiones se utiliza la pasta de chile para agregar sabor y pungencia a las preparaciones de alimentos (Pol, Siddiq, & Shahzad, 2018).

3.13 Usos industriales del chile

De los frutos de chile se pueden obtener oleorresinas, las cuales son extractos fabricados de chiles picantes deshidratados. Su uso principal es como aditivo alimentario el cual le brinda picor a la comida. La oleorresina de *Capsicum* spp. también es utilizada para la condimentación de diversos productos cárnicos, tanto por el color como el sabor que le puede brindar a estos alimentos. Además de estos usos, las oleorresinas también son utilizadas como equipo de protección personal al ser un componente principal del gas pimienta. En la agricultura este compuesto sirve como insecticida y repelente de muchas plagas que afectan a gran variedad de cultivos. Actualmente la industria farmacéutica propone el uso de estos compuestos como analgésicos debido a sus propiedades para inhibir la transmisión del dolor (Pol, Siddiq, & Shahzad, 2018; Ciju, 2019).

3.14 Conclusiones y perspectivas

Se ha logrado un progreso significativo en la investigación de las variedades de chiles picantes; sin embargo, todavía existe una gran cantidad de especies con gran potencial nutrimental y nutraceutico que no han sido estudiadas, por lo que esta línea de investigación aún tiene un largo camino por recorrer.

En general existe información acerca de los factores que influyen en las características de los frutos durante su cultivo y en la etapa de poscosecha y procesamiento. La evaluación de diferentes condiciones de cultivo y los métodos de conservación en nuevas especies sería útil para encontrar nuevos canales de comercialización, con el fin de ofrecer al consumidor otras alternativas con similar o mayor valor nutrimental. Se han realizado esfuerzos considerables por conservar algunas de las especies menos estudiadas; sin embargo, se podría perder una gran diversidad de especies y frutos si se continua con la tendencia actual de sólo estudiar las variedades de mayor importancia económica.

3.15 Literatura citada

- Abdel-Salam, O. M. E. (2016). Preference for hot pepper: A complex interplay of personal, cultural, and pharmacological effects. *Temperature*, 3(1), 39–40. <https://doi.org/10.1080/23328940.2015.1111289>
- Aguirre-Medina, J. F., Kohashi-Shibata, J., Cadena-Iñiguez, J., & Avendaño-Arrazate, C. (2008). Tasa de secado del suelo e intercambio de gases de tres variedades de *Phaseolus vulgaris* L. *Phyton*, 77(March 2015), 31–48.
- Alonso, R. A., Ponce, P., Quiroga, R., Rosales, M. A., Zuart, J. L., Moya, C., & Cabrera, A. (2008). Evaluación In Situ de la variabilidad genética de los chiles silvestres (*Capsicum* spp.) en la región Frailesca del estado de Chiapas, México. *Cultivos Tropicales*, 29(2), 49–55. Retrieved from http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0258-59362008000200008&lng=es&nrm=iso&tlng=es
- Al-snafi, A. E. (2015). The Pharmacological Importance of *Capsicum* Species (*Capsicum annuum* and *Capsicum frutescens*) Grown in Iraq. *Journal of Pharmaceutical Biology*, 5(3), 124–142.
- Antonio, A. S., Wiedemann, L. S. M., & Veiga Junior, V. F. (2018). The genus: *Capsicum*: a phytochemical review of bioactive secondary metabolites. *RSC Advances*, Vol. 8, pp. 25767–25784. <https://doi.org/10.1039/c8ra02067a>
- Antonious, G. F., Lobel, L., Kochhar, T., Berke, T., & Jarret, R. L. (2009). Antioxidants in *Capsicum chinense*: Variation among countries of origin. *Journal of Environmental Science and Health - Part B Pesticides, Food Contaminants, and Agricultural Wastes*, 44(6), 621–626. <https://doi.org/10.1080/03601230903000727>
- Attokaran, M. (2017). *Natural Food Flavors and Colorants*. <https://doi.org/10.1002/9781119114796>
- Bosland, P. W., & DeWitt, D. (2009). *The Complete Chile Pepper Book: A Gardener's Guide to Choosing, Growing, Preserving, and Cooking* (p. 336). p. 336. Retrieved from <https://books.google.com/books?hl=en&lr=&id=90M5Tw0530gC&pgis=1>
- Cantwell, M. (1998). Bell peppers. *Fresh Produce Facts website at http://postharvest.ucdavis.edu*.
- Ciju, R. (2019). *Chile peppers*. Retrieved from <https://books.google.es/books?hl=es&lr=&id=KVKZDwAAQBAJ&oi=fnd&pg=PT2&dq=Chile+Peppers+-+Roby+Jose+Ciju&ots=RAf4iDa3Zo&sig=1LDmBIVtJnEN3vwlcLjSfbayyfY>
- Con, J., Relaciones, D., No, N. H., & A, S. J. A. L. (2012). Producción y calidad de chile habanero (*Capsicum chinense* Jacq.) Con diferentes relaciones

- nh4 +/no3 - y tamaño de partícula de sustratos. *Terra Latinoamericana*, 30(1), 9–15.
- do Rêgo, E. R., do Rêgo, M. M., Finger, F. L., Cruz, C. D., & Casali, V. W. D. (2009). A diallel study of yield components and fruit quality in chilli pepper (*Capsicum baccatum*). *Euphytica*, 168(2), 275–287. <https://doi.org/10.1007/s10681-009-9947-y>
- Evolution, B. P.-, (1971), undefined. (n.d.). Relationships between weedy and cultivated forms in some species of chili peppers (genus *Capsicum*). *JSTOR*. Retrieved from <https://www.jstor.org/stable/2406949>
- García-Galindo, H., Ortega-Martínez, J., García-Rosales, M., Martínez, C., & Beristáin, C. (1995). La capsaicina, el principio pungente del chile; su naturaleza, absorción, metabolismo y efectos farmacológicos. *Ciencia*, 46, 84–102.
- Handerburg, R. E., Watada, A. E., & Wang, C. Y. (1988). Commercial storage of fruits and vegetables and florists and nurseries stocks. *Investigación y Desarrollo (IICA)*. Retrieved from <http://agris.fao.org/agris-search/search.do?recordID=XL2012004833#.XafWw8Ru4ek.mendeley>
- Khovidhunkit, W., & Wittayalertpanya, S. (2009). Pharmacokinetic and The Effect of Capsaicin in *Capsicum frutescens* on Decreasing Plasma Glucose Level. In *Article in Journal of the Medical Association of Thailand = Chotmaihet thangphaet*. Retrieved from <https://www.researchgate.net/publication/24176349>
- Kraft, K. H., Brown, C. H., Nabhan, G. P., Luedeling, E., De Jesús Luna Ruiz, J., D'Eeckenbrugge, G. C., ... Gepts, P. (2014). Multiple lines of evidence for the origin of domesticated chili pepper, *Capsicum annuum*, in Mexico. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 111(17), 6165–6170. <https://doi.org/10.1073/pnas.1308933111>
- Latournerie, L., Chávez, J. L., Pérez, M., Castañón, G., Rodríguez, S. A., Arias, L. M., & Ramírez, P. (2002). Valoración in situ de la diversidad morfológica de chiles (*Capsicum annuum* L. y *Capsicum chinense* Jacq.) en Yaxcabá, Yucatán. *Fitotecnia Mexicana*, 25(1), 25–33.
- Lim, T. K., & Lim, T. K. (2013). *Capsicum baccatum* var. pendulum. In *Edible Medicinal And Non-Medicinal Plants* (pp. 197–204). https://doi.org/10.1007/978-94-007-5628-1_29
- Lim, T. K., & Lim, T. K. (2013). *Capsicum chinense*. In *Edible Medicinal And Non-Medicinal Plants* (pp. 205–212). https://doi.org/10.1007/978-94-007-5628-1_30
- Lim, T. K., & Lim, T. K. (2013). *Capsicum frutescens*. In *Edible Medicinal And Non-Medicinal Plants* (pp. 213–239). https://doi.org/10.1007/978-94-007-5628-1_31

- Lin, W. C., Hall, J. W., & Saltveit Jnr, M. E. (1993). Ripening stage affects the chilling sensitivity of greenhouse-grown peppers. *Journal of the American Society for Horticultural Science*, 118(6), 791–795. <https://doi.org/10.21273/jashs.118.6.791>
- Liu, S., Li, W., Wu, Y., Chen, C., & Lei, J. (2013). De Novo Transcriptome Assembly in Chili Pepper (*Capsicum frutescens*) to Identify Genes Involved in the Biosynthesis of Capsaicinoids. *PLoS ONE*, 8(1). <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0048156>
- López-López, Á., Espinoza-Santana, S., Ceceña-Duran, C., Ruiz-Alvarado, C., Núñez-Ramírez, F., & Araiza-Zúñiga, D. (2015). Biosíntesis, acumulación y efecto del ambiente sobre compuestos antioxidantes del fruto del cultivo de chile (*Capsicum* spp.)/ biosynthesis, accumulation and effect of the environment on antioxidant compounds in the fruit of pepper crop (*Capsicum* spp.). *Biotecnia*, 17(2), 50–57. Retrieved from <http://biotecnia.unison.mx/index.php/biotecnia/article/view/183/170>
- Luo, M., Purdy, H., & Avis, T. J. (2019). Compost bacteria provide antifungal activity against grey mold and *Alternaria* rot on bell pepper fruit. *Botany*, 97(3), 221–230. <https://doi.org/10.1139/cjb-2018-0180>
- Lurie, S., Ronen, R., & Aloni, B. (2019). Growth-regulator-induced Alleviation of Chilling Injury in Green and Red Bell Pepper Fruit during Storage. *HortScience*, 30(3), 558–559. <https://doi.org/10.21273/hortsci.30.3.558>
- Moreno, L. L., & Mendoza, H. V. (2011). Los chiles de México y su distribución. In *Revista fitotecnia mexicana* (Vol. 34).
- Naves, E. R., de Ávila Silva, L., Sulpice, R., Araújo, W. L., Nunes-Nesi, A., Peres, L. E. P., & Zsögön, A. (2019). Capsaicinoids: Pungency beyond *Capsicum*. *Trends in Plant Science*, Vol. 24, pp. 109–120. <https://doi.org/10.1016/j.tplants.2018.11.001>
- Pérez Castañeda, L. M., Castañón Nájera, G., & Mayek Pérez, N. (2008). Diversidad morfológica de chiles (*Capsicum* spp.) de Tabasco, México. *Cuadernos de Biodiversidad*, (27), 11–22. <https://doi.org/10.14198/cdbio.2008.27.02>
- Pérez-Castañeda, L. M., Castañón-Nájera, G., Ramírez-Meraz, M., & Mayek-Pérez, N. (2015). Avances y perspectivas sobre el estudio del origen y la diversidad genética de *Capsicum* spp. *Ecosistemas y Recursos Agropecuarios*, 2(4), 117–128. Retrieved from http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2007-90282015000100009&lng=es&nrm=iso&tlng=es
- Perry, L., Dickau, R., Zarrillo, S., Holst, I., Pearsall, D. M., Piperno, D. R., ... Zeidler, J. A. (2007). Starch fossils and the domestication and dispersal of

- chili peppers (*Capsicum* spp. L.) in the Americas. *Science*, 315(5814), 986–988. <https://doi.org/10.1126/science.1136914>
- Pickersgill, B. (2007). Domestication of plants in the Americas: Insights from Mendelian and molecular genetics. *Annals of Botany*, Vol. 100, pp. 925–940. <https://doi.org/10.1093/aob/mcm193>
- Pol, L. C., Siddiq, M., & Shahzad, T. (2018). Chili, peppers, and paprika. *Handbook of Vegetables and Vegetable Processing* (N. K. Sinha, Ed.). Blackwell Publishing Ltd.
- Riva Ruiz, R. (2019). Manual de cultivo de Ají Charapita (*Capsicum frutescens* L.) (1° edición; D. P. Quispe, Ed.). Universidad Nacional de Ucayali.
- Sanatombi, K., & Rajkumari, S. (2019). Effect of Processing on Quality of Pepper: A Review. *Food Reviews International*, 00(00), 1–18. <https://doi.org/10.1080/87559129.2019.1669161>
- Sánchez, E. H. (2016). Manual para la producción de chile manzano en el Valle del Mezquital, Hidalgo, (G. G. Brigido, Ed.). Tula de Allende, Hgo.
- Sánchez-Torres, P., Raigón, M. D., Gammoudi, N., & Gisbert, C. (2016). Effects of grafting combinations on the nutritional composition of pepper fruit. *Fruits*, 71(4), 249–256. <https://doi.org/10.1051/fruits/2016014>
- Tewksbury, J. J., Mancheng, C., Haak, D. C., & Levey, D. J. (2006). Where did the chili get its spice? Biogeography of capsaicinoid production in ancestral wild chili species. *Journal of Chemical Ecology*, 32(3), 547–564. <https://doi.org/10.1007/s10886-005-9017-4>
- Vázquez-Flota, F., Miranda-Ham, M. D. L., Monforte-González, M., Gutiérrez-Carbajal, G., Velázquez-García, C., & Nieto-Pelayo, Y. (2007). Biosynthesis of capsaicinoids, the pungent principle of peppers. *Revista Fitotecnica Mexicana*, 30 (4), 353–360.
- Yamamoto, S., Djarwaningsih, T., & Wiriadinata, H. (2013). *Capsicum pubescens* (Solanaceae) in Indonesia: Its History, Taxonomy, and Distribution. *Economic Botany*, 67(2), 161–170. <https://doi.org/10.1007/s12231-013-9230-y>
- Yáñez, P., Balseca, D., Rivadeneira, L., & Larenas, C. (2015). Características morfológicas y de concentración de capsaicina en cinco especies nativas del género *Capsicum* cultivadas en Ecuador. *Revista de Ciencias de La Vida*, 22(2), 12–32.
- Araceli, A. M., Morrell, P. L., Roose, M. L., & Kim, S. C. (2009). Genetic diversity and structure in semiwild and domesticated chiles (*Capsicum annum*; Solanaceae) from Mexico. *American Journal of Botany*, 96(6), 1190–1202. <https://doi.org/10.3732/ajb.0800155>
- Vázquez García, E., Ramírez Meraz, M., Mata Vázquez, H., Ariza Flores, R., & Alía Tejacal, I. (2010). Revista fitotecnica mexicana publicada por la Sociedad Mexicana de Fitogenética. In *Revista fitotecnica mexicana* (Vol.

33). Retrieved from
http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0187-73802010000500016&lng=es&nrm=iso&tlng=pt

4 ATRIBUTOS DE CALIDAD Y PROPIEDADES ANTIOXIDANTES DE LOS PIMIENTOS DE CHILE SERRANO (*Capsicum annuum* L.) AFECTADOS POR LAS CONDICIONES TÉRMICAS EN EL PERIODO POSTERIOR A LA COSECHA

4.1 Resumen

Las frutas del género *Capsicum* son ingredientes alimenticios comunes en muchos países, por lo que es importante preservar sus propiedades nutricionales. El objetivo de este estudio fue evaluar la modificación de los atributos de calidad y las propiedades antioxidantes del chile Serrano (*Capsicum annuum* L.) durante el periodo poscosecha en diferentes condiciones térmicas. Se implementó un periodo de almacenamiento de 33 días a 4, 8 y 25 ° C. Las frutas a 4 y 8 ° C mostraron los cambios más pequeños en la pérdida de peso, la textura y el ángulo de matiz, pero la atenuación se identificó en las semillas y tejidos de las frutas almacenadas a 4 ° C, lo que se asoció con una lesión por frío. Los fenoles solubles totales y la capsaicina aumentaron con el tiempo a 25 ° C, pero permanecieron sin cambios en las frutas almacenadas a 4 y 8 ° C. La capacidad antioxidante no se vio afectada por la maduración o la baja temperatura. El almacenamiento a 8 ° C permitió el mantenimiento de los chiles Serranos en condiciones óptimas durante todo el periodo posterior a la cosecha.

Palabras clave: *Capsicum annuum*, poscosecha, refrigeración, chile Serrano.

⁵Tesis de Doctorado en Ciencias Agroalimentarias, Programa de Posgrado en Ciencia y Tecnología Agroalimentaria, Universidad Autónoma Chapingo.

Autor: Francisco Daniel Miranda Molina.

Director: Salvador Valle Guadarrama, Dr.

Quality attributes and antioxidant properties of serrano chili pepper (*Capsicum annuum* L.) affected by thermal conditions in the postharvest period

4.2 Abstract

Fruits of the genus *Capsicum* are common food ingredients in many countries, so it is important to preserve their nutritional properties. The objective of this study was to evaluate the modification of the quality attributes and antioxidant properties of Serrano chili pepper (*Capsicum annuum* L.) during the postharvest period under different thermal conditions. A storage period of 33 d was implemented at 4, 8, and 25°C. Fruits of 4 and 8°C showed the smallest changes in weight loss, texture, and hue angle, but darkening was identified in the seeds and tissues of fruits stored at 4 °C, which was associated with chilling injury. Total soluble phenols and capsaicin increased with time at 25°C but remained unchanged in fruits stored at 4 and 8°C. The antioxidant capacity was not affected by ripening or by low temperature. Storage at 8 °C allowed for the maintenance of Serrano chili peppers at optimum conditions throughout the postharvest period.

Key words: *Capsicum annuum*, postharvest, refrigeration, Serrano chili pepper

⁶Thesis of Doctorado en Ciencias Agroalimentarias, Programa de Posgrado en Ciencia y Tecnología Agroalimentaria, Universidad Autónoma Chapingo.

Author: Francisco Daniel Miranda Molina.

Thesis Director: Salvador Valle Guadarrama, Dr.

4.3 Introduction

The genus *Capsicum* (Solanaceae) whose origin and domestication have been located in regions of Latin America (DeWitt and Bosland, 2014), produces fruit that are consumed in many countries either fresh, as a spice, in combination with other vegetables, in the form of salads or sauces (Kantar et al., 2016), or in processed foods (Toledo et al., 2016). The fruit of *Capsicum* spp. constitute an important source of vitamin C (Li et al., 2017), vitamin E, several minerals (Kantar et al., 2016) and phenolic compounds that confer high antioxidant potential (Ghasemnezhad et al., 2011; Loizzo et al., 2015; Sricharoen et al., 2017). Depending on maturity, these fruits may have a high carotenoid content (Avalos-Llano et al., 2018), and pungent species are rich in capsaicinoids (Sricharoen et al., 2017), which increase the antioxidant potential.

Among the different species, the cultivars of *Capsicum annuum* exhibit the highest antioxidant potential (Loizzo et al., 2015). The Serrano chili pepper (*C. annuum* L.) is one of the most preferred cultivars among those that are of the pungent type (Castellón-Martínez et al., 2012) and is also among those with the highest antioxidant potential due to its high content of capsaicinoids (González-Zamora et al., 2013), phenolic compounds (Alvarez et al., 2011) and ascorbic acid (Medina-Juárez et al., 2012). Serrano peppers are consumed mainly in their fresh and green stages (Vázquez-García et al., 2010), so their postharvest life has been defined as the time required for them to change from a green to red or orange tonality or the time required to lose their turgid consistency due to transpiration (Martínez Zambrano et al., 2005). Refrigeration in the range between 4 and 8°C has been used to maintain quality attributes in several types of pepper fruit (Martínez et al., 2005; Lim et al., 2007).

Refrigeration has been evaluated, even in combination with other technologies, such as biopolymer coatings (Xing *et al.*, 2011) or the application of substances such as methyl jasmonate (Wang *et al.*, 2019), to lengthen shelf life. However, it is necessary to know the specific resistance of a fruit to low temperatures because the sensitivity to chilling injury is unique to each cultivar (Smith *et al.*, 2006), and this has not been studied in Serrano chili peppers. The objective of this work was to evaluate the modification of the quality attributes and antioxidant properties of Serrano chili peppers (*Capsicum annuum* L.) during the postharvest period under different thermal conditions to provide information that allows for the improvement of their commercialization potential.

4.4 Materials and methods

4.4.1 Plant material

The experimental material consisted of 40 kg of Serrano chili peppers (*Capsicum annuum* L.) cv. Camino Real. Their physiological conditions corresponded to commercial maturity. Fruits were free of damage and had a length of 10 cm and a dark green color.

4.4.2 Experimental organization

Batches with 250 g of fruit were prepared. Three groups of 33 batches were formed and placed in storing rooms at 4 (± 2), 8 (± 2), and 25 (± 2) °C, denoted as T4, T8, and T25, with an average relative humidity (RH) of 88, 87, and 76%, respectively. Samples from each condition were taken every 72 h for 33 d to evaluate weight loss, color, firmness, titratable acidity, total soluble solids, content of total soluble phenols, antioxidant activity and capsaicin content. Additionally, fruit were visually inspected to identify symptoms of chilling injury in tissue. All measurements were made in triplicate.

4.4.3 Cumulative weight loss

Batches of fruit were weighed on day one and when they were removed from the storage. A scale (Ohaus, USA) with a precision of 0.01 g was used. The cumulative weight loss was evaluated based on the initial condition (AOAC 1994).

4.4.4 Color

Color was measured with a MiniScan XE Plus 45/OL colorimeter (Hunter Associates Laboratory Inc., USA) and was expressed as lightness (L^*), hue angle (H^*), and chroma (C^*).

4.4.5 Firmness

The pericarp firmness was measured with a texture analyzer (TA-TX2i, Stable Micro Systems, UK) using a 5 mm spherical probe with a compression routine based on a test speed of 2 mm/s and a deformation distance of 2 mm. Measurements were performed in the equatorial zone, and firmness was expressed in Newtons (N).

4.4.6 Total soluble solids

The total soluble solids (TSS), expressed as °Brix, were determined with a manual refractometer (Alla France ATC, France) with a 0-32% scale (AOAC 1994).

4.4.7 Acidity

Acidity was evaluated with 20 g of fruit that was macerated with 100 mL of deionized water and a titration using 0.1 N NaOH and phenolphthalein as the indicator (AOAC 1994). The results were reported as the percentage of citric acid (Avalos-Llano et al., 2018).

4.4.8 Total soluble phenols

To evaluate the content of total soluble phenols (TSPs), a 20 g sample of fruit was mixed with 125 mL of 80% methanol. The mixture was sonicated in a Cole-Parmer sonicator (Cole-Parmer Instrument Co., USA) for 30 min in the dark. Centrifugation was applied at 2000×g, and the supernatant was recovered. The solid residue was subjected to a similar second extraction, and the supernatants were pooled (Alvarez et al., 2011). The method of Singleton and Rossi (1965) was used for phenol analysis. Samples of 25 µL of extract were mixed with 20 µL of the Folin-Ciocalteu reagent, which was diluted at a 1:1 ratio from the commercial 2 N solution (Sigma-Aldrich, Co., Germany). The mixture was neutralized with 30 µL of 20% Na₂CO₃ (w/v) and 125 µL of distilled water. The treatments were placed in the dark for 30 min, and absorbance was read at 760 nm in a spectrophotometer (Synergy™ HTX, BioTek Instruments, Inc., USA). TSP quantification was based on a standard curve of gallic acid, and the results were expressed in mg equivalents of gallic acid per 100 g of fresh material (mg GAE/100 g).

4.4.9 Capsaicin content

The capsaicin content was evaluated in 1 g of tissue that was mixed with 12 mL of acetonitrile and placed in a water bath at 80 °C for 4 h, and agitation was applied every 30 min. The extract was cooled and passed through 0.45-µm membrane filters. Analysis with HPLC (PerkinElmer Series 200 HPLC Systems) was carried out using a Zorbax SB-C18 column (4.6×250 mm) with a particle size of 5 µm. The mobile phase consisted of a 73:27 methanol:water solution, and an isocratic separation was used with a flow rate of 1 mL/min (Contreras-Padilla et al., 1998). The quantification was based on a standard curve of capsaicin of 99% purity (Sigma-Aldrich, Co., Germany).

4.4.10 Antioxidant activity

The antioxidant activity was determined with the methods of FRAP (ferric reducing antioxidant power) (Benzie and Strain 1996) and ABTS (2,2'-azino-bis (3-ethylbenzothiazoline-6-sulfonic acid)) (Re et al., 1999). A 300 mM sodium acetate trihydrate buffer solution, pH 3.6, was prepared by mixing 20 mM ferric chloride hexahydrate with 10 mM 2,4,6-tris(2-pyridyl)-s-triazine (TPTZ) dissolved in 40 mM HCl. The solution was added to the samples, and the absorbance was read at 530 nm in a spectrophotometer (Synergy™ HTX, BioTek Instruments, Inc., USA). The results were expressed as μmol equivalents of Trolox per 100 g of fresh tissue ($\mu\text{mol TE}/100 \text{ g}$). To apply the second method, a solution of ABTS was prepared at a concentration of 7.4 mM, which was dissolved in a 2.6 mM sodium persulfate solution. The mixture was allowed to react for 16 h in darkness. Twenty microliters of the extract were mixed with 230 μL of the ABTS solution. The absorbance reduction was measured in a spectrophotometer (Synergy™ HTX, BioTek Instruments, Inc., USA) at 734 nm after 10 min. The results were expressed as μmol equivalent of Trolox per 100 g of fresh chili pepper ($\mu\text{mol TE}/100 \text{ g}$).

4.4.11 Data analysis

The experimental organization considered two variation sources: the temperature, with three levels (4, 8, and 25 °C) and the storage time with 11 evaluation points within 33 d. Thus, data were submitted to analysis of variance, considering a 3×11 factorial arrangement in a completely randomized design, and complemented with analyses to compare treatment means through the Tukey test, with a significance level of 0.05. All analyses were performed with the SAS program (SAS Institute Inc. 1999).

4.5 Results and discussion

4.5.1 Cumulative weight loss

Weight loss was affected by temperature and storage time, although the interaction between such factors was not significant (Table 6). The greatest weight loss occurred at 25 °C (T25) followed by 4 °C (T4), and finally by 8 °C (T8), with a significant difference ($p \leq 0.05$) between them (Figure 5A). The cumulative weight loss was practically linear in all cases, with rates of 1.77, 0.30, and 0.51%/d at 25, 8, and 4°C, respectively. The weight loss during storage was significant ($p \leq 0.05$) under the three conditions, but only at 25°C was it accompanied by an appearance of wilt (data not shown).

The loss of mass was mainly caused by transpiration induced by a vapor pressure deficit between the internal tissue and the environment, and it is a common characteristic of horticultural products handled in postharvest (Hübert and Lang, 2012). In the case of *Capsicum* spp., water loss, in addition to chilling injury, is a factor that limits the shelf life of fruit (Avalos-Llano et al., 2018). The higher transpiration rate at 25°C can be explained, both by the higher thermal condition and by the lower RH of the storage room (76%) than those of the other storage conditions. In contrast, the relatively low weight losses of T4 and T8 were caused by the higher RH (87-88%) than that of T25 and because a low temperature reduces the rate of transpiration (Hübert and Lang, 2012). During the first two weeks, the tendency of weight loss was similar between T4 and T8; however, after day 15, fruit of T4 showed an increase in the rate of weight loss (Figure 5A), which suggested a modification in the physical structure of plant material that might be associated with low temperatures.

The exposure of sweet peppers to very low temperatures can cause an increase in weight loss by transpiration due to the leakage of electrolytes in the tissue caused by chilling injury (Lim et al., 2007; Xing et al., 2011), and a similar situation could occur with Serrano chili peppers. The most common visible symptom associated with low-temperature stress is the loss of water associated with an alteration in the structure of cell membranes, which is indicative of chilling injury (Korkmaz et al., 2010; Wang et al., 2019).

Table 6. Percentile values of the Fisher distribution ($F_{0.05}$) and F values corresponding to the analysis of variance of the postharvest behavior of Serrano chili peppers (*Capsicum annuum* L.) stored at 4 °C, 8 °C and 25 °C for 33 d.

Variable	Variation factor				VC (%)
	Temperature	Time	Temp×Time	Error	
df	2	10	20	66	
$F_{0.05}$	3.14	1.98	1.74		
Physiological variables					
Weight loss	24.26*	3.13*	1.28 ns		15.76
Lightness	18.25*	0.91*	2.95*		6.06
Chroma	0.60*	1.08*	6.33*		8.03
Hue angle	129.29*	24.42*	24.35*		7.03
Firmness	204.44*	17.56*	0.92 ns		26.03
Chemical variables					
TSS	1.1ns	2.22*	8.64*		7.47
TA	1.51ns	0.61ns	10.00*		10.9
TSP	6.81*	13.09*	1.84*		12.31
Capsaicin	1.15ns	0.6ns	2.92*		41.97
AA (FRAP)	2.05ns	3.72*	1.18ns		36.52
AA (ABTS)	1.80ns	3.06*	1.14ns		20.63

^zTemperature: variation factor given by the storage temperature (4 °C, 8 °C, and 25 °C), ^y Time: variation factor given by the storage time (11 sampling points), ^xTemp×Time: interaction between variation factors, df: degrees of freedom, ^w VC: variation coefficient, L*: lightness, C*: chroma, Hue: hue angle, ^v TSS: total soluble solids, ^u TA: titratable acidity, ^tTSP: total soluble phenols, ^sAA: antioxidant activity. The symbol * indicates that at least one level within the variation factor produced a different effect in relation to the rest (Tukey, $\alpha_{0.05}$). The ns symbol indicates a nonsignificant effect (Tukey, 0.05) between levels within the variation factor.

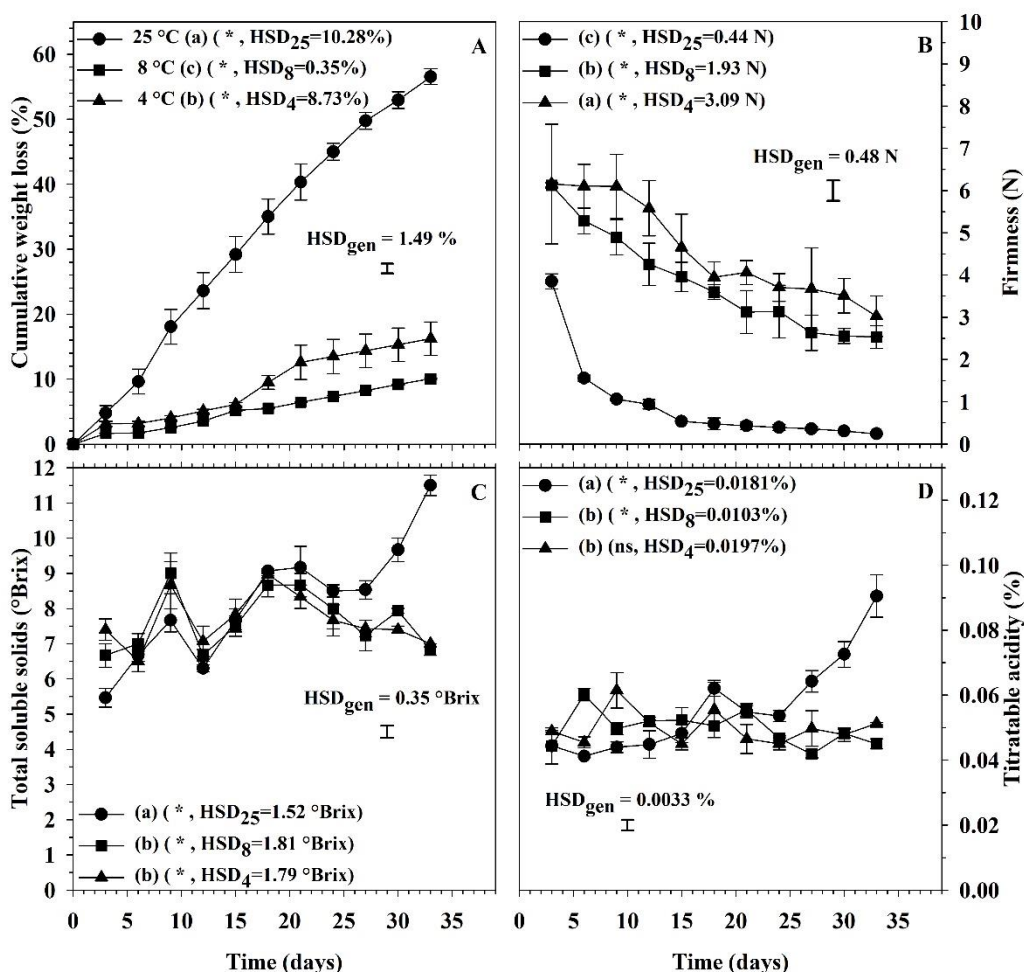


Figure 5. Modification of cumulative weight loss (A), firmness (B), total soluble solids (C), and acidity (D) in Serrano chili peppers stored at 4, 8, and 25 °C for 33 d in postharvest. Symbols correspond to the average of three repeated measurements. Error bars indicate standard error. HSD_{gen} is a general honest significant difference (Tukey, 0.05) and applies to the comparison of means between temperatures. HSD₄, HSD₈, and HSD₂₅ are honest significant differences, which apply to the comparison of means within each temperature group. Different letters indicate significant differences between temperatures. Symbols ns and * indicate nonsignificant and significant variation, respectively, of parameters within each temperature group.

4.5.2 Color

The hue angle (H*) of the Serrano chili peppers was also affected by the thermal conditions and storage time ($P \leq 0.05$), and in this case, the interaction between these factors was significant (Table 5). H* was approximately 178.9° during the first 21 d, without a significant difference between temperatures ($P > 0.05$, Figure

6A), which was characteristic of the green color of immature Serrano chili peppers (Martínez Zambrano et al., 2005). However, after 21 d, fruit of the T25 group experienced a significant change ($P \leq 0.05$) in H^* , reaching $37.3^\circ (\pm 1.9^\circ)$ at the end of 33 d of storage, which characterized the transition to the typical red-orange tones of mature fruit (Martínez Zambrano et al., 2005). Moreover, at T4 and T8, the hue angle of the fruit remained approximately constant, with values of $178.82^\circ (\pm 0.05^\circ)$ during the whole period, with no difference between both conditions ($P > 0.05$).

Similarly, lightness (L^*) was affected by the temperature modification (Table 6), with observed significant differences between the three thermal conditions ($P \leq 0.05$, Figure 6B). The highest values were observed at 25°C , which varied between 39.80 and 48.05%, followed by the material handled at 4°C , with variation between 35.51 and 43.27%, and, finally, by fruit stored at 8°C , whose lightness varied between 33.83 and 39.07%, which indicated that refrigeration caused a reduction in such attributes. The storage duration caused different effects under different thermal conditions, and the temperature $\times$ time interaction was significant ($P \leq 0.05$, Table 6). Only storage at 25°C showed significant fluctuations of L^* , which occurred in the last stage of storage-coinciding with the modification of H^* , although a clear trend was not confirmed.

Chroma (C^*) presented a similar behavior since the highest values were observed at 25°C ($P \leq 0.05$), with fluctuations between 32.64 and 52.08, followed by that of the fruit stored at 8°C , which varied between 33.50 and 43.47, and, finally, by that of the fruit stored at 4°C , whose variation was between 31.88 and 40.93. Although there were fluctuations in C^* throughout storage, the change at the end was important only at 25°C ($P \leq 0.05$) (Figure 6C), coinciding again with the transition from green to orange-red tonality. The fruit of Serrano chili pepper is consumed more frequently in the green state (Vázquez-García et al., 2010), and shelf life is determined by the time required to modify the hue angle towards a red-orange appearance (Martínez Zambrano et al., 2005). The observed behavior indicated that refrigeration at 4 or 8°C constitutes an adequate alternative to maintain color

attributes without major modifications during 33 d postharvest. However, the condition of 25°C favored ripening, causing the modification of hue angle from day 21 and the increase of lightness and chroma.

The storage at 4°C caused darkening in the seeds and internal tissue of fruit in the later stage of storage, which did not occur with the other two thermal conditions and suggested the possible presence of chilling injury at the lowest temperature (Figure 7). The use of low temperatures can affect the fruit quality of *Capsicum* spp., and the darkening of seeds is a symptom associated with chilling injury (Boonsiri et al., 2007; Valenzuela et al., 2017). Xing et al. (2011) showed that storage at 8°C caused considerable decay in sweet peppers. However, Lim et al. (2007) did not observe adverse symptoms from low-temperature storage, even with exposure to 5°C.

Smith et al. (2006) showed that the sensitivity to chilling injury depends on the cultivar, and the data of the present work showed that exposure to 8°C did not cause chilling injury in Serrano chili peppers, but the use of 4°C induced symptoms that might be related to such a physiological disorder. In general, chilling injury affects the commercialization ability of fruit and must be avoided. Xing et al. (2011) reported losses of 40 and 60% sensory acceptability in sweet peppers after 14 and 21 d of storage at 8°C, respectively. In addition, color is a quality indicator in seed production (Tu et al., 2018), so darkening caused by chilling injury directly affects this industry.

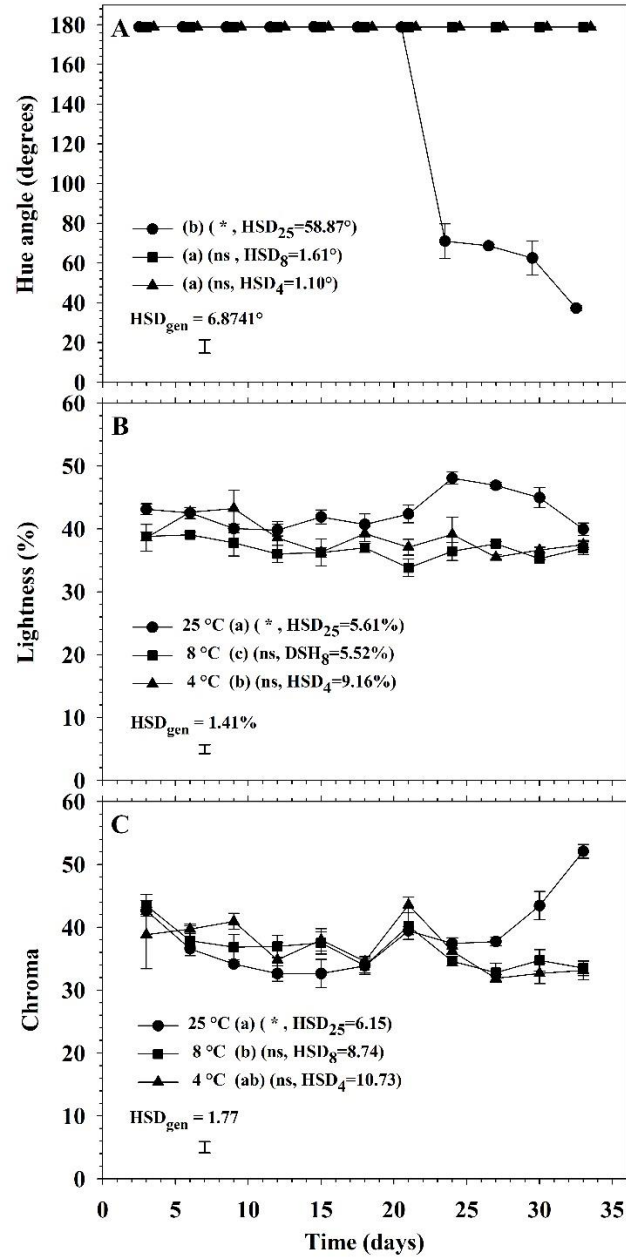


Figure 6. Variation of lightness (A), chroma (B), and hue angle (C) in Serrano chili peppers stored at 4, 8, and 25°C for 33 d in postharvest. Notation has the same meaning as outline in Figure 5.



Figure 7. A: Serrano chili peppers without the presence of chilling injury (A). B: Serrano chili peppers stored at 4°C with symptoms of chilling injury (darkening of seeds and surrounding tissue) (B).

4.5.3 Firmness

The firmness of fruit was affected both by the variation of the thermal condition and by the storage time (Table 6). Firmness was approximately 6.1 N at the beginning and decreased significantly in fruit under all three thermal conditions ($P \leq 0.05$). The greatest change occurred in fruit stored at 25°C, followed by that of fruit stored at 8°C, and, finally, by that of those stored at 4°C (Figure 5B). Loss of firmness is a common feature in horticultural products that are handled fresh in postharvest and can be caused by the loss of water by transpiration, which induces reduction of cellular turgor, or by degradation of the cell wall polymers (Smith et al., 2003). Tsegay et al. (2013) showed that the firmness of sweet peppers (*Capsicum annuum*) decreased 26.7% throughout a ripening process under refrigeration.

Likewise, Rao et al. (2011) showed that the modification of firmness is related to enzymes such as polygalacturonase (PG), pectin-methyl esterase (PME), cellulase, and β -galactosidase. According to Rao et al. (2011), PG and PME activities increase with temperature. However, based on the observed cumulative weight loss under the three thermal conditions, it was accepted that the loss of firmness was a combined effect of both the degradation of polymeric compounds in cell walls and the loss of turgor caused by transpiration, which manifested to a greater extent in fruit stored at 25°C than in those stored at 8°C. This behavior

was expected since the higher the temperature, the higher the metabolic process rates (Nunes and Emond 2003).

4.5.4 Total soluble solids and titratable acidity

The total soluble solids (TSS) remained unaffected by temperature modification during the first 25 d of storage, but from that point, the material stored at 25°C experienced a considerable increase in this variable and became the group with the highest TSS value ($P \leq 0.05$, Figure 5C). Significant variation was identified in all the cases, but no clear trend was observed in the groups stored at 4 and 8°C, where TSS varied between 6.50 and 8.97 and between 6.67 and 9.00 °Brix, respectively.

These values were similar to those reported by Rao et al. (2011) for sweet peppers. In the case of 25°C, the increasing trend from 5.4 to 11.50 °Brix could be associated with the continuous weight loss that caused a concentration of soluble compounds; additionally, the fact that the fruit went through a ripening process evidenced by a change in color, the increase in TSS may be a characteristic feature of ripening, similar to that which occurs with other fruit of the genus *Capsicum* (Castro et al., 2008; Ghasemnezhad et al., 2011).

The acidity content showed a similar behavior, without a significant difference between fruit stored at all three temperatures during the first 25 d, with values between 0.04 and 0.06%, without a clear trend; thereafter, the material stored at 25°C experienced a significant increase in acidity, reaching values of 0.09% (**Figure 5D**), which could also be a consequence of both ripening (Ghasemnezhad et al., 2011) and weight loss. Castro et al. (2008) reported an increase in acidity of 2.5 times during the ripening of sweet peppers due to an increase in the concentration of organic acids. Ghasemnezhad et al. (2011) explained that as fruit ripen, the concentrations of organic acids involved in the Krebs cycle increase. The acidity found in Serrano chili peppers was similar to those reported in habanero chili peppers, according to Kantar et al. (2016).

4.5.5 Total soluble phenols

Total soluble phenols (TSP) in the peppers varied in the ranges of 84.81-150.72, 74.84-136.17, and 80.33-136.53 mg GAE/100 g when stored at 4, 8, and 25°C, respectively, with significant influence from temperature and storage time ($P \leq 0.05$; Table 6), despite exhibiting differences that did not have practical importance nor a clear trend of change during storage (Figure 8A). These results coincided with those reported in the range of 90-120 mg GAE/100 g for sweet peppers by Ghasemnezhad *et al.* (2011), but Alvarez *et al.* (20e1) reported a TSP content of 1032 mg GAE/100 g in Serrano chili peppers, but the difference is that these authors used a dry basis to express results, while the data of the present work are reported on a wet basis.

According to Ghasemnezhad *et al.* (2011), the TSP content showed a decrease with ripening in sweet pepper fruit; however, this behavior was not observed in the present work, where Serrano chili peppers were used, which suggested that the compositional behavior may be affected by the cultivar. The fruit stored at 4°C showed darkening in the seeds and in the tissue around them. This was interpreted as a chilling injury symptom since it is a behavior previously reported for fruit of the genus *Capsicum* (Valenzuela *et al.*, 2017). It is common that in fruit where this physiological disorder causes darkening, the content of phenolic compounds decreases (Gao *et al.*, 2016), but this did not occur in the present work. Boonsiri *et al.* (2007) found that severe darkening in the pungent fruit seeds of *C. annuum* correlated with visible cell damage, electrolyte leakage, high activity of the polyphenol oxidase enzyme and the initial levels of free phenol. The absence of a clear variation trend in TSP in the material of the present work suggested that the damage was slight and only the beginning of chilling injury.

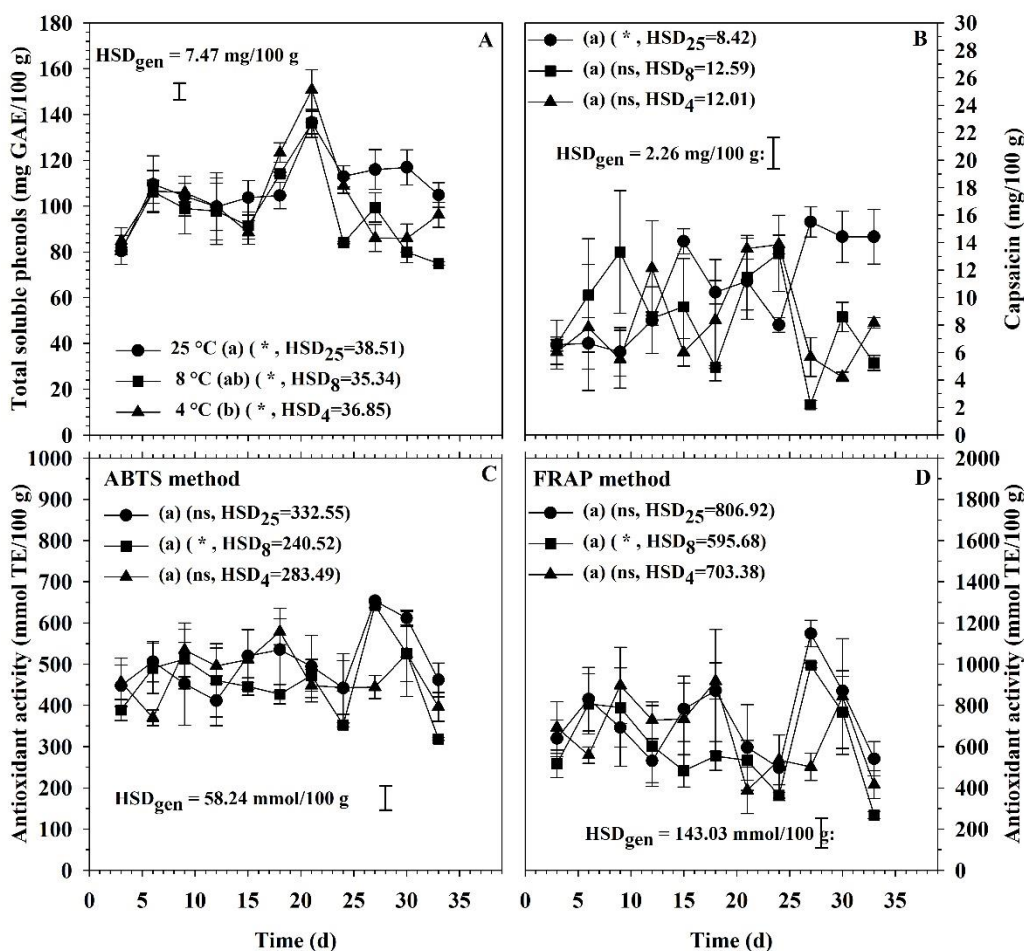


Figure 8. Modification of the content of total soluble phenols (A), capsaicin content (B), antioxidant activity evaluated by the ABTS method (C) and antioxidant activity evaluated by the FRAP (D) method in Serrano chili fruit stored at 4, 8, and 25°C for 33 d in postharvest. Notation has the same meaning as outlined in Figure 5.

4.5.6 Capsaicin

The pungency of hot peppers is attributed to capsaicinoids, whose major components are capsaicin and dihydrocapsaicin (Domínguez-Cañedo et al., 2015). The capsaicin content was not affected by the temperature variation (Table 6). With regard to time, large fluctuations occurred between 4.2 and 15.5 mg/100 g during storage, with similar ranges under the three conditions, which was similar to the report of Alvarez et al. (2011) for Serrano chili peppers. The capsaicin content can remain constant (Li et al., 2017) or can experience modification with development (Ornelas-Paz et al., 2010). In the present work, the capsaicin

content increased only in peppers stored at 25°C (Figure 8B). However, since Ornelas-Paz et al. (2010) reported that in green-stage Serrano chili peppers, the compound concentration was higher than that found in the red stage, it is believed that the observed behavior was due to a concentration phenomenon derived from weight loss. The fruit stored at 4°C showed no tendency in capsaicin variation. However, Patel et al. (2019) found a reduction in capsaicin concentration during the storage of green peppers handled at 4°C for 40 d, which suggests that the affection by low temperature may depend on the cultivar. Alvarez et al. (2011) mentioned that the variability of capsaicin content may be due to maturity state, cultivar and the pre and postharvest conditions to which fruit are subjected.

4.5.7 Antioxidant activity

The antioxidant activity (AA) was evaluated using the ABTS and FRAP methods. Both assays indicated that the temperature did not affect this property in Serrano chili peppers. Only at 8°C were significant differences observed between some days during storage, but without a clear trend (Table 6, Figure 8C y 8D), which suggests that there was natural variability between samples. The ABTS method reported AA between 318.7 and 653.5 $\mu\text{mol TE}/100\text{ g}$, while values of the FRAP method were between 267.9 and 1148.7 $\mu\text{mol TE}/100\text{ g}$. The ABTS method is based on evaluation of electron transfer, while the FRAP method is based on hydrogen atom transfer (Apak et al., 2016), which explains the differences in the observed results.

Alvarez et al. (2011) reported an antioxidant activity value of 4103 $\mu\text{mol TE}/100\text{ g}$, and this difference is again due to the dry weight basis used by these authors. On the other hand, data of the fruit stored at 4 and 25°C showed that there was no significant effect of the storage time. In the first case, there could have been chilling injury; in the second case, fruit underwent ripening, but the results suggest that neither of these phenomena affected the AA in Serrano chili peppers. According to Sricharoen et al. (2017), the AA of *Capsicum* spp. is determined mainly by TSP since they constitute the majority of substances that contribute to this characteristic, which is consistent with data from the present work for Serrano

chili peppers since a TSP/capsaicin ratio of 11.3/1.0 was found. However, the presence of capsaicin allows for pungent fruit to have greater antioxidant activity than nonpungent fruit.

4.6 Conclusions

The storage temperature significantly affected the quality attributes and the antioxidant properties of Serrano chili peppers. The condition of 25°C favored weight loss, softening, and transition through a ripening process. The 4°C condition caused symptoms associated with chilling injury, manifested as seed and tissue darkening. Storage at 8°C maintained the best characteristics in the fruit during the postharvest period without the presence of chilling injury symptoms. The content of total soluble phenols, capsaicin content, and antioxidant capacity were not affected by the thermal condition or storage time.

4.7 References

- Alvarez-Parrilla, E., De La Rosa, L. A., Amarowicz, R. and Shahidi, F. 2011. Antioxidant activity of fresh and processed Jalapeño and Serrano peppers. *Journal of Agricultural and Food Chemistry* 59: 163–173. Doi: 10.1021/jf103434u
- AOAC. 1994. *Official Methods and Analysis*. 14th ed. Airlington, VA, USA: Association of Official Analytical Chemists.
- Apak, R., Özyürek, M., Güçlü, K. and Çapanoğlu, E. 2016. Antioxidant activity/capacity measurement. 1. Classification, physicochemical principles, mechanisms, and electron transfer (ET)-based assays. *Journal of Agricultural and Food Chemistry* 64: 997–1027. Doi: 10.1021/acs.jafc.5b04739
- Avalos-Llano, K. R., Sgroppo, S. C. and Chaves, A. R. 2018. Changes in quality parameters, antioxidant compounds and enzymes of phenolic metabolism of hot water-treated organic ‘cherry’ peppers. *International Food Research Journal* 25(4): 1633-1641. <http://www.ifrj.upm.edu.my>
- Benzie, I. F. and Strain, J. J. 1996. The ferric reducing ability of plasma (FRAP) as a measure of “antioxidant power”: the FRAP assay. *Analytical Biochemistry* 239: 70-76. Doi: 10.1006/abio.1996.0292
- Boonsiri, K., Ketsa, S. and van Doorn, W. G. 2007. Seed browning of hot peppers during low temperature storage. *Postharvest Biology and Technology* 45: 358-365. Doi: 10.1016/j.postharvbio.2007.03.014

- Castellón-Martínez, E., Chávez-Servia, J. L., Carrillo-Rodríguez, J. C. and Vera-Guzman, A. M. 2012. Consumption preferences of pepper (*Capsicum annuum* L.) landraces in the Central Valleys of Oaxaca, México. *Revista Fitotecnia Mexicana* 35 (Especial 5): 27-35. https://www.revistafitotecniamexicana.org/documentos/35-3_Especial_5/5r.pdf
- Castro, S. M., Saraiva, J. A., Lopes-da-Silva, J. A., Delgadillo, I., Van Loey, A., Smout, C. and Hendrickx, M. 2008. Effect of thermal blanching and of high pressure treatments on sweet green and red bell pepper fruits (*Capsicum annuum* L.). *Food Chemistry* 107: 1436-1449. Doi: 10.1016/j.foodchem.2007.09.074
- Contreras-Padilla, M. and Yahia, E. M. 1998. Changes in capsaicinoids during development, maturation, and senescence of chile peppers and relation with peroxidase activity. *Journal of Agricultural and Food Chemistry* 46: 2075-2079. Doi: 10.1021/jf970972z
- DeWitt, D. and Bosland, P. W. 2014. The complete chile pepper book. Portland, Oregon: Timber Press.
- Domínguez-Cañedo, I. L., Beristain-Guevara, C. I., Díaz-Sobac, R. and Vázquez-Luna, A. 2015. Degradation of carotenoids and capsaicin in the molecular inclusion complex of habanero chili oleoresin (*Capsicum chinense*) in β -cyclodextrin. *CyTA – Journal of Food* 13: 151–158. Doi: 10.1080/19476337.2014.926459
- Gao, H., Zhang, Z. K., Lv, X. G., Cheng, N., Peng, B. Z. and Cao, W. 2016. Effect of 24-epibrassinolide on chilling injury of peach fruit in relation to phenolic and proline metabolisms. *Postharvest Biology and Technology* 111: 390–397. Doi: 10.1016/j.postharvbio.2015.07.031
- Ghasemnezhad, M., Sherafati, M. and Payvast G. A. 2011. Variation in phenolic compounds, ascorbic acid and antioxidant activity of five coloured bell pepper (*Capsicum annuum*) fruits at two different harvest times. *Journal of Functional Foods* 3: 44-49. Doi: 10.1016/j.jff.2011.02.002
- González-Zamora, A., Sierra-Campos, E., Luna-Ortega, J. G., Pérez-Morales, R., Rodríguez Ortiz, J. C. and García-Hernández, J. L. 2013. Characterization of different *Capsicum* varieties by evaluation of their capsaicinoids content by high performance liquid chromatography, determination of pungency and effect of high temperature. *Molecules* 18: 13471-13486. Doi: 10.3390/molecules181113471
- Hübert, T. and Lang, C. 2012. Artificial fruit: postharvest online monitoring of agricultural food by measuring humidity and temperature. *International Journal of Thermophysics* 33: 1606–1615. Doi: 10.1007/s10765-011-1101-0

- Kantar, M. B., Anderson, J. E., Lucht, S. A., Mercer, K., Bernau, V., Case, K. A., Le, N. C., Frederiksen, M. K., DeKeyser, H. C., Wong, Z. Z., Hastings, J. C. and Baumler, D. J. 2016. Vitamin variation in *Capsicum* spp. provides opportunities to improve nutritional value of human diets. Plos One 11, e0161464: 1-12. Doi: 10.1371/journal.pone.0161464
- Korkmaz, A., Korkmaz, Y. and Demirkiran, A. R. 2010. Enhancing chilling stress tolerance of pepper seedlings by exogenous application of 5-aminolevulinic acid. Environmental and Experimental Botany 67: 495–501. Doi: 10.1016/j.envexpbot.2009.07.009
- Li, D., Long, H. Y., Zhang, S. X., Wu, X. P., Shao, H. Y. and Wang, P. 2017. Effect of continuous negative pressure water supply on the growth, development and physiological mechanism of *Capsicum annuum* L. Journal of Integrative Agriculture 16: 1978–1989. Doi: 10.1016/S2095-3119(16)61572-1
- Lim, C. S., Kang, S. M., Cho, J. L., Gross, K. C. and Woolf, A. B. 2007. Bell pepper (*Capsicum annuum* L.) fruits are susceptible to chilling injury at the breaker stage of ripeness. HortScience 42: 1659-1664. Doi: 10.21273/HORTSCI.42.7.1659
- Loizzo, M. R., Pugliese, A., Bonesi, M., Menichini, F. and Tundis, R. 2015. Evaluation of chemical profile and antioxidant activity of twenty cultivars from *Capsicum annuum*, *Capsicum baccatum*, *Capsicum chacoense* and *Capsicum chinense*: A comparison between fresh and processed peppers. LWT - Food Science and Technology 64: 623-631. Doi: 10.1016/j.lwt.2015.06.042
- Martínez Zambrano, G., Dorantes González, J. R. A., Ramírez Meraz, M., de la Rosa Loera, A. and Pozo Campodónico, O. 2005. Genetic effects and heterosis of shelf life in Serrano hot pepper. Revista Fitotecnia Mexicana 28: 327–332. <https://www.revistafitotecniamexicana.org/documentos/28-4/4a.pdf>
- Martínez, S., López, M., González-Raurich, M. and Bernardo Álvarez, A. 2005. The effects of ripening stage and processing systems on vitamin C content in sweet peppers (*Capsicum annuum* L.). International Journal of Food Sciences and Nutrition 56: 45-51. Doi: 10.1080/09637480500081936
- Medina-Juárez, L. A., Molina-Quijada, D. M. A., Del Toro-Sánchez, C. L., González-Aguilar, G. A. and Gámez-Meza, N. 2012. Antioxidant activity of peppers (*Capsicum annuum* L.) extracts and characterization of their phenolic constituents. Interciencia 37: 588-593. <https://www.interciencia.net/>
- Nunes, M. C. N. and Emond, J. P. 2003. Storage temperature. In Bartz, J. A. and Brecht, J. K. (Eds). Postharvest Physiology and Pathology of Vegetables. Second Edition, p. 209-228. Gainesville, FL: University of Florida.

- Ornelas-Paz, J. J., Martínez-Burrola, J. M., Ruiz-Cruz, S., Santana-Rodríguez, V., Ibarra-Junquera, V., Olivas, G. I. and Pérez-Martínez, J. D. 2010. Effect of cooking on the capsaicinoids and phenolics contents of Mexican peppers. *Food Chemistry* 119: 1619-1625. Doi: 10.1016/j.foodchem.2009.09.054
- Patel, N., Gantait, S. and Panigrahi, J. 2019. Extension of postharvest shelf-life in green bell pepper (*Capsicum annuum* L.) using exogenous application of polyamines (spermidine and putrescine). *Food Chemistry* 275: 681–687. Doi: 10.1016/j.foodchem.2018.09.154
- Rao, T. V. R., Gol, N. B. and Shah, K. K. 2011. Effect of postharvest treatments and storage temperatures on the quality and shelf life of sweet pepper (*Capsicum annum* L.). *Scientia Horticulturae* 132: 18-26. Doi: 10.1016/j.scienta.2011.09.032
- Re, R., Pellegrini N., Proteggente, A., Pannala, A., Yang, M. and Rice-Evans, C. 1999. Antioxidant activity applying an improved ABTS radical cation decolorization assay. *Free Radical Biology Medicine* 26: 1231-1237. Doi: 10.1016/S0891-5849(98)00315-3
- SAS Institute, Inc. 1999. SAS/STAT® User's Guide, Version 8. Cary, NC, SAS Institute Inc.
- Singleton, V. L. and Rossi, J. A. 1965. Colorimetry of total phenolics with phosphomolybdic-phosphotungstic acid reagents. *American Journal of Enology and Viticulture* 16: 144-158. <http://www.ajevonline.org/content/ajev/16/3/144.full.pdf>
- Smith, A. C., Waldron, K. W., Maness, N. and Perkins-Veazie, P. 2003. Vegetable texture: measurement and structural implications. In Bartz, J. A. and Brecht, J. K. (Eds). *Postharvest Physiology and Pathology of Vegetables*. Second Edition, p. 297-329. Gainesville, FL: University of Florida.
- Smith, D. L., Stommel, J. R., Fung, R. W. M., Wang, C. Y. and Whitaker, B. D. 2006. Influence of cultivar and harvest method on postharvest storage quality of pepper (*Capsicum annuum* L.) fruit. *Postharvest Biology and Technology* 42: 243–247. Doi: 10.1016/j.postharvbio.2006.06.013
- Sricharoen, P., Lamaiphan, N., Patthawaro, P., Limchoowong, N., Techawongstien, S. and Chanthai S. 2017. Phytochemicals in Capsicum oleoresin from different varieties of hot chilli peppers with their antidiabetic and antioxidant activities due to some phenolic compounds. *Ultrasonics Sonochemistry* 38: 629–639. Doi: 10.1016/j.ultsonch.2016.08.018
- Toledo-Aguilar, R., López-Sánchez, H, López, P. A., Guerrero-Rodríguez, J. D., Santacruz-Varela, A. and Huerta-de la Peña, A. 2016. Morphological diversity of native population's poblano pepper. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas* 7: 1005-1015. <http://www.scielo.org.mx/pdf/remexca/v7n5/2007-0934-remexca-7-05-1005.pdf>

- Tsegay, D., Tesfaye, B., Mohammed, A., Yirga, H. and Bayleyegn, A. 2013. Effects of harvesting stage and storage duration on postharvest quality and shelf life of sweet bell pepper (*Capsicum annuum* L.) varieties under passive refrigeration system. International Journal for Biotechnology and Molecular Biology Research 4: 98-104. Doi: 10.5897/IJBMBR2013.0154
- Tu, K. L., Li, L. J., Yang, L. M., Wang, J. H. and Sun, Q. 2018. Selection for high quality pepper seeds by machine vision and classifiers. Journal of Integrative Agriculture 17: 1999–2006. Doi: 10.1016/S2095-3119(18)62031-3
- Valenzuela, J. L., Manzano, S., Palma, F., Carvajal, F., Garrido, D. and Jamilena, M. 2017. Oxidative stress associated with chilling injury in immature fruit: postharvest technological and biotechnological solutions. International Journal of Molecular Science 18: 1467, 1-26. Doi:10.3390/ijms18071467
- Vázquez García, E., Ramírez Meraz, M., Mata Vázquez, H., Ariza Flores, R. and Alia Tejacal, I. 2010. Fruit quality attributes and shelf life of Serrano pepper cultivars in México. Revista Fitotecnia Mexicana 33 (Especial 4): 79–82. <https://www.revistafitotecniamexicana.org/documentos/33-3%20Especial%204/14r.pdf>
- Wang, Y., Gao, L., Wang, Q. and Zuo, J. 2019. Low temperature conditioning combined with methyl jasmonate can reduce chilling injury in bell pepper. Scientia Horticulturae 243: 434-439. Doi: 10.1016/j.scienta.2018.08.031
- Xing, Y., Li, X., Xu, Q., Yun, J., Lu, Y. and Tang, Y. 2011. Effects of chitosan coating enriched with cinnamon oil on qualitative properties of sweet pepper (*Capsicum annuum* L.). Food Chemistry 124: 1443–1450. Doi: 10.1016/j.foodchem.2010.07.105

5 USO DE ELICITORES PARA PREVENIR DAÑO POR FRÍO EN FRUTOS DE CHILE SERRANO (*Capsicum annuum* L.)

5.1 Resumen

El chile Serrano (*Capsicum annuum* L.) es un fruto perecedero por su alto contenido de agua. El almacenamiento a bajas temperaturas es el método más utilizado para su conservación; sin embargo, los frutos de chile son sensibles al daño por frío (DPF), particularmente cuando se almacenan a temperaturas menores a 7 °C. El objetivo de este estudio fue evaluar los cambios en los atributos de calidad del chile Serrano durante el periodo poscosecha bajo diferentes temperaturas de almacenamiento y la combinación de dos elicitors como tratamientos preventivos de daño por frío. Frutos de chile Serrano fueron tratados individualmente con dos elicitors durante el periodo de desarrollo de los frutos, jasmonato de metilo (MeJa) y ácido salicílico (AS), en tres concentraciones, 25, 50 y 100 ppm y 50, 100 y 200 ppm, respectivamente, y se almacenaron durante 30 d a 4, 8 y 25 °C. Los frutos almacenados a 4 y 8 °C mostraron menos porcentaje de pérdida de peso, cambio de textura y el ángulo de matiz, manteniendo un color verde al final del almacenamiento. Se produjo un mayor porcentaje de fuga de electrolitos en los tratamientos a 4 °C, con síntomas de ablandamiento de la superficie y oscurecimiento interno de semillas, asociados con daño por frío. El contenido de fenoles, capsaicina y actividad antioxidante fue mayor en los frutos tratados con MeJa que en los tratados con AS, para las tres temperaturas de almacenamiento. El almacenamiento a 8 °C permitió mantener los chiles Serranos en condiciones óptimas durante todo el periodo posterior a la cosecha.

Palabras clave: *Capsicum annuum*, metil jasmonato, poscosecha, refrigeración.

⁷ Tesis de Doctorado en Ciencias Agroalimentarias, Programa de Posgrado en Ciencia y Tecnología Agroalimentaria, Universidad Autónoma Chapingo.

Autor: Francisco Daniel Miranda Molina.

Director: Salvador Valle Guadarrama, Dr.

Use of elicitors to prevent chilling injury in serrano chilli peppers (*Capsicum annuum* L.)

5.2 Abstract

Serrano chilli pepper (*Capsicum annuum* L.) is a highly perishable fruit due to its highwater content. The handling at low temperature is the most used conservation method; however, chili fruit are sensitive to chilling injury (CI) when are stored at temperatures below 7 °C. The objective of this work was to evaluate the changes on the quality attributes of Serrano pepper during the postharvest period under different storage temperatures and the use of elicitors to prevent chilling injury. Serrano chilli pepper fruit were individually treated with two elicitors, methyl jasmonate (MeJa) and salicylic acid (AS) at three different concentrations, 25, 50, and 100 ppm in the first case, and 50, 100, and 200 ppm, respectively, in the second, and they were stored for 30 d at 4, 8, and 25 °C. Fruit stored at 4 and 8 °C showed less percentage of weight loss, changes in texture and hue angle, maintaining a green color at the end of storage. Higher percentage of electrolyte leakage in treatments at 4 °C occurred, as well as symptoms of surface softening and internal browning of seeds, associated to chilling injury. Soluble phenols, capsaicin, and antioxidant activity content were higher in fruit treated with MeJa than those treated with AS at the three storage temperatures. Storage at 8 °C allowed the Serrano peppers to be kept in optimal conditions throughout the postharvest period.

Key words: *Capsicum annuum*, methyl jasmonate, post-harvest refrigeration.

⁸ Thesis of Doctorado en Ciencias Agroalimentarias, Programa de Posgrado en Ciencia y Tecnología Agroalimentaria, Universidad Autónoma Chapingo.
Author: Francisco Daniel Miranda Molina.
Thesis Director: Salvador Valle Guadarrama, Dr.

5.3 Introducción

El chile Serrano (*Capsicum annuum* L.) es uno de los cultivos hortícolas más importantes en México, su consumo se asocia al sabor característico que aporta al paladar, sus distintas formas de uso, así como a su contenido nutricional (Lim et al., 2007). Dentro de los compuestos nutrimentales de estos frutos destacan el ácido ascórbico, los compuestos fenólicos, la capsaicina y los carotenoides, los cuales tienen propiedades que ayudan a la prevención de distintas enfermedades (Álvarez Parrilla et al., 2011; Erin et al., 2017).

El chile Serrano es un fruto que se consume principalmente en etapa inmadura y verde, que en conjunto con un alto contenido de humedad lo convierte en un fruto altamente perecedero. Los frutos presentan rápido deterioro, que provoca grandes pérdidas a productores y comercializadores, por lo que se necesita un manejo adecuado durante la poscosecha para mantener la calidad por un mayor tiempo (Wang et al., 2016).

Los principales problemas poscosecha que afectan la calidad comercial de estos frutos son el ablandamiento y la pérdida de agua (O'Donoghue et al., 2018). Dentro de los métodos de conservación más utilizados para estos frutos se encuentra el almacenamiento a bajas temperaturas (Martínez et al., 2005; Lim et al., 2007). Se han examinado diferentes temperaturas de conservación en un rango entre 4 y 8 °C, con el fin de prolongar la conservación por mayor tiempo; sin embargo, aunque se ha logrado prolongar la vida de anaquel de los frutos de chile bajo estas condiciones, se han presentado distintas alteraciones debido a la aparición de daño por frío (Rao et al., 2011; Wang et al., 2016). Dentro de los desórdenes observados en el almacenamiento a bajas temperaturas se ha encontrado ablandamiento de superficie, fuga de electrolitos, pardeamiento interno de semillas y placenta, así como presencia de hongos en la superficie de los frutos dañados (Lim et al., 2007; O'Donoghue et al., 2018).

El uso de elicitors como el jasmonato de metilo (MeJa) y el ácido salicílico (AS), en combinación con almacenamiento a baja temperatura, han demostrado su efectividad en la disminución del índice de daño por frío en frutos de pimiento,

logrando conservar sus atributos por mayor tiempo y convirtiendo este método en una tecnología útil para mejorar la tolerancia al daño por frío en el periodo de poscosecha (Fung et al., 2004; Ma et al., 2020). A la fecha, la aplicación de elicitores no ha sido evaluada en frutos de chile Serrano, por lo que el objetivo de este trabajo fue evaluar los cambios en los atributos de calidad y propiedades nutrimentales de frutos de chile Serrano (*Capsicum annuum* L.) durante el periodo posterior a la cosecha en diferentes condiciones térmicas de almacenamiento y con el uso de los elicitores MeJa y AS para reducir el daño por frío e incrementar la vida de anaquel.

5.4 Materiales y métodos

5.4.1 Material vegetal

Se usaron frutos de chile Serrano (*Capsicum annuum* L.) cv. Camino Real cultivados bajo condiciones de invernadero en el periodo del 25 de abril al 10 de septiembre de 2019. Durante el desarrollo de los frutos se aplicaron siete tratamientos precosecha que consistieron en la aplicación por aspersión de 100 ml de MeJa y AS en tres concentraciones diferentes, 25 (MJ25), 50(MJ50) y 100(MJ100) ppm, así como a 50(AC50), 100(AC100) y 200(AC200) ppm respectivamente, además de un testigo (TES) que no recibió ningún tratamiento. Estos tratamientos fueron aplicados en el día 15, 30 y 45 después de la floración. El corte los frutos se realizó en etapa de madurez comercial, con longitud aproximada de 10 cm y color verde oscuro característico de los frutos. Los frutos cosechados no presentaron signos de daños mecánicos ni por patógenos.

5.4.2 Organización experimental

Se prepararon lotes con cinco frutos que constituyeron unidades experimentales. Se formaron tres grupos de 63 lotes y se colocaron en cuartos de almacenamiento a 4 (± 2), 8 (± 2) y 25 (± 2) °C, denotados como T4, T8 y T25, con humedad relativa promedio (HR) del 88, 87 y 78%, respectivamente. Se tomaron tres muestras con cinco frutos de cada tratamiento cada 144 h durante 30 d para evaluar pérdida de peso, color, firmeza, acidez titulable, sólidos

solubles totales, contenido de fenoles solubles totales, capacidad antioxidante, contenido de capsaicina, así como algunas variables relacionadas con el daño por frío, como la fuga de electrolitos en superficie y las actividades enzimáticas de peroxidasa y polifenol oxidasa. Todas las mediciones se realizaron por triplicado.

5.4.3 Pérdida de peso acumulada

Se pesaron lotes de frutos el primer día y cada seis días hasta el retiro del almacenamiento. Se utilizó una balanza (Ohaus, EE. UU.) con precisión de 0.01 g. La pérdida de peso acumulada se evaluó respecto a la condición inicial (AOAC 1994).

5.4.4 Color

El color se midió cada seis días con un colorímetro MiniScan XE Plus 45 / OL (Hunter Associates Laboratory Inc., EE. UU.) y se expresó como luminosidad (L^*), ángulo de tono (H^*) y cromaticidad (C^*) (McGuire, 1992).

5.4.5 Firmeza

La firmeza del pericarpio se midió con un analizador de textura (TA-TX2i, Stable Micro Systems, Reino Unido) utilizando una sonda esférica de 5 mm con una rutina de compresión basada en velocidad de ensayo de 2 mm s^{-1} y distancia de deformación de 2 mm. Las mediciones se hicieron en la zona ecuatorial y la firmeza se expresó en Newtons (N).

5.4.6 Sólidos solubles totales

Los sólidos solubles totales (SST) se expresaron como °Brix y se determinaron con un refractómetro manual (Alla France ATC, Francia) con una escala de 0-32 % (AOAC, 1994).

5.4.7 Acidez

La acidez se evaluó en 10 g de tejido macerado con 50 mL de agua desionizada. La mezcla se tituló con NaOH 0.1 N y fenolftaleína como indicador (AOAC, 1994). Los resultados expresaron como porcentaje de acidez, con base en ácido cítrico (Avalos-Llano et al., 2018).

5.4.8 Fenoles solubles totales

Para determinar contenido de fenoles solubles totales (FST) se preparó un extracto siguiendo la metodología de Álvarez-Parrilla et al. (2010). Brevemente, una muestra de 2 g de tejido se mezcló con 10 mL de metanol al 80 %. La mezcla se agitó y se sonicó en un equipo Cole-Parmer (Cole-Parmer Instrument Co., USA) por 30 min, en oscuridad. Se aplicó centrifugación a 2000×g y se recuperó el sobrenadante. El residuo sólido se sometió a una segunda extracción con el mismo procedimiento y los sobrenadantes se juntaron. La cuantificación de FST se hizo con el método de Singleton y Rossi (1965), adaptado a microplacas. Se tomaron muestras de 25 µL del extracto y se mezclaron con 20 µL del reactivo Folin-Ciocalteu 2 N (Sigma-Aldrich, Co., Germany) diluido con agua en proporción 1:1. La mezcla se neutralizó con 30 µL de Na₂CO₃ 20 % (p/v) y 125 µL de agua destilada. Se aplicó reposo en oscuridad a temperatura ambiente por 30 min y se leyó absorbancia a 760 nm en un espectrofotómetro con lector de microplacas (Synergy™ HTX, BioTek Instruments, Inc., USA). La cuantificación se apoyó en una curva estándar de ácido gálico y los resultados se expresaron en mg equivalentes de ácido gálico por 100 g de chile seco (mg GAE 100 g⁻¹).

5.4.9 Contenido de capsaicina

Para cuantificar contenido de capsaicina se colocó 0.5 g de muestra con 5 mL de acetonitrilo en baño maría a 80 °C durante 4 h, agitando cada 30 min. El extracto fue enfriado y pasado por filtros de membrana de 0.45 µm. Los extractos se analizaron por triplicado mediante cromatografía de líquidos de alta resolución (HPLC; PerkinElmer Series 200 HPLC Systems), con columna Zorbax SB-C18 (4.6 X 250 mm) con tamaño de partícula de 5 µm. La fase móvil consistió en una

solución metanol-agua 73:27 y el uso de un régimen isocrático con flujo de 1 mL min⁻¹ (Contreras-Padilla et al., 1998). La cuantificación se realizó con apoyo de una curva estándar de capsaicina (Sigma-Aldrich, Co., Germany) en concentración de 99 %.

5.4.10 Actividad antioxidante

La actividad antioxidante se determinó con los métodos FRAP (ferric reducing antioxidant power), en la forma descrita por Benzie y Strain (1996) y siguiendo el procedimiento descrito por Re et al. (1999) con modificaciones. La disolución FRAP fue preparada al momento de su uso, mezclando una disolución buffer pH 3.6, TPTZ 10 mM en HCl 40mM y FeCl₃.6H₂O 20 mM en proporciones 10:1:1 (v/v/v), En una microplaca de 96 pozos se colocaron 20 µL de extracto, 60 µL de agua destilada y 180 µL de disolución FRAP. Después de 10 min se midió la absorbancia a 530 nm. Los resultados se expresaron como micromoles equivalentes de Trolox por 100 gramos de muestra en base seca (µmol ET 100 g⁻¹). Para el ensayo ABTS, el radical ABTS^{•+} se generó por la reacción de ABTS (7.4 mM) y persulfato de sodio (2.6 mM). Esta disolución se dejó reposar durante 16 h y finalmente fue diluida para obtener una absorbancia entre 0.7 y 1.2. Posteriormente, en los pozos de la microplaca se mezclaron 20 µL de muestra y 180 µL de la disolución ABTS^{•+}. La microplaca se agitó y la mezcla de reacción se dejó reposar durante 10 min protegida de la luz, finalmente la absorbancia fue medida a 734 nm. Los resultados se expresaron como micromoles equivalentes de Trolox por 100 gramo de muestra en base seca (µmol ET 100 g⁻¹).

5.4.11 Proteína soluble

Se determinó por el método de Bradford (1976). Para ello se mezclaron 0.5 g de muestra liofilizada con 5 mL de buffer Tris-HCl 0.1 M (pH 7.1) en frío. La mezcla se centrifugó a 12000×g por 20 min. A una alícuota de 0.1 mL del sobrenadante se adicionaron 5 mL de la solución Coomassie Blue. Se aplicó agitación y se registró absorbancia a 595 nm en el espectrofotómetro. La cuantificación se hizo mediante una curva de calibración con albúmina de bovino.

5.4.12 Fuga de electrolitos

La fuga de electrolitos (FE) se midió utilizando un medidor de conductividad eléctrica según lo descrito por Kong et al. (2018). Los frutos fueron cortados y lavados con agua desionizada. Después de secarlos, 1 g de peso fresco de chile fue sumergido en 20 mL de agua desionizada e incubado a 25 °C durante 24 h para medir la conductividad eléctrica (CE1) de la solución. Posteriormente las muestras fueron autoclavadas a 120 °C durante 20 min, para después evaluar la conductividad eléctrica de las muestras (CE2) y cuantificar el total de electrolitos. La fuga de electrolitos fue expresada en porcentaje siguiendo la fórmula $FE = CE1 / CE2 \times 100$.

5.4.13 Actividad de la enzima polifenol oxidasa

La actividad enzimática de la enzima polifenol oxidasa (PFO) se determinó a partir de la muestra liofilizada, y se evaluó mediante el método propuesto por Lamikanra (1995) con modificaciones. La enzima se extrajo a partir de 0.2 g de muestra con 5 mL de Tris-HCl frío, 100 mM (pH 7.1) que contenía 1 % de polivinil pirrolidona (PVP), los cuales se mezclaron en un homogeneizador durante 30 s; posteriormente, la mezcla se centrifugó por 20 min a 10,000×g a 4 °C. El sobrenadante se utilizó para evaluar el cambio de absorbancia a 420 nm en el espectrofotómetro. Para el ensayo de la actividad enzimática se emplearon 3 mL de catecol 60 mM disueltos en un amortiguador Tris-HCl 100 mM, pH 7.1 y 0.2 mL del sobrenadante. Los ensayos se realizaron a temperatura de 22 a 24 °C. La actividad enzimática se reportó como unidades de actividad enzimática por gramo de proteína ($U\ g^{-1}$).

5.4.14 Actividad de la enzima peroxidasa

La extracción de la enzima peroxidasa (POD) fue similar a PFO y el ensayo se hizo de acuerdo con el método de Flurkey y Jen (1978), con las siguientes modificaciones. La mezcla de ensayo tuvo un volumen total de 3 mL, de los cuales 2.6 mL fueron del amortiguador TrisHCl 100 mM, pH 7.1, 0.25 mL de guayacol 0.1 M, 0.1 mL de peróxido de hidrógeno 0.25 % y 0.05 mL del

sobrenadante; se determinó el cambio de absorbancia a 470 nm en 3 min. La actividad enzimática se reportó como U g⁻¹ de peso fresco, donde una unidad de actividad enzimática es igual a la formación de 1 μmol de tetraguaicol min⁻¹. Los ensayos se hicieron a temperatura ambiente, entre 22 y 24 °C.

5.4.15 Análisis de datos

La organización experimental consideró dos fuentes de variación: la temperatura, con tres niveles (4, 8 y 25 °C), y los elicitores MeJa y AS con tres concentraciones o niveles (niveles) cada uno (25, 50 y 100 ppm y 50, 100 y 200, respectivamente) además de un testigo que no recibió ningún tratamiento. Por lo tanto, los datos se sometieron a análisis de varianza, considerando un arreglo factorial 3×7, en un diseño completamente al azar, y complementados con rutinas de comparación de medias de tratamiento a través de la prueba de Tukey, con un nivel de significancia de 0.05. La unidad experimental fue un lote de cinco frutos y los tratamientos se desarrollaron con tres repeticiones. Todos los análisis se realizaron con el programa SAS (SAS Institute Inc. 1999).

5.5 Resultados y discusión

5.5.1 Pérdida de peso acumulada

La pérdida de peso sólo fue afectada por la temperatura de almacenamiento, los tratamientos con elicitores no tuvieron efecto significativo, y tampoco fue significativa la interacción con la temperatura (Cuadro 7). La mayor pérdida de peso se observó en frutos almacenados a 25 °C (T25), seguido de los manejados a 8 °C (T8) y finalmente por los tratamientos de 4 °C (T4) (Figura 9), con diferencia significativa entre T25 con respecto a T8 y T4. La pérdida de peso es una de las principales causas de la pérdida de calidad en el periodo de poscosecha ya que se determina con frecuencia por el grado de pérdida de agua del fruto, el cual está determinado por la humedad relativa a la cual son almacenados los productos, la ventilación del área de almacenamiento, el empaque, el tiempo de almacenamiento, el tamaño de los frutos y la temperatura, (O'Donoghue et al., 2018).

Cuadro 7. Valores percentiles de la distribución de Fisher ($F_{0.05}$) y valores F correspondientes al análisis de varianza del comportamiento poscosecha de frutos de chile Serrano almacenados a 4, 8 y 25 °C y tratados con MeJa y AS.

Variable	Factor de Variación			Error	C.V. (%)
	Temperatura	Elicitores ^z	Temp x Elic ^y		
gl	2	6	12	16.34	
$F_{0.05}$	73.62	0.21	0.37		
Variables fisiológicas					
Pérdida de peso	69.90 ^{*x}	0.55ns ^w	0.48ns		13.31
Luminosidad	7.90 [*]	4.94 [*]	2.56 [*]		11.9
Cromaticidad	43.55 [*]	4.72 [*]	1.25ns		28.58
Angulo Hue	276.09 [*]	8.71 [*]	5.85 [*]		18.23
Firmeza	73.62 [*]	0.21ns	0.37ns		54.04
Fuga de electrolitos	17.22 [*]	1.93 ns	0.22 ns		26.68
Variables químicas					
SST ^v	1.58ns	1.08ns	0.77 ns		14.86
AT ^u	20.34 [*]	0.80ns	1.36ns		12.88
FST ^t	16.75 [*]	20.68 [*]	6.30 [*]		12.21
Capsaicina	10.22 [*]	117.26 [*]	2.86 [*]		12.46
AA ^s (FRAP)	10.83 [*]	83.58 [*]	9.23 [*]		11.14
AA (ABTS)	34.51 [*]	164.75 [*]	7.89 [*]		9.07
Variables enzimáticas					
Proteína	1.77ns	1.09ns	2.1ns		10.34
Peroxidasa	61.92 [*]	2.10ns	0.75ns		72.93
Polifenol oxidasa	27.29 [*]	2.53 [*]	0.10ns		41.97

^z Jasmonato de metilo (MeJa) aplicado en concentraciones de 25, 50 y 100 ppm; ácido salicílico (AS) aplicado en concentraciones de 50, 100 y 200 ppm.

^y Temp*Elic: interacción entre factores de variación.

^x Indica que al menos un nivel dentro del factor de variación produjo un efecto diferente en relación con el resto ($\alpha = 0.05$).

^w Indica que no hubo diferencia en el efecto ($\alpha = 0.05$) causado entre niveles dentro del factor de variación.

^v Sólidos solubles totales.

^u Acidez titulable.

^t Fenoles solubles totales.

^s Actividad antioxidante

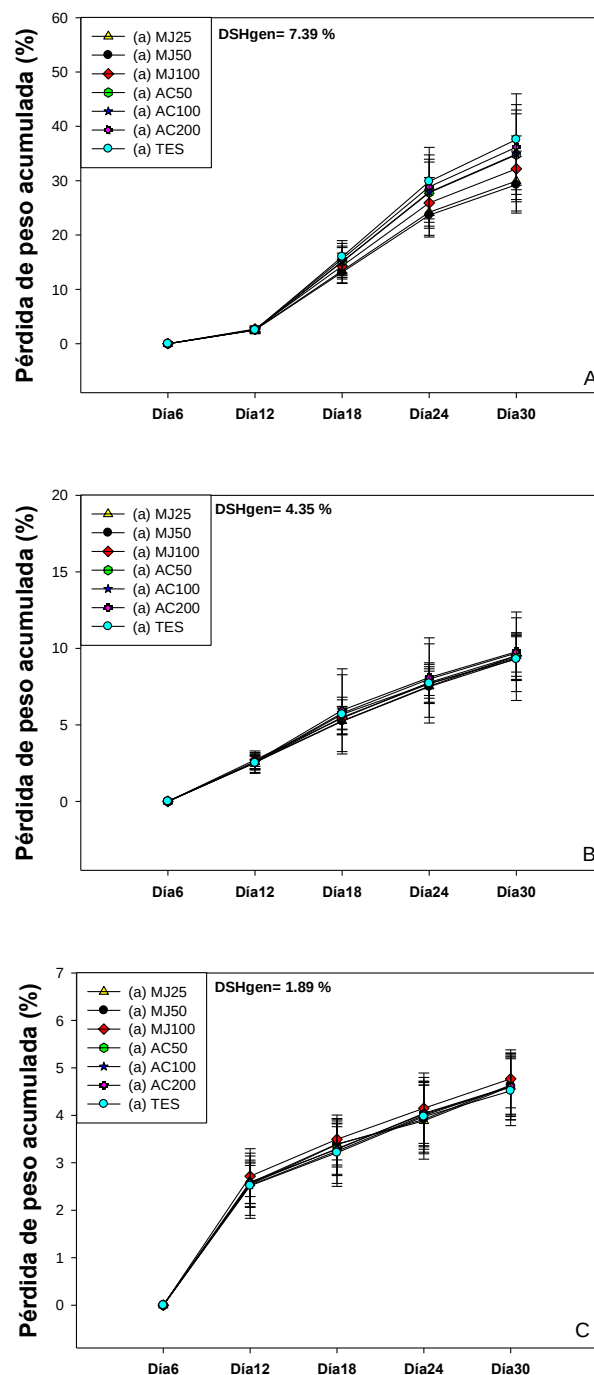


Figura 9. Pérdida de peso acumulada en frutos de chile Serrano almacenados a 25, 8 y 4 °C (A, B y C respectivamente) y tratados con MeJa (MJ 25, 50 y 100) y AS (AC50, 100 y 200). Los símbolos corresponden al promedio de tres repeticiones (n = 3). Barras de error indican error estándar. DSHgen es diferencia significativa honesta general (Tukey, 0.05) y aplica a la comparación de medias entre tratamientos. Letras distintas indican diferencia significativa entre tratamientos.

Una de las respuestas a todos estos factores antes mencionados es la transpiración de los frutos, la cual es inducida por la presencia de un déficit de presión de vapor entre el tejido interno y el entorno, y es una característica común de los productos hortícolas manejados en fresco en poscosecha (Maguire et al., 2001).

La condición térmica de T25 en combinación con una baja humedad relativa propició mayor transpiración en los frutos manejados bajo esas condiciones y por consecuencia mayor pérdida de peso, lo cual fue contrario a las otras dos temperaturas de almacenamiento T4 y T8 en las cuales se propicia una menor transpiración, debido a una mayor humedad relativa, así como a una disminución del metabolismo de los frutos, una menor transpiración y por ende menor pérdida de peso (Bojórquez et al., 2010).

5.5.2 Color

La luminosidad (L^*) fue influenciada por la temperatura y los elicitores, así como por la interacción entre ambos factores (Cuadro 7), con diferencias significativas entre los tres niveles de temperatura y los dos tipos de elicitores. Los valores más altos de L^* se observaron en la combinación de los factores T25 con el tratamiento Testigo (sin elicitor) y en la combinación de factores T25 con el tratamiento AC50 (Figura 10). Estos valores se incrementaron al día 30 de almacenamiento. El aumento de L^* también ocurrió en las muestras almacenadas a T4, pero no se observó un incremento constante durante todo el periodo de almacenamiento. Miona et al. (2014) reportaron que todas las muestras de paprika (*Capsicum annuum* L.) presentaron valores de L^* más altos (se volvieron más claros) a mayor tiempo de almacenamiento.

Los valores más altos de cromaticidad (C^*) para los chiles Serranos se presentaron a 25 °C con el elicitor AC50, seguidas por los almacenados a 8 °C (Figura 11). Estos valores se incrementaron al día 30 de almacenamiento. También se observó un incremento en el tratamiento T4; sin embargo, hubo fluctuaciones a lo largo del periodo de almacenamiento. El incremento de estos

valores coincidió con la transición de tonalidad verde a naranja-roja. El ángulo de tono (H^*) de los chiles Serranos también se vio afectado por las temperaturas de almacenamiento y por el uso de los elicitores, así como por su interacción.

Los valores iniciales para H^* fueron de alrededor de 178° , que representa el área verde-azul en la rueda de colores, cuyas características pertenecen a los chiles Serranos inmaduros. Algunos frutos almacenados a T25 cambiaron su tonalidad verde a naranja-rojizo a partir del día 6. Después del día 12 de almacenamiento, todos los chiles presentaron coloración rojiza. Los tratamientos T4 y T8 no presentaron cambios significativos en H^* (Figura 12), conservando su color verde al finalizar el periodo de almacenamiento. La tendencia del aumento del ángulo de tono durante el periodo de almacenamiento de algunas variedades de chiles fue reportada por algunos autores (Belović et al., 2014; Miranda et al., 2019).

La aparición del color rojo en frutos de *C. annuum* está relacionada con una acumulación de carotenoides y xantofilas. La principal xantofila roja en los chiles rojos es la capsantina (Tian et al., 2015). Además, uno de los carotenos dominantes en el chile rojo es el β -caroteno, que es un intermediario importante en la síntesis de las xantofilas rojas (Levy A. et al., 1995; Deli J. et al., 2001). Pola, Sugaya, y Photchanachai (2020) encontraron un aumento significativo en la acumulación de β -caroteno y capsantina libre en muestras incubadas a 30°C , relacionándolas con el cambio de color verde a rojo intenso en el chile maduro. La refrigeración a 4 y 8°C constituye una alternativa adecuada para mantener los atributos de color sin modificaciones importantes durante el periodo de almacenamiento (Miranda et al., 2019).

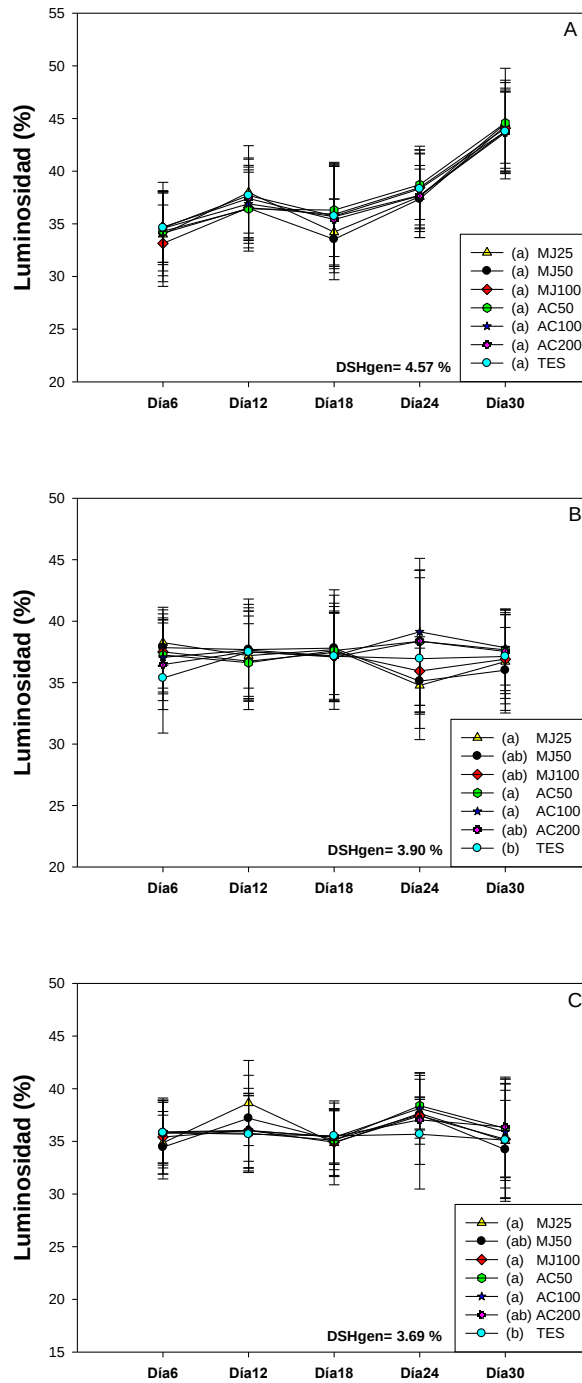


Figura 10. Variación de luminosidad en frutos de chile Serrano almacenados a 25, 8 y 4 °C (A, B y C respectivamente) y tratados con MeJa (MJ 25, 50 y 100) y AS (AC50, 100 y 200). Los símbolos corresponden al promedio de tres repeticiones (n = 3). Barras de error indican error estándar. DSHgen es diferencia significativa honesta general (Tukey, 0.05) y aplica a la comparación de medias entre tratamientos. Letras distintas indican diferencia significativa entre tratamientos.

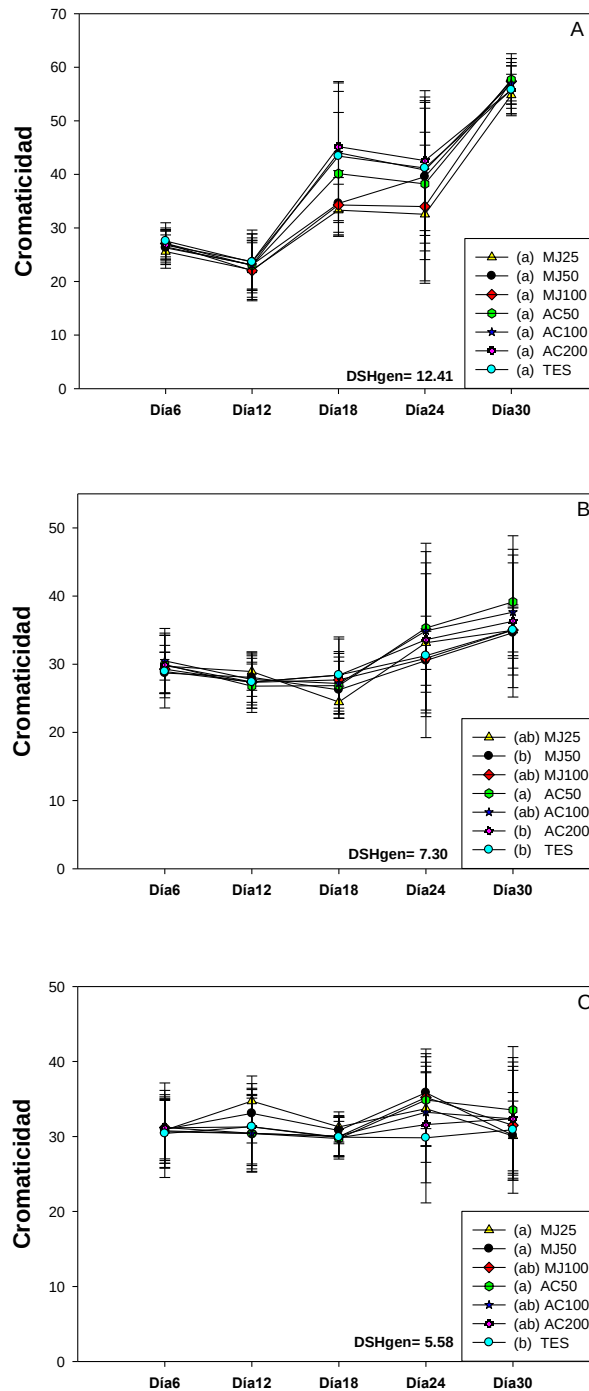


Figura 11. Variación de cromaticidad en frutos de chile Serrano almacenados a 25, 8 y 4 °C (A, B y C respectivamente) y tratados con MeJa (MJ 25, 50 y 100) y AS (AC50, 100 y 200). Los símbolos corresponden al promedio de tres repeticiones (n = 3). Barras de error indican error estándar. DSHgen es diferencia significativa honesta general (Tukey, 0.05) y aplica a la comparación de medias entre tratamientos. Letras distintas indican diferencia significativa entre tratamientos.

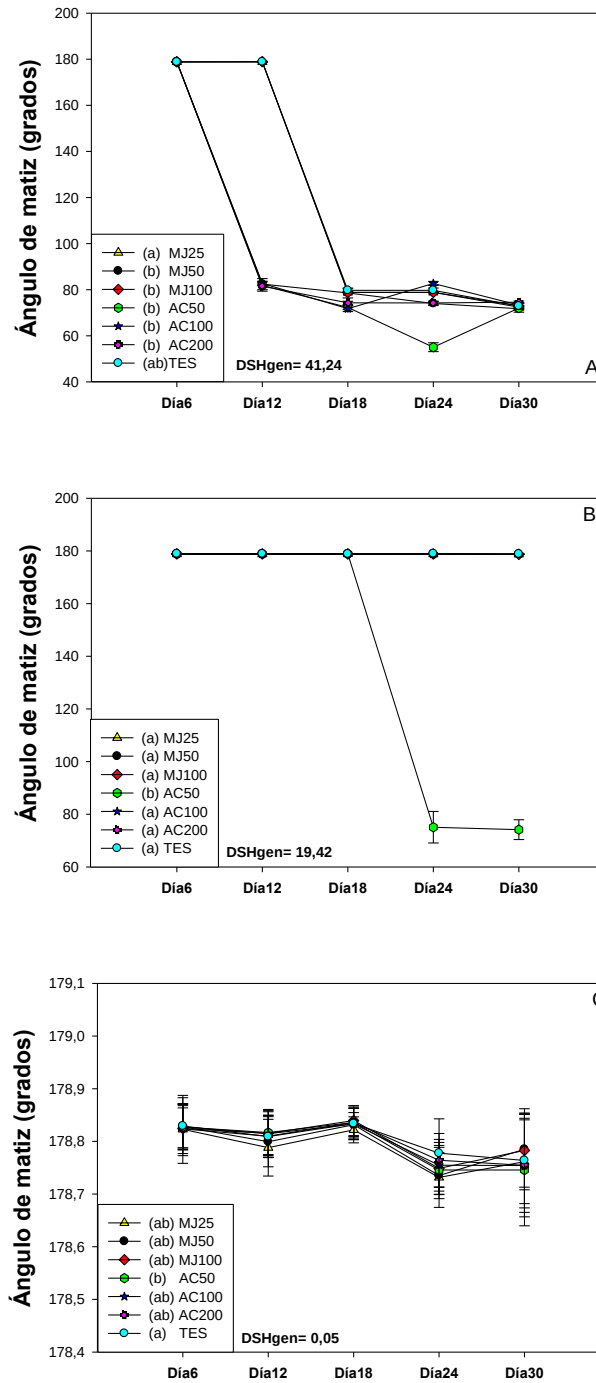


Figura 12. Variación de ángulo de matiz en frutos de chile Serrano almacenados a 25, 8 y 4 °C (A, B y C respectivamente) y tratados con MeJa (MJ 25, 50 y 100) y AS (AC50, 100 y 200). Los símbolos corresponden al promedio de tres repeticiones (n = 3). Barras de error indican error estándar. DSHgen es diferencia significativa honesta general (Tukey, 0.05) y aplica a la comparación de medias entre tratamientos. Letras distintas indican diferencia significativa entre tratamientos.

5.5.3 Firmeza

La firmeza de los frutos de chile Serrano sólo se vio afectada por el efecto de la temperatura (Cuadro 7). Los valores de firmeza que tenían los frutos al inicio del ensayo eran de aproximadamente 14 N, que fueron disminuyendo de manera significativa durante todo el periodo de evaluación en las tres condiciones térmicas. La mayor pérdida de este atributo de calidad se presentó en los frutos almacenados a 25 °C, seguidos de los frutos a 8 °C y finalmente en los almacenados a 4 °C (Figura 13). La firmeza inicial de los frutos de chile se describe típicamente como crujiente, una característica apreciada por el consumidor de este producto en fresco (O'Donoghue et al., 2018). la pérdida de firmeza de los frutos de chile se atribuye principalmente a la pérdida de agua; sin embargo, el ablandamiento también puede estar asociado a la acción de enzimas relacionadas con la maduración de los frutos, responsables de la descomposición y el ablandamiento de la pared celular, como la poligalacturonasa (PG), pectinmetil esterasa (PME), celulasa y β -galactosidas (Rao y Paran 2003; Rao et al., 2011).

Tsegay et al. (2013) mostraron que la firmeza de frutos de pimiento dulce (*Capsicum annuum*) disminuyó 26.7 % a lo largo de un proceso de maduración en condiciones de refrigeración, por lo que las bajas temperaturas logran retrasar la pérdida de firmeza, pero no logran detenerla. En este sentido, se puede asociar la pérdida de firmeza con la pérdida de humedad de los frutos, debido a que a mayor pérdida de humedad mayor es la pérdida de firmeza. Algunos trabajos han reportado que a mayor temperatura de almacenamiento existe un aumento de los procesos metabólicos de los frutos por lo tanto hay una mayor transpiración y una menor firmeza, sin dejar de lado la actividad de las enzimas asociadas a la maduración de los frutos y la degradación de la pared celular (Nunes y Emond, 2003; Rao et al., 2011).

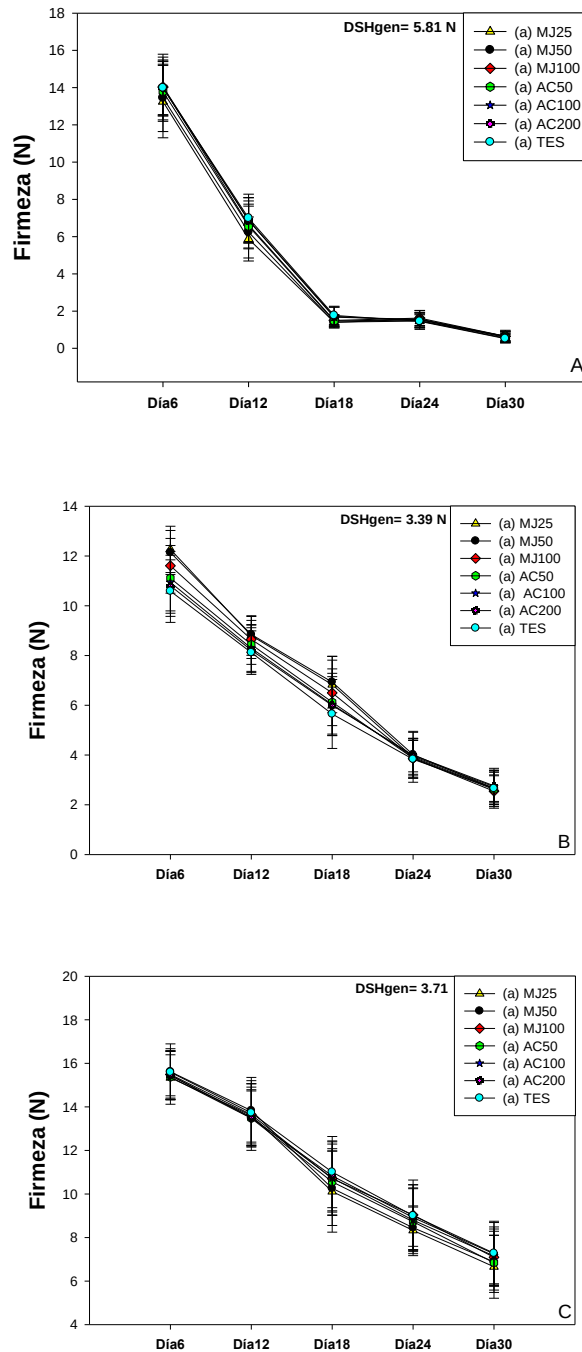


Figura 13. Variación de la firmeza en frutos de chile Serrano almacenados a 25, 8 y 4 °C (A, B y C respectivamente) y tratados con MeJa (MJ 25, 50 y 100) y AS (AC50, 100 y 200). Los símbolos corresponden al promedio de tres repeticiones ($n = 3$). Barras de error indican error estándar. DSH_{gen} es diferencia significativa honesta general (Tukey, 0.05) y aplica a la comparación de medias entre tratamientos. Letras distintas indican diferencia significativa entre tratamientos.

5.5.4 Sólidos solubles totales y acidez titulable

El contenido de sólidos solubles totales (SST) no se vio afectado por ninguno de los factores estudiados (Cuadro 7). Dicho contenido mostró un incremento gradual durante todo el periodo de almacenamiento, alcanzando alrededor de 8.5 °Brix en el día 30, para los frutos almacenados a 25 y 4 °C. (Figura 14). Los valores obtenidos en este ensayo y la tendencia de aumento en el contenido de SST durante el periodo de almacenamiento fueron similares a los reportados por Rao et al. (2011) para frutos de pimiento dulce. En general, la tendencia ascendente del contenido de SST puede estar asociada a un proceso de ablandamiento de los frutos y la degradación del almidón la cual conduce a la presencia de un mayor contenido de SST, ya que todos los tratamientos mostraron una menor firmeza de los frutos durante el periodo de almacenamiento evaluado (Rao et al., 2011).

El contenido de acidez se vio afectado por la temperatura de almacenamiento, pero no por los tratamientos con MeJa y AS (Cuadro 7). Los frutos almacenados a 25 °C tuvieron un aumento gradual durante todo el periodo evaluado, con valores entre 0.03 y 0.06 %, mientras que los frutos almacenados a 8 y 4 °C tuvieron un comportamiento similar entre ellos, aumentando un poco la concentración al principio del periodo de almacenamiento, pero teniendo valores finales similares a los del inicio (Figura 15). En el caso de los frutos almacenados a 25 °C dicho incremento de acidez se ha asociado al proceso de maduración de los frutos (Ghasemnezhad et al., 2011), así como a la pérdida de peso por transpiración lo cual puede llevar a una mayor concentración de ácidos orgánicos en las muestras. En el caso de los frutos almacenados a 8 y 4 °C se observó que los valores de acidez se mantuvieron similares al principio y al final del periodo de evaluación lo cual se puede deber a que las bajas temperaturas ralentizan los procesos metabólicos de los frutos evitando la degradación de los ácidos presentes en los frutos (Samira, Woldetsadik y Workneh, 2013).

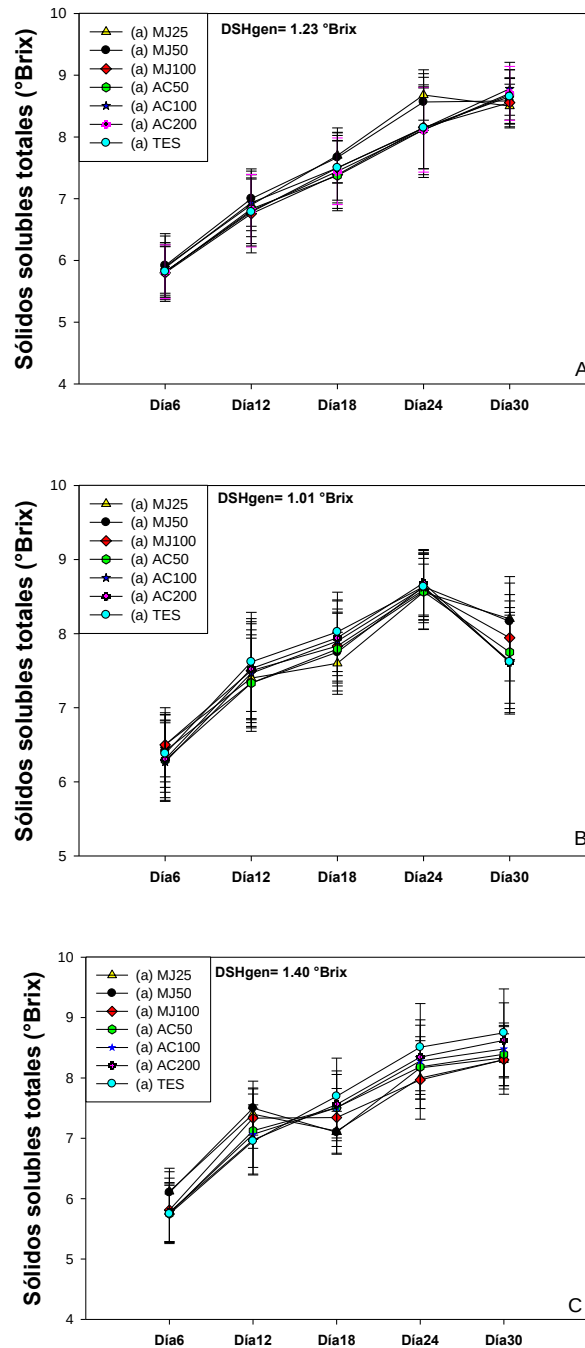


Figura 14. Variación del contenido de sólidos solubles totales en frutos de chile Serrano almacenados a 25, 8 y 4 °C (A, B y C respectivamente) y tratados con MeJa (MJ 25, 50 y 100) y AS (AC50, 100 y 200). Los símbolos corresponden al promedio de tres repeticiones (n = 3). Barras de error indican error estándar. DSH_{gen} es diferencia significativa honesta general (Tukey, 0.05) y aplica a la comparación de medias entre tratamientos. Letras distintas indican diferencia significativa entre tratamientos.

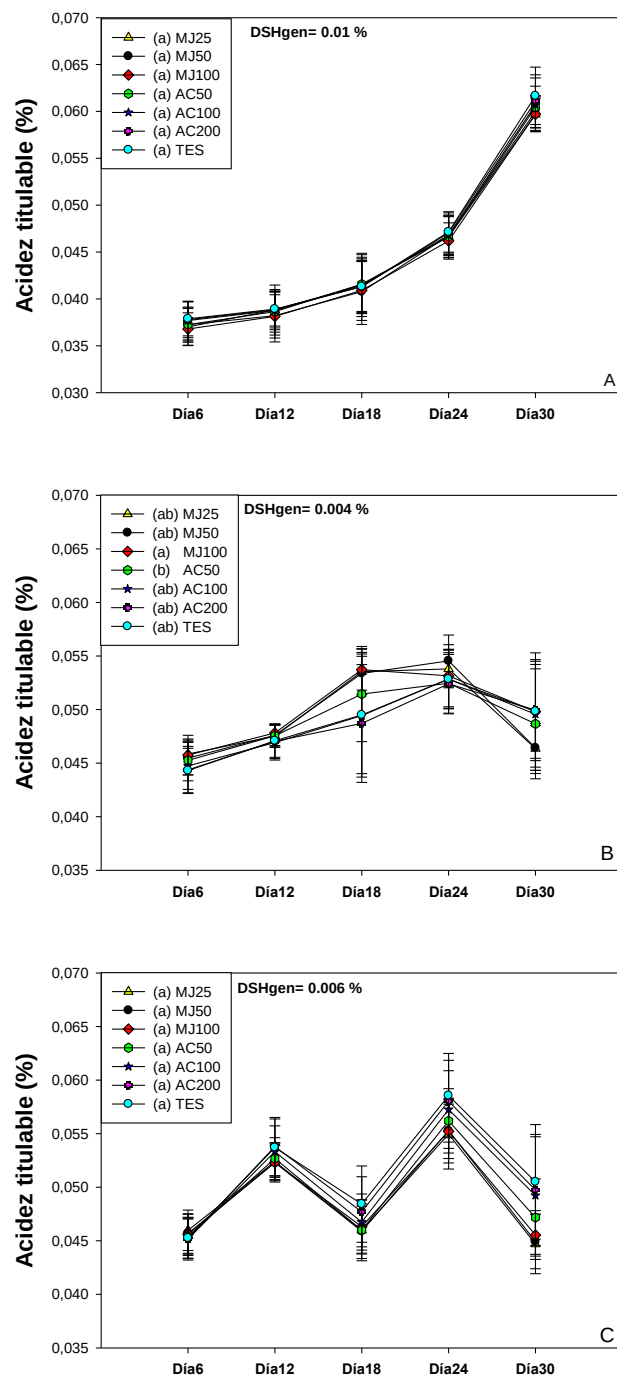


Figura 15. Modificación de la acidez titulable en frutos de chile Serrano almacenados a 25, 8 y 4 °C (A, B y C respectivamente) y tratados con MeJa (MJ 25, 50 y 100) y AS (AC50, 100 y 200). Los símbolos corresponden al promedio de tres repeticiones ($n = 3$). Barras de error indican error estándar. DSH_{gen} es diferencia significativa honesta general (Tukey, 0.05) y aplica a la comparación de medias entre tratamientos. Letras distintas indican diferencia significativa entre tratamientos.

5.5.5 Fenoles solubles totales

El contenido de fenoles solubles totales se vio afectado tanto por la temperatura de almacenamiento como por los tratamientos con MeJa y AS (Cuadro 7). El contenido de éstos varió en los rangos de 878.15-1069.63, 864.09-997.04 y 861.67-1240.37 mg GAE 100 g⁻¹ en los frutos manejados a 4, 8 y 25 °C, respectivamente (Figura 16), mientras que el mayor contenido de fenoles se observó en los frutos tratados con MeJa a 25 y 100 ppm.

Estos resultados sobre el contenido de fenoles coincidieron con los reportados por Álvarez-Parrilla et al. (2010), quienes reportaron un contenido de compuestos fenólicos totales de 1032 mg EAG 100 g⁻¹ en frutos de chile Serrano sin tratamiento con elicitores e incluso se puede observar que en los frutos de este ensayo tuvieron un contenido mayor de fenoles cuando fueron tratados con MeJa.

De acuerdo con Ghasemnezhad et al. (2011), el contenido de fenoles solubles totales mostró un descenso con la maduración de frutos de pimiento dulce. Ese comportamiento no fue observado en el presente trabajo, donde se estudió chile Serrano, lo cual sugirió que el comportamiento composicional puede estar afectado por la aplicación de los tratamientos con MeJa, ya que trabajos como el de Heredia y Cisneros (2009) indican que la aplicación de jasmonato de metilo tiene un efecto directo en la ruta de biosíntesis de los fenilpropanoides, aumentando la actividad de la enzima fenilalanina amonio liasa (PAL), la cual es clave en la ruta de biosíntesis de fenoles y otros compuestos benéficos para la salud.

El material del tratamiento a 4 °C mostró oscurecimiento en semillas y ablandamiento en la superficie de los frutos a partir del día 24 de almacenamiento (Figura 13), asociados a síntomas de daño por frío (Valenzuela et al., 2017). Es común que en frutos donde este desorden fisiológico causa oscurecimiento, se observe una disminución del contenido de compuestos fenólicos (Gao et al., 2016), lo cual se observa al final del periodo de almacenamiento.

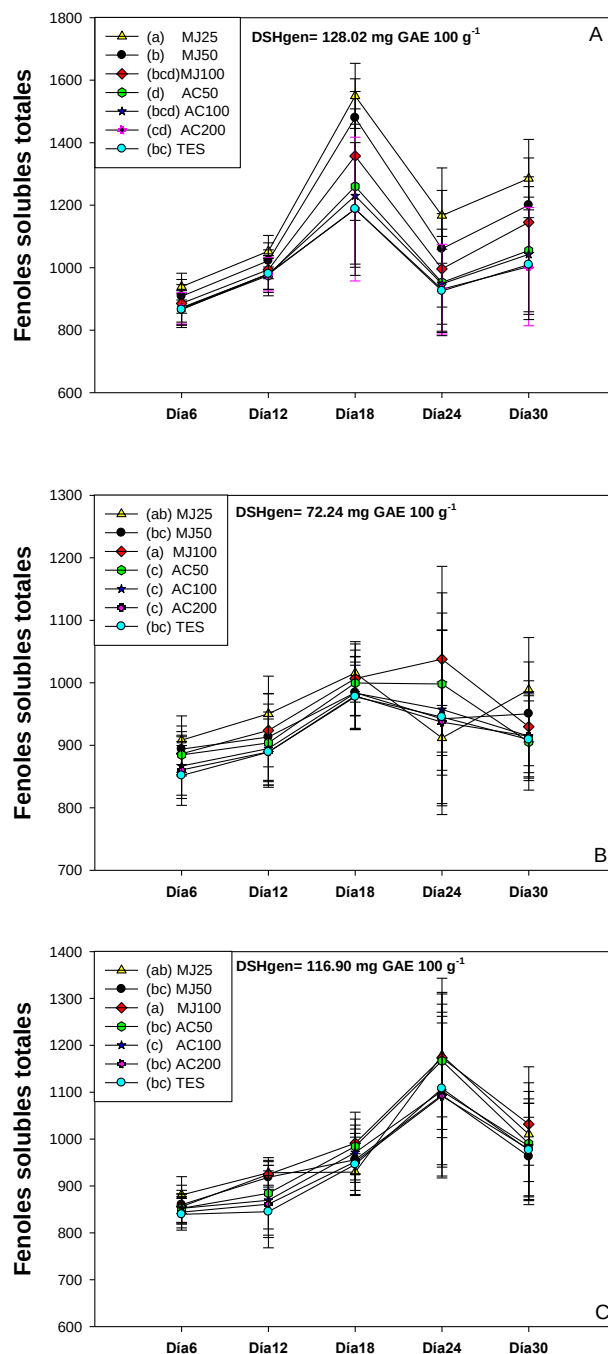


Figura 16. Modificación del contenido de fenoles solubles totales (mg GAE 100 g⁻¹) en frutos de chile Serrano almacenados a 25, 8 y 4 °C (A, B y C respectivamente) y tratados con MeJa (MJ 25, 50 y 100) y AS (AC50, 100 y 200). Los símbolos corresponden al promedio de tres repeticiones (n = 3). Barras de error indican error estándar. DSH_{gen} es diferencia significativa honesta general (Tukey, 0.05) y aplica a la comparación de medias entre tratamientos. Letras distintas indican diferencia significativa entre tratamientos.

Sin embargo, el contenido aun es mayor que al inicio del ensayo, lo cual puede estar relacionado a una alta tasa de síntesis de compuestos fenólicos por efecto de la aplicación del jasmonato de metilo, compensando de esta manera la disminución típica de los fenoles cuando los frutos presentan síntomas de daño por frío como el oscurecimiento de la placenta y las semillas.

5.5.6 Contenido de capsaicina

El contenido de capsaicina presentó diferencias significativas durante el periodo de almacenamiento a distintas temperaturas, y bajo el tratamiento de los elicitores (Cuadro 7). También fue significativa la interacción entre ambos factores. Los tratamientos T4 y T8 no presentaron diferencias significativas entre sí. Se observó un incremento en los capsaicinoides al día 30 de almacenamiento a T25 con aproximadamente 1825 mg 100 g⁻¹, cuando los chiles presentaron una coloración roja (Figura 17). Estos valores son similares a los reportados por Álvarez et al. (2011) para chile Serrano con 1606 mg 100 g⁻¹ en peso fresco.

El contenido de capsaicina puede permanecer constante (Li et al., 2017) o puede experimentar modificaciones con el desarrollo (Ornelas et al., 2010). Los chiles Serranos almacenados a T8 presentaron un descenso en el contenido de capsaicinoides al día 18 y los almacenados a T4 tuvieron un descenso en el día 6 de almacenamiento; sin embargo, no mostraron tendencia a la variación de capsaicina. Este comportamiento ha sido reportado por Patel et al. (2019), quienes encontraron una reducción en la concentración de capsaicina durante el almacenamiento de pimientos verdes a 4 °C durante 40 d.

Se observó un incremento en contenido de capsaicina con el elicitor MJ25 en las tres temperaturas de almacenamiento. La capacidad de MeJa y SA para estimular la síntesis de estos compuestos ha sido bien documentada. Se ha reportado que la aplicación de MeJa o SA a distintas concentraciones promueven la acumulación de capsaicinoides (Gutierrez et al., 2010; Maleck y Dietrich 1999, Repka 2001).

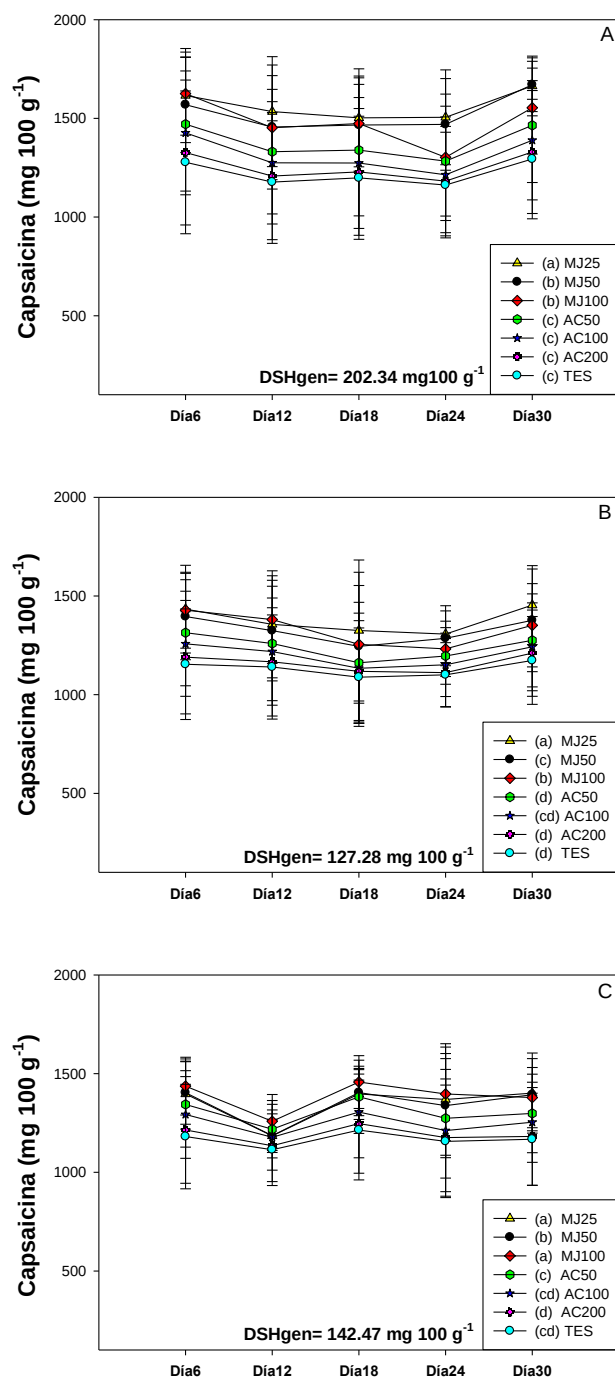


Figura 17. Modificación del contenido de capsaicina en frutos de chile Serrano almacenados a 25, 8 y 4 °C (A, B y C respectivamente) y tratados con MeJa (MJ 25, 50 y 100) y AS (AC50, 100 y 200). Los símbolos corresponden al promedio de tres repeticiones (n = 3). Barras de error indican error estándar. DSH_{gen} es diferencia significativa honesta general (Tukey, 0.05) y aplica a la comparación de medias entre tratamientos. Letras distintas indican diferencia significativa entre tratamientos.

Sudha y Ravishankar (2003) reportaron que la aplicación individual de SA y MeJA en cultivos de células de *C. frutescens*, mejoró la producción de capsaicina, pero la administración simultánea de ambos compuestos de señalización no dio como resultado un aumento adicional de la producción de capsaicina.

5.5.7 Actividad antioxidante

La actividad antioxidante se evaluó a través de los métodos de ABTS y FRAP. En ambos casos la interacción de la temperatura con la aplicación de elicitores fue significativa (Cuadro 7). Los frutos tratados con MeJA tuvieron mayor actividad antioxidante ($5113\text{--}6000\ \mu\text{mol TE } 100\ \text{g}^{-1}$) que los tratados con SA y que el TES ($4097\text{--}5008\ \mu\text{mol TE } 100\ \text{g}^{-1}$) en las tres temperaturas evaluadas (Figuras 18 y 19).

Los valores iniciales de las muestras concordaron con lo reportando por Álvarez-Parrilla et al. (2010), quien observaron una actividad antioxidante de $4103\ \mu\text{mol TE } 100\ \text{g}^{-1}$. De acuerdo Ghasemnezhad et al. (2011), la actividad antioxidante de los frutos de pimiento dulce sufre un aumento durante el periodo de maduración, lo cual se corroboró con los frutos almacenados a T25 que tuvieron una mayor actividad antioxidante final.

La actividad antioxidante de los pimientos está estrechamente relacionada con la presencia de un alto contenido de compuesto fenólicos y la presencia de valores altos de capsaicina (Tan et al., 2012), compuestos con un alto poder antioxidante. Los frutos de los tratamientos con MeJA presentaron mayor contenido de este tipo de compuestos, lo cual corroboró su mayor capacidad antioxidante. Además del efecto de la aplicación de MeJA, se ha reportado que cuando existe sintomatología de daño por frío en frutos de pimiento, éstos sufren un incremento importante en la capacidad antioxidante como respuesta contra el daño (Vicente et al., 2005)

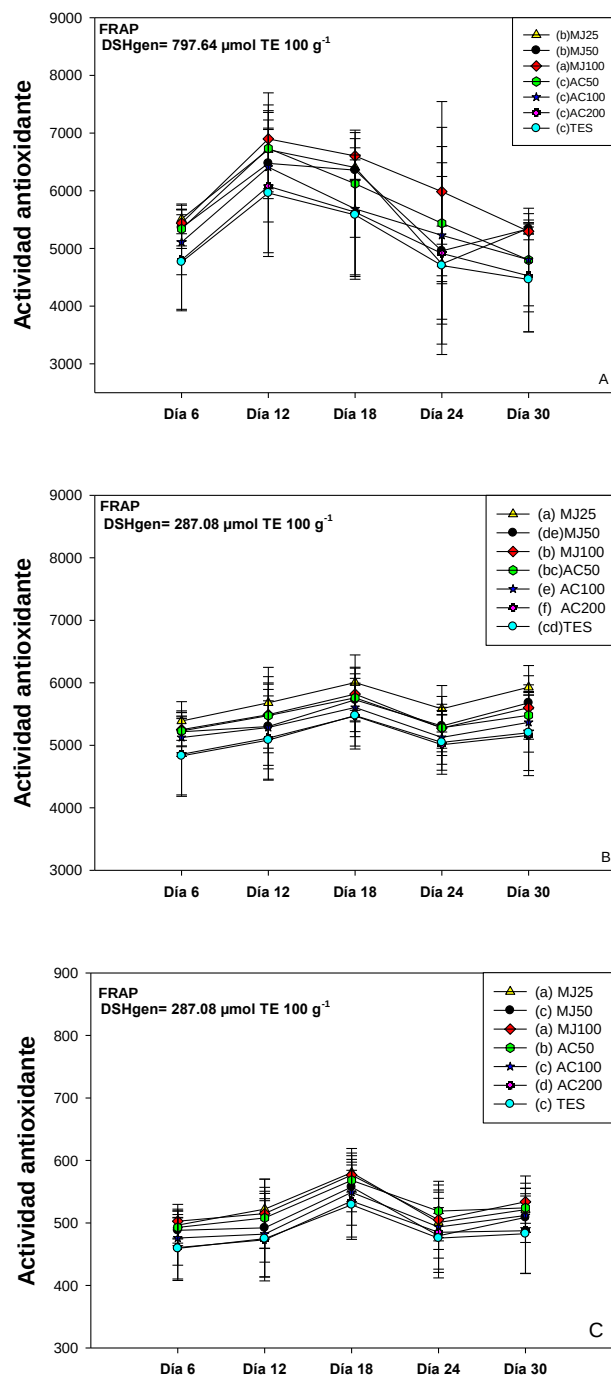


Figura 18. Modificación de actividad antioxidante ($\mu\text{mol TE } 100 \text{ g}^{-1}$) evaluada por el método FRAP en frutos de Chile Serrano almacenados a 25, 8 y 4 ° C (A, B y C, respectivamente) y tratados con MeJa (MJ 25, 50 y 100) y AS (AC50, 100 y 200). Los símbolos corresponden al promedio de tres repeticiones ($n = 3$). Barras de error indican error estándar. DSH_{gen} es diferencia significativa honesta general (Tukey, $\alpha = 0.05$) y aplica a la comparación de medias entre tratamientos. Letras distintas indican diferencia significativa entre tratamientos.

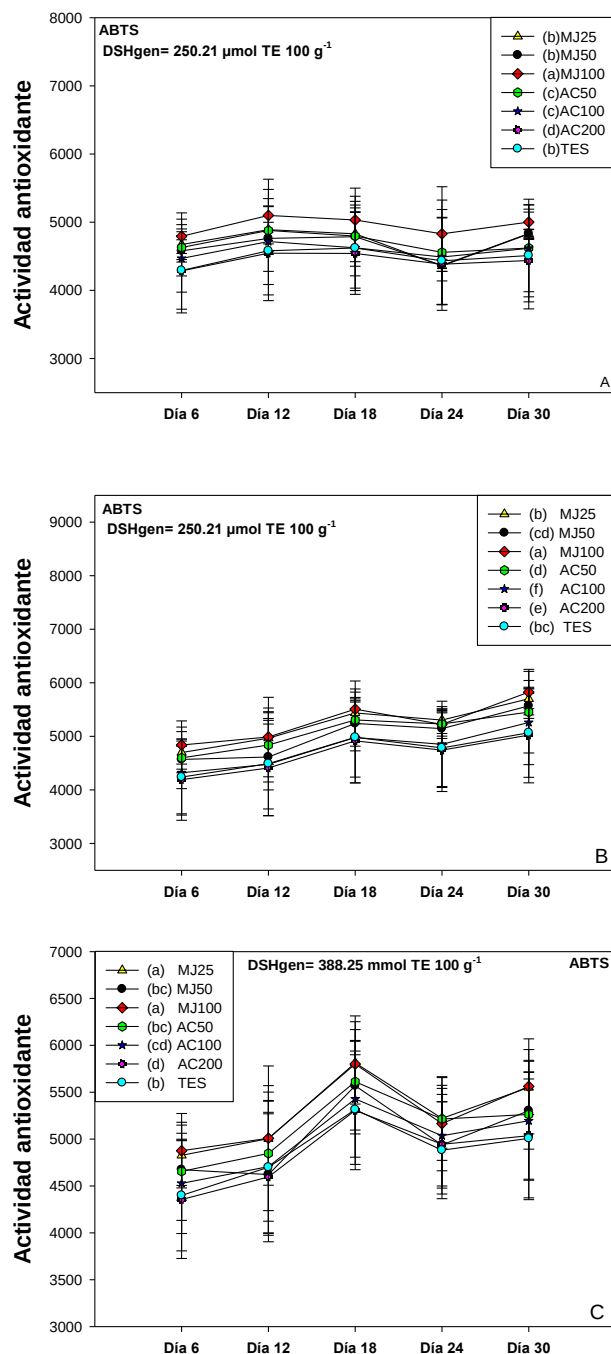


Figura 19. Modificación de actividad antioxidante ($\mu\text{mol TE } 100 \text{ g}^{-1}$) evaluada por el método ABTS en frutos de chile Serrano almacenados a 25, 8 y 4 ° C (A, B y C respectivamente) y tratados con MeJa (MJ 25, 50 y 100) y AS (AC50, 100 y 200). Los símbolos corresponden al promedio de tres repeticiones ($n = 3$). Barras de error indican error estándar. DSH_{gen} es diferencia significativa honesta general (Tukey, 0.05) y aplica a la comparación de medias entre tratamientos. Letras distintas indican diferencia significativa entre tratamientos.

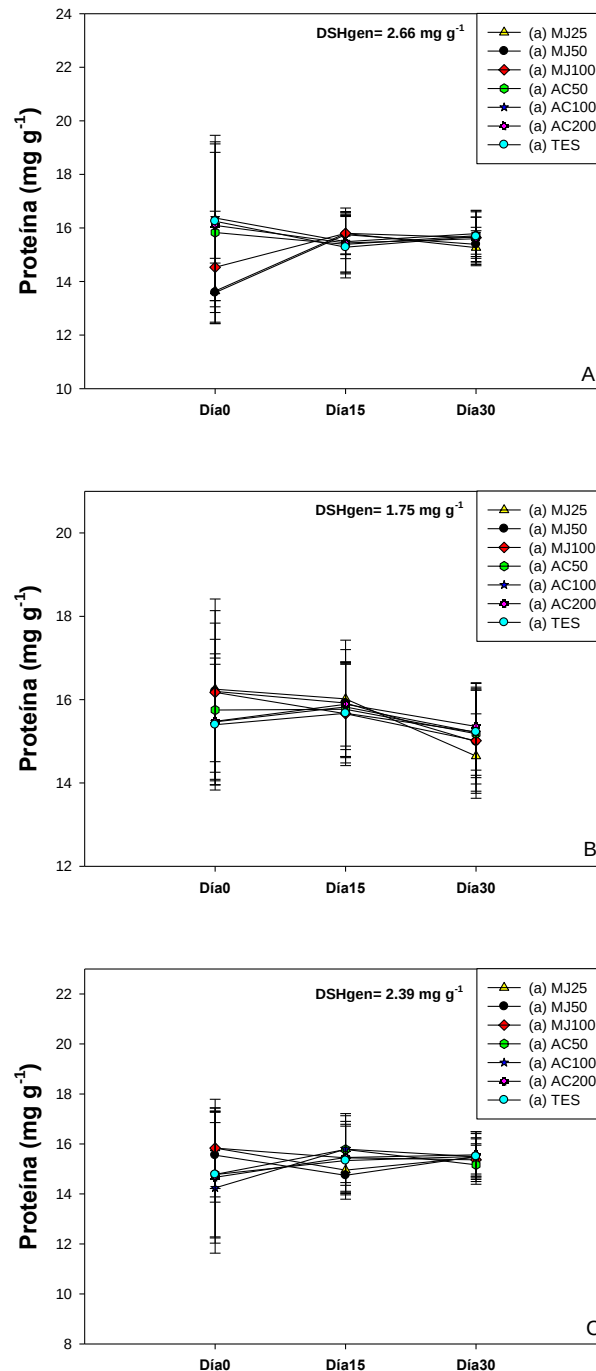


Figura 20. Modificación del contenido de proteína en frutos de chile Serrano almacenados a 25, 8 y 4 °C (A, B y C respectivamente) y tratados con MeJa (MJ 25, 50 y 100) y AS (AC50, 100 y 200). Los símbolos corresponden al promedio de tres repeticiones (n = 3). Barras de error indican error estándar. DSH_{gen} es diferencia significativa honesta general (Tukey, 0.05) y aplica a la comparación de medias entre tratamientos. Letras distintas indican diferencia significativa entre tratamientos.

5.5.8 Proteína soluble

En contenido de proteína no se vio afectado ni por la temperatura ni por los tratamientos aplicados a los frutos (Cuadro 7). El contenido de proteína de los frutos de chile Serrano rondó los 16 mg g⁻¹ de peso seco y se mantuvo constante durante todo el periodo de almacenamiento (Figura 20). Estos valores concordaron con lo reportado por Schweiggert et al. (2005) y Simonovska et al., (2014), quienes reportaron un contenido similar 14-16 mg g⁻¹ de peso seco en frutos de pimientos picantes.

5.5.9 Fuga de electrolitos

La fuga de electrolitos se utilizó como un indicador de cambios en la permeabilidad de la membrana en los frutos, asociado a la presencia de daño por frío. Esta variable sólo se vio afectada por el factor temperatura (Cuadro 7). Al inicio del almacenamiento la fuga de electrolitos fue de 16 %, aproximadamente, en todos los tratamientos, pero a medida que avanzó el almacenamiento este valor se incrementó, principalmente en los frutos almacenados a 4°C, alcanzando valores finales de 38 % (Figura 21). Estos resultados fueron similares a los reportados por Kong et al. (2018), quienes observaron un comportamiento similar en frutos de pimienta almacenados a 4 °C.

Este comportamiento en la fuga de electrolitos se puede asociar principalmente con la presencia de síntomas de daño por frío (Kong et al., 2018). En este caso, dichos síntomas comenzaron a manifestarse en el día 24 de almacenamiento (Figura 22), presentándose como ablandamientos en la superficie de los frutos y pardeamiento interno de semillas y placenta. Estos resultados en la fuga de electrolitos en superficie sugieren que hubo pérdida de integridad de la membrana celular conforme pasó el tiempo (Ma et al., 2020), por lo que en este caso los tratamientos con MeJa y AS no lograron prevenir la sintomatología del daño por frío, como se ha reportado en otros trabajos (Wang et al., 2019; Ma et al., 2020).

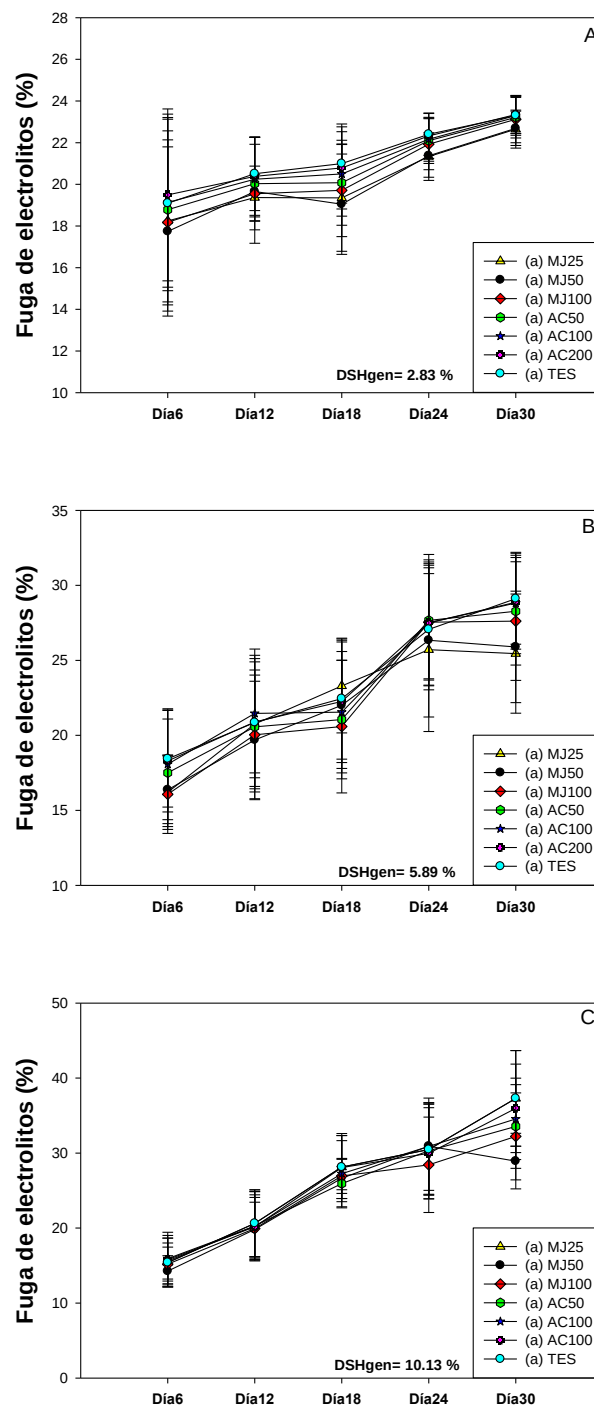


Figura 21. Cambio en el porcentaje de fuga de electrolitos en frutos de chile Serrano almacenados a 25, 8 y 4 °C (A, B y C respectivamente) y tratados con MeJa (MJ 25, 50 y 100) y AS (AC50, 100 y 200). Los símbolos corresponden al promedio de tres repeticiones (n = 3). Barras de error indican error estándar. DSH_{gen} es diferencia significativa honesta general (Tukey, 0.05) y aplica a la comparación de medias entre tratamientos. Letras distintas indican diferencia significativa entre tratamientos.



Figura 22. Síntomas de daño por frío en frutos de chile Serrano almacenados a 4 °C.

5.5.10 Actividad de la enzima polifenol oxidasa

La actividad específica de PFO presentó diferencias significativas para los tratamientos a diferentes temperaturas y para los elicitores (Cuadro 7), pero no para la interacción entre ambos factores. La actividad inicial de PFO (8.88 UAE mg⁻¹ proteína, Figura 23) contrasta con lo reportado por Schweiggert, Schieber y Carle (2005), que informaron valores para chiles verdes y pimentón de 17.7 y 39.2 UAE mg⁻¹ de proteína, respectivamente. Se observó una tendencia de incremento en la actividad de PFO en los tratamientos T25 y T8 a partir del día 12. Este comportamiento no correspondió a la actividad de PFO para los chiles Serranos sometidos a T4, puesto que desde el primer día disminuyó su actividad enzimática. Sin embargo, se ha observado que el almacenamiento a bajas temperatura puede inhibir la actividad de esta enzima. El elicitor MJ25 y MJ100 presentaron la mayor actividad de PFO al final del periodo de almacenamiento a T4, con respecto al testigo y al elicitor AS. Cuando los frutos se encuentran bajo un alto estrés por frío, desarrollan una reacción en cadena que involucra algunos compuestos fenólicos, lo que puede ocasionar un aumento en la actividad de PFO y la frecuencia respiratoria (Pérez et al. 2001). Se ha demostrado que el tratamiento con ácido salicílico (AS) aumentó la actividad de PFO y POD en las hojas de *C. annuum* (Mahdavian et al., 2007); sin embargo, en este estudio no se observó un efecto significativo para la aplicación de AS.

5.5.11 Actividad de la enzima peroxidasa

La actividad enzimática de la enzima peroxidasa (POD) sólo se vio afectada por el factor temperatura (Cuadro 7). El incremento de la actividad de POD fue mayor en frutos almacenados a 25 °C (250 UAE mg⁻¹ proteína) que en los frutos a 4 y 8 °C (40 y 80 UAE mg⁻¹ proteína respectivamente) (Figura 24). Se ha reportado que bajo condiciones de almacenamiento en frío la actividad de POD se ve disminuida (Thompson, 2003), lo cual coincidió con lo observado en los frutos de chile Serrano almacenados a 4 y 8 °C.

El incremento de la actividad de peroxidasa se presenta durante el proceso de maduración de los frutos (Contreras-Padilla et al., 1998). El incremento de la actividad de esta enzima en los frutos a 25 °C se puede deber a que bajo estas condiciones se alcanzó por completo el estado de madurez y senescencia de los frutos, por lo que también puede ser usada como un indicador de madurez (Ingham et al., 1998).

La actividad de esta enzima se vio incrementada al final del ensayo en los frutos a 4 y 8 °C. En el caso de los frutos a 4 °C se puede asociar el incremento de la actividad de esta enzima a la presencia de daños por frío, ya que esta enzima está relacionada con la respuesta de los frutos contra este daño (Wang et al., 2012). A partir del día 24 de almacenamiento se presentaron los primeros síntomas del daño por frío y en el día 30 todos los tratamientos mostraron signos evidentes del daño. En el caso de los frutos a 8 °C, este incremento pudo estar relacionado a una mayor madurez de los frutos, pero no se alcanzaron los valores de los frutos a 25 °C, ya que éstos no logran desarrollar por completo su estado de madurez.

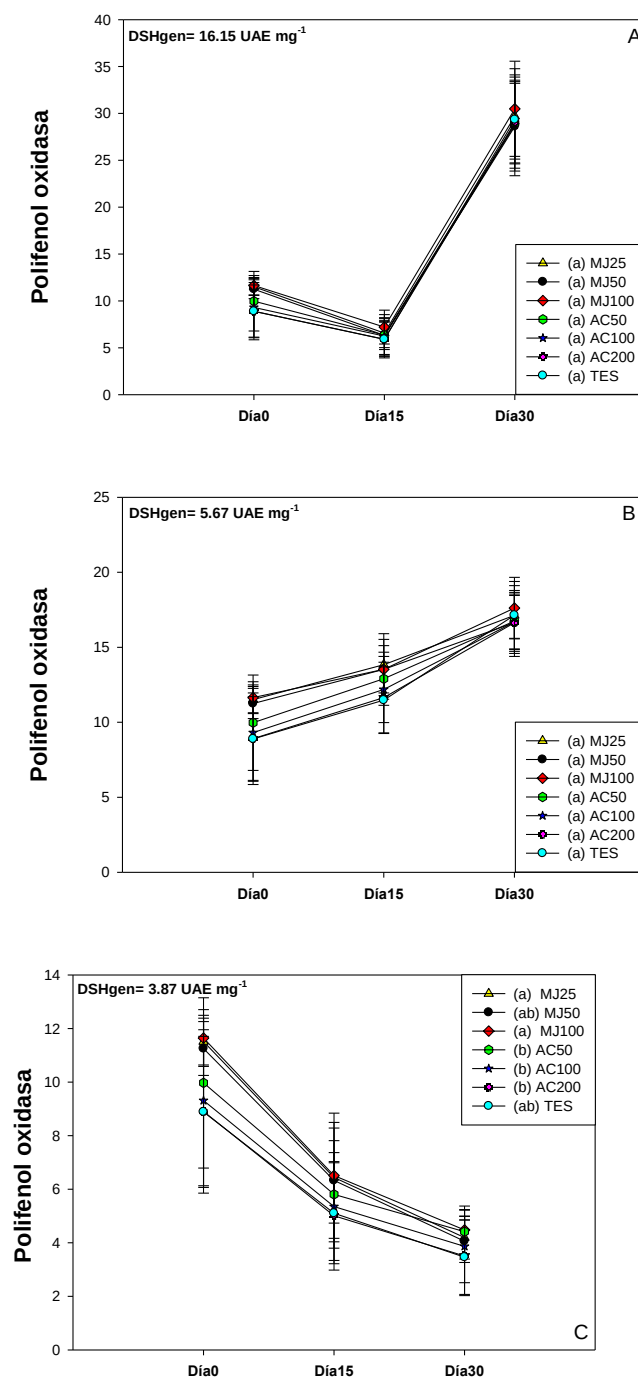


Figura 23. Actividad enzimática (UAE mg⁻¹) de la enzima polifenoloxidasas en frutos de chile Serrano almacenados a 25, 8 y 4 °C (A, B y C respectivamente) y tratados con MeJa (MJ 25, 50 y 100) y AS (AC50, 100 y 200). Los símbolos corresponden al promedio de tres repeticiones (n = 3). Barras de error indican error estándar. DSH_{gen} es diferencia significativa honesta general (Tukey, 0.05) y aplica a la comparación de medias entre tratamientos. Letras distintas indican diferencia significativa entre tratamientos.

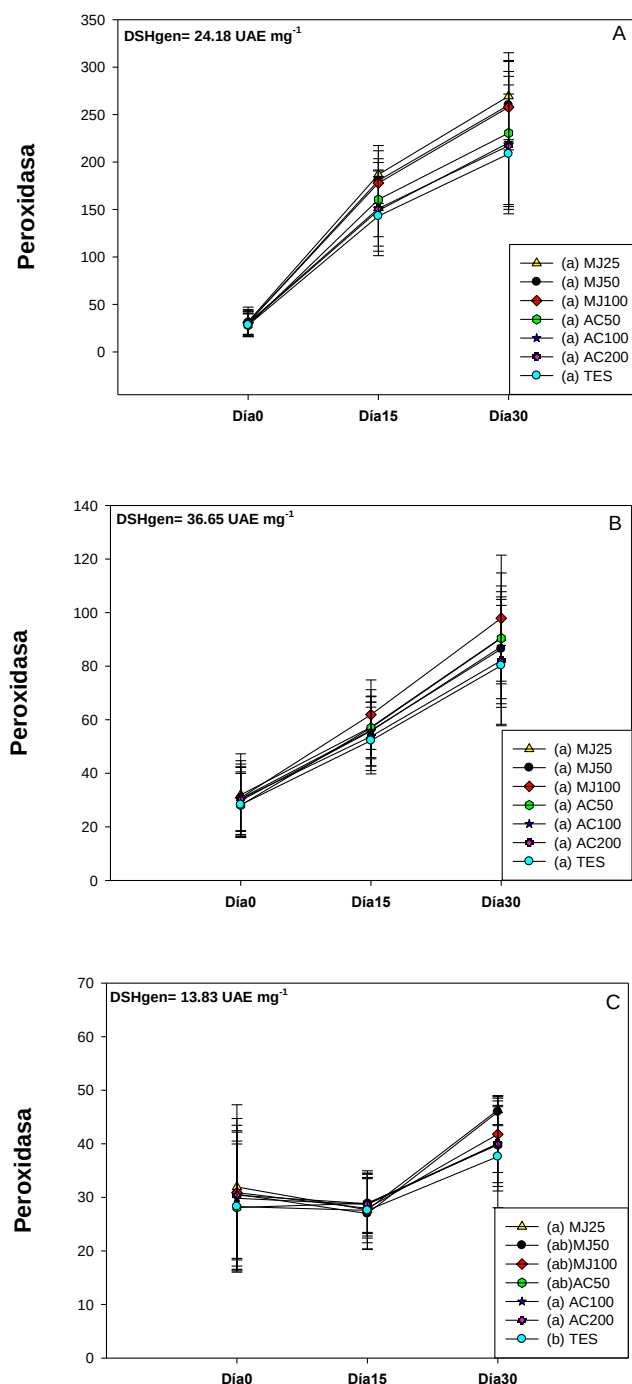


Figura 24. Actividad enzimática (UAE mg⁻¹) de la enzima peroxidasa en frutos de chile Serrano almacenados a 25, 8 y 4 °C (A, B y C respectivamente) y tratados con MeJa (MJ 25, 50 y 100) y AS (AC50, 100 y 200). Los símbolos corresponden al promedio de tres repeticiones (n = 3). Barras de error indican error estándar. DSH_{gen} es diferencia significativa honesta general (Tukey, 0.05) y aplica a la comparación de medias entre tratamientos. Letras distintas indican diferencia significativa entre tratamientos.

5.6 Conclusiones

La temperatura de almacenamiento afectó de manera significativa las características de calidad de los frutos de chile Serrano. Los frutos almacenados a 25 °C mostraron los cambios más significativos: mayor pérdida de peso, disminución de la firmeza y un cambio total en la coloración estos cambios se atribuyen al proceso de maduración y senescencia que alcanzaron a los 24 días bajo esta condición. La aparición de síntomas de daño por frío, ablandamientos en la superficie y oscurecimiento de semillas, se presentaron hacia el final del ensayo cuando los frutos se almacenaron a 4 °C. El tratamiento con elicitores en la etapa precosecha, no redujo la incidencia del daño por frío ya que éste se presentó en todos los productos almacenados a 4 °C. Sin embargo, el uso de jasmonato de metilo ayudó a mejorar el contenido de compuestos fenólicos, capsaicina y la actividad antioxidante de los frutos en las tres condiciones de almacenamiento. El manejo a 8 °C permitió mantener las mejores características en poscosecha sin la presencia de síntomas de daño por frío. Los contenidos de fenoles solubles totales y de capsaicina, así como la capacidad antioxidante se vieron incrementadas por el efecto de la aplicación de jasmonato de metilo y la temperatura de almacenamiento.

5.7 Referencias

- Álvarez Parrilla, E., De La Rosa, L. A., Amarowicz, R. and Shahidi, F. (2011). Antioxidant activity of fresh and processed Jalapeño and Serrano peppers. *Journal of Agricultural and Food Chemistry* 59: 163–173. doi.org/10.1021/jf103434u.
- Association of Official Analytical Chemists (AOAC). 1994. *Official Methods and Analysis*. 14th ed. Arlington, VA, USA: AOAC.
- Avalos-Llano, K. R., Sgroppo, S. C. and Chaves, A. R. (2018). Changes in quality parameters, antioxidant compounds and enzymes of phenolic metabolism of hot water-treated organic “cherry” peppers. *International Food Research Journal* 25(4): 1633-1641.
- Belovic, M., Mastilovic, J., & Kevresan, Z. (2014). Change of surface colour parameters during storage of paprika (*Capsicum annuum* L.). *Food and Feed Research*, 41(2), 85–92. doi:10.5937/ffr1402085b

- Benzie, I. F. and Strain, J. J. (1996). The ferric reducing ability of plasma (FRAP) as a measure of “antioxidant power”: the FRAP assay. *Analytical Biochemistry* 239: 70-76. doi.org/10.1006/abio.1996.0292.
- Bojórquez Gálvez A, Vega García M, Caro Corrales J, Carrillo López A, López Valenzuela JA. (2010). Effect of gradual cooling storage on chilling injury and phenylalanine ammonia-lyase activity in tomato fruit. *Journal of Food Biochemistry*. 34:295–307. doi.org/10.1111/j.1745-4514.2009.00279.x
- Bradford M.M. (1976) A rapid and sensitive method for the quantitation of microgram quantities of protein utilizing the principle of protein-dye binding. *Analit. Biochem.* 72:248-254. doi.org/10.1016/0003-2697(76)90527-3
- Contreras-Padilla, M. and Yahia, E. M. (1998). Changes in capsaicinoids during development, maturation, and senescence of chile peppers and relation with peroxidase activity. *Journal of Agricultural and Food Chemistry* 46: 2075-2079. doi.org/10.1021/jf970972z
- Deli, J., Molnár, P., Matus, Z., & Tóth, G. (2001). Carotenoid Composition in the Fruits of Red Paprika (*Capsicum annuum* var *lycopersiciforme* rubrum) during Ripening; Biosynthesis of Carotenoids in Red Paprika. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 49(3), 1517–1523. doi:10.1021/jf000958d
- Erin, M.D., David, A.B., Marian, J.M., Donald, A.H., Ross, E.L., (2017). Sweet *capsicum*: postharvest physiology and technologies. *J. N. Z. J. Crop Hortic. Sci.* 1–29. https:// doi.org/10.1080/01140671.2017.1395349.
- Fung, R. W., Wang, C. Y., Smith, D. L., Gross, K. C., & Tian, M. (2004). MeSA and MeJA increase steady-state transcript levels of alternative oxidase and resistance against chilling injury in sweet peppers (*Capsicum annuum* L.). *Plant Science*, 166(3), 711-719. doi.org/10.1016/j.plantsci.2003.11.009
- Gao, H., Zhang. Z. K., Gang. Lv X., Cheng. N., Peng. B. Z., & Cao. W. (2016). Effect of 24-epibrassinolide on chilling injury of peach fruit in relation to phenolic and proline metabolisms. *Postharvest Biology and Technology*, 111, 390–397. doi: 10.1016/j.postharvbio.2015.07.031
- Ghasemnezhad, M., Sherafati, M. and Payvast G. A. (2011). Variation in phenolic compounds, ascorbic acid and antioxidant activity of five coloured bell pepper (*Capsicum annum*) fruits at two different harvest times. *Journal of Functional Foods* 3: 44-49. doi.org/10.1016/j.jff.2011.02.002
- Gutiérrez-Carbajal, M. G., Monforte-González, M., Miranda-Ham, M. d. L., Godoy-Hernández, G., & Vázquez-Flota, F. (2010). Induction of capsaicinoid synthesis in *Capsicum chinense* cell cultures by salicylic acid or methyl jasmonate. *Biologia Plantarum*, 54(3), 430–434. doi.org/10.1007/s10535-010-0078-z
- Heredia, J. B., & Cisneros-Zevallos, L. (2009). The effects of exogenous ethylene and methyl jasmonate on the accumulation of phenolic antioxidants in

- selected whole and wounded fresh produce. Food Chemistry, 115(4), 1500-1508. doi.org/10.1016/j.foodchem.2009.01.078
- Ingham L M, M L Parker, K W Waldron (1998) Peroxidase: changes in soluble and bound forms during maturation and ripening of apples. Physiol. Plant. 93:93-100. doi.org/10.1034/j.1399-3054.1998.1020113.x
- Kong, X., Wei, B., Gao, Z., Zhou, Y., Shi, F., Zhou, X., ... & Ji, S. (2018). Changes in membrane lipid composition and function accompanying chilling injury in bell peppers. Plant and Cell Physiology, 59(1), 167-178. doi.org/10.1093/pcp/pcx171
- Lamikanra O. (1995) Enzymatic browning of Muscadine grapes products. In: Enzymatic Browning and its Prevention, C L Lee, J R Whitaker (eds). ACS. Washington, USA. pp:166-177. doi.org/ 10.1021/bk-1995-0600.ch013
- Li, D., Long, H.Y., Zhang, S.X., Wu, X.P., Shao, H.-. and Wang, P. (2017). Effect of continuous negative pressure water supply on the growth, development and physiological mechanism of *Capsicum annuum* L. Journal of Integrative Agriculture 16(9): 1978–1989. doi.org/10.1016/S2095-3119(16)61572-1
- Lim, C. S., Kang, S. M., Cho, J. L., Gross, K. C. and Woolf, A. B. (2007). Bell pepper (*Capsicum annuum* L.) fruits are susceptible to chilling injury at the breaker stage of ripeness. HortScience 42: 1659-1664. Levy, A., Harel, S., doi.org/10.21273/HORTSCI.42.7.1659
- Ma, M., Zhu, Z., Cheng, S., Zhou, Q., Zhou, X., Kong, X., ... & Ji, S. (2020). Methyl jasmonate alleviates chilling injury by regulating membrane lipid composition in green bell pepper. Scientia Horticulturae, 266, 109308. doi.org/10.1016/j.scienta.2020.109308
- Maguire, K. M., Banks, N. H., & Opara, L. U. (2001). Factors affecting weight loss of apples. Horticultural Reviews, 25, 197–234. doi.org/10.1002/9780470650783.ch4
- Mahdavian, K., Kalantari, K. M., & Ghorbanli, M. (2007). The effect of different concentrations of salicylic acid on protective enzyme activities of pepper (*Capsicum annuum* L.) plants. Pak. J. Biol. Sci, 10, 3162-3165. doi.org/10.3923/pjbs.2007.3162.3165
- McGuire, R. G. (1992). Reporting of objective color measurements. HortScience, 27(12), 1254-1255. doi.org/ 10.21273/HORTSCI.27.12.1254
- Miranda Molina, F. D., Valle Guadarrama, S., Guerra Ramírez, D., Arévalo Galarza, M. D. L., Pérez Grajales, M., & Artés Hernández, F. (2019). Quality attributes and antioxidant properties of Serrano chili peppers (*Capsicum annuum* L.) affected by thermal conditions postharvest. International Food Research Journal, 26(6).
- Nunes, M. C. N. and Emond, J. P. (2003). Storage temperature. In Bartz, J. A. and Brecht, J. K. (Eds). Postharvest Physiology and Pathology of

Vegetables. Second Edition, p. 209-228. Gainesville, FL: University of Florida.

- O'Donoghue, E. M., Brummell, D. A., McKenzie, M. J., Hunter, D. A., & Lill, R. E. (2018). Sweet *capsicum*: postharvest physiology and technologies. *New Zealand journal of crop and horticultural science*, 46(4), 269-297. doi.org/10.1080/01140671.2017.1395349
- Ornelas-Paz, J. J.; Martinez-Burrola, J. M.; Ruiz-Cruz, S.; Santana Rodriguez, V.; Ibarra-Junquera, V.; Olivas, G. I.; Pérez-Martínez, J. D. (2010) Effect of cooking on the capsaicinoids and phenolics contents of Mexican peppers. *Food Chem.* 119, 1619-1625. doi.org/10.1016/j.foodchem.2009.09.054
- Palevitch, D., Akiri, B., Menagem, E., & Kanner, J. (1995). Carotenoid Pigments and beta-Carotene in Paprika Fruits (*Capsicum* spp.) with Different Genotypes. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 43(2), 362–366. doi:10.1021/jf00050a019. doi.org/10.1021/jf00050a019
- Pérez-Tello, G. O., Silva-Espinoza, B. A., Vargas-Arispuro, I., Briceño-Torres, B. O., & Martinez-Tellez, M. A. (2001). Effect of Temperature on Enzymatic and Physiological Factors Related to Chilling Injury in Carambola Fruit (*Averrhoa carambola* L.). *Biochemical and Biophysical Research Communications*, 287(4), 846–851. doi.org/10.1006/bbrc.2001.5670
- Pola, W., Sugaya, S., & Photchanachai, S. (2020). Influence of Postharvest Temperatures on Carotenoid Biosynthesis and Phytochemicals in Mature Green Chili (*Capsicum annuum* L.). *Antioxidants*, 9(3), 203. doi:10.3390/antiox9030203. doi.org/10.3390/antiox9030203
- Rao GU, Paran I. (2003). Polygalacturonase: a candidate gene for the soft flesh and deciduous fruit mutation in *Capsicum*. *Plant Molecular Biology*. 51:135–141.
- Rao, T. V. R., Gol, N. B. and Shah, K. K. (2011). Effect of postharvest treatments and storage temperatures on the quality and shelf life of sweet pepper (*Capsicum annum* L.). *Scientia Horticulturae* 132: 18-26. doi.org/10.1016/j.scienta.2011.09.032
- Samira, A., Woldetsadik, K., & Workneh, T. S. (2013). Postharvest quality and shelf life of some hot pepper varieties. *Journal of food science and technology*, 50(5), 842-855.
- Schweiggert, U., Schieber, A., & Carle, R. (2005). Inactivation of peroxidase, polyphenoloxidase, and lipoxygenase in paprika and chili powder after immediate thermal treatment of the plant material. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 6(4), 403–411. doi.org/10.1016/j.ifset.2005.05.001
- Simonovska, J., Rafajlovska, V., Kavrakovski, Z., & Srbnoska, M. (2014). Nutritive and bioactive compounds in hot fruits of *Capsicum annuum* L. from Macedonia. *Macedonian Journal of Chemistry and Chemical Engineering*, 33(1), 97-104.

- Sudha, G., & Ravishankar, G. A. (2003). Influence of methyl jasmonate and salicylic acid in the enhancement of capsaicin production in cell suspension cultures of *Capsicum frutescens* Mill. *Current science*, 1212-1217.
- Sun, T., Xu, Z., Wu, C.-T., Janes, M., Prinyawiwatkul, W., & No, H. K. (2007). Antioxidant Activities of Different Colored Sweet Bell Peppers (*Capsicum annuum* L.). *Journal of Food Science*, 72(2), S98–S102. doi.org/10.1111/j.1750-3841.2006.00245.x
- Tan, C. K., Ali, Z. M., & Zainal, Z. (2012). Changes in ethylene production, carbohydrase activity and antioxidant status in pepper fruits during ripening. *Scientia Horticulturae*, 142, 23–31. doi.org/10.1016/j.scienta.2012.04.030
- Thompson, KA. (2003). Fruit and vegetables: harvesting, handling and storage. Blackwell Publishing, Ltd. New York, USA. 482 p.
- Tian, S.-L., Li, L., Shah, S. N. M., & Gong, Z.-H. (2015). The relationship between red fruit colour formation and key genes of capsanthin biosynthesis pathway in *Capsicum annuum*. *Biologia Plantarum*, 59(3), 507–513. doi.org/10.1007/s10535-015-0529-7
- Tsegay, D., Tesfaye, B., Mohammed, A., Yirga, H. and Bayleyegn, A. (2013). Effects of harvesting stage and storage duration on postharvest quality and shelf life of sweet bell pepper (*Capsicum annuum* L.) varieties under passive refrigeration system. *International Journal for Biotechnology and Molecular Biology Research* 4: 98-104.
- Valenzuela, J. L., Manzano, S., Palma, F., Carvajal, F., Garrido, D., & Jamilena, M. (2017). Oxidative stress associated with chilling injury in immature fruit: postharvest technological and biotechnological solutions. *International Journal of Molecular Science*, 18, 1467, 1-26. doi.org/10.3390/ijms18071467
- Vicente, A. R., Pineda, C., Lemoine, L., Civello, P. M., Martinez, G. A., & Chaves, A. R. (2005). UV-C treatments reduce decay, retain quality and alleviate chilling injury in pepper. *Postharvest Biology and Technology*, 35(1), 69-78. doi.org/10.1016/j.postharvbio.2004.06.001
- Wang, Q., Ding, T., Gao, L., Pang, J., & Yang, N. (2012). Effect of brassinolide on chilling injury of green bell pepper in storage. *Scientia Horticulturae*, 144, 195-200. doi.org/10.1016/j.scienta.2012.07.018

6 CONCLUSIONES GENERALES

La temperatura de almacenamiento tuvo un efecto significativo sobre la calidad y las características típicas de los frutos de chile Serrano. Un almacenamiento a 25 °C afectó rápidamente las características de los frutos, con elevada pérdida de peso y apariencia de marchitez, lo cual provoca que los frutos pierdan su valor comercial. La aplicación de bajas temperaturas (4 y 8 °C) logró mantener por un mayor periodo las características globales de los frutos de chile, logrando extender de manera significativa la vida de anaquel de estos frutos. Sin embargo, si no se evalúa la temperatura óptima de almacenamiento se pueden presentar desordenes fisiológicos como el daño por frío, ocasionando ablandamientos en la superficie de los frutos, así como el oscurecimiento de las semillas y los tejidos internos. El uso de jasmonato de metilo logró incrementar la síntesis de compuestos fenólicos, capsaicina y la actividad antioxidante de los frutos sin importar la temperatura de almacenamiento. Aunque no se vio un efecto significativo en la protección contra los síntomas de daño por frío, ya que todos los tratamientos presentaron síntomas en el final de los ensayos cuando se almacenaron a 4 °C. En general, la mejor temperatura de conservación para el chile Serrano fue de 8 °C, ya que logró extender por un mayor tiempo la vida de anaquel de los frutos sin afectar las características de éstos. Por otra parte, el contenido de compuestos nutrimentales y nutraceuticos de los frutos se puede ver incrementada cuando se aplican tratamientos con metil jasmonato a concentración de 25 y 100 ppm, aunque éstos no funcionaron como tratamiento preventivo contra el daño por frío. La revisión del estado del arte de chiles pungentes nos brindó un panorama de la importancia que tiene el cultivo de estas especies tanto en México como a nivel mundial, además de brindarnos información acerca de nuevas líneas de investigación que se pudieran desarrollar en un futuro.

7 ANEXOS

7.1 Publicaciones

International Food Research Journal 26(6): 1889-1898 (December 2019)

Journal homepage: <http://www.ijfrj.upm.edu.my>



Quality attributes and antioxidant properties of Serrano chili peppers (*Capsicum annuum* L.) affected by thermal conditions postharvest

¹Miranda-Molina, F. D., ^{1*}Valle-Guadarrama, S., ¹Guerra-Ramírez, D.,
²Arévalo-Galarza, M. D. L., ¹Pérez-Grajales, M. and ³Artés-Hernández, F.

¹Universidad Autónoma Chapingo, Mexico-Texcoco km 38.5, Chapingo, 56230, Texcoco de Mora, Mexico

²Colegio de Posgraduados, Mexico-Texcoco km 36.0, Montecillo, 56230, Texcoco de Mora, Mexico

³Postharvest and Refrigeration Group, Department of Agricultural Engineering, Universidad Politécnica de Cartagena, Cartagena, Murcia, 30203, Spain

Article history

Received: 26 June, 2019
Received in revised form:
18 October, 2019
Accepted: 23 October, 2019

Keywords

Capsicum annuum
Postharvest
Refrigeration
Serrano chili pepper

Abstract

Fruits of the genus *Capsicum* are common food ingredients in many countries; therefore it is important to preserve their nutritional properties. The objective of the present work was to evaluate the modification of the quality attributes and antioxidant properties of Serrano chili peppers (*Capsicum annuum* L.) during the postharvest period under different thermal conditions. A storage period of 33 d was implemented at 4, 8, and 25°C. Serrano chilli peppers stored at 4 and 8°C showed the smallest changes in weight loss, texture, and hue angle; but darkening was identified in the seeds and tissues of those stored at 4°C, which was associated with chilling injury. Total soluble phenols and capsaicin increased with time at 25°C but remained unchanged in Serrano chilli peppers stored at 4 and 8°C. The antioxidant capacity was not affected by ripening or by low temperature. Storage at 8°C allowed for the maintenance of Serrano chili peppers at optimum conditions throughout the postharvest period.

© All Rights Reserved