

METABOLÓMICA Y CULTIVO

DEL CHILE HABANERO (*Capsicum chinense* Jacq)

DE LA PENÍNSULA DE YUCATÁN

DRA. INGRID MAYANIN RODRÍGUEZ BUENFIL
DR. MANUEL OCTAVIO RAMÍREZ SUCRE
COORDINADORES



Este libro fue financiado por el Fondo de Investigación de Ciencia Básica SEP-CONACYT 2015

Metabolómica y cultivo del chile habanero (*Capsicum chinense* Jacq) de la Península de Yucatán. Ingrid Mayanin Rodríguez Buenfil y Manuel Octavio Ramírez Sucre, coordinadores. Centro de Investigación y Asistencia en Tecnología y Diseño del Estado de Jalisco A.C. CIATEJ, México. Ingrid Mayanin Rodríguez Buenfil, Manuel Octavio Ramírez Sucre y Emmanuel de Jesús Ramírez Rivera, editores.

Primera edición, 30 de junio de 2020

326 páginas.

ISBN: 978-607-8734-09-2

Centro de Investigación y Asistencia en Tecnología y Diseño del Estado de Jalisco A.C. CIATEJ
www.ciatej.mx

D.R. © 2020. Ingrid Mayanin Rodríguez Buenfil, Manuel Octavio Ramírez Sucre y Emmanuel de Jesús Ramírez Rivera

D.R. © 2020. Centro de Investigación y Asistencia en Tecnología y Diseño del estado de Jalisco A. C.

Av. Normalistas 800, Colinas de la Normal
44270, Guadalajara, Jalisco.

Diseño de portada, contraportada y separadores: Karen Elizabeth Pérez Beltrán

Impreso en México/ Reservados los derechos.

METABOLÓMICA Y CULTIVO DEL CHILE HABANERO (*Capsicum chinense* Jacq) DE LA PENÍNSULA DE YUCATÁN

Dra. Ingrid Mayanin Rodríguez Buenfil

Dr. Manuel Octavio Ramírez Sucre

Coordinadores

Dra. Ingrid Mayanin Rodríguez Buenfil

Dr. Manuel Octavio Ramírez Sucre

Dr. Emmanuel de Jesús Ramírez Rivera

Editores

Autores

Alonso Villegas, Rodrigo
Burgos Valencia, Eduardo
Chel Guerrero, Lilian Dolores
Cristóbal Alejo, Jairo
Echevarría Machado, Ileana
Escalante Magaña, Camilo Andrés
Esquivel Hernández, Diego Armando
Figueroa Hernández, Claudia Yuritzí
Flores López, María de Lourdes
Gómez Rincón, Enrique
Herrera Corredor, José Andrés
Herrera Parra, Elizabeth
Jiménez Hernández, Javier
López Puc, Guadalupe
Maldonado Astudillo, Yanik Ixchel
Martín Mex, Rodolfo
Martínez Estévez, Manuel
Medina Lara, María de Fátima
Morales Landa, Juan Luis
Morozova, Ksenia
Narváez Zapata, José Alberto
Navarrete Mapen, Reyna Zulemy
Nexticapán Garcéz, Ángel
Oney Montalvo, Julio Enrique
Rodríguez Buenfil, Ingrid Mayanin
Rodríguez Rodríguez, Juan Daniel
Ramírez Rivera, Emmanuel de Jesús
Ramírez Sucre, Manuel Octavio
Ramón Canul, Lorena Guadalupe
Reyes Vázquez, Nohemí del Carmen
Ruiz Gutiérrez, Mónica Carolina
Ruiz Sánchez, Esaú
Salazar López, Ricardo
Sánchez Osorio, Ever
Sánchez Valera, Oscar Valeriano
Scampicchio, Matteo
Tun Suárez, José María
Uc Varguez, Alberto
Vélez Ruiz, Jorge Fernando
Zamacona Ruiz, Melissa

AGRADECIMIENTO

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por el financiamiento del proyecto con título: “Análisis de los cambios metabólicos durante el desarrollo del fruto *Capsicum chinense* Jacq cultivado en diferentes tipos de suelo” con No. 257588 correspondiente a la convocatoria CB-2015-01.

CONTENIDO

PRÓLOGO	1
I. CULTIVO	3
CAPÍTULO 1. Manejo agronómico y los factores que influyen en el crecimiento y desarrollo de las plantas de cultivo del chile habanero	4
CAPÍTULO 2. Principales enfermedades del chile habanero (<i>Capsicum chinense</i> y su control	24
CAPÍTULO 3. Biología y manejo de plagas del cultivo de chile habanero	42
CAPÍTULO 4. Salinidad en plantas: caso <i>Capsicum</i>	55
II. METABOLÓMICA	71
CAPÍTULO 5. Importancia del estudio de metabolitos del chile habanero (<i>Capsicum chinense</i> Jacq.) y su posible actividad biológica: una revisión	72
CAPÍTULO 6. Capsaicinoides en chile habanero (<i>Capsicum chinense</i> J.) y factores que afectan su producción	95
CAPÍTULO 7. Polifenoles en chile habanero (<i>Capsicum chinense</i> Jacq.) y factores que afectan su producción	117
CAPÍTULO 8. Carotenoides en chile habanero (<i>Capsicum chinense</i> Jacq.) y factores que afectan su producción	134
CAPÍTULO 9. Vitaminas en chile habanero (<i>Capsicum chinense</i> Jacq.) y factores que afectan su producción	154
CAPÍTULO 10. Métodos electroquímicos para la detención de capsaicinoides en chile habanero	170
CAPÍTULO 11. Evaluación química y uso potencial de subproductos de <i>Capsicum chinense</i> Jacq., cultivado en dos tipos de suelo de Yucatán	185
III. CONTROL DE CALIDAD	217
CAPÍTULO 12. Estudio transcosecha y postcosecha del desarrollo de textura como característica de calidad de chile habanero de la península de Yucatán	218
CAPÍTULO 13. Análisis integrativo del color y metabolómica dirigida de metabolitos asociados al chile habanero (<i>Capsicum chinense</i> JACQ.)	242
CAPÍTULO 14. Técnicas sensométricas y su correlación instrumental para la evaluación de chiles: una revisión	263

IV. POSTCOSECHA	278
CAPÍTULO 15. Fisiología y tecnología postcosecha del chile habanero (<i>Capsicum chinense</i> Jacq.).....	279
V. BIOLOGÍA MOLECULAR	291
CAPÍTULO 16. Genes relacionados a la biosíntesis de capsaicinoides en el género <i>Capsicum</i> : un enfoque transcriptómico	292
VI. SOCIAL	308
CAPÍTULO 17. Entorno productivo del chile habanero en la península de Yucatán, México.....	309

PRÓLOGO

Eugenia Lugo Cervantes*

El Centro de Investigación y Asistencia en Tecnología y Diseño del Estado de Jalisco (CIATEJ), es un Centro Público de Investigación del Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) que cuenta con dos sedes la subsede Noreste y la Sureste, esta última ha adquirido gran importancia en la zona sur del país ya que atiende al sector agroindustrial de la región y además genera conocimiento. La Dra. Ingrid Rodríguez Buenfil, fue pionera en la fundación de la subsede sureste y ha liderado diferentes proyectos y se ha enfocado en la línea de investigación de chile habanero como eje central. Por lo que en 2016, obtuvo un proyecto de ciencia básica financiado por el Consejo nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) intitulado “Análisis de los cambios metabólicos durante el desarrollo del fruto *Capsicum chinense* Jacq cultivado en diferentes tipos de suelo” en donde el objetivo de este proyecto fue estudiar los cambios metabólicos correlacionados con la expresión genética durante el desarrollo de *Capsicum chinense* cultivado en tres tipos de suelo para el establecimiento de un modelo de redes metabólicas en respuesta a estas condiciones.

En este libro se integran los resultados del proyecto, los cuales fueron obtenidos en CIATEJ y es importante mencionar que se tuvo la colaboración de instituciones nacionales como el Centro de Investigación Científica de Yucatán (CICY) y el Centro de Biotecnología Genómica del IPN e internacionales como la Universidad libre de Bolzano Italia.

El libro proporciona una visión interdisciplinaria del cultivo de chile habanero de la Península de Yucatán con énfasis en la metabólica, en donde se incluyen resultados experimentales obtenidos en el desarrollo del proyecto. Evaluando los factores que afectan la producción de biomoléculas como carotenoides, capsaicinoides y vitaminas presentes en el chile habanero. Adicionalmente se incluyen temas del cultivo, como enfermedades, impacto del suelo que afectan el desarrollo de la planta y los frutos. Temas de postcosecha así como de control de calidad en donde se analiza una relación entre el color y la metabólica del chile habanero,

*Directora General del CIATEJ

así como análisis de textura y técnicas de sensométricas. El libro finaliza con dos capítulos muy importantes, un análisis de transcriptoma y la visión social del chile habanero en donde se expone el entorno productivo en la península de Yucatán.

Esta obra abre una nueva perspectiva del conocimiento, en donde el libro además de ser un entregable en el proyecto de Ciencia básica, permite adentrarse en temas fundamentales del chile habanero en donde se tocan aspectos de base científica y tecnológica. Finalmente es una contribución al estado de Yucatán y a su sociedad.

Guadalajara Jalisco, Junio de 2020.

I. CULTIVO



CAPITULO 1

Manejo agronómico y los factores que influyen en el crecimiento y desarrollo de las plantas del cultivo de chile habanero

Agronomic management and the factors that influence the growth and development of plants of habanero pepper crop

López-Puc, Guadalupe¹, Rodríguez-Rodríguez, Juan D¹., Ramírez-Sucre, Manuel O.¹, Rodríguez-Buenfil, Ingrid M.^{1*}

¹Centro de Investigación y Asistencia en Tecnología y Diseño del Estado de Jalisco. Subsede Sureste. Tablaje Catastral 31264 Km 5.5 Carr, Sierra Papacal-Chuburná puerto. Parque Científico Tecnológico de Yucatán. CP 97302 Mérida, Yucatán, México). *autor de correspondencia: irodriguez@ciatej.mx

Resumen

El chile habanero (*Capsicum chinense* Jacq.) es uno de los cultivos comerciales emblemáticos de la Península de Yucatán, México. Debido a que el sabor típico de los frutos es único de esta región de México en el 2010 se le otorgó la denominación de origen. Las características organolépticas que distinguen a los frutos de chile habanero son el aroma y sabor particular y alto nivel de picante conferido por la alta concentración de capsaicinoides. La concentración de los capsaicinoides puede ser influenciada por las condiciones de estrés hídrico o manejo nutricional del cultivo, entre otros. Teniendo en cuenta la importancia comercial del cultivo, es importante aplicar un adecuado manejo agronómico y conocer los factores que influyen en el crecimiento y desarrollo de las plantas del cultivo de chile habanero. En el manejo agronómico se debe considerar las condiciones de germinación, el transplante, el riego, la fertilización, por lo que el objetivo del presente capítulo es comentar los factores que influyen en el crecimiento y desarrollo de las plantas del cultivo de chile habanero y presentar los resultados obtenidos al evaluar el efecto de tres tipos de suelo en el que se realiza el cultivo del chile habanero en la Península de Yucatán: *K'ankab lu'um* o suelo rojo, *Box lu'um* o suelo negro y *Chich lu'um* o suelo café, sobre el desarrollo de la planta de *Capsicum chinense* Jacq y su producción de frutos. Palabras clave: *Capsicum chinense*, manejo agronómico, suelos de Yucatán, crecimiento de la planta

Abstract

Habanero pepper (*Capsicum chinense* Jacq.) is one of the emblematic commercial crops of the Yucatan Peninsula, Mexico. Because the typical flavor of the fruits is unique to this region of Mexico, in 2010 the designation of origin was granted. The organoleptic characteristics that distinguish the habanero pepper fruits are the particular aroma and flavor and high level of spiciness conferred by the high concentration of capsaicinoids. The concentration of the capsaicinoids can be influenced by the conditions of water stress or nutritional management of the crop, among others. Considering the commercial importance of the crop, it is important to apply adequate agronomic management and to know the factors that may influenced the growth and development of the plants of the Habanero pepper crop. In agronomic management, germination conditions, transplantation, irrigation, and fertilization must be considered, so the objective of this chapter is to comment on the factors that influence the

growth and development of the plants of the habanero pepper crop and to show the results obtained when evaluating the effect of three types of soil where the cultivation of the habanero pepper is carried out in the Yucatan Peninsula: *K'ankab lu'um* or red soil, *Box lu'um* or black soil and *Chich lu'um* or brown soil, on the development of the *Capsicum chinense* Jacq plant and its fruit production.

Keywords: *Capsicum chinense*, agronomic management, Yucatán Soils, Plant growth.

I.Introducción

1.1 *Capsicum chinense* Jacq

El chile habanero (*Capsicum chinense* Jacq.) es un cultivo tradicional en el sureste de México y Yucatán es el principal productor (Borges-Gómez et al., 2014). En 2019 fueron sembradas 345.39 ha con este chile en los estados de Campeche, Quintana Roo y Yucatán, lo que representó una producción de 5,782.7 ton, de las cuales Yucatán contribuyó con el 40 % de esta producción (SIAP, 2019).

El chile habanero es una planta de ciclo anual, alcanza una altura de 1.5 m en suelo mecanizable y hasta 16 meses de vida. Tiene raíz pivotante y un sistema radicular bien desarrollado cuyo tamaño depende de la edad de la planta, su tallo es grueso, erecto y generalmente tiene tendencia a formar tres tallos en la primera ramificación para después continuar bifurcándose, las hojas son simples, lisas y alternas, las flores son de color blanco; se pueden presentar racimos de hasta seis flores (Tun, 2001) y presenta en promedio seis frutos por axila; estos son de un tamaño entre 2 y 6 cm, el color es verde cuando son tiernos, y anaranjados, amarillos o rojos cuando maduros; son además muy picantes y aromáticos (Soria et al., 2002).

El chile habanero es el único cultivar de la especie *Capsicum chinense* Jacq., sin embargo, existen diversos tipos de chile habanero, los cuales se diferencian por el color del fruto cuando madura. Los frutos varían en color: amarillo, naranja, rosado, rojo, marrón y café. Para el consumo en fresco nacional es más adquirido el de color naranja, el cual es el preferido por los consumidores, para la industria se utiliza este mismo color y el amarillo. En el mercado extranjero existe preferencia por el fruto rojo y el de color café, conocido como cubano, por su buen tamaño y mayor pungencia (Tun, 2001).

1.2 Efecto de tipo de suelo, sustratos, fertilizantes en el crecimiento de chile habanero

1.2.2. Suelos de Yucatán

El suelo es un factor muy importante debido a que sus componentes al ser asimilados por la planta influyen en su fisiología (Chludil et al., 2008). En el estado de Yucatán, los suelos donde se cultiva el chile habanero son altamente heterogéneos (Borges et al., 2014) existiendo una gran diversidad de suelos en extensiones pequeñas de terreno lo cual es un problema importante en el manejo agronómico (Duch, 1988). Estos suelos son de densidad aparente baja, textura franco limosa, porosidad alta que facilita la aireación y el drenaje, el pH va de neutro a medianamente alcalino, presenta una salinidad ligera, con alto contenido de materia orgánica (MO), elevada capacidad de intercambio catiónico (CIC), altas concentraciones de P, N, K y Ca, contenidos de Mg de medio a alto, con niveles adecuados de Cu y Mn, pero deficientes en Fe y Zn (Borges et al., 2014).

Los tipos principales de suelos donde se cultiva el chile habanero en la península de Yucatán de acuerdo a la nomenclatura indígena del suelo maya (MSN), son: *K'áankab lu'um* (suelos rojos), *Box lu'um* (suelos negros) y *Ch'ich 'lu'um* (suelos pedregosos ó cafés) (Bautista *et al.*, 2005). Esta clasificación no considera, sin embargo, el conocimiento local de que el suelo pedregoso está limitado en micro y macro nutrientes, así como poca capacidad de retención de agua. Estas propiedades del suelo pueden causar diferentes tipos de estrés a las plantas, como el estrés debido a la deficiencia de potasio (K) o agua (Borges *et al.*, 2010; Medina-Lara *et al.*, 2019; Jaimez R. E., 2000)

1.2.2.1 *Boxlu'um* (Suelo negro)

El *Boxlu'um* es de color negro y presenta cantidades de carbonatos superiores al 30%. Se caracteriza por encontrarse en las partes altas del micro relieve, presentando piedras de un diámetro entre 5 y 10 cm de diámetro, lo cual hace que esta clase de tierra presente una mayor retención de humedad. El *Boxlu'um*, puede corresponder a dos subunidades, dependiendo de la cantidad de piedras. Cuando presenta abundantes piedras a lo largo del perfil será un Leptosol hiperesquelético (LPhsk), pero si la cantidad de suelo fuera mayor y sólo las piedras están en la superficie, entonces se clasificará como Leptosol rendzínico (LPrz) por el contenido de materia orgánica (< 10%) y de carbonatos de calcio. El *Boxlu'um* presenta la mejor calidad química a nivel de tierra fina de todos los Leptosoles, reflejada en los altos contenidos de materia orgánica, fósforo asimilable de 20 a 50 mg kg⁻¹, nitratos de 40 a 60 mg kg⁻¹, así como las mayores cantidades de micronutrientes en comparación con otros; en esta clase de tierra la fertilización química del suelo no es tan funcional al ser comparados con el *Kan'kab*, aunado a la dificultad para la aplicación de abonos. En estos suelos el P no constituye una restricción importante del crecimiento vegetal. El *Boxlu'um* es una clase de tierra con altos contenidos de calcio y fósforo totales, así como con cantidades menores de Al y Si, que se reflejan en las también escasas cantidades relativas de minerales secundarios (Bautista *et al.*, 2005).

1.2.2.2 *Ch'ich 'lu'um* (Suelo café)

El *Chichlu'um* se caracteriza por ser un suelo con grava, puede ser de varios colores café-rojizo a negro. Se encuentra predominantemente en las partes altas del microrrelieve y pie de monte. Retiene mucha agua, siendo por ello de buena calidad; puede ser clasificado como LPrz cuando es negro y carbonatado, pero puede no cumplir con los niveles de carbonatos de calcio estipulados para el carácter rendzínico. Esta clase de tierra puede llegar a confundirse con suelos profundos con grava del grupo Cambisol (CM), de los “pies de monte” localizados entre el *Boxlu'um* y el *Kankab* (Bautista *et al.*, 2005)

1.2.2.3 *K'áankab lu'um* (Suelo rojo)

El *Kankab* es la clase de tierra que presenta mayor cantidad de tierra fina, coloración de café-rojizo al amarillo, por lo cual puede clasificarse de crómico o ródico, según sea el caso. Es la clase de tierra que se localiza en las planicies del meso y microrrelieve, en sitios conocidos como los valles ciegos de karst. Esta clase de tierra puede pertenecer a tres grupos de suelo, Luvisol (LV), CM y Calicisol (CL), dependiendo del desarrollo del perfil, es decir dependiente de la presencia del horizonte Bt (acumulación de arcilla), Bw (horizonte cámbico) y Ckm (horizonte petrocálcio), respectivamente. No se han encontrado evidencias

lingüísticas de que los campesinos mayas identifiquen las diferencias entre los tres grupos de suelo, pero es posible que en cuestiones prácticas al momento de cultivar si noten estas diferencias (Bautista et al., 2005)

El desarrollo de la fruta se ve afectado por la interacción del suelo con la planta, ya que la cantidad de nutrientes, agua y la salinidad en el suelo tiene un efecto significativo en la cantidad y tamaño de la fruta. Se cuenta con estudios que han demostrado que el tipo de suelo tiene una relación directa con el crecimiento y rendimiento de frutos del chile (Rodríguez-Buenfil *et al.*, 2017; Medina-Lara *et al.*, 2019), y otros estudios han demostrado un directa relación del contenido de algunos metabolitos secundarios con estos mismos factores (Oney-Montalvo J. *et al.*, 2018). Sin embargo, cuando las plantas se cultivan, la variedad de los factores que afectan el desarrollo no pueden simplemente reducirse a la presencia o ausencia de un nutriente o la falta de agua, el suelo la estructura es compleja y variante, aunque la nutrición puede ser corregida por métodos químicos, otros parámetros del suelo no.

1.2.3. Sustratos y Fertilización para el cultivo del chile habanero

La utilización adecuada de fertilizantes en los cultivos permite obtener mayor rendimiento, reduciendo los costos de producción en el cultivo y evitando la contaminación del ambiente. Para reducir el uso excesivo de fertilizantes es necesario conocer la forma en que las plantas absorben los nutrimentos para determinar que fertilización debe aplicarse, ajustarla al ciclo del cultivo y por consecuencia, optimizar la cantidad de fertilizante a utilizar; de esta manera se evita el deterioro de los suelos y se disminuye el impacto de la fertilización en el ambiente (Noh-Medina *et al.*, 2010). Por otra parte, el uso de fertilizantes químicos en grandes cantidades conduce a la liberación instantánea de nutrientes, lo que genera que las plantas crezcan al máximo y agotan todos los productos fotosintéticos en el proceso de crecimiento dejando solo una cantidad mínima para la producción de metabolitos secundarios (Stamp, 2003).

Es importante conocer la demanda nutrimental del cultivo en las diferentes etapas de desarrollo de la planta, conocer lo que aporta el suelo o el sustrato utilizado. Por lo anterior, se han realizado estudios para determinar la demanda nutrimental del cultivo (Dem), que se define como la cantidad de nutrimentos que el cultivo requiere para producir una tonelada del producto de interés, para su estimación se necesita conocer la concentración nutrimental óptima en la biomasa aérea total (RI), la cual indica la concentración mínima del nutriente en cuestión en la biomasa total al momento de la cosecha en un sistema en donde todos los nutrimentos han estado en suficiencia para el cultivo y así obtener el rendimiento máximo (Nieves-González *et al.* 2015). Una metodología para obtener este valor consiste en aportar dosis crecientes del nutriente que se quiere evaluar, en el cultivo, procurando mantener un nivel de suficiencia en el resto de los nutrimentos. Debido a que esta situación es difícil de controlar bajo condiciones experimentales en campo, se recomienda realizar este tipo de estudios bajo condiciones controladas, es decir, cultivos sin suelo (Nieves-González *et al.* 2015). Noh-Medina *et al.* (2010) determinaron en chile habanero, que la relación entre nutrimentos en la biomasa presentó mayor número de respuestas significativas que la relación de los nutrimentos en el extracto celular. Las curvas de acumulación de NPK sugieren que la fertilización de 130-120-160 de N, P₂O₅ y K₂O respectivamente, debe aumentarse en 63% para N, reducirse a la mitad el P₂O₅ y mantener

la dosis de K₂O. Algunos trabajos relacionados al tema de sustrato y fertilizantes se describen en la Tabla 1.

Tabla 1. Estudios relacionados a sustratos y fertilizantes en chile habanero

Autores	Objetivo	Sustrato/ Fertilizante	Resultados
Guzmán-Antonio <i>et al.</i> , 2012	Evaluar el efecto del AS y la fertilización con N, P y K en el crecimiento y estado nutricional en plántulas de <i>C. chinense</i> .	Siembra de semillas en sustrato conformado de turba, perlita y piedra caliza.	Las plántulas sin fertilización y con AS tuvieron un desarrollo pobre. El uso de 10 ⁻⁸ M de AS con 190 mg L ⁻¹ de N-P ₂ O ₅ -K ₂ O) incrementó la altura, el número de hojas y la longitud de raíces de las plantas.
Nieves-González <i>et al.</i> 2015	Evaluar el RI de P para estimar la demanda nutrimental en <i>C. chinense</i> var Big Brother®	Siembra de semillas en sustrato Peat Moss/Sol. Steiner en charola. Trasplante de plantas de 50 d edad en sustrato Tezontle/Sol. Steiner.	Aplicando 1.5 meq·L ⁻¹ H ₂ PO ₄ ⁻ , la mayor PF fue 851 y la BST fue de 182 g/planta. Aplicando 2.0 meq·L ⁻¹ H ₂ PO ₄ ⁻ la [P] en raíz fue de 1.43%, se redujo la PF. El RI de P fue 0.22%, el cual se obtuvo con 1.5 meq·L ⁻¹ H ₂ PO ₄ ⁻ y presentó una Dem de 0.47 kg P/t de FF. * Datos registrados a los 90 días del trasplante:
Tucuch-Hass <i>et al.</i> (2012)	Evaluar el efecto de la relación amonio/nitrato y la granulometría del sustrato sobre el rendimiento y la calidad de los frutos de <i>C. Chinense</i>		Amonio /nitrato 20/80 dio la mejor CF independientemente del sustrato. Los valores más altos del DT y AP se obtuvieron con 0/100 amonio /nitrato. El sustrato con partícula de 10-20 mm produjo mayor RF y CF. El uso de 10/90 amonio/nitrato con sustrato de 10-20 mm presentó los valores más altos en todas las variables evaluadas. El uso 0/100 amonio/nitrato con la mezcla de sustrato con tezontle dio los valores más bajos.

FF: Fruto fresco; BST: Biomasa seca total; P: Fósforo; RI: Requerimiento interno; RF: Rendimiento de frutos; CF: Calidad de frutos. DT: diámetro del tallo; AP: Altura de la planta; RI: Requerimiento interno. N: Nitrógeno; K: Potasio; P: Fósforo. AS: Ácido salicílico.

El nitrógeno es un macronutriente clave de los nucleótidos, clorofilas, aminoácidos y proteínas. En las hojas, más del 60% del nitrógeno total es utilizado a las proteínas del aparato fotosintético (Hikosaka *et al.*, 1998). El nitrógeno puede influir en la calidad de los frutos y las semillas, ya que puede alterar la cantidad y proporción de las proteínas y los aminoácidos, puede alterar el contenido de las vitaminas, el azúcar y los sólidos solubles en los cultivos hortícolas (Maheswari *et al.*, 2017). La falta de nitrógeno genera alteraciones en el metabolismo del carbono, disminuyendo los niveles de malato y otros ácidos orgánicos

y mayores niveles de almidón y lo que afecta severamente el rendimiento del cultivo (Scheible *et al.*, 1997; Stitt 1999; Tschoep *et al.*, 2009). Además, la deficiencia de nitrógeno impacta el desarrollo del cultivo con la aceleración de la maduración de las hojas y senescencia (Mei *et al.*, 1984).

En un estudio realizado por de Ávila Silva *et al.*, 2019 en *C. chinense* en los cultivares Biquinho y Habanero, se observó que éstos tuvieron comportamiento contrastante en el amarre de fruto y el tamaño de la fruta. La deficiencia de nitrógeno produjo la disminución de la biomasa y la acumulación de almidón en las hojas, mientras que el exceso de nitrógeno incremento los niveles de NH_4^+ y la biomasa en hojas, principalmente en el cv. Habanero, que tiene menor amarre de frutos y mayor tamaño de frutos, esto puede ser un mecanismo por medio del cual la planta puede tolerar los altos niveles de NH_4^+ tóxico.

La deficiencia de nitrógeno en las plantas de *Capsicum* reduce el rendimiento del fruto a través del menor desarrollo de nuevos tejidos reproductivos y vegetativos. Las plantas que crecen con deficiencia de nitrógeno tienen un menor número de flores, pero frutos más pesados. Por el contrario, las plantas con mayor suministro de nitrógeno tienen menor asimilación de CO_2 y favorecen la vegetación en vez del crecimiento reproductivo, probablemente debido a un desequilibrio en suministro de sacarosa. El exceso de nitrógeno, la baja fijación de CO_2 y la competencia interna por los asimilados entre lo vegetativo y los órganos reproductivos pueden ser responsables de la disminución del peso del individuo frutos y la disminución en el número de flores, fructificación y rendimiento (de Ávila Silva *et al.*, 2019).

1.3. Efecto fisiológico de los nutrientes y reguladores de crecimiento en la producción de chile habanero

Noh-Medina *et al.* 2010 determinaron la composición nutrimental de la biomasa y los nutrimentos en los tejidos en cuatro etapas del cultivo del chile habanero: 1) Etapa vegetativa, a 50 días después del trasplante (DDT); 2) Etapa de floración, a 75 DDT; 3) Etapa de fructificación, a 100 DDT y 4) Etapa de producción, a 120 DDT, los resultados indicaron que el contenido de macronutrientes fue $\text{N} > \text{K} > \text{Ca} > \text{Mg} > \text{P}$ (g planta^{-1}) y para los micronutrientes el orden fue: $\text{Fe} > \text{Zn} > \text{Mn} > \text{Cu}$ (mg planta^{-1}). En otro estudio, Tapia Vargas *et al.*, 2016 reportaron que es factible incrementar la producción y la calidad de los frutos de *C. chinense* mediante la aplicación de reguladores de crecimiento de plantas, específicamente una mezcla de citocininas. El tratamiento con citocininas dio como resultado mayor rendimiento de fruto en 160 %, mayor peso de fruto, mayor longitud y mayor contenido del alcaloide en 40 % en comparación con el testigo.

Ramírez-Luna *et al.*, 2005 reportaron que al utilizar el producto comercial Maxigrow obtuvieron 46,891 frutos por ha en comparación con el experimento testigo (sin aplicación de producto comercial) en el que se obtuvieron 23,320 frutos. Maxigrow contiene 545,300 mg L^{-1} de extractos orgánicos, 90 mg L^{-1} de auxinas, 1500 mg L^{-1} de citocininas, 100 mg L^{-1} de giberelinas, 26,500 mg L^{-1} de N, 13,300 mg L^{-1} de P, 13,300 de K y 200 mg L^{-1} de Ca, 26,500 mg L^{-1} de Zn.

1.4 Efecto de la temperatura y agua en la producción de chile habanero

En las plantas el agua constituye típicamente de 80 a 95 % de la masa de los tejidos en crecimiento, donde desempeña funciones esenciales. La baja disponibilidad de agua en el suelo provoca el estrés abiótico de mayor incidencia en el crecimiento vegetal que en los sistemas agrícolas representa en pérdidas económicas. Es importante entonces estimar los requerimientos hídricos de los cultivos para mejorar su potencial productivo y el uso del agua.

Macías – Rodríguez *et al* 2013 realizaron estudios de fertirriego y manejo de temperaturas en el interior de los invernadero y determinaron que las condiciones ideales de temperatura y humedad relativa (HR) para la producción de habanero bajo condiciones de invernadero son respectivamente de 33 °C y de 80 %. A nivel de productores se indica que este cultivo también se produce en un rango de temperatura de 34 a 40 °C, pero con menor eficiencia, con síntomas de estrés hídrico y marchitamiento del follaje en las horas de mayor calor; la literatura reporta que esta especie trabaja óptimamente con temperaturas de 26 a 30 °C y una HR de 65 %.

La falta de agua es el estrés abiótico de mayor incidencia en el crecimiento vegetal y es de especial interés en los sistemas agrícolas en los que causa pérdidas económicas. La respuesta más sensible al estrés hídrico es el crecimiento celular y es durante esta condición que las células permanecen más pequeñas y las hojas tienen menor desarrollo y en consecuencia, se reduce el área foliar fotosintéticamente activa (Parra *et al.*, 1999). Además, en tales condiciones la actividad hidrolítica de las enzimas aumenta considerablemente, el transporte de los iones disminuye y la respiración comúnmente aumenta (Salisbury y Ross, 2000). Los procesos fisiológicos pueden ser afectados por la disminución del riego (Pérez *et al.*, 2008) debido a que la conductancia estomática se reduce cuando aumenta el estrés hídrico en hojas a causa del cierre de estomas (Rada *et al.*, 2005) y se sabe que se incrementa la temperatura de las hojas a niveles que ocurren daños por calor. Al mismo tiempo se reduce la transpiración foliar y aumenta la resistencia estomática (Parra *et al.*, 1999).

También el potencial hídrico de la hoja disminuye al incrementar el estrés hídrico, por lo que hay menor crecimiento vegetativo y producción de biomasa (Ismail, 2010; May *et al.*, 2011). Sin embargo, una reducción moderada de la humedad podría beneficiar a las plantas, pues en cultivos como tomate (*Lycopersicon esculentum* L.) se mejora el rendimiento y el uso de agua es más eficiente cuando se riega con 80 % que con 100 % de la evapotranspiración potencial (González y Hernández, 2000). En plantas de *C. chinense* sometidas a tensión hídrica se observa la disminución de: la altura de planta, el diámetro basal, el volumen de raíces y la biomasa (Pérez *et al.*, 2008; May *et al.*, 2011). Según Ismail (2010), el déficit hídrico en *Capsicum annum* se traduce en reducciones significativas del potencial hídrico foliar y del rendimiento.

Con base en lo anterior, Quintal *et al.*, 2012 realizaron un estudio donde se evaluaron diversos niveles de humedad aprovechable en el sustrato para medir sus efectos en el uso del agua, potencial hídrico y rendimiento de chile habanero crecido en condiciones protegidas, en Conkal, Yucatán. En este estudio se evaluó el efecto de cinco niveles de humedad aprovechable (HA) (60, 50, 40, 30 y 20 %) aplicada tres veces por semana) en

chile habanero (*C. chinense*) establecido en condiciones protegidas. Se analizó el potencial hídrico de la hoja, crecimiento, producción y distribución de biomasa, rendimiento y tamaño del fruto, índice de cosecha e índice de productividad del agua. Se encontró que al regar con una lámina de 60 % de la HA se obtuvo la mejor condición hídrica de la planta, 55 % más de área foliar, 44 % más de biomasa total y 84 % más de rendimiento de fruto, que con 20 % de HA. Con 60 % de HA se logró una producción de 5.6 g de biomasa seca por cada litro de agua aplicado.

La calidad de *C. chinense* es determinada por la apariencia, peso, firmeza y color del fruto. Ruiz-Lau *et al.*, 2011 realizaron un estudio donde aplicaron estrés hídrico en *C. chinense* iniciando su aplicación cuando ocurrió la primera antesis (26 DDT). Dos tratamientos se aplicaron, el primero consistió en riego con un litro de agua cada siete días (T1) y el segundo tratamiento consistió en aplicar un litro de agua cada nueve días (T2). Las plantas control, sometidas a riego diario tuvieron un potencial hídrico (PHI) del suelo de 0 MPa. Las plantas regadas cada 7 días registraron un PHI del suelo de -2.09 MPa, mientras que para las plantas regadas cada 9 d, el potencial hídrico fue de -3.13 MPa. Estos niveles de estrés hídrico son aún más negativos que el valor de -1.5 MP asignado como nivel de estrés hídrico o grado de sequía determinado por Hsiao (1973). Las plantas bajo T1 no tuvieron reducción significativa del peso seco o fresco de los brotes en comparación con las plantas control sometidas a riego diario. Sin embargo, en el T2 si hubo disminución significativa del peso fresco, pero no del peso seco de los brotes. Ambas condiciones de estrés disminuyeron la altura de la planta.

En la producción de flores y número de frutos por planta no encontraron diferencias significativas entre los tratamientos y el control. El estrés hídrico incremento significativamente las concentraciones de capsaicina y dihidrocapsaicina en semillas y pericarpio a los 25 y 45 días después de la antesis (DDA). Ambos tratamientos de estrés hídrico condujeron a la concentración de capsaicina, se observó un aumento de 16 mg g^{-1} en el peso seco (DW) con respecto al control y de dihidrocapsaicina 19 mg g^{-1} DW con respecto al control en la placenta a los 45 DAA. En los frutos no hubo diferencia significativa en la concentración de capsaicinoides a los 25 DAA.

Es importante tener en cuenta que los niveles de los capsaicinoides en los frutos plantas de control fueron similares para 25 y 45 DAA. En general, el contenido de capsaicinoides fue más alto en la placenta seguido por el pericarpio y la semilla. La concentración de capsaicina fue mayor que la dihidrocapsaicina en todos casos.

II. Materiales y métodos

2.1 Establecimiento del cultivo de chile habanero (*Capsicum chinense* Jacq) en tres diferentes tipos de suelo.

Se establecieron cinco cultivos de *Capsicum chinense* en el invernadero de la unidad sureste del CIATEJ, de marzo de 2017 a diciembre de 2019. En este capítulo se presentan los resultados del desarrollo del cultivo cuatro (2018) durante 265 días posteriores al trasplante (DPT) como parte del proyecto titulado: Análisis de los cambios metabólicos

durante el desarrollo del fruto *Capsicum chinense* Jacq cultivado en diferentes tipos de suelos financiado por el fondo de Ciencia Básica del CONACYT. El cuarto cultivo fue sembrado el 14 de marzo del 2018 empleándose plántulas de *Capsicum chinense* var. Jaguar y tres tipos de suelos diferentes. De este cultivo se realizaron 12 cosechas de chiles a lo largo de 9 meses que se mantuvo éste, habiéndose cosechado por primera vez, a los tres meses de realizado el trasplante. A lo largo de estas cosechada se obtuvieron chiles en diferentes estados de madurez en los diferentes suelos probados: suelos negro (*Boox lu'um*), rojo (*Chac Lu'um*) y café (*Ch'ich' lu'um*).

2.1.1 Siembra del cultivo de *Capsicum chinense* Jacq

El material vegetal empleado fueron plántulas de chile habanero var. Jaguar con una altura mínima de 19.3 cm y diez hojas verdaderas provenientes vivero Cutz de Suma de Hidalgo, Yucatán el cual se caracteriza por el uso de semilla certificada (Figura 1).



Figura 1. Material vegetal empleado para el establecimiento del cultivo

Se realizó la siembra de las plántulas en los tres tipos de suelo: negro (*Boox lu'um*), rojo (*Chac Lu'um*) y café (*Ch'ich' lu'um*) (Figura 2) para lo cual con ayuda de palas se llenaron los contenedores (bolsas plásticas) con 12 kg del suelo seleccionado hasta obtener 300 contenedores con su respectivo suelo (100 pertenecientes al suelo negro, 100 al suelo rojo y 100 al suelo café). Se prosiguió con un etiquetado usando una clave para la identificación individual de cada planta. Previamente se hizo una perforación en la parte inferior de los contenedores, dichas perforaciones fueron hechas con la finalidad de drenar el agua durante el riego de las plantas y evitar la saturación de sustratos.



Figura 2. Suelos empleados en el cultivo de chile habanero. a) negro (*Boox lu'um*), b) rojo (*Chac Lu'um*) y c) café (*Ch'ich' lu'um*).

Después de pesar y etiquetar los contenedores, se aplicó un litro de agua a cada uno de ellos, con la finalidad de ablandar la tierra para el trasplante de las plántulas (Figura 3), las

cuales fueron transportadas al invernadero del CIATEJ unidad Sureste desde el municipio de Suma de Hidalgo, Yucatán el día 14 de marzo del 2018.



Figura 3. Proceso de transplante de las plántulas de chile habanero a) Riego inicial con un litro de agua, b) Transplante de las plántulas en el suelo previamente húmedo, c) Segundo riego con medio litro de agua para evitar el estrés de las plántulas recién plantadas y d) Acomodo de las plantas en cuadrantes en el invernadero.

Con el objeto de reducir las fuentes de variación por intensidad lumínica y grado de sombreado, las plantas fueron organizadas en el invernadero en un diseño bloques al azar, compuesto de la siguiente manera: tres bloques (B1, B2, B3), tres tratamientos (S1, S2, S3) y cuatro repeticiones (R1, R2, R3, R4). Cada repetición contenía 25 plantas distribuidas en cuatro columnas (Figura 4). En total se sembraron 100 plantas por cada tipo de suelo.

La aplicación de macronutrientes a las plantas establecidas fue realizado siguiendo la fórmula de fertilización: 120, 100 y 150 kg Ha⁻¹ de NPK, recomendada para los suelos de Yucatán (Soria *et al.*, 2002), mismo que se incorporó en el agua de riego dos veces por semana a partir de los 10 días post-trasplante (DPT) utilizando los fertilizantes: triple 18 y 18-46-00 (Tabla 2).



Figura 4. Distribución de las plantas del invernadero por cuadrantes

Los micronutrientes fueron aplicados a través de una aplicación semanal del producto comercial Bayfolan forte. A los 20 DPT, se aplicó un regulador de crecimiento (Giberelina+auxina) a dosis de 1g Ha⁻¹, por lo que se aplicó 0.004 mg planta⁻¹ considerando una densidad de siembra de 25000 plantas Ha⁻¹. Los riegos fueron aplicados conforme la necesidad de la planta en los primeros días del trasplante, posteriormente se aplicó 2 L de agua planta⁻¹ cada tercer día. Las variables de crecimiento que se tomaron en cuenta fueron

las siguientes: Altura de la planta, número de hojas, número de tallos, número de botones, número de flores y cantidad de chiles por planta. Para la medición de la altura se midió desde la base de la planta hasta la copa. El número de hojas por planta, cantidad de tallos, botones, flores y frutos desarrollados se contabilizaron por observación directa del cultivo.

Tabla 2. Esquema de fertilización para 300 plantas de chile habanero (*Capsicum chinense*)

Tipo de fertilización	Dosis	Tipo de fertilización	Dosis	Etapas del cultivo
Suelo	2g/L Ultrasol 18-18-18 , 0g/L Ultrasol NKS 46 Dos veces por semana	Foliar	24 mL Bayfolan, 0mL de Adherex Semanalmente	Después del trasplante
Suelo	4g/L Ultrasol 18-18-18, 2g/L Ultrasol NKS 46 Dos veces por semana	Foliar	48 mL Bayfolan, 24 mL de Adherex Semanalmente	Botones y floración
Suelo	6g/L Ultrasol 18-18-18, 4g/L Ultrasol NKS 46	Foliar	72 mL Bayfolan, 36 mL de Adhereex Semanalmente	Fructificación

III. Análisis y discusión de resultados

3.1 Desarrollo de plantas de chile habanero cultivadas en los diferentes suelos

3.1.1 Altura de plantas de chile habanero cultivadas en los diferentes suelos

En la Figura 5 se puede observar crecimiento de las plantas (medido como altura) durante 142 DPT donde se puede ver que las plantas en todo el cultivo presentaron un crecimiento progresivo a lo largo de los días y se presentó variación en la altura promedio entre los diferentes tipos de suelo siendo por lo general las plantas de suelo rojo las que se desarrollaron con mayor rapidez. Las plantas que presentaron mayor altura fueron las cultivadas en el suelo rojo mientras que las que presentaron una menor altura fueron las plantas desarrolladas en suelo negro. Del día 0 al 111 DPT se observa crecimiento notable en las plantas después de lo cual, el crecimiento en altura de las plantas se estabiliza (Figura 5).

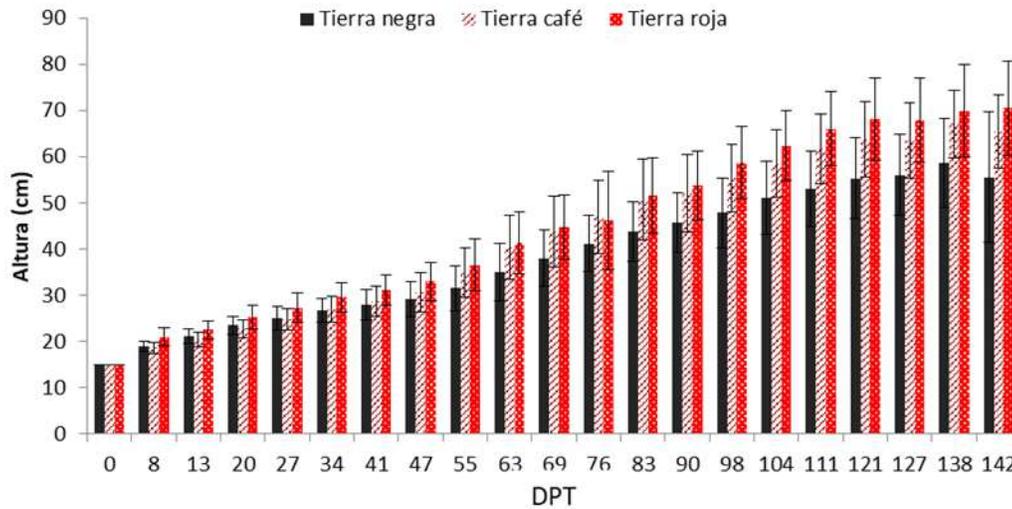


Figura 5. Crecimiento de las plantas durante 142 DPT

Se realizó un análisis estadístico de varianza a los resultados obtenidos tomando como variables los DPT y el tipo de suelo y se determinaron diferencias significativas en el crecimiento de las plantas, debido a cada uno de estos factores y a la interacción de ellos, confirmandose que las plantas más altas fueron las crecidas en suelo rojo, seguidas de las crecidas en suelo café y negro (Figura 6).

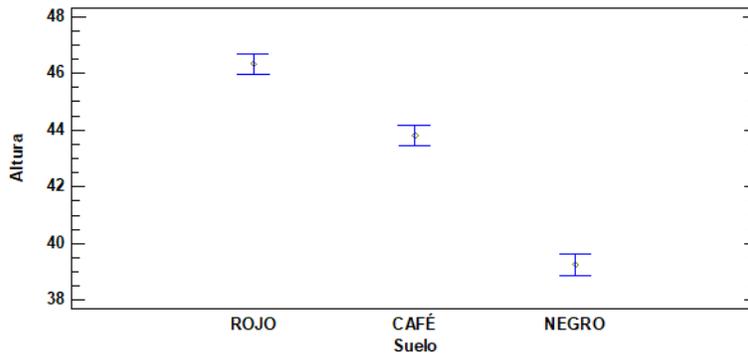


Figura 6. Gráfico de medias del desarrollo de las plantas en distintos tipos de suelos

Bautista *et al.*, (2005) mencionan que la cantidad de fósforo asimilable y materia orgánica es mayor en los suelos negros lo cual fue determinado también por Rodríguez *et al.*, 2017, quienes encontraron que el contenido de nutrientes en los tres tipos de suelo (rojo, negro y café) sugiere que están en concentraciones aceptables para el desarrollo de la planta pero existe una baja disponibilidad de nutrientes en el suelo negro debido al alto valor de Capacidad de Intercambio Catiónico (CIC) que tuvo ($38.5 \text{ Cmol Kg}^{-1}$) en comparación con el rojo (27 Cmol Kg^{-1}). Media-Lara *et al.*, 2019 también encontraron que se logró un mejor desarrollo de los frutos del chile habanero que fue cultivado en los suelos rojos y cafés en comparación con el suelo negro, mencionando que entre los factores que podría explicar este comportamiento está el hecho de la retención de Na en éstos suelos lo que podría conducir a una reducción en la disponibilidad y absorción de otros nutrientes importantes para el crecimiento de las plantas así como a la acumulación de grandes cantidades de

otros nutrientes tóxicos (como el amonio) en el suelo negro y los cambios en la microbiota de los suelos bajo estas condiciones.

3.1.2 Número de hojas en plantas de chile habanero cultivadas en los diferentes suelos

Para el desarrollo de hojas se puede observar que en el periodo 0-47 DPT estas se mantienen en la misma cantidad, y hasta los 55 DPT fué cuando las plantas comenzaron a desarrollar un mayor número de hojas, donde las plantas cultivadas en el suelo café fueron las que presentaron una mayor cantidad de hojas y las plantas crecidas en el suelo negro presentaron el menor número de hojas durante este cultivo (Figura 7).

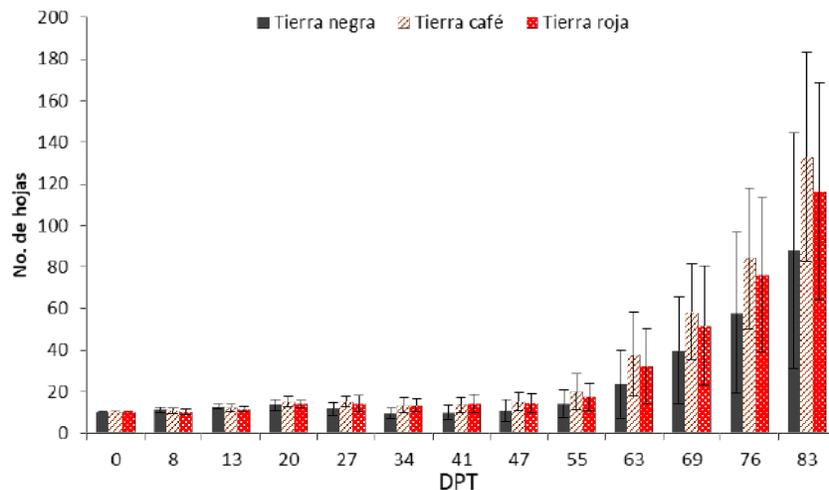


Figura 7. Desarrollo de hojas durante 83 DPT

Se determinaron diferencias significativas en el número de hojas promedio con respecto a los diferentes suelos en los que fueron cultivadas las plantas, y los DPT en los que se realizaron los muestreos. El número de hojas de las plantas crecidas en el suelo negro fue menor al de las plantas cultivadas en suelo rojo y café donde los resultados fueron similares (Figura 8). En la sección anterior se comentó sobre las posibles causas por las que las plantas cultivadas en suelo negro tuvieron resultados inferiores con respecto a los otros suelos probados.

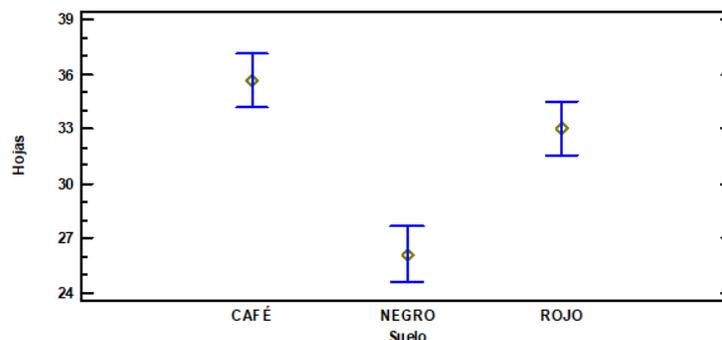


Figura 8. Gráfico de medias para el número de hojas en plantas de chile habanero cultivadas en diferentes suelos

3.1.3 Número de botones en plantas de chile habanero cultivadas en los diferentes suelos

La aparición de botones ocurrió muy rápidamente a los 20 DPT y fue uniforme en todos los suelos (Figura 9), sin embargo la mayoría de estos primeros botones fue abortada debido al calor intenso que dominaba en esos días y por la falta de preparación de las plantas para comenzar con su ciclo de producción.



Figura 9. Primera aparición de botones a los 20 DP

En Figura 10 se puede observar el aumento progresivo del promedio de botones por planta, éstos se presentaron en mínimas cantidades durante el periodo 20- 47 DPT, para el día 55 DPT se puede observar que el desarrollo de numero de botones incrementa y a los 69 DPT más del 90% de las plantas ya presentaba botones. Las altas temperaturas registradas de los 30 a los 60 DPT provocaron que el desarrollo de botones fuera lento en todos los tipos de suelo y que muchos de estos botones fueran abortados.

Las plantas cultivadas en el suelo café y suelo rojo fueron las que presentaron la mayor cantidad de botones desarrollados mientras que las plantas del suelo negro son las que tuvieron la menor cantidad (Figura 11).

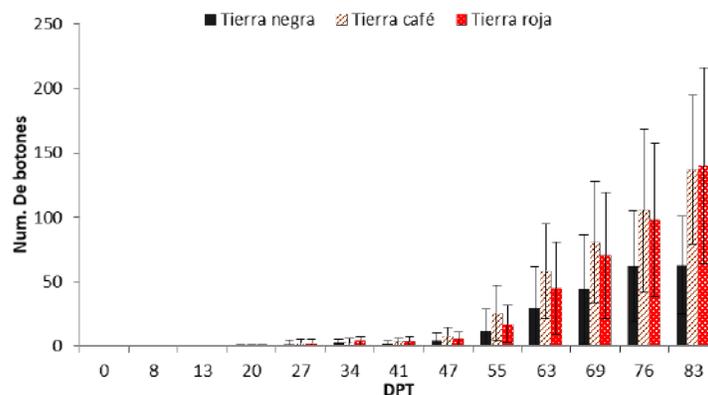


Figura 10. Desarrollo de botones durante 83 DPT

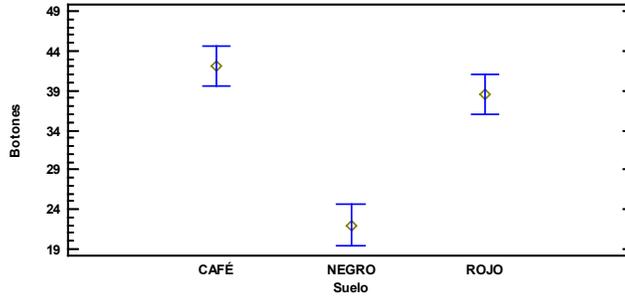


Figura 11. Gráfico de medias de número de botones en diferentes tipos de suelo

3.1.4 Número de flores en plantas de chile habanero cultivadas en los diferentes suelos

Las flores comenzaron su aparición 1 semana después que los primeros botones y tuvieron 2 periodos, en la (Figura 12).se puede observar la cantidad promedio de flores por planta a los diferentes DPT, donde es posible ver que entre los 27 y 47 DPT ocurrió el primer ciclo floral, mismo que culminaría sin la formación de frutos. Se puede observar que la cantidad de flores está relacionada con la cantidad de botones de la semana anterior (Figura 10). El segundo ciclo fue a los 63 DPT y éstas si se convirtieron en frutos.

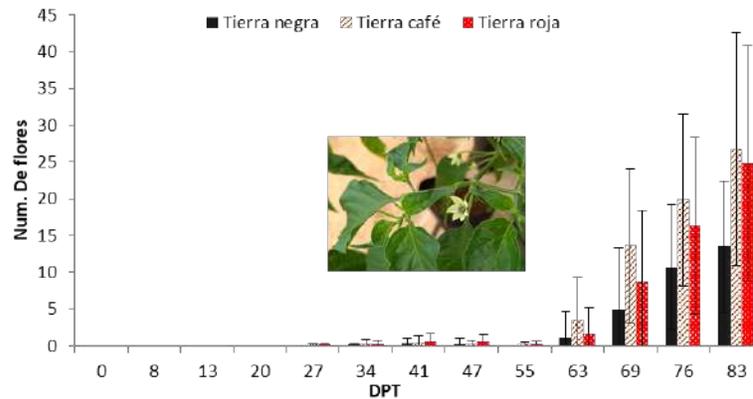


Figura 12. Desarrollo de flores durante 83 DPT

Tomando en cuenta, la cantidad total de flores desarrolladas se encontraron diferencias significativas entre las plantas crecidas en los diferentes tipos de suelo, siendo las plantas cultivadas en el suelo café las que más flores desarrollaron en el periodo marcado, seguido de las plantas del suelo rojo y por último las del suelo negro (Figura 13). El calor provocó una gran cantidad de caída de flores sin amarrar el fruto.

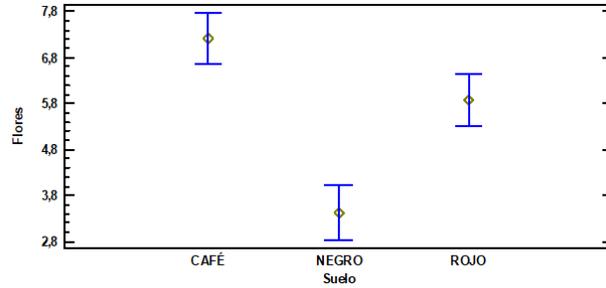


Figura 13. Gráfico de medias de la cantidad de flores del chile habanero en diferentes suelos

3.2 Producción de chile habanero en plantas cultivadas en los diferentes suelos

En cuanto a la producción de chiles, los primeros frutos se presentaron a partir de los 69 DPT como se muestra en la Figura 14, al comparar estos valores con los de la cantidad de flores de las plantas de chile habanero (Figura 12), se puede observar un alto índice de aborto floral, esto se debió al intenso calor (por arriba de 40°C) durante el día en el invernadero del CIATEJ en las fechas en las que desarrolló el cultivo.

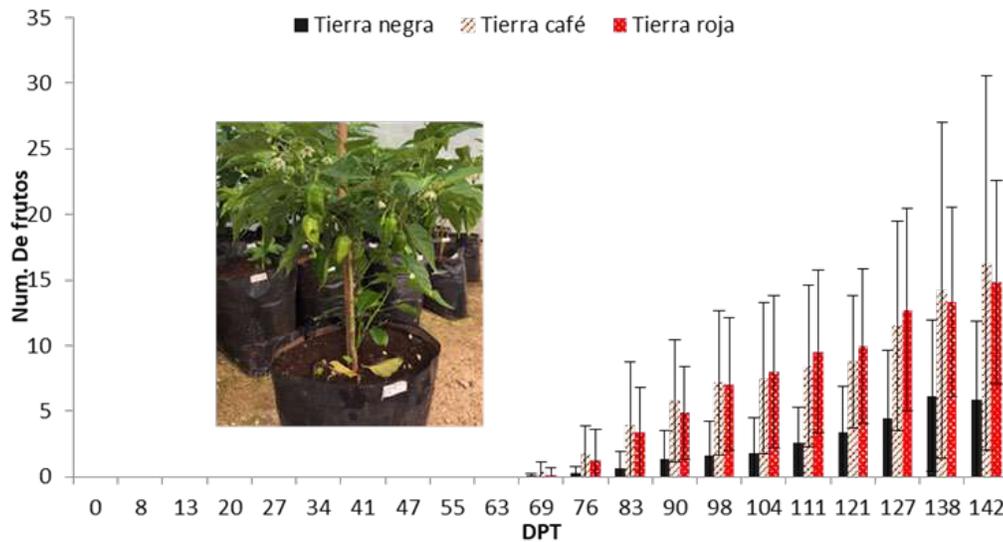


Figura 14. Desarrollo de chiles durante 142 DPT

Los análisis de varianza realizados demostraron que existió una diferencia significativa en el numero de frutos producidos debido a la interacción de los factores tipo de suelo y DPT, donde los frutos producidos en las plantas crecidas en el suelo negro fueron menos que los producidos en las plantas cultivadas en los suelos rojo y negro, siendo para éstos dos últimos suelos los valores similares (Figura 15).

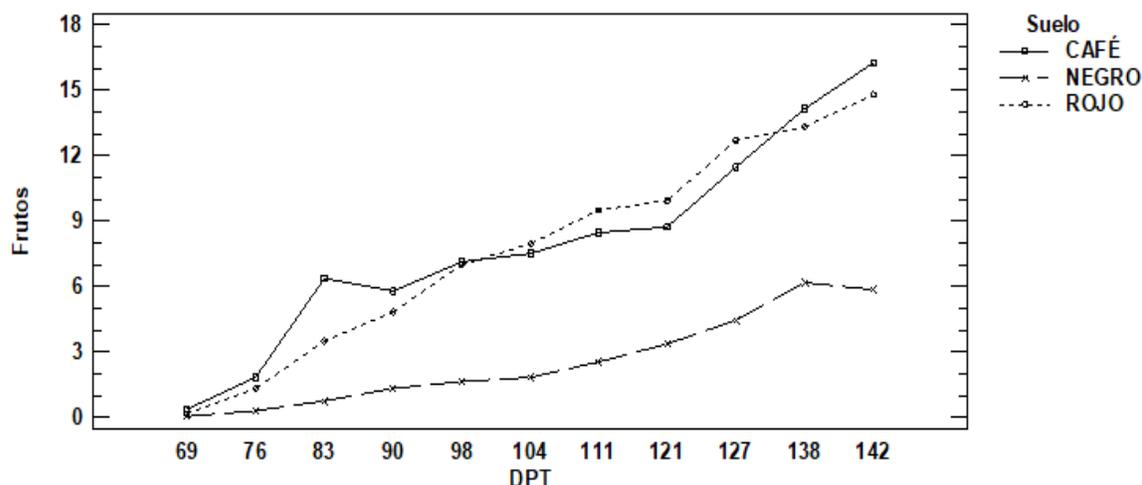


Figura 15. Gráfico de interacciones del tipo de suelo y DPT sobre el número de frutos

La producción total de chiles durante las 12 cosechas del cultivo se presenta en la Tabla 3 donde se puede observar que la mayor producción de chiles en cualquiera de sus estados de madurez se observó en las plantas crecidas en suelo rojo.

Tabla 3. Peso de los chiles obtenidos durante doce cosechas del cultivo en el invernadero del CIATEJ Unidad Sureste.

Cosecha	DPT	Fecha	Estado de madurez								
			Inmaduro (verde)			Madurez intermedia (verdes-naranja)			Maduro (chiles naranjas)		
			Suelo rojo	Suelo café	Suelo negro	Suelo rojo	Suelo café	Suelo negro	Suelo rojo	Suelo café	Suelo negro
			Peso (g)								
1	89	11/06/18	604	589	76	0	0	0	0	0	0
2	118	10/07/18	1527	1227	113	123	186	18	309	373	16
3	132	24/07/18	761	591	248	0	0	0	1671	1255	237
4	146	07/08/18	827	958	260	94	99	45	644	485	115
5	160	21/08/18	289	253	115	424	343	192	768	709	263
6	174	04/09/18	0	0	0	134	70	59	507	310	188
7	195	25/09/18	353	218	469	24	18	50	57	44	21
8	209	09/10/18	358	507	568	341	136	254	285	207	317
9	223	23/10/18	209	374	593	193	128	303	226	204	356
10	237	06/11/18	632	863	754	120	163	180	170	295	194
11	252	21/11/18	865	755	671	150	182	256	205	544	463
12	265	04/12/18	1631	926	1429	59	44	104	137	117	119
Total			8056	7261	5296	1662	1369	1461	4979	4543	2289

La producción total de chiles en este cultivo fue de 36.9 Kg lo cual correspondió a 10,953 unidades lo que representa un peso promedio global de 3.4 g por chile (Tabla 4). El 40 % de los chiles producidos correspondieron a los obtenidos de plantas desarrolladas en suelo rojo, 36 % de los chiles fueron de plantas desarrolladas en suelo café y solo el 24 % de los chiles fueron de plantas desarrolladas en suelo negro.

Tabla 4. Producción total del cultivo establecido durante las 12 cosechas.

Suelo	Total (g)	Total (unidades)
Rojo	14,697	4,425
Café	13,173	3,686
Negro	9,046	2,842
Total	36,916	10,953

IV. Conclusiones

Los factores que influyen en el crecimiento y desarrollo de las plantas del cultivo de chile habanero son varios entre los que podemos mencionar el tipo de suelo, la fertilización, el adecuado suministro de agua, la temperatura ambiente, entre otros. El suelo es un factor muy importante debido a que sus componentes al ser asimilados por la planta influyen en su fisiología. La utilización adecuada de fertilizantes en los cultivos permite obtener mayor rendimiento, reduciendo los costos de producción en el cultivo y evitando la contaminación del ambiente. Se logró el establecimiento del cultivo de chile habanero (*Capsicum chinense* Jacq) en tres diferentes tipos de suelos: negro (*Boox lu'um*), rojo (*Chac Lu'um*) y café (*Ch'ich' lu'um*) característicos en la Península de Yucatán. De este cultivo se obtuvieron 12 cosechas de chiles a lo largo de 9 meses que se mantuvo éste, habiéndose cosechado por primera vez, a los tres meses de realizado el trasplante.

El suelo rojo fue el más adecuado para el crecimiento vertical de las plantas de chile habanero, seguido por el suelo café y por último el suelo negro. En el resto de los parámetros de crecimiento evaluados (hojas, botones, flores y frutos) el suelo negro presentó significativamente la menor cantidad respecto a los suelos rojo y café cuyos resultados fueron similares entre sí. El bajo rendimiento del suelo negro probablemente se deba a una baja disponibilidad de nutrientes en éste suelo por tener una alta capacidad de intercambio catiónico, posible retención de Na y acumulación de nutrientes tóxicos. La mayor producción de chile habanero, tanto en unidades como en peso, se obtuvo con el suelo rojo para cualquiera de los estados de madurez.

V. Referencias

- Bautista F, Díaz-Garrido S, Castillo-González M, Zinck JA (2005) Spatial Heterogeneity of the Soil Cover in the Yucatán Karst: Comparison of Mayan, WRB, and Numerical Classifications. *Eurasian Soil Science* 38(1): S81-S88.
- Borges-Gómez L, Moo-Kauil C, Ruíz-Novelo J, Osalde-Balam M, González Valencia C., Yam-Chimal C., Can-Puc F. (2014) Soils used for habanero chili production in Yucatán: predominant physical and chemical characteristics. *Agrociencia* 48(4): 347-359.
- Borges-Gómez L, Cervantes Cárdenas L, Ruiz Novelo J, Soria Fregoso M, Reyes Oregel V, et al. (2010) Capsaicinoids in Habanero Pepper (*Capsicum chinense* Jacq.) under various humidity and nutritional conditions. *Terra Latinoamericana* 28(1): 35-41.

- Chludil, H., Corbino, G.B., y Leicach, S.R. (2008). Soil quality effects on *Chenopodium album* flavonoid content and antioxidant potential. *J. Agric. Food Chem.*, 56,5050–5056.
- de Ávila Silva, L., Condori-Apfata, J. A., Marcelino, M. M., Tavares, A. C. A., Raimundi, S. C.J., Martino, P. B., y Nunes-Nesi, A. (2019). Nitrogen differentially modulates photosynthesis, carbon allocation and yield related traits in two contrasting *Capsicum chinense* cultivars. *Plant Science*, 283, 224-237.
- Duch G., J. 1988. La Conformación Territorial del Estado de Yucatán: Los Componentes del Medio Físico. Universidad Autónoma de Chapingo, CIR. Texcoco, México. 427 p.
- González, M.A., y Hernández, L. (2000). Estimación de las necesidades hídricas del Tomate. *TERRA Latinoam.* 18, 45-50.
- Guzmán-Antonio, A., Borges-Gómez, L., Pinzón-López, L., Ruiz-Sánchez, E. y J. Zúñiga-Aguilar. (2012). Efecto del ácido salicílico y la nutrición mineral sobre la calidad de plántulas de chile habanero. *Agronomía Mesoamericana.* 23(2), 247-257.
- Hikosaka K., Hanba Y.Y., Hirose T., y Terashima I. (1998). photosynthetic nitrogen-use efficiency in leaves of woody and herbaceous species, *Funct. Ecol.* 12, 896–905,
- Hsiao, T.C. (1973). Plant response to water stress. *Annu. Rev. Plant Physiol.* 24, 519–570.
- Ismail S. M. (2010). Influence of deficit irrigation on water use efficiency and bird pepper production (*Capsicum annum* L.). *Meteor. Environ. Arid Land Agric. Sci.* 21, 29-43.
- Jaimez R. E (2000) Crecimiento y distribución de la materia seca en ají dulce bajo condiciones de déficit de agua. *Agronomía Tropical* 50(2): 189-200.
- Macías- Rodríguez, H., Villalobos, J. A. M., Valle, M. A. V., Talavera, M. D. C. P., y Castorena, M. M. V. (2013). Chile habanero: descripción de su cultivo en la península de Yucatán. *Revista Chapingo Serie Zonas Áridas*,12(2), 37-43.
- May L. C., A Pérez G. E., Ruiz S., y García R. (2011). Efecto de niveles de humedad en el crecimiento y potencial hídrico de *Capsicum chinense* Jacq. y su relación con el desarrollo de *Bemisia tabaci* Genn. *Trop. Subtrop. Agroecosyst.*14,1039-1045.
- Maheswari M., Murthy M.A.,y Shanker A.K. (2017). Nitrogen nutrition in crops and its importance in crop quality, *Indian Nitrogen Assess*,175–186.
- Medina-Lara F., Souza-Perera R., Martínez-Estévez M., Ramírez-Sucre M.O., Rodríguez-Buenfil I.M. and Echevarría Machado Ileana. (2019). Red and Brown Soils Increase the Development and Content of Nutrients in Habanero Pepper Subjected to Irrigation Water with High Electrical Conductivity. *HortScience*: 54(11):2039-2049. DOI: 10.21273/HORTSCI14157-19
- Mei H.S., Thimann K.V. (1984). The relation between nitrogen deficiency and leaf senescence, *Physiol. Plant.* 62, 157–161
- Nieves-González, F., Alejo-Santiago, G., Luna-Esquivel, G., Lemus-Flores, C., Juárez- López, P. y E. Salcedo-Pérez. (2015). Extracción y requerimiento de fósforo en chile habanero (*Capsicum chinense* Jacq.) ‘Big Brother’. *Interciencia.* 40(4), 282-286.
- Noh-Medina, J., Borges-Gómez, L. y M. Soria-Fregoso. (2010). Composición nutrimental de biomasa y tejidos conductores en chile habanero (*Capsicum chinense* Jacq.). *Tropical and Subtropical Agroecosystems*, 12, 219-228.
- Oney-Montalo J., López-Domínguez C., Zamacona-Ruiz M., Gómez-Rincón E., Ramíre-Sucre M., Rodríguez-Buenfil I. (2018). Metabolites present in *Capsicum chinense* of two ripening stages cultivated in different soil types in Yucatan, Mexico. *Revista Bionatura* 2018 Vol 1. No 1. 2018. <http://revistabionatura.com/cs-2018.01.01.9.html>.
- Parra, Q.R.A., Rodríguez, O. V. A., y González H. (1999). Transpiración, potencial hídrico y prolina en zarzamora bajo déficit hídrico. *TERRA Latinoam.* 17,125-130.
- Pérez G. A., Pineda. D., Latournerie M., Pam P., y Godoy A. (2008). Niveles de evapotranspiración potencial en la producción de chile habanero. *TERRA Latinoam.* 26, 53-59.
- Quintal Ortiz, W. C., Pérez-Gutiérrez, A., Latournerie Moreno, L., May-Lara, C., Ruiz Sánchez, E., & Martínez Chacón, A. J. (2012). Uso de agua, potencial hídrico y rendimiento de chile habanero (*Capsicum chinense* Jacq.). *Revista fitotecnia Mexicana*, 35(2),155-160.

- Rada, F., Jaimez, R. E., García Núñez, C., Azócar, A., y Ramírez, M. E. (2005). Relaciones hídricas e intercambio de gases en *Theobroma cacao* var. Guasare bajo periodos de déficit hídrico. *Rev. Fac. Agron. (LUZ)* 22, 112-120.
- Ramírez-Luna, E., Castillo-Aguilar C.C., Aceves-Navarro E. y Carrillo-Ávila E. (2005). Efecto de productos con reguladores de crecimiento sobre la floración y amarre de fruto en chile 'Habanero'. *Revista Chapingo Serie Horticultura*, 11, 93-98. DOI: 10.5154/r.rchsh.2003.12.080.
- Rodríguez-Buenfil IM, Ramírez-Sucre MO and Echevarría-Machado I. (2017). Soils of Yucatan: Effect On The Growth Of The Habanero chili Plant (*Capsicum chinense*). *Agri Res & Tech: Volume 8 Issue 1 - June 2017*. DOI: 10.19080/ARTOAJ.2017.08.555730.
- Ruíz-Lau, N., Medina-Lara, F., Minero-García, Y., Zamudio-Moreno, E., Guzmán-Antonio, accumulation of capsaicinoids in fruits of *Capsicum chinense* Jacq. *HortScience*. 46(3): 487-492. DOI: 10.21273/HORTSCI.46.3.487
- Salisbury, F.B., y Ross C W. (2000). *Fisiología de las Plantas*. Ed. Paraninfo Thomson Learning, Madrid. 758 p.
- Scheible W.R., Gonzalez-Fontes A., Lauerer M., Muller-Rober B, Caboche M., y Stitt M. (1997). Nitrate acts as a signal to induce organic acid metabolism and repress starch metabolism in tobacco, *Plant Cell*, 9: 783–798.
- SIAP. 2019. Anuario estadístico de producción agrícola. Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera. Disponible en: <https://nube.siap.gob.mx/cierreagricola/>
- Soria, F.M., Tun, S.J., Trejo, R.A., Terán, S.R. (2002). Paquete tecnológico para la producción de chile habanero (*Capsicum chinense* Jacq.). SEP. DGTA. ITA-2 Conkal, Yuc, México. 75 (15). *Predicción de la demanda nutricional de potasio para la producción de capsicum chinense jacq. en el Sureste de México*. Available from: https://www.researchgate.net/publication/237042736_Prediccion_de_la_demanda_nutricional_de_potasio_para_la_produccion_de_capsicum_chinense_jacq_en_el_Sureste_de_Mexico
- Stamp, N. (2003). Out of the quagmire of plant defense hypotheses. *Q. Rev. Biol.* 78, 23–55.
- Stitt M. (1999). Nitrate regulation of metabolism and growth, *Curr. Opin. Plant Biol.* 2, 178–186.
- Tapia-Vargas, M., Larios-Guzmán, A., Díaz-Sánchez, D. D., Ramírez-Ojeda, G., Hernández-Pérez, A., Vidales-Fernández, I., y Guillén-Andrade, H. (2016). producción hidropónica de chile habanero negro (*Capsicum chinense* Jacq.). *Revista fitotecnia mexicana*, 39(3), 241-245.
- Tschoep, H., Gibon, Y., Carillo, P., Armengaud, P., Szecowka, M., Nunes-Nesi, A., Ferni A.R., Koehl, K., y Stitt M. (2009). Adjustment of growth and central metabolism to a mild but sustained nitrogen-limitation in *Arabidopsis*, *Plant Cell Environ*, 32, 300– 318.
- Tucuch-Haas, C.J., Alcántar-González, G., Ordaz-Chaparro, V.M., Santizo-Rincón, J.A. y A. Larqué-Saavedra. (2012). Producción y calidad de chile habanero con diferentes relaciones $\text{NH}_4^+/\text{NO}_3^-$ y tamaño de partícula de sustratos. *Terra Latinoamericana*. 30, 9-15.
- Tun Dzul. J de la C. 2001. Características y tecnología de producción del chile habanero. Centro de Investigación Regional del Sureste. INIFAP- SAGARPA. Mocochoá, Yucatán, México. Pp: 5-74. <http://biblioteca.inifap.gob.mx>.

CAPITULO 2

Principales enfermedades del chile habanero (*Capsicum chinense*) y su control

Main diseases of habanero pepper (*Capsicum chinense*) and its control

Navarrete-Mapen, Reyna Z¹, Cristóbal-Alejo, Jairo¹, Tun-Suárez, José M¹, Herrera-Parra, Elizabeth² y Uc-Varguez, Alberto^{3*}

¹Tecnologico Nacional de México/Instituto Tecnológico de Conkal. Av. Tecnológico S/N Conkal, Yucatán. C.P. 97345.

²Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias. Km 25 antigua carretera Mérida–Motul, Mococho Yucatán México. Cp.97450

³Centro de Investigación y Asistencia en Tecnología y Diseño del estado de Jalisco AC., Subsede Sureste. Parque científico y Tecnológico de Yucatán. Km. 5.5 Carretera Sierra Papacal-Chuburná Puerto. Cp. 97302. *autor de correspondencia: auc@ciatej.mx

Resumen

En este capítulo se describen las características de las principales enfermedades causadas por hongos, bacterias, virus y nematodos fitopatógenos que afectan el cultivo de chile habanero en el sureste de México, empezando por la descripción del agente causal, la sintomatología, el comportamiento epidemiológico de la enfermedad y finalmente se mencionan algunas de las alternativas que pueden utilizarse para el diseño e implementación de las estrategias de manejo de la enfermedad.

Palabras clave: Problemas fitosanitarios, chile habanero, manejo de la enfermedad.

Abstract

The characteristics of main diseases caused by fungi, bacteria, viruses and phytopathogens nematodes that affecting habanero pepper at the southeast of Mexico, are described in this chapter. Starting with the description of the agent causal of the disease, the symptomatology, the epidemiological behavior of the disease and finally, some of the alternatives that can be used for to design and to stablish strategies to plant diseases management.

Keywords: Phytosanitary problems, habanero pepper, diseases management.

I. Introducción

El chile habanero (*Capsicum chinense*) es uno de los cultivos de mayor importancia económica y social en la península de Yucatán, ya que constituye una fuente importante de ingresos a los productores y debido a los múltiples usos que recibe el fruto en la industria alimentaria y farmacéutica. Además en el 2017, la producción de chiles en Yucatan alcanzó un valor por arriba de los 58.5 millones de pesos (Ramirez *et al.*, 2018; Ruiz-Lau *et al.*, 2011; SIAP, 2019).

El rendimiento por hectárea del cultivo de habanero es de 15 a 43 t·ha⁻¹, esta variación se debe principalmente a la variedad utilizada, a las condiciones y manejo del cultivo (cultivo a cielo abierto o invernadero). Por otra parte, las enfermedades pueden provocar bajos rendimientos del cultivo, los cuales a su vez pueden ocasionar pérdidas de hasta el 100% de la producción (Chávez y Zavaleta, 2019; Pérez-Moreno *et al.*, 2004). Por otro lado, la aplicación desmedida de pesticidas para el control de los fitopatógenos, ha ocasionado serios problemas en el ecosistema como: presencia residuos en las cosechas, resistencia de los patógenos a los agroquímicos, reducción de la fauna benéfica e incremento de la contaminación ambiental, además de elevar los costos de producción (Ramírez *et al.*, 2018).

Por tal motivo, el presente capítulo tiene como finalidad describir las principales enfermedades causadas por hongos, bacterias, virus y nematodos fitopatógenos que afectan al cultivo de chile habanero, ya que el conocimiento de aspectos básicos como la sintomatología de la enfermedad, características del microorganismo patógeno, factores ambientales que propician el desarrollo de la enfermedad y su control en campo, pueden mejorar el manejo de la enfermedad, con los beneficios económicos, sociales y ecológicos que ello implica.

II. Revisión bibliográfica

2.1 Enfermedades más importantes que afectan al chile habanero

2.1.1 Principales enfermedades causadas por hongos

Múltiples trabajos reportan una gama de enfermedades fungosas que afectan al cultivo del chile habanero, entre los que se pueden mencionar el damping off, la antracnosis, el manchado foliar, el marchitamiento de plantas, mildiu, marchitez y pudrición del tallo, entre otros. Sin embargo, su incidencia y severidad depende en gran medida de las condiciones ambientales, la variedad utilizada, así como del manejo del cultivo, por lo que resulta importante conocer cada uno de estos factores que afectan el comportamiento de la enfermedad, a fin de reducir las afectaciones debidas a este grupo de patógenos.

Enfermedad. Damping off o secadera

Patógeno: (*Phytophthora*, *Pythium*, *Fusarium* y *Rhizoctonia*).

Sintomatología: El damping off es una de las enfermedades que ocasiona a los productores de chile, pérdidas importantes debido a que provoca el decaimiento y marchitez del 5 al 80% de las plántulas en vivero, o de las plantas recién trasplantadas en campo (Chávez y Zavaleta, 2019; Lamichhane *et al.*, 2017). Cuando la infección del hongo ocurre durante el proceso de germinación de la semilla (preemergencia), los tallos recién formados adquieren una coloración café y mueren rápidamente, provocando la aparición de manchones sin plántulas en el vivero (Figura 1b). Por otra parte, cuando la infección ocurre en la etapa pos emergencia, el cuello de las plántulas a nivel del suelo presenta un típico estrangulamiento de color café oscuro a rojiza, las hojas de las plántulas pierden turgencia y se marchitan, posteriormente toda la planta se marchita y finalmente muere provocando la observación de manchones de plántulas muertas en el vivero (Lamichhane *et al.*, 2017).

En plantas adultas la enfermedad se caracteriza por presentar lesiones cóncavas de color pardo rojizo que aparecen en el tallo y en la raíz principal (Figura 1a). Los suelos arcillosos y susceptibles a la inundación favorecen el desarrollo del hongo en los meses con mayor precipitación (Lamichhane *et al.*, 2017). La incidencia observada en plántulas establecidas bajo condiciones de invernadero en tres tipos de suelo, sugieren que el tipo de suelo no afecta su respuesta a la infección. Chávez y Zavaleta (2019), mencionan que el género *Capsicum* presenta cierta tolerancia natural a *Phytophthora* debido posiblemente a una resistencia poligénica.

Epidemiología. Los factores que pueden afectar la aparición de la enfermedad son, condiciones de estrés hídrico, debido a periodos de baja humedad (30%) seguido de condiciones de alta humedad (arriba del 70%). La severidad de la enfermedad es mayor cuando se utiliza semilla contaminada, sin desinfectar y en suelos poco permeables. La enfermedad se distribuye a distancias de 4.5 m a partir de un foco de infección en dirección de las líneas de riego y hasta 2.0 m a través de los surcos. El patógeno se dispersa de una planta enferma a una sana a través del agua de riego (Lamichhane *et al.*, 2017; Silva-Rojas *et al.*, 2009).

Manejo de la enfermedad. Puede realizarse mediante la desinfección del sustrato y las charolas utilizadas en el semillero, mediante cloro comercial al 5%, evitar el uso de siembras de alta densidad que impida la aireación, así como, el uso de semilla desinfectada y libre de patógenos.

En campo, para evitar el uso de plantas contaminadas en campo, se pueden sumergir durante un minuto, las plantas al momento del trasplante, en una solución de Thiabendazol a dosis de 0.5 a 1.0 g L⁻¹. Además, se debe evitar el exceso de humedad en los suelos mal drenados (Silva- Rojas *et al.*, 2009; Velásquez- Valle *et al.*, 2013).

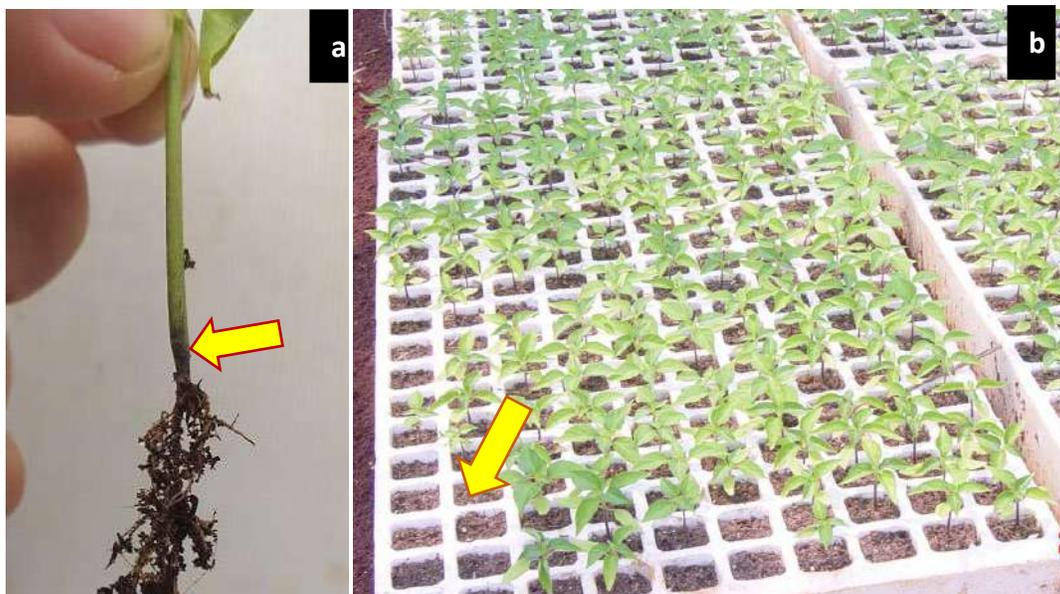


Figura 1. Mancha café rojiza con estrangulamiento en la base del tallo (a) y manchones de plántulas sin germinar debida a infección premergente (b) de damping off y amarillamiento inicial en plántulas de chile habanero.

Enfermedad: Antracnosis del chile

Patógeno: *Colletotrichum gloeosporioides*

Sintomatología. Es una de las principales enfermedades que afectan el chile habanero en etapa de poscosecha, pero los síntomas también pueden presentarlo las plantas en campo. Esta enfermedad es inducida por especies de hongos del género *Colletotrichum* y se presenta especialmente en los cultivos tropicales y subtropicales, en los cuales reduce la cantidad y calidad de la producción. En chile habanero se ha considerado como una enfermedad de los frutos, provoca pérdidas arriba del 50% de la producción, al reducir la calidad comercial, pues se observan lesiones oscuras y hundidas en los frutos (Figuras 2a y 2b) las cuales contienen las esporas del hongo (Ali *et al.*, 2016; Oo y Oh, 2016).

Epidemiología. Los factores que favorecen el desarrollo de la enfermedad son temperaturas de 27 °C y humedad relativa de 80% y suelos con pH de 5.0 a 6.0. La lluvia puede dispersar las esporas del hongo, mediante lavado o salpique, por lo que las pérdidas en los periodos de mayor precipitación en las regiones tropicales pueden ser mayores (Oo y Oh, 2016). Otros autores reportaron que la variabilidad de aislados de *Colletotrichum* provenientes de habanero, se deben a la capacidad de los aislados de colonizar el hospedante, mientras que la tolerancia o resistencia del hospedante está asociada a una mayor o menor habilidad de restringir la penetración, colonización y la producción de conidios por parte del patógeno (Liao *et al.*, 2012).

Manejo de la enfermedad. Una sola medida para el control de la enfermedad no es efectiva, por lo que se propone una serie de medidas de control efectivas como estrategia de manejo de la enfermedad, entre los que sobresalen: el uso de plantas resistentes, control cultural, biológico y químico. El uso de las variedades resistentes puede disminuir las pérdidas por

esta enfermedad, así como reducir los costos de la aplicación de los métodos de control mecánico y aplicación de agroquímicos (Ali *et al.*, 2016; Phoulivong, 2011). Por otra parte, la rotación de cultivos debe realizarse al menos durante dos años y el cultivo alternativo debe excluir a especies del género solanácea. Finalmente, el control químico mediante la aplicación de Maneb (bisditió carbamato de etileno) y thiram (disulfuro de tetrametil tiuram) han sido reportados como los más efectivos. Otros productos como el bavistin, caldo bordelés y benomilo han sido reportados con buenos resultados.



Figura 2. Síntoma típico de antracnosis por *Colletotrichum gloeosporioides* en frutos de chile habanero (a) y micelio gris observado en el interior de los frutos (b) infectados.

Enfermedad: Mancha foliar de la hoja café (ojo de rana)

Patógeno: *Cercospora capsici*, *Alternaria solani* y *Corynespora cassiicola*

Sintomatología. La enfermedad se manifiesta en las hojas y el tallo principalmente, en forma de clorosis, manchas ovaladas y oscuras con centro gris (Figura 3a y 3b). Al inicio de la infección, se observan en las hojas manchas cafés con márgenes amarillos y un centro gris. Cuando las condiciones de temperatura (18-25 °C) y humedad relativa (90%) son propicias para el desarrollo del patógeno, el número de manchas incrementa y el tamaño de la mancha incrementa hasta 1.5 cm de diámetro aproximadamente, con anillos oscuros y un centro blanquecino. Posteriormente, el centro de la mancha se seca y desprende de la hoja y finalmente se observa un amarillamiento y caída de las hojas.

Cristobal- Alejo *et al.* (2006), reportaron en la península de Yucatán, que la mancha foliar es inducido por *Alternaria solani*, además mencionan que *Cercospora capsici* no fue aislado en las plantas con los síntomas de mancha foliar, lo que sugiere que el mismo síntoma, puede ser inducido por más de un patógeno, tal como demostró Tun- Suárez *et al.* (2011),

al reportar que *Corynespora cassiicola* indujo síntomas de manchado foliar en habanero. En hojas, tallos y frutos de chile, *C. cassiicola* induce manchas café oscuras de 1 a 2 mm de diámetro, que incrementan de tamaño y coalescen hasta formar grandes lesiones irregulares rodeadas por un halo amarillo (Shimomoto *et al.*, 2008).

Las plantas infectadas presentan una disminución en la producción de fotoasimilados importantes en la formación y desarrollo del fruto. Además, la infección induce la abscisión de las hojas, lo que deja expuestos los frutos a la luz solar que les provocan quemaduras y reducen su calidad y rendimiento con pérdidas que oscilan entre 10 y 100%.



Figura 3. Mancha ovalada con centro gris observado (a y b) en hojas de chile habanero infectados por *Cercospora capsici*.

Epidemiología. Los factores que favorecen el desarrollo de la enfermedad son las condiciones de humedad relativa alta y temperaturas de 20 a 30 °C. Además, la concentración de inoculo, así como el tipo de hospedante, afectan el desarrollo de síntomas de la enfermedad que va de 2 a 7 días después de la infección.

Manejo de la enfermedad. El patógeno puede controlarse mediante la aplicación de Benomilo, Mancozeb y oxiclورو de cobre. Otros reportes, sugieren la viabilidad de utilizar un complejo bacteriano para el control biológico de la enfermedad (Tun-Suárez *et al.*, 2011).

2.1.2 Principales enfermedades causadas por bacterias

Las principales enfermedades bacterianas reportadas en el cultivo de habanero son la mancha, el cancro y marchitez bacteriana. En el sureste de México, se ha reportado la presencia de dos bacterias de importancia económica: *Xantomonas euvesicatoria* y *Ralstonia solanacearum*, debido a los daños que ocasiona en el cultivo del chile.

Enfermedad: Mancha bacteriana del chile

Patógeno: *Xantomonas euvesicatoria* (*Xantomonas vesicatoria* pv *vesicatoria*)

Sintomatología. La mancha bacteriana por *Xantomonas euvesicatoria* pv *vesicatoria*, es una de las enfermedades más importantes del Chile debido a las pérdidas económicas que puede generar en el cultivo, ya que puede infectar todas las partes aéreas de la planta. Al inicio de la infección, la bacteria provoca pequeñas manchas de color café y aspecto húmedo, de contorno redondeado a irregular, las manchas se observan hundidas en el envés de la hoja y en el haz ligeramente levantada. Cuando ocurren condiciones de alta humedad y temperatura, las lesiones toman un color negro y un aspecto grasoso. Estas lesiones en las hojas pueden crecer y fusionarse, por lo que el resto de la lámina foliar toma una coloración amarilla (Manelli *et al.*, 2004). En el fruto se observan manchas oscuras, rodeados de un halo blanco con aspecto aceitoso.

Por otro lado, largos periodos de precipitación, baja resistencia de los cultivares, así como un ineficiente manejo químico de la enfermedad, provoca el desarrollo de la infección e incremento del número de plantas enfermas. Manelli *et al.* (2004), reportaron la existencia de tres genes recesivos que controlan la resistencia de las plantas de Chile a la enfermedad, lo que abre la posibilidad de obtener plantas resistentes en el futuro. Otros autores mencionan que el Chile habanero posee algún grado de resistencia o tolerancia a la marchitez bacteriana (Rowell *et al.*, 2001; Silva y García, 2016).

Epidemiología. La bacteria se transmite por semilla, donde puede sobrevivir por 16 meses, el patógeno puede mantenerse infectivo por el mismo tiempo en el suelo y sobre restos vegetales. El patógeno penetra en la planta a través de estomas u otras aberturas naturales, por heridas provocadas por partículas de suelo que impulsa el viento o por lesiones causadas por insectos. Dentro de una parcela, la bacteria puede ser diseminada por el roce de hojas infectadas con otras sanas, sobre todo en presencia de lluvia o rocío y viento (Potnis *et al.*, 2015).

Manejo. La aspersión de antibióticos como la estreptomicina en dosis de 85 g por cada 100 litros de agua, es recomendable para el control de la enfermedad en vivero. Después del trasplante en campo, se recomienda el uso de la estreptomicina combinado con un producto a base de cobre. Sin embargo, se ha reportado la generación de cepas resistentes debido al uso frecuente del cobre. Otra estrategia de manejo que puede utilizarse es la rotación de cultivos con cultivos no hospedantes de la bacteria, como los cereales y algunas leguminosas (Potnis *et al.*, 2015).

Enfermedad: Marchitez bacteriana del Chile

Patógeno: *Ralstonia solanacearum*

Sintomatología. La marchitez bacteriana por *R. solanacearum* está distribuida ampliamente en el mundo, afecta especies de más de 54 familias de plantas, entre las que sobresalen *Solanum lycopersicom*, *S. tuberosum*, *Capsicum chinense*, *C. annum*, *C. frutescens* entre otros (Naranjo y Martínez, 2013). La bacteria puede causar pérdidas de hasta el 100% de la producción, cuando las condiciones de temperatura (28-35°C) y humedad son adecuadas (80-90%) para el desarrollo de la enfermedad. Posiblemente, la habilidad de la bacteria para sobrevivir en el suelo y en la rizosfera de plantas no hospedantes, es la responsable de infecciones latentes, lo que a su vez contribuye con la

dispersión y distribución de la enfermedad en los campos de cultivo (Rueda-Puente *et al.*, 2014), incluso puede encontrarse y multiplicarse en el agua de riego (Álvarez *et al.*, 2010).

Epidemiología. La bacteria es capaz de sobrevivir hasta por 4 años en los suelos contaminados, bajo condiciones restrictivas tales como la falta de nutrientes y bajas temperaturas. Pero también puede permanecer en el agua y en los residuos vegetales hasta encontrar un hospedante susceptible (Naranjo y Martínez, 2013).

Manejo. Considerando la habilidad de la bacteria de producir infecciones latentes, una de las estrategias de manejo más importantes de la enfermedad en la etapa inicial de la epidemia, es el uso de métodos de diagnóstico sensibles y económicos que permitan la detección y eliminación de plantas asintomáticas, que sirvan como fuente de inóculo para futuras infecciones (Alvarado-Martínez *et al.*, 2013).

2.1.3. Principales enfermedades causadas por virus

Los virus que afectan al chile habanero son múltiples y pertenecen a diversos grupos entre los que sobresalen los Geminivirus, específicamente el grupo de los Begomovirus (García *et al.*, 2010). Especies del grupo de los Tosposvirus, Potyvirus, Cucumovirus, Tobamovirus y Bromovirus también han sido reportadas causando pérdidas importantes en este cultivo. En este documento, se describirán únicamente las especies virales más comunes del sureste de México. De manera general, se sabe que las plantas de chile habanero infectadas por Begomovirus tienen un ciclo vegetativo más corto y los síntomas más comunes son enanismo, mosaicos, moteados, necrosis, clorosis y deformaciones (Figura 4b, 4c y 4d) (Astier *et al.*, 2007). En el estado de Yucatán se han detectado a los *Begomovirus: Pepper huasteco virus* (PHV), *Pepper golden mosaic virus* (PepGMV), *Tomato motle virus* (ToMoV), *Bean golden mosaic virus* (BGMV), y *Tomato yellow leaf curl virus* (TYLCV), los cuales infectan plantaciones de chile habanero y su principal vector es la mosca blanca (*Bemisia tabaci* Genn.) (Ascencio *et al.*, 1999a; Ascencio *et al.*, 1999b; González *et al.*, 2014).

Pepper golden mosaic virus (PepGMV). Es un Begomovirus que se transmite en forma persistente por mosca blanca (*Bemisia tabaci*), se caracteriza por inducir una variedad de síntomas en las plantas infectadas, las cuales van desde enanismos, mosaicos de color amarillo hasta un mosaico dorado, acompañados de una distorsión de nervaduras y deformación de las hojas. La severidad de síntomas de la enfermedad puede ser más severa cuando la infección de la planta ocurre en la etapa de vivero o recién establecidas en campo, en cuyo caso los frutos son escasos y deformes (Holguin-Peña *et al.*, 2004).

Pepper huasteco virus (PHV). Es un Begomovirus transmitido por mosca blanca, y que, junto con el PepGMV, son considerados como los Begomovirus más importantes en chile habanero. Además, es común encontrar a estos dos virus en mezclas en los diferentes hospedantes. En ocasiones, la interacción del PHV y el PepGMV es antagónica y en otros casos establecen un sinergismo, el tipo de interacción al parecer es dependiente del hospedante y específicamente en el chile habanero la interacción es antagónica (Méndez-Lozano *et al.*, 2003). Las plantas infectadas por el PHV se caracterizan por presentar un

mosaico amarillo dorado, la cual inicia como un amarillamiento en las nervaduras de las hojas y abolsamiento en las hojas.

Tomato spot wilt virus (TSWV). Es un Orthotospovirus (antes Tospovirus) transmitido por trips (*Frankliniella occidentalis*, *F. fusca*, *Trips tabaci*, *T. setosus*, entre los principales vectores) en cientos de hospedantes y se considera como uno de los virus más comunes en Chile habanero y puede provocar pérdidas de hasta el 100%, este efecto está asociado a la presencia de la enfermedad en la etapa inicial del cultivo, y a la severidad de síntomas en el follaje. Por otro lado, los síntomas pueden modificarse debido al estado nutricional del cultivo y factores ambientales que inciden directamente en la modificación de la concentración del título viral (Ríos-Dominguez *et al.*, 2019; Torres-Bojórquez *et al.*, 2017). Aunque en condiciones de campo solo se ha reportado y demostrado la transmisión por las especies de Trips, bajo condiciones de laboratorio se ha logrado transmitir al virus mecánicamente y mediante injerto (Whitfield *et al.*, 2005).

Los síntomas más comunes que induce el virus en el Chile son, un marcado enanismo y la falta de producción de frutos cuando la infección ocurre en la etapa de plántula en vivero. Mientras que cuando las plantas se infectan en etapas posteriores, se observan manchas cloróticas y pequeños anillos necróticos en hojas y tallos (Figura 4a), algunas veces también se observa defoliación y caída de flores. Los frutos de plantas infectadas presentan manchas cloróticas o necróticas con anillos o mosaicos que provocan la pérdida de valor comercial del fruto. Debido a que las manchas no cambian de color a pesar de que el fruto adquiere el color rojo.

Cucumber mosaic virus (CMV). Es un Cucumovirus transmitido de manera no persistente por cerca de 60 especies de pulgones a más de 800 especies de plantas. Los vectores más importantes son *Aphis gossypii*, *A. fabae*, *Macrosiphum euphorbiae* y *Myzus persicae*. El virus también se transmite por semilla y de forma mecánica mediante las herramientas de trabajo en el cultivo. El virus puede inducir pérdidas del 100% en la producción, cuando el cultivo de Chile habanero está cerca de plantaciones de cucurbitáceas. Las plantas infectadas presentan síntomas de amarillamiento, achaparramiento, hojas angostas y de apariencia correosa y deformación en frutos (Pérez-Moreno *et al.*, 2004).

Tobacco etch virus (TEV). El virus grabado o jaspeado del tabaco es un Potyvirus que se transmite por semilla, en forma mecánica y por varias especies de pulgones en forma no persistente. El patógeno infecta principalmente a las solanáceas y es uno de los virus más destructivos en el cultivo de habanero, tomate y tabaco, en donde puede causar pérdidas de hasta el 70%. Los síntomas de las plantas infectadas son achaparramiento, marchitez, raíces oscuras e induce que las nervaduras de las hojas adquieran una coloración más oscura, defoliación y deformación de frutos (Pérez-Moreno *et al.*, 2004).

Tabaco mosaic virus. Es un Tobamovirus que se transmite mecánicamente de manera muy eficiente, frecuentemente está asociado al *Tomato mosaic virus* y puede permanecer en los residuos de cosecha por más de 30 años, por lo que una vez que ingresa en una región su eliminación es prácticamente imposible. Los síntomas más comunes que presentan las plantas infectadas es la aclaración de las nervaduras en hojas jóvenes, abultamientos en las hojas. En la planta se observa achaparramiento, clorosis y mosaicos. Caída prematura de hojas viejas y aborto de flores y frutos. Necrosis de las yemas, maduración irregular y

deformación de los frutos, las pérdidas por este virus pueden ser del 30 al 70 % del total de producción (Pérez Moreno *et al.*, 2004).

Tomato brown rugose fruit virus (ToBRFV). Este virus está asociado a la caída de flores, necrosis en pedúnculos de frutos, hojas con manchas cafés y frutos con áreas rugosas de color café del chile y tomate, lo cual conduce a una reducción en el número de flores y frutos. Los frutos de plantas infectadas pueden desarrollar áreas amarillas, mostrar rugosidades, así como áreas necróticas o de color marrón. En México, los primeros reportes de esta enfermedad fueron realizadas en el 2018 y se ha sugerido que el ingreso de la enfermedad fue debido a la importación de semilla contaminada proveniente de Israel (Camacho-Beltrán *et al.*, 2019; Cambrón-Crisantos *et al.*, 2018).

Epidemiología. Los factores que afectan el desarrollo de las epidemias virales son aquellos relacionados con el vector (eficiencia de transmisión, así como condiciones que pueden propiciar el incremento repentino de la población del vector entre otros factores), el hospedante (susceptible, tolerante o resistente), el ambiente (factores ambientales y de manejo que modifican la población del vector) pueden tener una fuerte influencia en la velocidad de dispersión de la enfermedad.

Finalmente, el tipo de virus (variantes severas o no severas del virus) presente puede inducir la aparición de síntomas ligeros o severos en el hospedante. Aunque cabe aclarar que cada patosistema posee características particulares, de manera que la influencia de cada uno de los factores mencionados puede ser mayor o menor, en el comportamiento espacial y temporal de la enfermedad.

Estrategia general del manejo de virus. La mejor estrategia de manejo viral se basa en la prevención de la infección y el uso de estrategias dirigidas a reducir la velocidad de avance de la epidemia en la plantación. Por lo que, el uso de material vegetal (plántulas o semillas) libre de virus, así como el uso de variedades resistentes debe ser considerado al inicio del cultivo. Además, el monitoreo y control permanente de las poblaciones del vector del virus en cuestión, aunado al uso de estructuras que impidan el acceso del vector a las plantas, tales como el uso de casa sombra o invernadero, cubierto con una malla contra insectos deben ser parte del manejo. Cuando a pesar de estas medidas de protección, las plantas resultan infectadas con el virus, se recomienda la detección y eliminación oportuna de las plantas infectadas, así como de hospedantes alternos en la etapa inicial de la epidemia.



Figura 4. Síntomas de amarillamiento y anillos necróticos (a) inducidos por el Virus de la marchitez manchada del tomate (TSWV), así como deformaciones (b) de hoja y enanismos y moteado (c y d) y que presentan las plantas de habanero infectadas por virus del grupo de los Geminivirus.

Una estrategia que ha funcionado en el cultivo de tomate es el uso de portainjertos que inducen resistencia o tolerancia a patógenos del suelo y a virus (Chew *et al.*, 2012; Rivero *et al.*, 2003; Santacruz *et al.*, 2002;). Esta estrategia está siendo evaluada en Chile habanero, para el manejo de patógenos entre los que sobresalen nematodos (*Meloidogyne incognita*) y virus (especies de geminivirus), a través del uso de genotipos criollos de *Capsicum annum* variedad *glabriusculum* como portainjertos resistentes para *Capsicum chinense*. Los resultados muestran la reducción del uso de agroquímicos y se presenta como una alternativa para el manejo de plagas y enfermedades foliares y del suelo, ya que ayuda a mejorar la eficiencia en la producción en solanáceas y cucurbitáceas (Lee, 2007). La estrategia se basa en mejorar la tolerancia del hospedante a condiciones estresantes, activar las respuestas de defensa vegetal, así como el aumento en la absorción de agua y nutrientes, lo que resulta en un crecimiento vigoroso y mejora en el rendimiento (Cohen *et al.*, 2005; Nah, 2016).

2.1.4. Principales enfermedades causadas por nematodos

Los nematodos que afectan el cultivo de chile habanero son variados. Sin embargo, en el sureste de México se ha reportado únicamente a nematodos del género *Meloidogyne* entre los que sobresalen las especies de *M. incognita* y *M. arenaria*, los cuales se caracterizan por inducir la formación de agallas en el hospedante infectado.

Nematodos formadores de agallas (*Meloidogyne* spp.)

La presencia de *M. incognita* ha sido reportado en 18 cultivos del estado de Yucatán, entre los que sobresalen por su importancia económica el melón (*Cucumis melo*), pepino (*Cucumis sativus*), calabaza (*Cucumis pepo*), sandía (*Citrillus vulgare*) chile (*C. annuum*), girasol (*Helianthus annuus*), gerbera (*Gerbera jamesonii*), heliconia (*Heliconia* sp.), kalancho (*Kalanchoe pinnata*); mientras que en tomate (*S. lycopersicum*), chile habanero (*C. chinense*), frijol (*Phaseolus vulgaris*), tulipán (*H. rosea-sinensis*) chile Xkat'ic y dulce (*C. annuum*) se encontraron poblaciones mezcladas de *M. arenaria* y *M. incognita* (Cristóbal-Alejo *et al.*, 2010; Herrera-Parra *et al.*, 2011).

Síntomas ocasionados por *Meloidogyne incognita*. El nematodo causa en sus hospedantes clorosis en las hojas, enanismo de plantas, proliferación de raíces y reducción del tamaño de frutos. Además, las plantas manifiestan deficiencia de agua en las horas de mayor calor, en las raíces de las plantas parasitadas (Figura 5a y 5b) se observa la presencia de agallas de tamaño variable (Coyne *et al.*, 2007). El nematodo aumenta la producción de proteínas en las agallas y provocan un mal funcionamiento de los reguladores de crecimiento en las raíces y el tallo. El establecimiento de los sitios de alimentación provoca alteraciones en la continuidad del tejido vascular. Lo que contribuye a la reducción del crecimiento y desarrollo de las plantas (Medina-Canales *et al.*, 2011).

Manejo de nematodos. El control de los nematodos se realiza mediante la aplicación de nematicidas, uso de plantas resistentes y mediante el control biológico a través de la incorporación de enmiendas orgánicas e inorgánicas, uso de nematicidas naturales, así como mediante el uso de compuestos para inducir la resistencia. Para el caso específico de los nematodos agalladores del género *Meloidogyne*, el control biológico se ha realizado mediante la aplicación de especies de *Trichoderma* (Oka *et al.*, 2000).

Considerando que las especies de *Trichoderma* penetran y se establecen en la parte externa de la raíz y solo colonizan las primeras capas de células de la epidermis de la planta (Yedidia *et al.*, 2001). La colonización implica la capacidad del hongo para reconocer, adherirse, penetrar las raíces y tolerar metabolitos tóxicos de las plantas; fitoalexinas, flavonoides, terpenos, derivados fenólicos, agliconas y otros compuestos antimicrobianos (Vinale *et al.*, 2008).



Figura 5. Plantas de chile habanero (*Capsicum chinense*), mostrando síntomas de defoliación (a), caída y maduración prematura de frutos (b), debidos a la infección por el nematodo agallador (*Meloidogyne incognita*) en chile habanero

Una vez establecido, *Trichoderma*, activa la expresión de genes implicados en el sistema de respuesta de defensa de las plantas contra fitopatógenos (Nawrocka y Malolepsza, 2013), promoviendo el crecimiento de las plantas ya que secretan ácido indol acético, que estimula la germinación de la semilla, crecimiento de tejidos meristemáticos, mejora la asimilación de nutrientes, lo que se refleja en el aumento de volumen de raíz, la altura y la biomasa de las plantas (De Santiago *et al.*, 2011; Ortuño *et al.*, 2013). En particular, *Trichoderma* spp. puede inducir supresión de enfermedades con origen en el suelo, lo cual puede ocurrir por la actividad de los diferentes mecanismos de acción (Harman *et al.*, 2012; Mendoza *et al.*, 2013).

Reportes indican que *Trichoderma* spp. es un biorregulador contra nematodos del género *Meloidogyne* (Candelero *et al.*, 2015), los modos de acción se asocian a mecanismos como: la antibiosis; producción de metabolitos con efecto nematocida (viridina, gliotoxina, gliovirina, peptaiboles, trichodermina, suzukacilina, alameticina), el parasitismo, donde las hifas tiene la capacidad de envolver al nematodo, parasitar huevos y juveniles, y producir enzimas que hidrolizan componentes de la cutícula del nematodo (quitinasas, glucanasas, quitobionas y peroxidasas) (Jiménez *et al.*, 2013).

Cuando este hongo se inoculó en *Solanum lycopersicum* y *Cucumis sativus*, se observó una reducción del 50 % en la producción de huevecillos, juveniles en etapa 2 (J₂) y formación de agallas por *Meloidogyne* (Moura *et al.*, 2012; Sahebani y Hadavi, 2008). Estudios *in vitro* con esporas de *Trichoderma viridae* y *T. atroviride* fueron capaces de parasitar entre el 50-100 % de huevecillos de *M. incognita* (Mendoza *et al.*, 2013) y filtrados de aislados nativos causaron la muerte del 65-100 % de J₂ (Candelero *et al.*, 2015).

Otra estrategia para el manejo de nematodos es la incorporación de hongos micorrízicos arbusculares (HMA) como parte integral del control biológico de nematodos. Cuando las esporas del hongo se encuentran en el suelo, germinan y la hifa crece desde la espora hasta la superficie de la raíz. Posteriormente, se diferencia para formar el apresorio y pasar hasta la célula epidérmica. La penetración hacia la raíz ocurre a través del apresorio y con frecuencia el hongo se introduce entre las células epidérmicas. En el interior de la corteza, la hifa ramificada se invagina en la pared celular cortical de la célula, para formar estructuras terminales conocidas como arbusculos (Genre y Bonfante, 2010).

Se ha demostrado que los HMA translocan principalmente fósforo (P) del suelo a la planta, de ésta se mueven compuestos carbonados hacia el hongo, en forma de hexosa (fructosa y glucosa), que se convierten en lípidos (triacilglicerol y carbohidratos) en el micelio intraradical, los cuales se translocan al micelio extraradical, donde se sintetiza los compuestos estructurales y de almacenamiento del hongo; quitina, trehalosa y glicógeno (Ballestrini y Bonfante, 2014).

Los HMA protegen a las plantas contra los nematodos ya que alteran la composición de los exudados radicales y activan mecanismos de defensa en las plantas lo cual reducen; su penetración, su establecimiento y su reproducción (Alban *et al.*, 2013; Liu *et al.*, 2012). En los últimos años, se han utilizado para el control de nematodos endoparásitos al menos cinco especies de HMA, pertenecientes a la familia Glomeraceae (Herrera-Parra *et al.*, 2014; Zhang *et al.*, 2008). Implementadas en tomate (*S. lycopersicum*), pepino (*Cucumis sativus*), plátano (*Musa sp.*) y papaya (*Carica papaya*). En estas especies se ha logrado disminuir el establecimiento, el índice de reproducción y la severidad del ataque de los nematodos.

III. Conclusiones

Los fitopatógenos que infectan al chile habanero son múltiples y diversos (hongos, bacterias, virus y nematodos principalmente), afectando desde la etapa de vivero, durante el crecimiento y desarrollo de la planta en campo, hasta la cosecha y poscosecha. La severidad de la enfermedad depende del tipo de patógeno (virulento), del hospedante (susceptible) y factores ambientales (propicios) para el desarrollo de la enfermedad. Por lo que las pérdidas económicas que provoca cada patógeno, puede reducirse a través de la aplicación de una estrategia de manejo efectiva y oportuna.

IV. Referencias

- Abdelmageed, A. and N. Gruda. 2009. Influence of grafting on growth, development and some physiological parameters of tomatoes under controlled heat stress conditions. *European Journal of Horticultural Science* 74:16–20.
- Alban, R., Guerrero, R., Toro, M. 2013. Interaction between a root knot nematode (*Meloidogyne exigua*) and arbuscular mycorrhizae in coffee plant development (*Coffea arabica*). *American Journal of Plant Sciences* 4: 19-23.
- Ali, A., Bordoh, P.K., Singh, A., Siddiqui, Y. and Droby, S. 2016. Post harvest development of anthracnose in peppers (*Capsicum spp.*): etiology and management strategies. *Crop protection* 90:132-141.

- Alvarado-Martínez, A.G., Rueda-Puente, E.O., Ponce-Medina, J.F., Avendaño-Reyes, L., Jesús Santillano-Cazares, J., Borboa-Flores, J., Hernández-Montiel, L. y Holguín-Peña, R. 2013. Detection of *Ralstonia solanacearum* in *Solanum tuberosum* L. in Sonora, Mexico. Rev. FCA UNCUYO 45: 29-45.
- Ascencio, J., Z. Monsalve, M. Pruna, R. Díaz, y R. Rivera. 1999a. Los Geminivirus. Revista Mexicana de Fitopatología 17: 113-127.
- Ascencio, J., R. Díaz, J. Méndez, Z. Monsalve, G. Argüello, and R. Rivera. 1999b. First report of Tomato yellow leaf curl geminivirus in Yucatan. Plant Diseases 83: 1178.
- Astier, S., Albouy, J., Maury, Y., Robaglia, C. and Lecoq, H. 2007. Principles of plant virology. Science Publishers. Enfield, NH, USA. pp 472.
- Ballestrini, R. y Bonfante, P. 2014. Cell wall remodeling in micorrhizal symbiosis: a way towards biotrophism. Frontiers in Planta Science. 5: 1-10.
- Beltran, B.M., Velásquez, V.R. y Reveles, H.M. 2011. Avances de investigación en la bioecología de trips en chile (*Capsicum annuum* L.) en Zacatecas. Agrofaz 11:7-12.
- Bhattacharjee, R. and Dey, U. 2014. An overview of fungal and bacterial biopesticides to control plant pathogens/diseases. African Journal of Microbiology Research. 8: 1749-1762.
- Camacho-Beltrán, E., Perez-Villareal, A., Leyva-Lopez, N.E., Rodriguez-Negrete, E.A., Ceniceros Ojeda, E.A. and Méndez-Lozano, J. 2019. Occurrence of *Tomato brown rugose fruit virus* Infecting Tomato Crops in Mexico. Plant Diseases 103.
- Cambrón-Crisantos JM, Rodríguez-Mendoza J, Valencia-Luna JB, Alcasio-Rangel S, García-Ávila CJ, López-Buenfil JA and Ochoa-Martínez DL. 2018. First report of *Tomato brown rugose fruit virus* (ToBRFV) in Michoacan, Mexico. Revista Mexicana de Fitopatología 37: 185-192.
- Candelero, D. J., Cristóbal, A. J., Reyes, R. A., Tun, J. M., Ruíz, S. E. 2015. *Trichoderma* spp. promotoras del crecimiento en plántulas de *Capsicum chinense* Jacq. y antagónicas contra *Meloidogyne incognita*. Phytion 84: 113-119.
- Chávez-Díaz IF and Zavaleta-Mejía E. 2019. Molecular communication in the pathosystem *Capsicum* species-*Phytophthora capsici*. Mexican Journal of Phytopathology 37(2).
- Chew, Y., A. Gaytán, R. Chew y R. Ramírez. 2012. Respuesta de tomate (*Lycopersicon esculentum* Mill.) injertado y sin injertar a enfermedades virales en condiciones de invernadero. Producción agrícola-agrofaz 12: 13-19.
- Cohen, R., Y. Burger, C. Horev, A. Porat, and M. Edelstein. 2005. Performance of galiatype melons grafted on t Cucurbita rootstock in Monosporascus cannonballus-infested soils. Annals of Applied Biology 146:381–387.
- Coyne, D. L., Nicol, J. M. and Cole, C. B. 2007. Practical plant nematology: a field and laboratory guide. SP-IPM Secretariat, International Institute of Tropical Agriculture (IITA). Cotonou, Benin. Pp. 1-82.
- Cristóbal-Alejo, J., Herrera-Parra, E., Reyes-Oregel, V., Ruiz-Sánchez, E., Tun-Suárez, J. M y Celis-Rodríguez, T. 2010. *Glomus intraradices* para el control de *Meloidogyne incognita* (Kofoid & White) Chitwood en condiciones protegidas. Fitosanidad 14: 25-29.
- De Santiago, A. J. M., Quintero, M., Aviles and Delgado, A. 2011. Effect of *Trichoderma asperellum* strain T34 on iron, copper, manganese and zinc uptake by wheat grow on a calcareous medium. Plant and soil. Soil Biology Biochemistry 324: 97-104.
- García, M., D. Trejo y R. Rivera. 2010. Veinte años de investigación con *Geminivirus* en vegetales en Guanajuato. Acta Universitaria. Número Especial 3: 84-92.
- Genre A, and Bonfante P. 2010. The making of symbiotic cells in arbuscular mycorrhizal roots. In: Kapulnick Y., Douds D. D. (eds) Arbuscular mycorrhizas: physiology and function. Springer, Dordrecht. Pp. 57–71.
- González, A., E. Gill, L. Robles, A. Núñez, R. Pérez, O. Hernández y L. Pérez. 2014. Detección de Virus que Afectan al Cultivo de Chile (*Capsicum annuum* L.) en Chihuahua, México. Revista Mexicana de Fitopatología 32 :38-51.

- González, M. 1996. Efecto de niveles nutrimentales en las infecciones de los Virus Marchitez Manchada del Tomate y Jaspeado del Tabaco en tomate (*Lycopersicon esculentum* Mill.). Tesis de Maestría. Colegio de Posgraduados. Montecillo, Estado de México. pp 114.
- Harman, E. G., Herrera, E. A. H., Horwitz, A. B. and Lorito, M. 2012. Special issue: *Trichoderma*-from basic biology to biotechnology. *Mycrobiology*. 158: 1-2.
- Herrera-Parra, E., Cristóbal-Alejo, J., Tun-Suárez, J. M., Góngora-Jiménez, J. A., y Lomas-Barrié, T. C. 2011. Nematofauna nociva (*Meloidogyne* spp.) en cultivos hortícolas tropicales: distribución y perspectivas de manejo en Yucatán. En: Recursos genéticos microbianos de la zona golfo sur-sureste de México. SUBNARGEN. Edit. Morevalladolid S de R. L. de C. V. Pp. 125-136.
- Herrera-Parra, E., Lozano-Contreras, M. G., Santamaría-Basulto, F., Cristóbal-Alejo, J., Cabrera-Hidalgo, A. J. y Marbán-Mendoza, N. 2014. Inoculantes micorrícicos para el control de *Rotylenchulus reniformis* (Tylenchida: Hoplolaimidae) en *Carica papaya* cv. Maradol. *Nematropica* 44: 218-227.
- Holguín-Peña, R.J., Vázquez-Juárez, R., y Rivera- Bustamante, R.F. 2004. Rango de hospedantes, incidencia y filogenia del virus del mosaico dorado del chile (PepGMV) en Baja California Sur, México. *Revista Mexicana de Fitopatología* 22: 206-215.
- Jiménez, M. A., Asdrubal, A. M., Ramis, C., de Faria, Y. 2013. Evaluación de *Trichoderma harzianum* Rifai como inductor de resistencia a la pudrición blanca *Sclerotium rolfsii*. Sacc de la carota (*Phaseolus vulgaris* L.) bajo condiciones controladas. *Journal of the Selva Andina Research Society* 4: 31-41.
- Lamichhane, J.R., Dürr, C., Schwanck, A.A., Robin, M, H., Sarthou, J.P., Cellier, V., Messéan, A. and Aubertot, J.N. 2017. Integrated management of damping-off diseases. A review. *Agronomy for Sustainable Development*. 37: 10.
- Lee, S. 2007. Production of high quality vegetable seedling grafts. *Acta Horticulturae* 759: 169-174.
- Liao, C. Y., Chen, M. Y., Chen, Y. K., Wang, T. C., Sheu, Z. M., Kuo, K. C., . & Lee, M. H. 2012. Characterization of three *Colletotrichum acutatum* isolates from *Capsicum* spp. *European Journal of Plant Pathology* 133: 599-608.
- Liu, R., Dai, M., Wu, X., Li, M. y Liu, X. 2012. Suppression of the root-knot nematode *Meloidogyne incognita* (Kofoid & White) Chitwood on tomato by dual inoculation with arbuscular mycorrhizal fungi and plant growth-promoting rhizobacteria. *Mycorrhiza* 22: 289-296.
- Manelli, E., R. E., Rodrigues, R., Gonzaga, P. M., Pombo, S. C., and Karasawa, M. 2004. Inheritance of bacterial spot disease in *Capsicum annuum* L. *Crop Breeding and Applied Biotechnology* 4:490-494.
- Medina-Canales, Ma. G., Carvajal-Sandoval, A., Alejandre-Aguilar, A. Tovar-Soto, A. 2011. Alteraciones histológicas inducidas por *Meloidogyne hapla* y *M. arenaria* en zanahoria (*Daucus carota* L.) en el Valle de Tepeaca, Puebla, México. *Nematropica*. 41: 223-228.
- Méndez-Lozano, J., Torres-Pacheco, I., Fauquet, C. M. and Rivera-Bustamante, R. F. 2003. Interactions between geminiviruses in a naturally occurring mixture: *Pepper huasteco virus* and *Pepper golden mosaic virus*. *Phytopathology* 93:270-277.
- Mendoza, G. A. T., Wilson, J. H. Colina, J. C. 2013. Efecto de *Trichoderma atroviride*, *Trichoderma harzianum* y *Trichoderma viride* sobre huevos de *Meloidogyne* sp. en condiciones de laboratorio. *REBIOLEST*. 1: 65.71.
- Moisés Ramírez, M. M., Arcos, C. G., Méndez, A. R. 2018. Jaguar: cultivar de chile habanero para México. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas* 9:487-492.
- Moura, M. G., Bonfin, J. F. M. And Viera, de Araújo, F. J. V. 2012. *Trichoderma harzianum* reduces population of *Meloidogyne incognita* in cucumber plants under greenhouse conditions. *Journal of Entomology and Nematology* 46: 54-57.
- Nah, A. 2016. Tolerancia de genotipos de *Capsicum annuum* L. var. *glabriusculum* A *Meloidogyne incognita* y su potencial como portainjerto de *C. chinense* Jacq. Tesis de Maestría en horticultura tropical. Instituto Tecnológico de Conkal, Yucatán, México. pp 19.

- Naranjo, F. E. y Martínez, Z, Y. 2013. Avances en el diagnóstico de la marchitez bacteriana (*Ralstonia solanacearum*): situación actual y perspectivas en Cuba. *Revista Protección Vegetal*. 28: 160-170.
- Nawrocka, J. and Malolepsza, U. 2013. Diversity in plant systemic resistance induced by *Trichoderma*. *Biological Control* 67: 149-156.
- Oka, Y., Koltai, H., Bar-Eyal, M., Mor, M., Sharon, E., Chet, L. and Spiegel, Y. 2000. New strategies for the control of plant-parasitic nematodes. *Pest Management Science* 56:983-988.
- Oo MM, Oh SK. 2016. Chili anthracnose (*Colletotrichum* spp.) disease and its management approach. *Korean Journal of Agricultural Science* 43:153-162.
- Ortuño, N., Miranda, C., Claros, M. 2013. Selección de cepas de *Trichoderma* spp. generadoras de metabolitos secundarios de interés para su uso como productoras de crecimiento en plantas cultivadas. *Journal of the Selva Andina Research Society*. 1: 16-20.
- Pérez-Moreno, L., Rico-Jaramillo, E., Sánchez-Palé, J.R., Ascencio-Ibáñez, J.T., Díaz-Plaza, R., y Rivera-Bustamante, R.F. 2004. Identificación de virus fitopatógenos en cultivos hortícolas de importancia económica en el estado de Guanajuato, México. *Revista Mexicana de Fitopatología* 22:187-197.
- Phoulivong, S. 2011. *Colletotrichum*, naming, control, resistance, biocontrol of weeds and current challenges. *Current research in environmental & applied mycology* 3:53-73.
- Potnis, N., Timilsina, S., Strayer, A., Shantharaj, D., Barak, J. D., Paret, M.I., Vallad, G.E., and Jones, J.B. 2015. Bacterial spot of tomato and pepper: diverse *Xanthomonas* species with a wide variety of virulence factors posing a worldwide challenge. *Molecular Plant Pathology*: **16**: 907–920.
- Ramírez, M. M., Arcos, C.G., Méndez, A. R. 2018. Jaguar: cultivar de chile habanero para México. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas* 9:487-492.
- Ríos-Domínguez, G., Salgado-Siclán, M. L., Aguilar-Ortigoza, C., Aquino-Martínez, J.G. y Ramírez-Dávila, J.F. 2019. Tomato spotted wilt orthotospovirus (TSWV) no se trasmite por semilla de jitomate. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas* 10: 1949-1955.
- Rivero, R., J. Ruiz y L. Romero. 2003. Role of grafting in horticultural plants under stress condition. *Food, Agriculture and Environment* 1: 70-74.
- Rowell, B., Jones, R. T., Nesmith, W., Satanek, A., & Snyder, J. C. (2001). Bacterial spot resistance, yield, and quality of bell and specialty peppers. *HortTechnology* 11: 648-657.
- Ruiz-Lau, N., Medina-Lara, F. y Martínez-Estévez, M. 2011. El chile habanero: su origen y usos. *Ciencia*. Julio-septiembre:70-77.
- Rueda-Puente, E. O., Hernández-Montiel, L. G., Holguín-Peña, R. J., Ruiz- Espinoza, F. H., López-Elías, J., Huez- Lopez, M. A., Jiménez- León, J. B. F, J. y Ortega-García, J. 2014. *Ralstonia solanacearum*: Una enfermedad bacteriana de importancia cuarentenaria en el cultivo de *Solanum tuberosum* L. *Innurnus* 9: 24-36.
- Sahebani, N., and Hadavi, N. 2008. Biological control of the root-knot nematode *Meloidogyne javanica* by *Trichoderma harzianum*. *Soil Biology & Biochemistry*. 40: 2016-2020.
- Santacruz, A., M. Martínez, F. Pérez, R. Romero, and M. Bolarin. 2002. The rootstock effect on the tomato salinity response depends on the shoot genotype. *Plant Science* 162:825–831
- SIAP. 2019. Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera. Disponible en: <https://nube.siap.gob.mx/cierreagricola>
- Silva-Rojas, H.V., Fernández-Pavía, S.P., Góngora-Canul, C., Macías-López, B.C. y Ávila-Quezada, G.D. 2009. Distribución Espacio Temporal de la Marchitez del Chile (*Capsicum annum* L.) en Chihuahua e identificación del agente causal *Phytophthora capsici* Leo. *Revista Mexicana de Fitopatología* 27:134-147.
- Torres-Bojórquez, A.I., Morales-Maza, A., Grijalva-Contreras, R, L., Cervantes- Díaz, Lourdes y Núñez-Ramírez, F. 2017. Hierro foliar y acolchado de plástico en *Capsicum chinense* Jacq. Infectado con Tospovirus. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas* 8: 369-380.

- Tun-Suárez, J.M., Castillo-Peraza, M.E., Cristóbal-Alejo, J. y Latournerie-Moreno, L. 2011. Etiología de la mancha foliar del chile dulce (*Capsicum annuum* L.) y su control *in vitro* en Yucatán, México. *Fitosanidad* 15:5-9.
- Velásquez-Valle, R., Reveles-Torres, L.R. y Reveles-Hernández, M. 2013. Manejo de las principales enfermedades del chile para secado en el norte centro de México. Folleto Técnico. Núm 50. Campo Experimental Zacatecas. CIRNOC – INIFAP, 57 páginas.
- Vinale, F., Sivasithamparam, K., Ghisalberti, L., Marra, R., Woo, S. L., Lorito, M. 2008. *Trichoderma*-plant-pathogen interactions. *Soil Biology & Biochemistry*. 40: 1-10.
- Whitfield, A. E., Ullman, D.E. and German. T. L. 2005. Tospovirus-Thrips Interactions. 2005. *Annual Review of Phytopathology* 43:459-489.
- Yedidia, I., Srivastva, A. K., Kapulnik, Y. and Chet, I. 2001. Effect of *Trichoderma harzianum* on microelement concentrations and increased growth of cucumber plants. *Plant and Soil*. 235: 235-242.
- Zhang, L., Zhang, J., Christie, P and Li, X. 2008. Pre-inoculation with arbuscular mycorrhizal fungi suppresses root knot nematode (*Meloidogyne incognita*) on cucumber (*Cucumis sativus*). *Biology and Fertility of Soils*. 45: 205-21.

CAPÍTULO 3

Biología y manejo de plagas del cultivo de chile habanero

Biology and management of pests on habanero pepper

Martín-Mex, Rodolfo¹, Nexticapán-Garcéz, Ángel¹, y Ruiz-Sánchez, Esaú^{2*}

¹Laboratorio GeMBio. Centro de Investigación Científica de Yucatán. A.C. Calle 43 # 130. Chuburná de Hidalgo, Mérida, Yucatán. CP 97200. (rodolfo@cicy.mx, angar@cicy.mx). ²Tecnológico Nacional de México. Instituto Tecnológico de Conkal. Avenida Tecnológico S/N, Municipio de Conkal, Yucatán. C.P. 97345 *autor para correspondencia: eau.ruiz@itconkal.edu.mx

Resumen

El presente capítulo describe la morfología, biología/daños y estrategias de manejo de las principales especies de plagas que afectan el cultivo de chile habanero en zonas tropicales de México, con énfasis en la Península de Yucatán. Se mencionan algunos aspectos de la biología que son de importancia para la toma de decisiones en la implementación de las estrategias de manejo. La información de los daños es para reconocer de manera práctica la plaga y sus efectos en el cultivo. Se sugieren algunas recomendaciones para el manejo, en particular sobre manejo biorracional y químico.

Palabras Clave: *Capsicum chinense*, plagas, manejo

Abstract

This chapter describes the morphology, biology/damage and management of the main species of pests on habanero pepper production in tropical areas of Mexico, particularly in the Yucatan Peninsula. We mentioned some aspects of biology that are important for decision making to apply strategies of pest management. The information of pest damage helps to identify the pest in the field and to determine its effects on the crop. Some recommendations pest management are indicated, in particular the biorational and chemical products for management are described.

Keywords: *Capsicum chinense*, pests, management

I. Introducción

Uno de los factores más importantes en la producción de chile habanero es la presencia de ácaros e insectos fitófagos, los cuales ocasionan daños directos por consumo de tejido vegetal o savia o en algunos casos también puede transmitir enfermedades. En general las plagas disminuyen la productividad del cultivo o afectan la calidad de los frutos. Las pérdidas ocasionadas por plagas en el cultivo varían de acuerdo con la edad de la planta y al grado de infestación, así como de las estrategias de manejo implementadas.

Para el manejo de plagas se usa información sobre biología y ecología de las especies plagas, debido a la importancia de saber sobre el proceso de colonización y desarrollo del insecto o ácaro en la planta. La descripción de los ciclos biológicos es de suma importancia porque a través de ellos se puede visualizar los mejores periodos para establecer estrategias de manejo. Actualmente, las estrategias de manejo deben ir encaminadas a usar prácticas ecológicas de menor impacto al ambiente.

II. Revisión bibliográfica

Plagas más comunes del cultivo

2.1 Mosquita blanca *Bemisia tabaci* Genn. (HEMIPTERA: ALEYRODIDAE).

Morfología. Los huevos son ovales de color blanco, con el tiempo se tornan café obscuro. Las ninfas de primer estadio son ovales, color blanco verdosas y miden 0.3 mm de longitud. Las ninfas de segundo al cuarto instar son aplanadas y ovales, color amarillo verdosas y miden de 0.4 a 0.7 mm. La pupa es aplanada y más convexa que las ninfas, los ojos son rojos y el cuerpo amarillo (Figura 1). Los adultos son blancos amarillentos y miden de 0.8 a 1 mm (Figura 1) (Mejía *et al.*, 1995).



Figura 1. Adultos e inmaduros de *Bemisia tabaci*.

Biología y daños. La oviposición se lleva a cabo en el envés de las hojas jóvenes. Los huevos eclosionan en 5-7 días. Las ninfas de primer estadio son móviles y buscan activamente un lugar para alimentarse. Del segundo al último estadio, las ninfas son sésiles. Las ninfas completan su desarrollo en 10-15 días, dependiendo de las temperaturas (Brown *et al.*, 1995).

Los adultos y ninfas succionan savia, lo que afecta el vigor y producción de frutos. Los adultos excretan sustancias azucaradas que originan el desarrollo de hongos causantes de fumaginas, que cubren la lámina foliar y dificulta el proceso fotosintético. Debido a la

alimentación por la succión de savia, la planta puede sufrir alteraciones fisiológicas que van desde cambios de coloración, clorosis y maduración heterogénea de frutos. El daño más importante, es la transmisión de enfermedades virales. Los begomovirus son transmitidos eficientemente por los adultos (Martín-Mex *et al.*, 2012). Las plantas que han sido infectadas muestran diferentes síntomas (Figura 2), tales como mosaicos, clorosis, achaparramientos, deformación foliar y disminución dramática del rendimiento de frutos (Ortega, 1995).



Figura 2. Síntomas de mosaico y deformación del follaje por virosis.

Manejo

Algunas prácticas culturales incluyen establecimiento de barreras vivas con especies de gramíneas alrededor del cultivo, uso de acolchado plástico y uso de microtuneles de malla flotante. El uso de mallas flotantes principalmente es para proteger los primeros dos meses del cultivo (Martín-Mex *et al.*, 2009).

Existen enemigos naturales, como parasitoides que pueden ser eficientes para disminuir poblaciones de *B. tabaci*. Entre ellos se encuentran especies de *Encarsia* y *Eretmocerus*. Existen depredadores, como crisopas *Chrysoperla* sp. y chinches depredadoras *Orius* y *Geocoris*. Los hongos entomopatógenos *Metarhizium anisopliae* y *Beauveria bassiana* son eficientes cuando la humedad relativa ambiental es alta (Aguilar, 2001). El hongo *Paecilomyces fumosoroseus* también puede ser activo (Chan-Cupul *et al.*, 2010). Se ha observado que estos organismos presentan mayor efectividad en los meses de septiembre a febrero debido a la mayor humedad relativa del ambiente.

Los productos biorracionales más eficientes son aquellos a base de sales potásicas de ácidos grasos, extractos de ajo, mezcla de extractos de chile canela y ajo, así también, el uso de aceites de soya. Estos insecticidas actúan por contacto, por lo que es indispensable una correcta cobertura en el envés de las hojas al momento de la aplicación. Las aplicaciones de estos productos pueden ser intercaladas con insecticidas químicos para mayor efectividad (Martín-Mex *et al.*, 2012).

Para el control químico, contra inmaduros se recomiendan los reguladores de crecimiento, Pyriproxyfen y Buprofezin. También para inmaduros el ácido tetrónico, Spirotetramat; y diamidas antranílicas Clorantraniliprol y Ciantraniliprol, son eficientes para el manejo de esta plaga (Martín-Mex y Larqué-Saavedra, 2009; Martín-Mex *et al.*, 2012). Para el control de adultos, los ingredientes más efectivos son los del grupo químico neonicotinoides, que incluye Imidacloprid, Tiametoxam, Acetamiprid y Dinotefuran. Del grupo butenolida se encuentra el insecticida Flupyradifurone. Otro grupo recomendado incluye los bloqueadores selectivos de alimentación, como Pymetrozine y Flonicamida.

2.2 Picudo del chile *Anthonomus eugenii* Cano. (COLEOPTERA: CURCULIONIDAE)

Morfología. Los huevos son ovalados, color blanco perla al principio y posteriormente se tornan amarillos. Los huevos miden 0.5 mm de longitud. La larva es ápoda de cuerpo curvado, con cabeza café y cuerpo blanco-cremoso, la pupa es de color blanco-cremoso, al final adquiere una coloración café. El adulto mide de 2.5 a 3.0 mm de longitud, color gris a negro brillante o café rojizo (Figura 3). Una característica primaria es su rostrum alargado y curvado (Anaya, 1995).



Figura 3. Adulto de *Anthonomus eugenii* en los brotes de chile habanero.

Biología y daños. Las hembras ovipositan en el ovario de las flores y frutos en formación. Después de un periodo de 4 a 5 días de incubación, las larvas emergen y pasan por cuatro estadios dentro de los frutos, en un periodo de 8 a 10 días. La pupa se desarrolla en el interior del fruto dentro de una celda. Una vez que emergen los adultos, perforan la epidermis para salir del fruto. El ciclo completo de huevo a adulto va de 20 a 30 días (Patrock y Schuster, 1992). El desarrollo de esta plaga se ve favorecida por temperaturas calurosas. Aparte del chile existen otros hospederos donde los adultos pueden sobrevivir, como el

toloache (*D. stramonium*), tabaco (*Nicotiana tabacum*) y berenjena (*Solanum rostratum*) (Capinera, 2014).

El daño principal lo produce la larva, ésta se alimenta de la placenta, semillas y todo el tejido interno de frutos, causando malformaciones y manchado de semillas. Los frutos dañados se tornan amarillamientos y maduran prematuramente (Figura 4) (Patrock y Schuster, 1992).



Figura 4. Fruto dañado dañado por larvas de *Anthonomus eugenii*.

Manejo

Las prácticas culturales incluyen coleccionar y enterrar frutos caídos, así como la destrucción de hospederos alternativos para romper el ciclo de vida (Capinera, 2014., Martín-Mex *et al.*, 2008). Las especies de hongos entomopatógenos más usadas son *Metarhizium anisopliae* y *Beauveria bassiana* (Aguilar, 2003).

Los productos biorracionales a base de extracto de Argemónina, Berberina y Ricina son eficientes. Sobre los insecticidas químicos, los reguladores de crecimiento Diflubenzuron y Novaluron son efectivos. Otros insecticidas de amplio espectro incluyen los piretroides Lambda-cyhalotrin, Zeta-cypermethrin y Beta Cyflutrin. Otros grupos de insecticidas incluye

los neonicotinoides, como Imidacloprid, Tiametoxam, Acetamiprid y Dinotefuran (Martín-Mex *et al.*, 2008, 2012).

2.3 Pulgón verde *Myzus persicae* Sulz. (HOMOPTERA: APHIDIDAE)

Morfología. El adulto mide de 1.5 a 2.5 mm, es de color verde pálido o amarillento (Figura 5). La frente presenta tubérculos antenales convergentes bien desarrollados que le dan un aspecto de “W”. Los sinfúnculos son delgados con ápices oscuros y la cauda es pálida (Peña y Bujanos, 1995).



Figura 5. Adultos de *Myzus persicae* y apariencia de hoja infestada

Biología y daños. En la Península de Yucatán. *M. persicae* es anholocíclico. Las ninfas pasan por cuatro estadios en dos semanas. Presenta reproducción partenogenética. Los adultos alados infestan las hojas tiernas y brotes de las plantas de chile. En pocos días se establecen las colonias con adultos ápteros (Jansson y Smilowitz, 1986). Su óptimo

desarrollo se presenta a temperaturas de 25-28°C (Davis *et al.*, 2006). Las ninfas y adultos succionan savia de los brotes tiernos, lo que causa reducción del vigor de la planta. Secretan una mielecilla sobre las hojas donde los hongos producen fumaginas, lo que ennegrece la superficie del follaje e interfiere la fotosíntesis. El daño indirecto más peligroso es la transmisión de enfermedades virales (Peña y Bujanos, 1995).

Manejo

Sobre el control biológico, los parasitoides *Aphelinus* spp. y los depredadores *Ceratomegilla maculata*, *Cycloneda sanguinea*, *Hippodamia convergens* y *Chrysopa carnea* son agentes eficientes de manejo (Tamaki *et al.*, 1981). Los hongos entomopatógenos como *Lecanicillium lecanii* representan buena alternativa en épocas templadas y de alta humedad relativa (Ashouri *et al.*, 2004).

El uso de insecticidas químicos incluye los neonicotinoides, Imidacloprid, Tiametoxam, Acetamiprid y Sulfoxaflor. También se pueden usar Pimetrozine y flonicamid. El derivado de ácidos tetrónico, Spirotetramat es eficiente.

2.4 Araña roja *Tetranychus urticae* Koch (TROMBIDIFORMES: TETRANYCHIDAE)

Morfología. Los huevos son esféricos, color blanco amarillentos, miden 0.1 mm de diámetro. Los juveniles y adultos tienen cuerpo ovalado y globoso, son de color rojizos lo que contrasta con el color verde de las hojas (Figura 6). Los adultos miden 0.5 mm de largo, presentan manchas negras en ambos lados de sus cuerpos (Otero, 1995).

Biología y daños. Las hembras ovipositan en el envés de las hojas. El periodo de incubación es de tres a cuatro días. El periodo de larva es de dos a cinco días. El estadio de protoninfa va de uno a dos días y deutoninfa de uno a tres días. El período total de huevo a adulto es de siete a 14 días (Gallardo *et al.*, 2005, Tellom *et al.*, 2009). Esta plaga se desarrolla en condiciones de humedad relativa baja y temperaturas altas. Tiene amplia gama de hospederos, como Solanáceas, Curcubitáceas y frutales en general, así como especies ornamentales (Fasulo y Denmark, 2009).

El daño inicia en el envés de las hojas inferiores. Se forman puntos amarillos en la base de las hojas y a los lados de la nervadura central. Las áreas amarillas aparecen en toda la hoja y posteriormente cambian a un color rojizo en el haz (Figura 6). Las infestaciones severas producen defoliación de la planta (Otero, 1995).



Figura 6. Colonia de *Tetranychus urticae* en follaje y daño producido por succión de savia.

Manejo

Se recomienda riegos por aspersión en épocas de sequía. Controlar el polvo de los caminos para evita que las hojas se empolvan y los depredadores puedan trabajar eficientemente. Los ácaros depredadores incluyen los géneros *Amblyseius*, *Phytoseiulus* y *Metaseiulus*, así como las catarinitas *Hippodamia convergens*, *Ceratomegilla maculata* y *Olla abdominalis* (Garza y Rivas, 2003).

Se recomienda utilizar productos comerciales a base de extracto de neem y canela, sales potásicas de ácidos grasos y azufre elemental. Los productos químicos más utilizados son la Abamectina, Fenpiroximate y Spiromesifen.

2.5 Ácaro blanco *Polyphagotarsonemus latus* Banks (ACARI: TARSONEMIDAE)

Morfología. Los huevos son hialinos o color ámbar traslúcidos. La hembra adulta mide 0.2 mm y el macho 0.1 mm de largo. Los adultos tienen el cuerpo hinchado de perfil y tienen un color blancuzco, amarillo ámbar o verde (Gerson, 1992).

Biología y daños. Las hembras ovipositan en la nervadura central. Los adultos se localizan en el haz y envés de las hojas. El ciclo de huevo a adulto es de ocho a 10 días, se reproducen por partenogénesis y de manera asexual (Gerson, 1992). Tiene otros hospederos aparte de chile, incluyendo berenjena, tomate, papaya, mango, cítricos, guayaba y aguacate. También puede afectar ornamentales (Fasulo, 2010).

Las colonias ocasionan deformación de hojas jóvenes debido a que la nervadura central se distorsiona en zig-zag y los bordes se enrollan hacia el haz (Figura 7). El crecimiento de los brotes disminuye y el aborto floral es alto. Si la severidad de daño es alta, el ácaro puede causar la muerte de la planta.



Figura 7. Daños causados por *Polyphagotarsonemus latus*.

Manejo

Las prácticas culturales son similares a lo descrito en araña roja. Los productos biorracionales recomendados incluyen extracto de canela y azufre elemental. Los productos químicos convencionales más efectivos son Abamectina, Fenpiroximate y Spiromesifen (Martín-Mex *et al.*, 2009).

2.6 Trips oriental *Thrips palmi* Karny (THYSANOPTERA: THIRIPIDAE)

Descripción morfológica. Los huevos tienen forma arrifionada, son de color blanco amarillento y miden aproximadamente 0.25 mm de longitud. Las larvas son pálidas o amarillas transparentes, el primer instar mide alrededor de 0.5 mm y el segundo aproximadamente 0.7 mm de longitud. Los adultos son de color amarillo pálido y miden alrededor de 1 mm. El cuerpo es alargado y poseen hileras de setas; el abdomen posee nueve segmentos bien definidos (Rosenheim *et al.*, 1990).

Biología y daños: La oviposición se lleva a cabo en hojas, flores y frutos. Los huevos eclosionan en tres días, de ahí pasa por dos instares larvales y dos instares pupales antes del estado adulto. El ciclo tarda de 11 a 26 días. Las larvas se alimentan raspando tejidos de la planta. En estado de pupa permanece en el suelo. Los adultos cuando eclosionan se alimentan gregariamente en las hojas, principalmente en las venas. También se desarrollan en los pétalos y ovarios, en flores y en la superficie de los frutos (Rosenheim *et al.*, 1990). El ciclo es favorecido por temperaturas elevadas. Sus hospederos son muy variados, entre los que se encuentran Solanáceas, Cucurbitáceas y frutales de diferentes familias. También puede atacar a especies ornamentales (Tsai *et al.*, 1995).

Debido a la alimentación, la planta da apariencia bronceada o plateada, especialmente en las venas de las hojas y superficie de los frutos. En varios cultivos se produce ampollamiento y rizado de las hojas, incluso se produce cicatrices y deformaciones en el tejido vegetal. También puede haber transmisión de virus (Salas, 1994).

Manejo

Como prácticas culturales se sugiere establecer el cultivo del chile asociado con plantas de frijol común que actúan como cultivo trampa y establecer coberturas inertes con material seco de alguna planta o coberturas de plástico plateado en los lugares donde sea factible (Peña y Bujanos, 1995).

Los insecticidas químicos del grupo de las spinosinas, como Spinosad y Spinetoram son altamente efectivos. Los insecticidas del grupo de los neonicotinoides más eficientes son Imidacloprid, Tiametoxam, Acetamiprid y Dinotefuran.

2.7 Minador de la hoja *Liriomyza spp.* (DIPTERA: AGROMYZIDAE)

Morfología. Los huevos son blancos y ovalados, miden 0.25 mm de longitud. Las larvas son blancas al principio y posteriormente amarillas o color café. Llegan a medir hasta 3 mm cuando están completamente desarrolladas. Las pupas son ovaes, de 2 mm de longitud. Los adultos miden de 2 a 3 mm, son de color amarillo con el dorso del tórax de color negro brillante (Figura 8) (Cervantes, 1995).

Biología y daños. Las hembras ovipositan en la lámina foliar. Los huevos eclosionan en dos a cuatro días. La larva pasa por tres o cuatro estadios durante siete a 10 días. Las larvas hacen galerías entre el haz y el envés de las hojas. La pupa tiene una duración de ocho a 15 días. El insecto pupa en el suelo, pero también puede pupar en el follaje, dentro de las hojas o en la superficie (Cervantes, 1995; Ganapathy *et al.*, 2010). Se desarrolla a temperatura de 28-30°C y moderada a alta humedad relativa. El ciclo completo de huevo a adulto toma 15 días. Se hospeda en Solanáceas, Cucurbitáceas y Fabáceas, principalmente (Schuster *et al.*, 1991).

La larva produce galerías entre el haz y envés de las hojas, principalmente en hojas bajas e intermedias (Figura 8). En ataques severos causa defoliación y los frutos quedan expuestos a quemaduras solares (Soria *et al.*, 2000; Van Elferen y Yathom, 1989).



Figura 8. Adulto y punturas de alimentación de *Liriomyza spp.* y daños en las hojas causados por las larvas.

Manejo

Los parasitoides como la avispa *Diglyphus begini* y *D. websteri*, así como *Opius bruneipes* son eficientes regulando poblaciones de la plaga (Liu *et al.*, 2009).

Los insecticidas a base de extractos de ajo chile y canela, así como las sales potásicas de ácidos grasos los extractos de berberina, ricina y argemonina son eficientes en el manejo de esta plaga (Liu *et al.*, 2009).

Los insecticidas químicos más efectivos incluyen el regulador de crecimiento Cyromazina, las spinosinas Spinosad y Spinetoram. También son efectivos los insecticidas Abamectina y Clorantroliprol.

III. Conclusiones

Las plagas de chile habanero afectan desde el vigor de las plantas hasta la calidad de frutos. Las plagas son una limitante importante en la producción y se debe reconocer la morfología y biología de las especies para diseñar estrategias de manejo eficientes. El manejo de las plagas en general se lleva a cabo con insecticidas químicos, pero existen prácticas culturales y agentes de control biológico que podrían coadyuvar a la disminución de las poblaciones de plagas en campo. Para el buen uso de insecticidas químicos se recomienda que las aplicaciones inicien toda vez que el nivel de infestación lo amerite, pero siempre considerando el modo de acción de los insecticidas utilizados. Conocer las familias químicas de los insecticidas, permite diseñar estrategias de manejo de resistencia a insecticidas y contribuye a incrementar la vida activa de estos agroquímicos.

IV. Referencias

- Aguilar, J.J.F. (2001). Hongos entomopatógenos para el control del picudo del chile (*Anthonomuseugenii* Cano). Tesis profesional – Instituto Tecnológico Agropecuario No. 2. Conkal, Yuc. México.
- Aguilar, O. (2003). Control del picudo del chile (*Anthonomuseugenii* Cano) con insecticidas de bajo impacto ambiental. Tesis de maestría en ciencias – Instituto Tecnológico No. 2. Conkal, Yuc. México.
- Anaya, R. S. (1995). Catarinitas y picudos que atacan a las hortalizas en México. En: Plagas y enfermedades de las hortalizas en México. Anaya, R. S y Romero N. J. (Edits). Colegio de posgraduado Instituto de Fitosanidad. 467 p.
- Ashouri, A., Arzanian, N., Askary, H. y Rasouljan, G.R. (2004). Pathogenicity of the fungus, *Verticillium lecanii*, to the green peach aphid, *Myzus persicae* (Hom.: Aphididae). Communication on Agricultural and Applied Biological Sciences, 69(3), 205-209.
- Brown, J.K., Frohlich, D.R. y Rosell, R.C. (1995). The sweetpotato or silverleaf whiteflies: biotypes of *Bemisia tabaci* or a species complex?. Annual Review of Entomology, 40: 511-534.
- Capinera, J.L. (2014). Pepper Weevil, *Anthonomus eugenii* Cano (Insecta: Coleoptera: Curculionidae). IFAS Extension. University of Florida. Florida, USA. 1-3.
- Cervantes, M.J.F. (1995). Insectos chupadores y minadores que afectan hortalizas. En: Plagas y enfermedades de las hortalizas en México. Anaya, R. S y Romero N. J. (Edits). Colegio de Posgraduados. Instituto de Fitosanidad. 467 p.
- Chan-Cupul, W., Ruiz-Sánchez, E., Cristóbal-Alejo, J., Pérez-Gutiérrez, A., Munguía-Rosales, R. y Lara-Reyna J. (2010). Desarrollo *in vitro* de cuatro cepas nativas de *Paecilomyces*

- fumosoroseus* y su patogenicidad en estados inmaduros de mosquita blanca. *Agrociencia*, 44(5), 587-597.
- Fasulo, T.R. y Denmark, H.A. (2009). Twospotted spider mite *Tetranychus urticae* Koch (Arachnida: Acari: Tetranychidae). EENY- 150. Department of Agriculture and Consumer Services - Division of Plant Industry, University of Florida. Florida, USA.
- Fasulo, T.R. (2010). Broad mite *Polyphagotarsonemus latus* Banks (Arachnida: Acari: Tarsonemidae). EENY- 183. Department of Agriculture and Consumer Services - Division of Plant Industry. University of Florida. Florida, USA.
- Gallardo, A., Vázquez, C., Morales, J. y Gallardo, J. (2005). Biología y enemigos naturales de *Tetranychus urticae* en pimentón. *Manejo integrado de Plagas y Agroecología (Costa Rica)*, 74, 34-40.
- Ganapathy, N., Durairaj, C. y Karuppuchamy, K. (2010). Bio-ecology and management of serpentine leaf miner, *Liriomyza trifoli* (Burgess) in cowpea. *Karnataka Journal of Agricultural Sciences*, 23(1), 159-160.
- Garza, U.E. y Rivas M.A. (2003). Manejo integrado de las plagas del chile y jitomate en la zona media de San Luis Potosí. INIFAP- CIRNE. Campo Experimental Ebano. Folleto para productores Núm 5. 57 p.
- Gerson, U. (1992). Biology and control of the broad mite, *Polyphagotarsonemus latus* (Acari: Tarsonemidae). *Experimental and Applied Acarology*, 13 (3), 163-178.
- Jansson, R.K. y Smilowitz, Z. (1986). Influence of nitrogen on population parameters of potato insects: abundance, population growth, and within-plant distribution of the green peach aphid, *Myzus persicae* (Homoptera: Aphididae). *Environmental Entomology*, 15(1), 49-55.
- Liu, T.X., Kang, L., Heinz, K.M. y Trumble, J. (2009). Biological control of *Liriomyza* leafminers: progress and perspectives. *CAB Reviews: Perspectives in agriculture, Veterinary Science, Nutrition and Natural Resources*, 4, 1-16.
- Martín-Mex, R., Nexticapan-Garcéz, A y Larqué-Saavedra, A. (2012). Las 3 principales plagas del chile habanero. *De Riego*. Año 10, No. 59. Diciembre-Enero. p. 56-61.
- Martín-Mex, R., Nexticapan-Garcéz, A y Larqué-Saavedra, A. (2009). Manejo integrado de plagas en chile habanero en Yucatán México. *De Riego*. Año. 7, No. 46. Octubre-Noviembre. p. 6-9.
- Martín-Mex, R. y Larqué-Saavedra, A. (2009). Mosca blanca: Control químico. *Desafío (Fundación Produce Yucatán)*. Año. 1, No. 6. Mayo-Junio. pp. 34-35.
- Martín-Mex, R., Nexticapan-Garcéz, A y Larqué-Saavedra, A. (2008). El picudo del chile, lo que se necesita saber acerca de su biología y control. *Uuy u T'aan. (Fundación Produce Yucatán)*. Año. 4 No. 1. pp. 3-5.
- Mejía, G.H., Anaya, R.S. y Nápoles, J.R. (1995). Diagnósis comparativa de las mosquitas blancas *Bemisia tabaci* Genn. y *B. argentifolii* B. & P. (Homoptera: Aleyrodidae). En: *Plagas y enfermedades de las hortalizas en México*. Anaya, R. S y Romero N. J. (Edits). Colegio de posgraduado Instituto de Fitosanidad. 467 p.
- Ortega, A.L.D. (1995). Mosquitas blancas vectoras de virus en hortalizas (Homoptera: Aleyrodidae). En: *Plagas y enfermedades de las hortalizas en México*. Anaya, R. S y Romero N. J. (Edits). Colegio de posgraduado Instituto de Fitosanidad. 467 p.
- Otero, C.G. (1995). Ácaros plaga de hortalizas. En: *Plagas y enfermedades de las hortalizas en México*. Anaya, R. S y Romero N. J. (Edits). Colegio de posgraduado Instituto de Fitosanidad. 467 p.
- Patrock, R.J. y Schuster, D.J. (1992). Feeding, oviposition and development of the pepper weevil, (*Anthonomus eugenii* Cano), on selected species of Solanaceae. *Tropical Pest Management*, 38(1), 65-69.
- Peña, M.R. y Bujanos M.R. (1995). Especies de áfidos (Homoptera: Aphididae) que dañan hortalizas. En: *Plagas y enfermedades de las hortalizas en México*. Anaya, R. S y Romero N. J. (Edits). Colegio de Posgraduado. Instituto de Fitosanidad. 467 p.

- Rosenheim, J.A., Welter, S.C., Johnson, M. W., Mau, R.F.L. y Gusukuma-Minuto, L.R. (1990). Direct feeding damage on cucumber by mixed-species infestations of *Thrips palmi* and *Frankliniella occidentalis* (Thysanoptera: Thripidae). *Journal of Economic Entomology*, 83(4), 1519-1525.
- Schuster, D.J., Gilreath, J.P., Wharton, R.A. y Seymour, P.R. (1991). Agromyzidae (Diptera) leafminers and their parasitoids in weeds associated with tomato in Florida. *Environmental Entomology*, 20,720-723.
- Soria, F.M.de J., Tún S.J.M., Trejo R., A. y Terán S.R. (2000). Tecnología para la Producción de hortalizas a cielo abierto en la Península de Yucatán. SEP-DGETA-SEIT; CIGA- ITA No 2, Conkal, Yuc.
- Tamaki, G., Annis, B. y Weiss, M. (1981). Response of natural enemies to the green peach aphid in different plant cultures. *Environmental Entomology*, 10, 375-378.
- Tellom, M.V., Vargas, M.R. y Araya, C.J. (2009). Parámetros de vida de *Tetranychus cinnabarinus* (Acari: Tetranychidae) sobre hojas de clavel (*Dianthus caryophyllus*). *Revista Colombiana de Entomología*, 35(1), 47-51.
- Tsai, J.H., Yue, B., Webb, S.E., Funderburk, J.E. y Hsu, H.T. (1995). Effects of host plant and temperature on growth and reproduction of *Thrips palmi* (Thysanoptera: Thripidae). *Environmental Entomology*, 24, 1598-1603.
- Van Elferen, J.H.W.M. y Yathom, S. (1989). The bionomics of *Liriomyza trifolii* on Gypsophila and bean leaves. *Phytoparasitica*, 17(4), 241-250.

CAPÍTULO 4

Salinidad en plantas: caso *Capsicum*

Salinity in plants: *Capsicum* case

Escalante-Magaña, Camilo A.¹, Echevarría-Machado, Ileana¹, Medina-Lara, María de F.¹, Martínez-Estévez, Manuel^{1*}

¹Unidad de Bioquímica y Biología Molecular de Plantas. Centro de Investigación Científica de Yucatán, Calle 43 # 130, Chuburna de Hidalgo, CP 97205, Mérida, Yucatán, México. *autor de correspondencia: luismanh@cicy.mx

Resumen

El objetivo de este capítulo es discutir los efectos de la salinidad en plantas tomando como modelo este género. La salinidad es uno de los tipos de estrés abióticos más importantes y destructivos en plantas, es capaz de reducir hasta al 100% los rendimientos de plantas glicófitas cultivadas y de interés comercial, hoy la cantidad de tierras cultivables que están en peligro de superar los tenores salinos por encima de 4 mM es importante y se están haciendo esfuerzos por estudiar estos efectos con la finalidad de contrarrestar este fenómeno. De las plantas cultivadas más importantes a nivel mundial están las que pertenecen al género *Capsicum* cuya sensibilidad ante la salinidad es moderada y dentro de ellas esta *Capsicum chinense* Jaqc.

Palabras clave: *Capsicum*, salinidad, prolina

Abstract

The objective of this chapter is to discuss the effects of salinity in plants using this genus as a model. Salinity is one of the most important and destructive types of abiotic stress in plants, it is able to reduce up to 100% the yields of cultivated glycophyte plants and commercial interest, today the amount of arable land that is in danger of exceeding the tenor's saline above 4 mM is important and efforts are being made to study these effects in order to counteract this phenomenon. Of the most important cultivated plants worldwide are those belonging to the genus *Capsicum* whose sensitivity to salinity is moderate and within them is *Capsicum chinense* Jaqc.

Keywords: *Capsicum*, salinity, proline

I. Introducción

Capsicum (*Capsicum sp*) también llamado chile es de los cultivos más importantes en América (Jarret et al., 2019). Alrededor de este género hay un creciente interés y fascinación debido a la considerable variación genética que posee.

Este género es parte de una gran familia de plantas, las Solanaceas, que está formada por más de 90 géneros y más de 2500 especies incluidos vegetales comercialmente importantes como el tomate, la papa, la berenjena, etc. y es nativo de América tropical y subtropical (Hunziker 2001) en una amplia región que comprende desde México y el norte de América Central, el Caribe, las tierras bajas de Bolivia, las tierras bajas del norte de la Amazonía y el sur de la zona media de los Andes, donde evidencias arqueológicas sugieren el uso de este cultivo desde los años 6000 AC (Davenport 1970; Basu y De 2003; Perry et al. 2007).

La salinidad del suelo es un importante estrés abiótico que afecta la productividad de los cultivos agrícolas en todo el mundo. El estrés salino tiene un efecto significativo en el crecimiento y desarrollo de las plantas. La germinación de la semilla, la longitud de las raíces, por consiguiente, la altura de la planta y la producción de frutos son inhibidas significativamente (Zanetti et al., 2019). El estrés osmótico es el primer estrés que se experimenta cuando una planta se expone al suelo salino y este afecta instantáneamente el crecimiento vegetal (Horie et al., 2011). La toxicidad iónica ocurre más tarde cuando los niveles de sal alcanzan un umbral de 200 Mm de NaCl, más allá del cual la planta no puede mantener la homeostasis iónica y el crecimiento (Muns y Tester, 2008). La toxicidad iónica y el estrés osmótico son primarios, el estrés oxidativo es un efecto secundario de este tipo de estrés.

Los miembros del género *Capsicum* son sensibles a patógenos y factores abióticos como sequía y salinidad. De hecho, son considerados como moderadamente sensibles, sensibles o muy susceptibles a este último factor abiótico (Aktas *et al.*, 2006). Sin embargo, a pesar de su importancia económica se tiene poca información sobre cómo responden y los mecanismos de tolerancia a salinidad en este género.

En este capítulo nos proponemos mostrar de manera sencilla algunos de los principales conocimientos sobre la salinidad en plantas tomado como caso específico el género *Capsicum*.

II. Revisión bibliográfica

2.1 La salinidad

En el mundo existe un amplio rango que ambientes estresantes (tales como: altas y bajas temperaturas, sequía, alcalinidad, salinidad, estrés por luz ultravioleta e infección por patógenos) que son potencialmente dañinos para las plantas (Van Breusegem *et al.*, 2001). Así mismo, la salinidad es uno de los principales factores de estrés abiótico, especialmente en regiones áridas y semi-áridas, y que pueden afectar severamente el crecimiento, rendimiento y calidad de los cultivos agrícolas, limitando con ello la producción de alimentos de origen vegetal (Aktas *et al.*, 2005; Koca *et al.*, 2007).

La mayor parte de las tierras han sido afectadas por causas naturales, como la acumulación de sales en zonas áridas y semi-áridas durante largos periodos de tiempo (Rengasamy, 2002) o la erosión de las rocas que liberan sales solubles y que pueden ser de varios tipos, entre las principales sales que contribuyen a esta salinidad, se encuentran el carbonato de sodio (Na_2CO_3), los sulfatos de sodio (Na_2SO_4), magnesio (MgSO_4) y calcio (CaSO_4); los cloruros de magnesio (MgCl_2), potasio (KCl) y sodio (NaCl), siendo esta última sal y el ion sodio (Na^+) los más abundantes en los suelos (Alemán-Guillén, 2009). El cloruro de sodio (NaCl) es la sal más soluble y abundante en los suelos salinos, la otra causa de la acumulación es la deposición de sales oceánicas acarreadas por el viento y lluvia. El agua de lluvia contiene de 6-50 mg/kg de NaCl, estas concentraciones disminuyen a mayor distancia de la costa, sin embargo, podría depositar cerca de $10 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ de sal por cada 100 mm de precipitación por año (Munns y Tester, 2008)

Los suelos son clasificados como salinos cuando su conductividad eléctrica (CE) es mayor de 4 dS/m (USDA-ARS., 2008), que es aproximadamente equivalente a 40 mM NaCl y genera una presión osmótica de aproximadamente -0.2 MPa. Esta definición de salinidad deriva de la CE que reduce significativamente la mayoría de los cultivos agrícolas.

2.1.2 El estrés salino en plantas

Es interesante reflexionar sobre la evolución de los primeros años de la vida en el entorno denominado salino, y que, por lo tanto, no es una sorpresa que los organismos marinos, desde los protistas a los animales, son altamente tolerantes a la sal, de hecho, requieren Na^+ para mantener su turgencia celular y metabolismo. Incluso en los animales terrestres, el Na^+ juega un papel de nutriente esencial.

Las plantas se clasifican como halófitas o glicófitas de acuerdo a la capacidad de crecer y desarrollarse en ambientes (Sairam y Tyagi, 2004). Las halófitas son consideradas plantas que pueden ser parte de la flora nativa en los suelos salinos, sobrevivir y completar su ciclo de vida a altas concentraciones de sal; se les han llamado plantas amantes de la sal o del agua salada (Ruan *et al.*, 2010). Para su óptimo crecimiento, las plantas halófitas requieren de altas concentraciones de sal y pueden crecer en suelos con NaCl que presentan concentraciones mayores de 400 mM (Hawighorst, 2007). Así mismo, las plantas glicófitas tienen una limitada capacidad para alojarse en presencia de sales y su desarrollo puede ser extremadamente reducido a bajos niveles relativos de sales (Alemán-Guillén, 2009).

Las glicófitas son definidas como plantas que son sensibles a la salinidad (Göl, 2006) o tolerantes a bajas concentraciones de sal, sin embargo, el crecimiento de las glicófitas no es estimulado por la sal en ningún rango de concentraciones (Zafar, 2008).

Los efectos tóxicos de la salinidad en el crecimiento de las plantas pueden estar asociados con: 1) bajo potencial hídrico del medio en contacto con la raíz que causa o provoca un déficit de agua dentro de la planta; 2) los efectos tóxicos de iones, principalmente por Na^+ , Cl^- y SO_4^{2-} ; y 3) el desbalance nutricional causado por la reducción en la toma de nutrientes (por ejemplo, K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+}) y su transporte a los brotes (Serrano *et al.*, 1999; Hasegawa *et al.*, 2000).

En general las plantas expuestas a salinidad pueden presentar los siguientes efectos: estrés hídrico, toxicidad por iones, desordenes nutricionales, estrés oxidativo, alteración de procesos metabólicos, desorganización de la membrana, genotoxicidad, reducción de la expansión y división celular (Hasegawa *et al.*, 2000; Munns, 2005; Zhu, 2007). A la vez, estos efectos reducen el crecimiento, desarrollo y supervivencia de las plantas.

Durante el inicio y desarrollo del estrés salino, dentro de la planta se ven afectados procesos de gran importancia tales como la fotosíntesis, la síntesis de proteínas y el metabolismo de lípidos (Parida y Das, 2005). Durante una exposición inicial a la salinidad, como se mencionó anteriormente las plantas reducen su expansión foliar. El efecto osmótico del estrés salino puede ser observado inmediatamente después de la aplicación de NaCl y se cree que puede continuar durante la exposición, resultando en una inhibición en la división y expansión celular, así como en un cierre estomático (Flowers, 2004; Munns, 2005). Durante una exposición a la salinidad a largo plazo, las plantas experimentan estrés iónico, que puede conducir a la senescencia prematura de hojas adultas y así, a la reducción de la disponibilidad del área fotosintética la cual puede servir de base para un crecimiento continuo (Cramer y Nowak, 1992). De hecho, un exceso de Na^+ y Cl^- han mostrado una potencial afectación para las enzimas en las células vegetales y también pueden causar incremento en el tamaño celular, resultando en una reducción en la producción de energía y otros cambios fisiológicos (Larcher, 1980). El estrés iónico como se mencionó tiene como resultado la senescencia prematura en las hojas más viejas y se muestra los síntomas de toxicidad (clorosis y necrosis) en hojas maduras debido a altas concentraciones de Na^+ este ion desorganiza la síntesis de proteínas debido a que desplaza o disminuye la concentración de K^+ en el citosol el cual juega un papel importante en el acoplamiento de los ribosomas, así mismo, el Na^+ causa una disminución de la actividad enzimática (Hasegawa *et al.*, 2000; Munns, 2005).

2.1.3 La absorción y transporte de Na^+ en plantas

Las células epidérmicas constituyen la primera barrera para el movimiento de los iones en la raíz (Plett y Moller, 2010). Esta barrera proporciona una regulación de la entrada hacia el xilema (cerca del 2%) así como la exclusión de sales (alrededor del 98%) a la solución del suelo (Munns *et al.*, 2005). Por otro lado, los iones y solutos pueden viajar a partir de la epidermis hacia el xilema por vía simplástica, esto puede darse mediante la introducción en las células de la raíz y de esta manera moverse de célula en célula a través de los

plasmodesmos o por vía apoplástica, es decir, transportándose a través de la membrana plasmática (White *et al.*, 2002).

Muchos trabajos han postulado los mecanismos de transporte de Na⁺ tanto en su absorción como en su exclusión en la célula vegetal (Munns y Tester, 2008; Zhang *et al.*, 2010; Kronzucker y Britto, 2011; Cheeseman, 2013). Existe una discrepancia y no ha surgido un consenso respecto a la relación real en cuanto al papel de los diversos componentes de la planta; por otro lado, no existe ningún candidato molecular identificado y demostrado de manera convincente que sea el que transporte el Na⁺ en el flujo de entrada a la célula bajo condiciones tóxicas. Dentro de todos los estudios, el candidato más fuerte que se ha reportado en la actualidad, son ciertas subclases de canales catiónicos no selectivos (NSCCs, por sus siglas en inglés) insensibles a voltaje IV-NSCCs, que participan de manera crítica y la mayoría de la evidencia se ha derivado de estudios electrofisiológicos, en los cuales se demuestra de manera concreta que los NSCCs pueden conducir corrientes de Na⁺. Ciertamente, la mayoría de estos estudios electrofisiológicos se realizaron utilizando la técnica de path-clamp, en membranas de protoplastos los cuales carecen de pared celular, en ellos se midieron los flujos de Na⁺ así como su acumulación (Kronzucker y Britto, 2011).

Otras proteínas transportadoras han recibido atención como candidatas potenciales para el flujo de entrada de Na⁺ en las células de la raíz, estos son los transportadores de cationes de baja afinidad (LCT1, por sus siglas en inglés) que permiten la toma de Na⁺ (Schachtman *et al.*, 1997; Amtmann *et al.*, 2001) y tanto los transportadores de alta y baja afinidad de K⁺ como los transportadores pertenecientes a la familia multigénica de los KUP/HAK/KT. Por otro lado, en algunas especies como *Arabidopsis* (*Arabidopsis thaliana*) y arroz (*Oryza sativa*) se ha visto que los canales de rectificación entrante de K⁺ que pertenecen a la familia Shaker, cuyo nombre son AKT que participan permitiendo la entrada de Na⁺ al citosol (Blumwald *et al.*, 2000; Gollack *et al.*, 2003; Nieves-Cordones *et al.*, 2010; Zhang *et al.*, 2010). Otro estudio donde se reporta que AKT podría estar involucrado en el flujo de entrada de este ion es en la planta halófila *S. maritima*, este estudio fue realizado por Wang *et al.* (2007), en él se muestra evidencia sobre la participación de AKT cuando se somete a las plantas a 150 mM de NaCl, pero no existió adquisición o entrada de Na⁺ a concentraciones de 25 mM por tal motivo los autores sugieren que AKT podría estar implicado en la toma del ion. Hasta cierto punto la evidencia relacionada con la función de AKT como mediador en el flujo de entrada de Na⁺ es relativamente limitada y es claro que este tipo de canales debe recibir mayor atención para futuras investigaciones.

Por último, se encuentran los miembros de los transportadores de la familia HKT. Los miembros de la subfamilia HKT1 se propone que operan mayormente en la regulación y traslocación de Na⁺ de las raíces a los brotes (Sunarpi *et al.*, 2005; Moller *et al.*, 2009), mientras que los de la subfamilia HKT2 han sido implicados en el flujo de entrada primario de Na⁺, al menos a bajas concentraciones de Na⁺ y principalmente en cereales (Hauser y Horie, 2010; Horie *et al.*, 2011; Schulze *et al.*, 2012).

Otra potencial vía que puede permitir la entrada de Na⁺ a la célula, y que ha recibido menos atención, pero no deben ser descartados, son los transportadores que llevan a cabo transporte del tipo simporte, en particular estos que simultáneamente y electroneutralmente

pueden transportar Na^+ o K^+ junto con el Cl^- , son los conocidos Cotransportadores Cloro-Cación (CCCs, por sus siglas en inglés) (Zhang *et al.*, 2010). Dada la típica co-presencia de Na^+ y Cl^- en altas concentraciones en suelos salinos, esta posibilidad es particularmente atractiva para la toma de Na^+ .

Por otra parte, la identificación de los sistemas antiportes de Na^+/H^+ se ha establecido de manera clara uno de estos es el sistema SOS1 (de Salt Overly Sensitive), este sistema es responsable de exclusión del citosol hacia fuera de la célula, por lo que se encarga de la salida de Na^+ a través de la membrana plasmática, esto se vio en plántulas de *Arabidopsis thaliana* (Shi *et al.*, 2000), el otro es el sistema NHX1, el cual se ha sugerido que participa en la compartimentalización de Na^+ en la vacuola y es mayormente localizado en el tonoplasto, sin embargo estos dos tipos de transportadores se sugiere que son los encargados de regular la tolerancia al NaCl y regular las concentraciones de Na^+ dentro de la célula (Apse *et al.*, 1999).

2.1.4 Los principales efectos de la salinidad

De manera general, en cuanto al crecimiento, ciertamente los cultivos responden a la salinidad en dos fases: la primera es una fase continua o también llamado estrés osmótico y está dado como consecuencia del bajo potencial hídrico y presión osmótica que ejercen las soluciones con altas concentraciones de sales, la cual baja su energía potencial (el agua siempre se mueve de un alto a un bajo nivel de potencial de energía), que dificulta la entrada de agua a la planta; la segunda fase o tipo de estrés que se desarrolla en presencia de la salinidad es el estrés iónico, tiene un tiempo lento y se da cuando hay una acumulación de iones específicos en la planta durante un periodo de tiempo que conduce a la toxicidad o el desequilibrio de iones (Munns y Tester 2008).

Existen estudios realizados por Munns *et al.*, (2006) que sugieren que la respuesta de las plantas ante la salinidad está dada tanto por un estrés osmótico como por un estrés iónico; se menciona que estos efectos ocurren secuencialmente.

Finalmente, la salinidad produce tanto estrés osmótico como iónico, a estos se les conoce como factores de estrés primarios, sin embargo, el estrés salino y otros factores ambientales pueden causar un estrés secundario, el estrés oxidativo, este tipo de estrés se presenta por el incremento de especies reactivas de oxígeno (ROS, por sus siglas en inglés), tales como el radical superóxido ($\text{O}_2^{\cdot-}$), peróxido de hidrogeno (H_2O_2) y el radical hidroxilo ($\cdot\text{OH}$). Estas son altamente reactivas y se ha visto que alteran el metabolismo celular normal a través del daño oxidativo en lípidos, ácidos nucleicos y proteínas (Adly, 2010), estas últimas pueden sufrir modificaciones en aminoácidos, fragmentación de la cadena peptídica e incremento en la susceptibilidad a sufrir proteólisis y de manera general la célula puede tener un desbalance metabólico lo que conlleva a un deterioro celular (Ahmad *et al.*, 2010).

2.1.5 Los mecanismos de tolerancia

La capacidad para tolerar una concentración elevada de sales es un ejemplo cierto de la adaptación genética en plantas. Aunque la vida surgió en el mar, las células vegetales

evolucionaron en una condición pobre en Na⁺. Por esta razón, la mayoría de las plantas terrestres han perdido la capacidad para tolerar una cantidad de sal elevada. El problema puede ser planteado a nivel celular, haciendo hincapié en el motivo por el cual las células de las raíces de las plantas terrestres no son capaces de excluir Na⁺ y concentrar K⁺ de forma tan eficaz a como lo hacen las células de animales o de hongos (Yeo, 1998, Benito y Rodríguez-Navarro, 2003). El incremento de Na⁺ en el citoplasma provoca a nivel celular reducción de la síntesis proteica, daños osmóticos relacionados con la pérdida de agua en las células, la inhibición del transporte de nutrientes y como consecuencia la muerte celular; en la planta completa se observa la pérdida de hojas o la inhibición del crecimiento de las raíces (Hasegawa et al., 2000; Tester y Davenport, 2003).

No obstante, las plantas han desarrollado ciertos mecanismos que les confieren tolerancia a elevadas concentraciones externas de Na⁺. Estos mecanismos se manifiestan en un amplio rango de adaptaciones, que comprenden desde el nivel celular hasta el de la planta completa (Yeo, 1998; Hasegawa *et al.*, 2000; Tester y Davenport, 2003). Las plantas han mostrado mecanismos para disminuir los efectos negativos del estrés salino, como por ejemplo:

2.1.6 Osmotolerancia

Una de las mayores consecuencias del estrés por NaCl es la pérdida de agua intracelular. Ante esto, las plantas han mostrado mecanismos involucrados en la disminución de la toxicidad por NaCl. Las plantas acumulan muchos metabolitos que son también conocidos como “solutos compatibles (orgánicos)” en el citoplasma, esto para incrementar la tolerancia hiperosmótica contra la pérdida de agua celular inducida por el estrés salino. Este proceso es también requerido para el balance del potencial osmótico de Na⁺ y Cl⁻ que son secuestrados en la vacuola (Wyn Jones *et al.*, 1979).

En cuanto al componente osmótico, para superar los problemas de absorción de agua, las plantas requieren acumular solutos compatibles a nivel de citosol y organelos sin afectar la actividad de las enzimas involucradas en el metabolismo. Algunos de estos son iones esenciales como el K⁺, pero la mayoría son solutos orgánicos de bajo peso molecular como azúcares simples (principalmente glucosa y fructosa), alcoholes derivados de azúcares (glicerol e inositolos metilados) y azúcares complejos (trehalosa, resinosos y fructanos). También se incluyen derivados de aminoácidos cuaternarios (prolina, glicina betaína, β-alanina betaína, prolina betaína), aminas terciarias (1,4,5,5-tetrahidro-2-metil 1-4 carboxil pirimidina) y compuestos sulfónicos (o-sulfato de colina, propionato dimetil sulfónico).

2.1.7 Prolina

La acumulación de prolina se da para mejorar la adaptación tanto al estrés salino como a la sequía (Smirnoff y Cumbes, 1989; Chen y Dickman, 2005). Esta acumulación se da bajo condiciones de deshidratación y esto es debido al incremento en la biosíntesis y una disminución en la degradación. La prolina es sintetizada en los plastidios y citoplasma, mientras que su degradación a L-glutamato es un proceso que se lleva a cabo en la mitocondria. Existen dos diferentes precursores de la prolina en plantas; el glutamato y la Ornitina (Orn). La L-prolina es sintetizada y su vía proviene a partir de L-glutamato por dos

reacciones sucesivas de reducción, que son catalizadas por Δ^1 -pirrolina-5-carboxilato (P5C) sintasa (P5CS) y P5C reductasa (P5CR) respectivamente (Delauney y Verma, 1993).

El otro precursor involucrado en la biosíntesis de la prolina es Orn, que es transaminado para dar lugar a P5C, esta reacción es llevada a cabo por la enzima Orn- δ -aminotransferasa (OAT) mitocondrial (Verbruggen y Hermans, 2008). Las distintas vías de glutamato y Orn contribuyen de forma diferente para la acumulación de prolina inducida por estrés en diferentes plantas. Bajo condiciones de estrés salino, la vía de glutamato es dominante en *Vigna aconitifolia* (Delauney *et al.*, 1993). En plántulas jóvenes de *Arabidopsis thaliana*, la vía de la Orn trabaja en conjunto con la vía de glutamato para promover la acumulación de prolina durante el estrés salino, pero cuando se evaluaron plantas adultas se obtuvo que solo en la vía de glutamato tienen mayor actividad las enzimas relacionadas con esta vía (Roosens *et al.*, 1998).

2.1.8 Sistema antioxidante

La salinidad y el estrés hídrico se sabe que inducen estrés secundario, esto como consecuencia del estrés iónico y osmótico se produce un estrés secundario conocido como “estrés oxidativo”. Durante el estrés oxidativo inducido por salinidad, la disponibilidad de CO₂ atmosférico se ve reducido debido a un incremento en el cierre estomático y a que el consumo de NADPH por el ciclo de Calvin se reduce. Cuando la ferredoxina es reducida durante la transferencia de electrones fotosintéticos, los electrones pueden ser transferidos del fotosistema I (PS-I) al oxígeno para dar lugar a radicales superóxido (O₂⁻) esto en el proceso llamado reacción Mehler, la cual inicia una reacción en cadena donde se producen radicales de oxígeno más dañinos para la célula (Hsu y Kao, 2003).

Las plantas al ser organismos sésiles, son más vulnerables a estos daños oxidativos causados por factores ambientales (Foyer *et al.*, 1994; Hippeli y Elstner, 1996). Consecuentemente, existe la necesidad constante de mecanismos eficientes para mitigar el daño oxidativo en los componentes celulares. Por otro lado, las plantas han desarrollado sistemas eficientes para remover ROS, que incluyen enzimas antioxidantes específicas que son depuradoras de ROS y también se producen pequeñas moléculas no enzimáticas que actúan en la depuración de ROS, tales como: ascorbato, glutatión, α -tocoferol, flavonoides, antocianinas, componentes polifenólicos y carotenoides.

2.1.9 Los mecanismos de flujo de salida, compartimentalización vacuolar y removilización de Na⁺

A nivel celular, se minimiza la entrada de Na⁺, esto con el objeto de mantener una elevada relación de K⁺/Na⁺ en el citoplasma (Maathuis y Sanders, 1999; Serrano y Rodríguez-Navarro, 2001); así mismo, se potencia la extrusión de Na⁺ desde el citoplasma, hacia el exterior celular o hacia el lumen de la vacuola, a través de transportadores antiportadores Na⁺/H⁺ de tipo SOS1 o NHX1, respectivamente (Zhu, 2001; Zhu, 2003; Ward *et al.*, 2003).

A nivel de planta completa, las plantas tolerantes a ambientes salinos suelen minimizar el transporte de Na⁺ al xilema (especialmente las glicófitas; Hasegawa *et al.*, 2000) o

maximizar, una vez alcanzado el tallo, la recirculación a través del floema, hacia zonas especializadas de la planta donde se produce la acumulación de Na⁺, como ocurre en hojas maduras o células secretoras (Tester y Davenport, 2003).

2.2 El chile habanero como modelo de estudio

2.2.1 Importancia y origen

La familia de las Solanáceas agrupa las especies hortícolas de mayor importancia que se cultivan en Yucatán. Dentro de las Solanáceas, el cultivo del chile es de particular importancia para el estado por su gran demanda para la condimentación de platillos regionales y por su demanda actual en los mercados nacional e internacional. Todos los chiles cultivados pertenecen al género *Capsicum*, dentro del cual se han reconocido cinco especies domesticadas (*C. baccatum* L., *C. pubescens* R., *C. annuum* L., *C. chinense* Jacq. y *C. frutescens* L.). El chile habanero es un cultivo de gran importancia económica para los productores de hortalizas del estado de Yucatán, ocupando el segundo lugar después del cultivo del tomate (Tun, 2001).

Generalmente, su fruto se comercializa en fresco para consumo directo o como una materia prima para procesamiento industrial. Sin embargo, la demanda por frutos de alta calidad, el polvo, las pastas, las salsas y otros derivados, excede la oferta actual de los productores, procesadores e industriales del chile habanero de Yucatán (Leyva Morales *et al.*, 2005). El interés por este cultivo no se centra únicamente en su importancia económica; se ha demostrado que el chile es una fuente excelente de colorantes naturales, vitaminas como la C, E y A y minerales. (Guzmán *et al.*, 2004).

2.2.2 La salinidad y el género *Capsicum*

De acuerdo con el departamento de agricultura de los Estados Unidos (USDA, por sus siglas en inglés) en 2011, el chile (*C. annuum*) y tomate (*S. Lycopersicum*) son dos de los mayores cultivos de consumo diario y que se han clasificado como cultivos moderadamente sensibles a la salinidad (de la Peña y Hughes, 2007). Así mismo, otros autores consideran que el chile es susceptible o muy susceptible a la salinidad (Navarro *et al.*, 2002, 2006; Aktas *et al.*, 2006), pero existe poca información acerca de los efectos de la salinidad en el género *Capsicum* en general.

En *C. annuum*, la salinidad afecta el crecimiento de las plantas, su germinación, altura, longitud del sistema radicular y en general la biomasa se ve reducida significativamente. En cuanto a la productividad esta también se ve reducida, al igual que el rendimiento, presentando frutos pequeños con poco peso al igual que el número de frutos por planta se va afectado (Chartzoulakis y Klapaki, 2000; Rubio *et al.*, 2009; Kumar y Gothandam, 2014). Además, se ha visto que en algunos genotipos de *C. annuum* son tolerantes a concentraciones 150 mM de NaCl en la solución nutritiva por un periodo de diez días; para seleccionar los genotipos tolerantes a la salinidad, las plantas fueron expuestas a 100 mM de NaCl y la severidad del estrés fue evaluada en las hojas (Aktas *et al.*, 2006).

En trabajos realizados por Kumar y Gothandam, (2014), evaluaron los efectos del estrés salino (25, 50, 100, 150 y 200 mM de NaCl) sobre caracteres morfológicos y hormonas endógenas de tres variedades de *Capsicum*, variedad CO1 (sensible), variedad K2 (moderadamente tolerante) y variedad G4 (tolerante), los resultados claramente mostraron una disminución en el tamaño de las hojas, peso del fruto, altura de la planta y contenido de clorofila en todas las variedades a concentraciones de 150 y 200 mM NaCl, por otro lado al evaluar el contenido de hormonas endógenas se observó que existió una disminución en los contenidos de zeatina, auxinas y giberelinas, esto fue altamente correlacionado con el daño en el tejido y por último se pudo apreciar que a concentraciones de 200 mM de NaCl se encontró que la variedad CO1 tuvo mayor porcentaje de muerte al día 35 comparada con las otras variedades evaluadas.

En estudios realizados por Zhani *et al.*, (2012; 2013), evaluaron el efecto del estrés por NaCl (34, 68, 102, 136, 170 y 205 mM) en diferentes cultivares de chile (*Capsicum frutescens* L), entre los resultados obtenidos se menciona que los daños ocasionados por la salinidad fueron en el sistema radicular (longitud, peso fresco y seco) y hojas (número y área), además, el mayor contenido de prolina se pudo detectar en las hojas en la mayoría de las variedades evaluadas, los resultados mostraron que con el incremento de la salinidad, el contenido de K^+ y Ca^{2+} se vio disminuido. Por otro lado, al cuantificar el contenido de Na^+ en raíces este se vio aumentado al igual que la biosíntesis de proteínas y azúcares solubles en las hojas.

En estudios sobre el efecto de la aplicación diferencial de nitrógeno se determinó que esto modifica los perfiles de aminoácidos y poliaminas en plantas de chile y se concluyó que el perfil de aminoácidos fue alterado por el suministro de NH_4^+ , lo que redujo las concentraciones de histidina y fenilalanina. Además, las concentraciones de putrescina y cadaverina aumentaron en NH_4^+ a alta salinidad, sin embargo, la de cadaverina se redujo en NH_4^+ a baja salinidad. Los cambios observados en la calidad de los frutos provocados por la salinidad, en las condiciones de este estudio deben tenerse en cuenta como efecto paliativo este cultivo con respecto al efecto del suministro de $N-NH_4^+$ (Piñeiro *et al.*, 2019).

2.2.3 Salinidad y chile habanero

Existen pocos o escasos reportes acerca de la salinidad y el chile habanero, en gran parte ya que en la península de Yucatán, por el momento no existen reportes de cultivos de esta especie en suelos con problemas de salinidad. Sin embargo, una alternativa para conocimiento básico sería evaluar los diferentes cultivares utilizando agua de riego y con ello poder observar si presentan cambios en morfología, metabolismo en respuesta al agua de riego.

Entre los reportes que existen utilizando a chile habanero como modelo están los estudios realizados en nuestro grupo de trabajo (Bojórquez-Quintal *et al.*, 2014) donde se evaluaron, se seleccionaron y caracterizaron dos variedades de chile habanero que difieren en sensibilidad a NaCl, también se comparó su respuesta a estrés salino. La variedad Rex fue la que mostro más tolerancia, mientras que la variedad Chichén-Itzá fue la más sensible. Bajo estrés salino (7 días a 150 mM NaCl), la variedad Rex acumuló más prolina en las

raíces que la variedad Chichén-Itzá, por lo tanto, se sugiere que la prolina podría estar jugando un papel importante en la tolerancia y ajuste osmótico en esta variedad.

Uno de los temas estudiados en chile habanero referente al efecto de la salinidad fue la variación natural del crecimiento de la raíz primaria y la retención de K^+ en las raíces de esta especie en presencia de salinidad observándose que el NaCl induce salida de K^+ y H^+ , la pérdida de K^+ correlaciona positivamente con la inhibición del crecimiento de las raíces y la salida de K^+ y la actividad de la bomba de H^+ depende de la concentración de sal (Bojorquez-Quintal *et al.*, 2016). La tolerancia a la salinidad es un rasgo multigénico complejo que involucra a muchos procesos bioquímicos y fisiológicos. Se ha demostrado diferencias en la sensibilidad a la salinidad entre dos variedades de *C. chinense* Jacq, una de las cinco especies de chile domesticado. Se han analizado varios parámetros de las reacciones al estrés salino en ambos genotipos y sus diferencias, eso puede ser la base de su tolerancia diferencial a la salinidad. Uno de los mecanismos de tolerancia a la salinidad es el ajuste osmótico a través de la acumulación de solutos compatibles (en este caso, prolina) en raíces y hojas para mantener la absorción y prevenir la pérdida de agua. Un segundo mecanismo de tolerancia es el control eficiente del transporte de Na^+ confinando este ión a las raíces, posiblemente a través de la recuperación de Na^+ del xilema por los transportadores HKT1 (a baja, moderada y alta concentración de NaCl) a evitar el transporte a tejidos fotosintéticos. Además, si el contenido de Na^+ en las raíces es alto, este ion debe ser excluido del citosol para evitar la toxicidad. Un tercer mecanismo de tolerancia se observó en la variedad tolerante (Rex), Na^+ fue eficaz compartimentado en estructuras tipo vacuolas y pequeños compartimentos que puede actuar como osmolitos. Este mecanismo es posiblemente mediado por antiportadores de NHX vacuolar y endosoma. (Bojorquez-Quintal *et al.*, 2014)

Un mecanismo adicional parece estar involucrado en la sensibilidad a la salinidad de la variedad (Chichen-Itza), que extruye grandes cantidades de Na^+ en el apoplasto. Sin embargo, este mecanismo parece ser menos eficiente debido a su gran costo energético. Como en muchas otras plantas especies, la regulación de la homeostasis K^+ a través de su retención en raíces es crucial en chile habanero, demostrando la universalidad de este mecanismo a la tolerancia al estrés salino de estos cultivos (Bojorquez-Quintal *et al.*, 2014).

III. Conclusiones

En resumen, se conoce que el chile habanero es una especie de gran importancia para la península de Yucatán a nivel de producción y a nivel mundial ha mostrado una mayor demanda con el paso de los años, sin embargo, esta especie ha mostrado una gran variabilidad genética y es uno de los cultivos que presentan mayor sensibilidad a estrés por sal. Por lo tanto, es importante realizar estudios relacionados con los mecanismos de tolerancia a la salinidad, ya que existen pocos estudios con respecto al tema, sobre todo comparando diferentes variedades, esto sería de gran importancia para seleccionar genotipos que muestren mayor tolerancia a este tipo de estrés. El chile habanero ha demostrado que la tolerancia a la salinidad utilizando alguno de los mecanismos descritos en la literatura depende de las variedades lo ratifica su amplia variabilidad genética.

IV. Referencias

- Adly A.A.M. (2010). Oxidative stress and disease: an updated review, Res. J. Immunol. 3, 129-145. <http://docsdrive.com/pdfs/ansinet/rji/2010/129-145.pdf>
- Ahmad, P., Jaleel, C.A., y Sharma, S. (2010). Antioxidant defence system, lipid peroxidation, praline metabolizing enzymes and Biochemical activity in two genotypes of *Morus alba* L. subjected to NaCl stress. Russ. J. Plant Physiol. 57, 509-517. <https://www.agriculturejournals.cz/publicFiles/16737.pdf>
- Aktas, H., Abak, K., y Cakmak, I. (2006). Genotypic variation in the response of pepper to salinity. Sci. Hort. 110, 260-266. <http://research.sabanciuniv.edu/130/1/stvkaf01883.pdf>
- Aktas, H., Karni, L., Chang, D.C., Turhan, E., Bar-Tal A., y Aloni B. (2005) The suppression of salinity-associated oxygen radicals production, in pepper (*Capsicum annuum*) fruit, by manganese, zinc and calcium in relation to its sensitivity to blossom end rot. Physiologia Plantarum 123, 67-74. <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1111/j.1399-3054.2004.00435.x>
- Alemán-Guillén, F. (2009). K⁺ uptake in plants with different salt tolerance. PhD Thesis. Univ. Murcia. Spain. <https://digitum.um.es/digitum/handle/10201/12771>
- Amtmann, A., Fischer, M., Marsh, E.L., Stefanovic, A., Sanders, D., y Schachtman, D.P. (2001). The wheat cDNA LCT1 generates hypersensitivity to sodium in a salt-sensitive yeast strain. Plant Physiol 126, 1061-1071. <http://www.plantphysiol.org/content/126/3/1061.short>
- Apse, M.P., Aharon, G.S., Snedden, W.A., y Blumwald, E. (1999). Salt tolerance conferred by overexpression of a vacuolar Na⁺/H⁺ antiport in *Arabidopsis*. Science 285, 1256-1258. <https://science.sciencemag.org/content/285/5431/1256>
- Benito, B., y Rodríguez-Navarro, A. (2003). Molecular cloning and characterization of a sodium-pump ATPase of the moss *Physcomitrella patens*. The Plant Journal 36, 382-389. <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1046/j.1365-313X.2003.01883.x>
- Blumwald, E., Aharon, G.S., y Apse, M.P. (2000). Sodium transport in plant cells. Biochem Biophys Acta 1465, 140-151. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0005273600001358>
- Bojórquez-Quintal, E., Velarde-Buendía A., Ku-González, A., Carillo-Pech, M., Ortega-Camacho, D., Echevarría-Machado I., Pottosin, I., y Martínez-Estévez M. (2014). Mechanisms of salt tolerance in habanero pepper plants (*Capsicum chinense* Jacq.): Proline accumulation, ions dynamics and sodium root-shoot partition and compartmentation. Frontiers in Plant Science. doi: 10.3389/fpls.2014.00605. <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fpls.2014.00605/full>
- Bojórquez-Quintal, E., Ruiz-Lau, N., Velarde-Buendía, A., Echevarría-Machado, I., Pottosin I., y Martínez-Estévez, M. (2016) Natural variation in primary root growth and K⁺ retention in roots of habanero pepper (*Capsicum chinense*) under salt stress. Functional Plant Biology 43 (12), 1114-1125. <http://www.publish.csiro.au/FP/FP15391>
- Chartzoulakis, K., y Klapaki G. (2000). Response of two greenhouse pepper hybrids to NaCl salinity during different growth stages. Sci. Hort. 86, 247-260. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0304423800001515>
- Cheeseman, J.M. (2013). The integration of activity in saline environments: problems and perspectives. Funct Plant Biol. 40(9) 759-774. <http://www.publish.csiro.au/FP/FP12285>
- Chen, C., y Dickman M.B. (2005). Proline suppresses apoptosis in the fungal pathogen *Colletotrichum trifolii*. Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A. 102, 3459-3464. <https://www.pnas.org/content/102/9/3459.short>
- Cramer, G.R., y Nowak R.S. (1992). Supplemental manganese improves the relative growth, net assimilation and photosynthetic rates of salt-stressed barley. Physiologia Plantarum, 84, 600-605. <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1111/j.1399-3054.1992.tb04710.x>

- de la Peña, R. y Hughes, J. (2007). Improving vegetable productivity in a variable and changing climate, J. SAT Agric. Res. 4, 1-22. <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.493.6335&rep=rep1&type=pdf>
- Delauney, A.J., y Verma, D.P.S. (1993). Proline biosynthesis and osmoregulation in plants. Plant J. 4, 215-223. <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1046/j.1365-313X.1993.04020215.x>
- Flowers, T.J. (2004). Improving crop salt tolerance. J. Exp. Bot. 55, 307-319. <https://academic.oup.com/jxb/article/55/396/307/489015>
- Göl, D. (2006). Physiological and genetic characterization of salt tolerance in tomato (*Lycopersicon esculentum*). Master of Sci. Thesis. Izmir Institute of Technol. Türkçe pp. 1-15. <http://openaccess.iyte.edu.tr/handle/11147/3562>
- Golldack, D., Quigley, F., Michalowski C.B., Kamasani, U.R., y Bohnert, H.J. (2003). Salinity stress-tolerance and -sensitive rice (*Oryza sativa* L.) regulate AKT1-type potassium channel transcripts differently. Plant Mol Biol. 51, 71-8. <https://link.springer.com/article/10.1023/A:1020763218045>
- Guzmán, M.S., Torres, I., González, M., Mora, M.A., Herrera, M.G., y Hernández D. (2004). Análisis preliminar de compuestos fenólicos y capsaicinoides en variedades de Chile con diferente capacidad pungente. Departamento de Bioquímica, Instituto Tecnológico de Celaya. Primera Convención Mundial del Chile 2004. 115-122.
- Hasegawa, P.M., Bressan, R.A., Zhu, J.K., y Bohnert, H.J. (2000). Plant cellular and molecular responses to high salinity. Ann Rev Plant Physiol Plant Mol Biol. 51, 463-499. <https://www.annualreviews.org/doi/full/10.1146/annurev.arplant.51.1.463>
- Hauser, F., y Horie, T. (2010). A conserved primary salt tolerance mechanism mediated by HKT transporters: a mechanism for sodium exclusion and maintenance of high K⁺/Na⁺ ratio in leaves during salinity stress. Plant Cell Environ 33, 552-565. <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1111/j.1365-3040.2009.02056.x>
- Hawighorst, P. (2007). Sodium and calcium uptake, transport and allocation in *Populus euphratica* and *Populus x canescens* in response to salinity. PhD Thesis. Univ. Göttingen. Germany. pp. 1-12. <http://ediss.uni-goettingen.de/handle/11858/00-1735-0000-000D-F238-0?locale-attribute=en>
- Hippeli, S., y Elstner, E.F. (1996). Mechanisms of oxygen activation during plant stress: biochemical effects of air pollutants. J. Plant Physiol. 148, 249-257. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0176161796802501>
- Horie, T., Brodsky, D.E., Costa, A., Kaneko, T., Lo Schiavo, F., Katsuhara, M., y Schroeder, J.I. (2011). K⁺ transport by OsHKT2;4 transporter from rice (*Oryza sativa*) with atypical Na⁺ transport properties and competition in permeation of K⁺ over Mg²⁺ and Ca²⁺ ions. Plant Physiol. 156, 1493-1507. <http://www.plantphysiol.org/content/156/3/1493.short>
- Hsu, S.Y., y Kao, C.H. (2003). Differential effect of sorbitol and polyethylene glycol on antioxidant enzymes in rice leaves. Plant Growth Regul. 39, 83-90. <https://link.springer.com/article/10.1023/A:1021830926902>
- Hunziker, A.T. (2001) Genera Solanacearum: the genera of Solanaceae illustrated, arranged according to a new system. Gantner Verlag, Ruggell, Liechtenstein <file:///C:/Users/luismanh/Downloads/036364404772974130.pdf>
- Jarret, R.L., Barboza, G.E., Costa-Batista, F.R. et al., (2019) Capsicum- An abbreviated compendium. J. Amer. Soc. Hort. Sci. 144 (1): 3-22. 2019. <https://journals.ashs.org/jashs/view/journals/jashs/144/1/article-p3.xml>
- Koca, H., Ozdemir, F., y Türkan, I., (2006). Effect of salt stress on lipid peroxidation and superoxide dismutase and peroxidase activities of *Lycopersicon esculentum* and *L. pennellii*. Biol. Plant. 50, 745-748. <https://link.springer.com/article/10.1007/s10535-006-0121-2>
- Kronzucker, H.J., y Britto, D.T. (2011). Sodium transport in plants: a critical review. New Phytol. 189, 54-81. <https://nph.onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1111/j.1469-8137.2010.03540.x>

- Kumar, V.M. y Gothandam, K. M. (2014). Impact of Salt on Morphological Characters and Hormonal Regulation in three *Capsicum* Varieties, Res. J. Biotech. 9, 92-98. https://www.researchgate.net/profile/K_M_Gothandam/publication/264117021_Impact_of_Salt_on_Morphological_Characters_and_Hormonal_Regulation_in_three_Capsicum_Varieties/links/0f31753ce54cfa4028000000.pdf
- Larcher, W. (1980). Physiological plant ecology. In 2nd totally rev. edition ed., (pp. 303). Berlin and New York: Springer-Verlag.
- Maathuis, F.J.M., y Sanders, D. (1999). Plasma membrane transport in context—making sense out of complexity. Current Opinion in Plant Biology 2, 236-243. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1369526699800417>
- Møller, I.S., Gilliam, M., Jha, D., Mayo, G.M., Roy, S.J., Coates, J.C., Haseloff, J., y Tester M. (2009). Shoot Na⁺ exclusion and increase salinity tolerance engineered by cell type-specific alteration of Na⁺ transport in Arabidopsis. Plant Cell 21, 2163-2178. <http://www.plantcell.org/content/21/7/2163.short>
- Munns, R. (2005). Genes and salt tolerance: bringing them together. New Phytol. 167, 645-663. <https://nph.onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1111/j.1469-8137.2005.01487.x>
- Munns, R., James, R.A., y Lauchli, A. (2006). Approaches to increasing the salt tolerance of wheat and other cereals. Journal of Experimental Botany 57, 1025-1043. <https://academic.oup.com/jxb/article/57/5/1025/641280>
- Munns, R., y Tester, M. (2008). Mechanisms of Salinity Tolerance. Annual Review of Plant Biology 59, 651-681. <https://www.annualreviews.org/doi/full/10.1146/annurev.arplant.59.032607.092911>
- Navarro, J.M., Garrido, C., Carvajal, M., y Martínez, V. (2002). Yield and fruit quality of pepper plants under sulphate and chloride salinity. J. Hortic. Sci. Biotech. 77, 52-57. <https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/14620316.2002.11511456>
- Nieves-Cordones, M., Alemán, F., Martínez, V., y Rubio, F. (2010). The Arabidopsis thaliana HAK5 K⁺ transporter is required for plant growth and K⁺ acquisition from low K⁺ solutions under saline conditions. Molecular Plant. 3, 326-333. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1674205214604172>
- Parida, A.K., y Das, A.B. (2005). Salt tolerance and salinity effects on plants: A review. Ecotoxicology and Environmental Safety 60, 324-349. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0147651304000922>
- Piñero, M. C., Porras, M.E, Lopez-Marin, J., et al., (2019) Differential Nitrogen Nutrition Modifies Polyamines and the Amino-Acid Profile of Sweet Pepper Under Salinity Stress. Front Plant Sci. 2019; 10: 301. <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC6454138/>
- Plett, D.C., y Moller, I.S. (2010). Na⁺ transport in glycophytic plants: what we know and would like to know. Plant Cell Environ. 33, 612-626. <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1111/j.1365-3040.2009.02086.x>
- Rengasamy, P. (2002). Transient salinity and subsoil constraints to dryland farming in Australian sodic soils: an overview. Aust. J. Exp. Agric. 42, 351-61. <http://www.publish.csiro.au/an/ea01111>
- Roosens, N.H., Thu, T.T., Iskandar, H.M., y Jacobs, M. (1998). Isolation of the ornithine
- Ruan, Ch.J., Teixeira, da Silva, J.A., Mopper, S., Qin, P., y Lutts, S. (2010). Halophyte improvement for a salinized world. Crit. Rev. Plant Sci. 29, 329-359. <https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/07352689.2010.524517>
- Rubio, J.S., Garcia-Sanchez, F., Rubio, F., y Martínez, V. (2009). Yield, blossom-end rot incidence, and fruit quality in pepper plants under moderate salinity are affected by K⁺ and Ca²⁺ fertilization. Sci. Hort. 119, 79-87. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0304423808002719>

- Sairam, R.K., y Tyagi A. (2004). Physiology and molecular biology of salinity stress tolerance in plants. *Curr. Sci.* 86, 407-421. https://www.jstor.org/stable/24108735?seq=1#page_scan_tab_contents
- Schachtman, D.P., Kumar, R., Schroeder, J.I., y Marsh, E.L. (1997). Molecular and functional characterization of a novel lowaffinity cation transporter (LCT1) in higher plants. *Proc Natl Acad Sci USA* 94, 11079-11084. <https://www.pnas.org/content/94/20/11079.short>
- Schulze, L.M., Britto, D.T., Li, M., y Kronzucker, H.J. (2012). A pharmacological analysis of high-affinity sodium transport in barley (*Hordeum vulgare* L.): a $^{24}\text{Na}^{+}/^{42}\text{K}^{+}$ study. *J Exp Bot* 63, 2479-2489. <https://academic.oup.com/jxb/article/63/7/2479/511202>
- Serrano, R., Mulet, J.M., Rios, G., Marquez, J.A., de Larrinoa, I.F., Leube, M.P., Mendizabal, I., Pascual-Ahuir, A., Proft, M., Ros, R., y Montesinos, C. (1999). A glimpse of the mechanisms of ion homeostasis during salt stress. *Journal of Experimental Botany* 50, 1023-1036. https://www.researchgate.net/profile/Jose_Mulet2/publication/31437652_A_Glimpse_of_the_Mechanisms_of_Ion_Homeostasis_during_Salt_Stress/links/0912f5108d97398ea5000000.pdf
- Smirnoff, N., y Cumbes, Q.J. (1989). Hydroxyl radical scavenging activity of compatible solutes. *Phytochemistry* 28, 1057-1060. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/0031942289801827>
- Sunarpi, H.T., Motoda, J., Kubo, M., Yang, H., Yoda, K., Horie, R., Chan, W.Y., Leung, H.Y., Hattori, K., Konomi, M., Osumi, M., Yamagami, M., Schroeder, J.I., y Uozumi, N. (2005). Enhanced salt tolerance mediated by AtHKT1 transporter-induced Na^{+} unloading from xylem vessels into xylem parenchyma cells. *Plant J.* 44, 928-938. <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1111/j.1365-313X.2005.02595.x>
- Tester, M., y Davenport, R. (2003). Na^{+} tolerance and Na^{+} transport in higher plants, *Ann. Bot.* 91, 503-527. <https://academic.oup.com/aob/article/91/5/503/157102>
- Tun, J.C. (2001). Chile habanero, características y tecnología de producción. INIFAP, Yucatán, México.
- Van Breusegem, F., Vranova, E., Dat, J.F., y Inze, D. (2001). The role of active oxygen species in plant signal transduction. *Plant Sci.* 161, 405-414. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0168945201004526>
- Verbruggen, N., y Hermans, C., (2008). Proline accumulation in plants: a review. *Amino Acids* 35, 753-759. <https://link.springer.com/article/10.1007/s00726-008-0061-6>
- Wang, S.M., Zhang, J.L., y Flowers, T.J. (2007). Low-affinity Na^{+} uptake in the halophyte *Suaeda maritima*. *Plant Physiology* 145, 559-571. <http://www.plantphysiol.org/content/plantphysiol/early/2007/08/31/pp.107.104315.full.pdf>
- Ward, J.M., Hirschi, K.D., y Sze, H. (2003). Plants pass the salt. *TRENDS in Plant Science* 8, 200-201. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1360138503000591>
- White, P.J., Bowen, H.C., Demidchick, V., Nichols, C., y Davies, J.M. (2002). Genes for calcium-permeable channels in the plasma membrane of plant root cells. *Biochim. Biophys. Acta* 1564, 299-309. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0005273602005096>
- Wyn Jones, R.G., Brady, C.J., y Speirs, J. (1979). Ionic and osmotic relations in plant cells. In *Recent Advances in the Biochemistry of Cereals* (D. L. Laidman and R. G. Wyn Jones, eds.), pp. 63–103. Academic Press, London and Orlando.
- Yeo, A. (1998). Molecular biology of salt tolerance in the context of whole-plant physiology. *Journal of Experimental Botany* 49, 915-929. <https://academic.oup.com/jxb/article/49/323/915/432801>
- Zafar, M. (2008). Genetic studies for salt tolerance in wheat (*Triticum aestivum* L.). PhD Thesis. University of Agriculture. Faisalabad. Pakistan.
- Zanetti, F., Zegada-Lizarazu, W., Lambertini C., y Monti A. (2019) Salinity effects on germination, seedlings and full-grown plants of upland and lowland switchgrass cultivars. *Biomass and*

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0961953418303313>

- Zhang, J.L., Flowers, T.J., Wang, S.M. (2010). Mechanisms of sodium uptake by roots of higher plants. *Plant Soil* 326, 45-60. <https://link.springer.com/article/10.1007/s11104-009-0076-0>
- Zhani, K., Ben, Fredj, M., Mani, F. y Hannachi, C. (2012). Impact of salt stress (NaCl) on growth, chlorophyll content and fluorescence of Tunisian cultivars of chili pepper (*Capsicum frutescens* L.). *Journal of Stress Physiology and Biochemistry* 8, 236-252. <https://cyberleninka.ru/article/n/impact-of-salt-stress-nacl-on-growth-chlorophyll-content-and-fluorescence-of-tunisian-cultivars-of-chili-pepper-capsicum-frutescens-l>
- Zhani, K., Hermans, N., Ahmad, R. y Hannachi, C. (2013). Evaluation of salt tolerance (NaCl) in Tunisian chili pepper (*Capsicum frutescens* L.) on growth, mineral analysis and solutes synthesis. *Journal of Stress Physiology and Biochemistry* 9, 209-228. <https://cyberleninka.ru/article/n/evaluation-of-salt-tolerance-nacl-in-tunisian-chili-pepper-capsicum-frutescens-l-on-growth-mineral-analysis-and-solutes-synthesis>
- Zhu, J.K. (2001). Plant salt tolerance. *Trends in Plant Science* 6, 66-71. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1360138500018380>
- Zhu, J.K. (2003). Regulation of ion homeostasis under salt stress. *Curr Opin Plant Biol* 6, 441-445. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1369526603000852>

II. METABOLÓMICA



CAPÍTULO 5

Importancia del estudio de metabolitos del chile habanero (*Capsicum chinense* jacq.) y su posible actividad biológica: una revisión

Relevance of the study of metabolites of habanero chili (*Capsicum chinense* jacq.) and its potential biological activity: a review

Figueroa-Hernández, Claudia Y.¹, Alonso-Villegas, Rodrigo², y Rodríguez-Buenfil Ingrid M.^{3*}

¹CONACYT-Tecnológico Nacional de México/ Tecnológico Nacional de México/ Instituto Tecnológico de Veracruz, Unidad de Investigación y Desarrollo en Alimentos. M. A. de Quevedo 2779, Veracruz, Ver. C.P. 91897. México. Teléfono (229) 934 5701.

²Universidad Autónoma de Baja California (UABC). Escuela de Enología y Gastronomía. Carretera Transpeninsular Ensenada- Tijuana 3917 Fracc. Playitas C.P. 22860. Teléfono (646)1750746.

³Centro de Investigación y Asistencia en Tecnología y Diseño del Estado de Jalisco. Subsede Sureste. Tablaje Catastral 31264 Km 5.5 Carr., Sierra Papacal-Chuburná puerto. Parque Científico Tecnológico de Yucatán. CP 97302 Mérida, Yucatán, México. *autor de correspondencia: irodriguez@ciatej.mx

Resumen

El chile habanero (*Capsicum chinense* Jacq.) es un producto hortícola con una gran importancia económica, gastronómica y cultural de la península de Yucatán. Se ha comprobado que además de su apreciada pungencia y perfil aromático, es fuente de compuestos que pueden ejercer una actividad biológica o bioactividad cuando son consumidos de forma regular. Entre las principales bioactividades estudiadas en el chile habanero destacan la antioxidante, antigluceante, anticancerígena, antimicrobiana y antiinflamatoria. Estas bioactividades pueden atribuirse a los capsaicinoides, capsinoides, flavonoides, carotenoides y vitamina C, presentes en el fruto. La cantidad y perfil de estos metabolitos dependen del estado de madurez, condiciones del cultivo, tolerancia al estrés, entre otras, por esta razón es importante conocer el efecto de estas variables sobre la producción de estos compuestos. El objetivo de esta revisión es analizar los estudios que se han realizado sobre la cuantificación de los metabolitos con actividad biológica empleando herramientas de la metabolómica. El análisis de estos mostró la importancia de la caracterización y cuantificación del metaboloma como una herramienta útil para conocer el estado bioquímico del fruto, así como para predecir su posible bioactividad y sus características de calidad sensorial.

Palabras claves: *Capsicum chinense*, chile habanero, bioactividad, capsaicinoides, metabolómica

Abstract

Habanero pepper (*Capsicum chinense* Jacq.) is a horticultural product with economic, gastronomic and cultural importance in the Yucatan peninsula. In addition to its appreciated

pungency and aromatic profile, it is a source of compounds that can exert a biological activity or bioactivity when consumed regularly. Capsaicinoids, capsinoids, flavonoids, carotenoids are responsible for several bioactivities in the habanero pepper include antioxidant, antimicrobial, anti-inflammatory among others. The metabolite profile depends on the state of maturity, crop conditions, stress tolerance, among others, for this reason it is important to know the effect of these variables on the compounds production. The aim of this review is to examine the studies carried out on the quantification of metabolites with biological activity using metabolomic tools. The analysis of these studies showed the relevance of the characterization and quantification of the metabolome as a useful tool to know the biochemical status of the fruit, as well as to predict its possible bioactivity and sensory quality characteristics.

Keywords: *Capsicum chinense*, habanero pepper, bioactivity, capsaicinoids, metabolomics

I. Introducción

El conocimiento generado en los últimos años sobre el impacto que tienen la dieta en la salud humana está modificando los patrones de consumo alimentario (Diolintzi *et al.*, 2019; La Barbera *et al.*, 2017; Piccolella *et al.*, 2019), debido a que hoy en día no solamente se busca que el alimento cumpla con su aspecto nutricional, sino que además contenga compuestos con actividad biológica que mejoren la salud (La Barbera *et al.*, 2017). En consecuencia, la identificación de estos compuestos es crucial tanto para la industria alimentaria para poder proporcionar a los consumidores una dieta sana y equilibrada (La Barbera *et al.*, 2017). En este sentido el reino vegetal es una gran fuente de este tipo de compuestos bioactivos (Jayaprakasha y Patil, 2016; La Barbera *et al.*, 2017; Piccolella *et al.*, 2019), entre los cuales destacan los compuestos fenólicos, carotenoides, glucosinolatos, capsaicinoides (La Barbera *et al.*, 2017; Pandey y Rizvi, 2009; Renard, 2018; Silva *et al.*, 2013). Las propiedades biológicas atribuidas a una gran cantidad de fitoquímicos presentes en los productos hortofrutícolas han sido ampliamente estudiadas en los últimos años (Beidokhti y Jäger, 2017; Chen y Kang, 2014; La Barbera *et al.*, 2017; Moo-Huchin *et al.*, 2014; Renard, 2018). La información generada ha sido recolectada y almacenada en numerosas bases de datos electrónicas (Scalbert *et al.*, 2011). Esta recolección de información sobre los fitoquímicos aumentó con el advenimiento de la metabolómica, que es una herramienta eficaz que permite el análisis exhaustivo a nivel cualitativo y cuantitativo de todos los metabolitos en un sistema biológico durante la presencia de estímulos ambientales o fisiológicos (Fiehn, 2002). Los metabolitos son definidos como moléculas de bajo peso molecular que incluyen una amplia gama de compuestos como azúcares, aminoácidos, ácidos grasos, nucleósidos y ácidos orgánicos que constituyen el metaboloma (Fiehn *et al.*, 2000).

El metaboloma presente en las plantas es muy grande, actualmente se tienen identificados alrededor de 200,000 compuestos fitoquímicos, entre los cuales 20,000 provienen de frutas, verduras y cereales. Estos fitoquímicos presentan diferencias en el peso molecular y características fisicoquímicas (Oz y Kafkas, 2017). Por lo tanto, la caracterización e identificación exhaustiva del metaboloma del material vegetal es un trabajo arduo y desafiante (La Barbera *et al.*, 2017).

Uno de los productos hortícolas que tiene gran relevancia, es el chile (género *Capsicum*), el cual ha sido muy estudiado en los últimos años (Castro-Concha *et al.*, 2014; Chen y Kang, 2014; Mokhtar *et al.*, 2016; Segura *et al.*, 2013; Zimmer *et al.*, 2012). En varios estudios se ha demostrado el potencial que tienen algunos de sus compuestos como la capsaicina, carotenoides, flavonoides de ejercer algún tipo de bioactividad. Las principales actividades biológicas que se han evaluado *in vitro* son: i) antioxidante (Carvalho *et al.*, 2015; Castro-Concha *et al.*, 2014; Hervert-Hernández *et al.*, 2010; Segura *et al.*, 2013), ii) antimicrobiana (Mokhtar *et al.*, 2016; Nascimento *et al.*, 2014), iii) antiinflamatoria (Zimmer *et al.*, 2012), iv) antihipertensivo (Chen y Kang, 2014; Menichini *et al.*, 2009), v) antiglicémica (Chen y Kang, 2014; Menichini *et al.*, 2009), vi) quelante de metales (Oboh *et al.*, 2007; Siddiqui *et al.*, 2013) y vii) y antitumoral (Shanmugaprakash *et al.*, 2015).

Los chiles (*Capsicum*) pertenecen a la familia de las solanáceas, al igual que el tomate, berenjena y papa. El género *Capsicum* consta de 25 especies que son agrupadas de acuerdo con ciertas características florales que comparten como el número y la orientación de las flores por nódulo, la forma del cáliz (Barboza y De Bem Bianchetti, 2005; Basu y De, 2003; Wahyuni *et al.*, 2011, 2013a). Las especies principales son *Capsicum annum*, *Capsicum frutescens*, *Capsicum baccatum*, *Capsicum chinense* y *Capsicum pubescens* (Wahyuni *et al.*, 2011). De acuerdo con los datos de la Food and Agricultural Organization of the United Nations, FAOSTAT (2019), la producción total de chile a nivel mundial en 2017 fue de 36.09 millones de toneladas, siendo el principal país productor China con 17.82 millones de toneladas, seguido por México (3.29 millones de toneladas), Turquía (2.60 millones de toneladas), Indonesia (2.35 millones de toneladas) y Estados Unidos (0.92 millones de toneladas).

El chile es uno de los productos agrícolas con mayor potencial de desarrollo en país, además de que es uno de los productos demandados en el extranjero, exportándose el 29.7 % de su producción anual (SAGARPA, 2017). De acuerdo con SAGARPA, los principales países que importan una gran variedad de chiles son Estados Unidos (0.98 millones de toneladas), Canadá (3.1 miles de toneladas), Guatemala (0.47 miles de toneladas) y España (0.10 miles de toneladas).

Uno de los chiles más apreciados en el comercio internacional y nacional por su pungencia y sus características de calidad, es el habanero, este chile tiene denominación de origen desde el 2010 (Diario Oficial de la Federación, 2010; SAGARPA, 2017), en conjunto con la vigilancia y aplicación de la NOM-189-SCFI-2017 ha logrado posicionarse como un producto de gran valor agregado (Diario Oficial de la Federación, 2018; SAGARPA, 2017), lo cual ha permitido que este producto se encuentre bien colocado a nivel nacional e internacional (SAGARPA, 2017).

Los principales países donde se exporta son Estados Unidos, Japón, Corea del Sur, Italia y Alemania. El 80% de la producción de chile habanero se comercializa como fruto fresco y el 20% restante se dirige a la elaboración de salsas, pastas y deshidratados.

El chile habanero es cultivado principalmente en la zona comprendida por los estados que conforman la península de Yucatán, Yucatán, Quintana Roo y Campeche; no obstante, también se cultiva en otros estados como Baja California Sur, San Luis Potosí, Sonora y

Tabasco (Gobierno de México, 2019; SAGARPA, 2017). Además, en la gastronomía yucateca, el chile habanero tiene un papel relevante siendo utilizado como acompañante de una gran cantidad de platillos tradicionales, como la cochinita pibil, poc chuc, mukbil pollo, entre otros (Gobierno de México, 2019; SECTUR, 2010). Aparte de su uso en la gastronomía, actualmente se emplea para la formulación de productos farmacéuticos (ungüentos para la artritis) y químicos, como base de pinturas, la fabricación de gas lacrimógeno, entre otros (Gobierno de México, 2019; Ruiz-Llau *et al.*, 2011).

El chile habanero contiene 9 g Kg⁻¹ de capsaicina (Borges-Gómez *et al.*, 2010), 14 mg g⁻¹ de carotenoides (Rodríguez-Maturino *et al.*, 2012), 45 mg 100g⁻¹ de flavonoides (Menichini *et al.*, 2009), 120 mg 100g⁻¹ de vitamina C (SIAP, 2010), entre otros. Por lo que es importante identificar y cuantificar los compuestos con actividad biológica durante diferentes estímulos fisiológicos y ambientales para predecir su posible bioactividad y su beneficio en la salud.

II. Revisión bibliográfica

2.1 Generalidades del género *Capsicum*

Las plantas del género *Capsicum* son cultivadas principalmente a nivel mundial; sin embargo, desarrollan un mejor crecimiento en los países tropicales y subtropicales (Wahyuni *et al.*, 2013a). El género *Capsicum* contiene más de 30 especies de chile, pero las cinco especies más cultivadas y representativas son: *Capsicum annuum* L., *Capsicum chinense* Jacq, *Capsicum frutescens* L., *Capsicum baccatum* L. y *Capsicum pubescens* (Del Valle-Echevarria *et al.*, 2019). La mayor diversidad genética de especies del género *Capsicum* se encuentra en México; no obstante, como ya se mencionó antes no es el principal país productor (Servicio de Información Agroalimentaria y pesquera, SIAP 2018). Las condiciones óptimas para el cultivo de las especies de *Capsicum* fluctúan entre 7-29 °C, con una precipitación anual de 300 a 4600 mm y suelos con pH entre 4.3- 8.7 (De Swart *et al.*, 2006). Habitualmente, se consumen en estado fresco y deshidratado o seco, y se utiliza principalmente como condimento debido a su pungencia, la cual depende del contenido de capsaicina presente (Melgar-Lalanne *et al.*, 2016). Los frutos del género *Capsicum* tienen diversas coloraciones que van del verde, amarillo, naranja y rojo, depende de la etapa de maduración y de su capacidad de síntesis de clorofila o carotenoides (Arimboor *et al.*, 2015; Khoo *et al.*, 2011).

La composición química de los frutos de las especies del género *Capsicum* depende del estado de madurez. Los chiles tienen una importancia etnofarmacológica, debido a que son utilizados tradicionalmente en diversos platillos y productos alimenticios por su sabor, color y aroma distintivos (Khan *et al.*, 2014). La composición química del fruto *Capsicum annuum* se muestra en la Tabla 1. Adicionalmente, los chiles contienen una amplia variedad de compuestos que poseen cadenas hidrocarbonadas derivadas denominadas capsacinoides. Otros compuestos químicos presentes en los chiles son los carotenoides y flavonoides. Estos metabolitos se encuentran en los frutos debido a que actúan como mecanismos de defensa contra factores abióticos y bióticos. Se ha propuesto que los capsacinoides podrían ser utilizados por la planta como sistema de defensa contra animales frugívoros y hongos del género *Fusarium* (Schulze y Spiteller, 2009; Wahyuni *et al.*, 2013a).

Tabla 1. Composición química promedio de 100 g de porción comestible del *Capsicum annuum* L. Fuente: Sistema de Información Agroalimentaria y Pesquera (SIAP, 2010).

Composición química*	Contenido
Agua	91 g
Carbohidratos	5.1 g
Proteínas	1.3 g
Lípidos	0.3 g
Fibra	1.4 g
Vitamina A	300 mg
Vitamina B1	0.03 mg
Vitamina B2	0.05 mg
Vitamina B5	0.20 mg
Vitamina B12	0.45 mg
Vitamina C	120 mg
Calcio	9 mg
Azufre	17 mg
Cloro	37 mg
Cobre	0.10 mg
Fósforo	23 mg
Hierro	0.5 mg
Magnesio	11 mg
Manganeso	0.26 mg
Potasio	234 mg
Sodio	58 mg
Yodo	0.01 mg

*En 100 g de fruto fresco.

Adicionalmente, se ha observado que algunos compuestos fenólicos como el ácido cinámico, y sus derivados, así como los flavonoides tienen actividad antioxidante y anticancerígena *in vitro* (Jeong *et al.*, 2011; Wahyuni *et al.*, 2013a). De igual modo, se han encontrado una gran cantidad de compuestos aromáticos como fenoles, aldehídos, cetonas, éteres y lactonas, los cuales expresan el perfil aromático característico del fruto (Junior *et al.*, 2012; Maji y Banerji, 2016).

La composición y concentración de estos metabolitos depende del estado de madurez del fruto, sistema y condiciones de cultivo y la técnica postcosecha utilizada (Howard *et al.*, 2000; Wahyuni *et al.*, 2013a); así como las condiciones de almacenamiento (temperatura <7.5 °C, ~70% de humedad relativa, ausencia de luz y oxígeno) para conservar el material vegetal con una alta calidad hasta su uso (Baenas *et al.*, 2019; Padilha *et al.*, 2015).

2.2 Chile habanero (*Capsicum chinense* Jacq.)

El chile habanero tiene forma de un trompo pequeño, su tamaño puede oscilar entre 2 a 6 cm de largo por 2 a 4 cm de ancho. Tiene una coloración verde cuando el fruto está inmaduro, pero una vez que madura puede tomar una coloración rojiza, anaranjada o amarillenta. La coloración está definida por la presencia de dos tipos de pigmentos: carotenoides y antocianinas (González-Estrada *et al.*, 2010). Las diferentes proporciones entre estos pigmentos son determinantes para la coloración en las cultivares del fruto. Con respecto a su aroma, se ha observado que todos los frutos de *C. chinense* Jacq. tienen el mismo aroma, independientemente de su coloración (Paulino-Luis, 2013). El chile habanero posee un alto contenido de capsaicina, que es la sustancia responsable de la pungencia, generalmente su contenido se mide en Unidades Scoville (SHU, por sus siglas en inglés), esta escala fue desarrollada por Wilbert Scoville e indica cuantas veces debe diluirse un chile para que su pungencia sea imperceptible (Liu y Nair, 2010; Wahyuni *et al.*, 2011). El contenido de capsaicinoides en el chile habanero se encuentra en un rango entre 150, 000 y 350,000 SHU, por esta razón es clasificado como muy pungente (Sweat *et al.*, 2016).

2.3 Principales compuestos bioactivos en el chile habanero

Como se ha mencionado, el chile habanero posee una gran cantidad de metabolitos con actividad biológica. En la Tabla 2 se muestran los principales metabolitos que se encuentran en el chile y ejercen una actividad biológica. A continuación, se describirán brevemente algunos de los compuestos bioactivos más importantes en el chile habanero.

2.3.1 Capsaicinoides

Los capsaicinoides son amidas producidas por las especies del género *Capsicum*, estas sustancias son las responsables de la pungencia en los chiles. Se han reportado más de 20 estructuras de capsaicinoides en diferentes especies de pimientos (Barbero *et al.*, 2016), siendo los principales la capsaicina, dihidrocapsaicina, norhidrocapsaicina y homocapsaicina. Cualquier variación en la estructura química afecta a la pungencia de los chiles (Wahyuni *et al.*, 2013a). Los principales capsaicinoides en los chiles picantes, como el habanero son la capsaicina y la dihidrocapsaicina, representan el 90% de los capsaicinoides totales del fruto (Jeeatid *et al.*, 2018). Los capsaicinoides son sintetizados en la placenta de los frutos por la condensación de la vanilililamina y ácidos grasos de cadena media (Thiele *et al.*, 2008). El nivel de producción de capsaicinoides, así como su abundancia relativa en los diferentes cultivares de *Capsicum* están determinados al menos de forma parcial por factores genéticos y/o diferencias en la expresión de genes de algunas enzimas claves de su ruta de producción, como la fenilalanina liasa (Pal), ácido cinámico 4-hidroxilasa (C4h) y ácido cafeico O-metiltransferasa (Comt), impulsadas por cambios ambientales (Aza-González *et al.*, 2011). Por otro lado, en los chiles también, se encuentran capsinoides, que son sustancias análogas a la capsaicina, siendo los más representativos el capsiato, dihidrocapsiato y el norhidrocapsiato (Lang *et al.*, 2009).

En un estudio realizado por Sweat *et al.*, (2016) se encontró que el contenido de capsaicina y dihidrocapsaicina en el chile habanero era de 10.4 mg g⁻¹ y 5.3 mg g⁻¹, respectivamente. El contenido de este metabolito tiene gran relevancia debido a que en los últimos 15 años, se le han atribuido diversas bioactividades como anticancerígena, analgésica, antiinflamatoria, antimicrobiana y contra la obesidad (Joo *et al.*, 2010; Lee *et al.*, 2010; Luo *et al.*, 2011; Rosa *et al.*, 2002).

Tabla 2. Principales grupos químicos presentes en el chile habanero y bioactividades asociadas a cada grupo.

Grupo	Compuesto	Fórmula química	Bioactividades del compuesto
Capsaicinoides	Capsaicina	C ₁₈ H ₂₇ NO ₃	Actividad antioxidante, antimicrobiana, antiinflamatoria, antihiper glucemiante y antitumoral
	Dihidrocapsaicina	C ₁₈ H ₂₉ NO ₃	
	Nordihidrocapsaicina	C ₁₇ H ₂₇ NO ₃	
	Homocapsaicina	C ₁₉ H ₂₉ NO ₃	
Capsinoides	Capsiato	C ₁₈ H ₂₆ O ₄	Actividad antioxidante, antimicrobiana y antitumoral
	Dihidrocapsiato	C ₁₈ H ₂₈ O ₄	
	Nordihidrocapsiato	C ₁₇ H ₂₆ NO ₄	
	Capsantina	C ₄₀ H ₅₆ O ₃	
Carotenoides	Capsorrubina	C ₄₀ H ₅₆ O ₄	Actividad antioxidante, antiinflamatoria y actividad antitumoral
	Criptocapsina	C ₄₀ H ₅₆ O ₂	
	β-caroteno	C ₄₀ H ₅₆	
	Zeaxantina	C ₄₀ H ₅₆ O ₂	
	Violaxantina	C ₄₀ H ₅₆ O ₄	
Flavonoides	β-criptoxantina	C ₄₀ H ₅₆ O	Actividad antioxidante, antimicrobiana
	Miricetina	C ₁₅ H ₁₀ O ₈	
	Quercetina	C ₁₅ H ₁₀ O ₇	
	Luteolina	C ₁₅ H ₁₀ O ₆	
	Apigenina	C ₁₅ H ₁₀ O ₅	

Fuente: Antonio *et al.*, 2018

2.3.2 Carotenoides

Los carotenoides son pigmentos liposolubles derivados de la ruta de los isoprenoides y que son responsables de la coloración naranja, amarilla o roja de muchos alimentos.

Estructuralmente, los carotenoides están compuestos por la unión de ocho moléculas de isopreno, lo cual origina un esqueleto de 40 átomos de carbono (Arimboor *et al.*, 2015; Baenas *et al.*, 2019). Pueden clasificarse en dos grandes grupos: i) xantofilas, que son moléculas que contienen oxígeno, como la luteína, zeaxantina y ii) carotenos, moléculas que no contienen oxígeno como el α -caroteno, β -caroteno y el licopeno (Amorim-Carrilho *et al.*, 2014; Jaswir *et al.*, 2011).

El género *Capsicum* es una de las fuentes más ricas de carotenoides entre los vegetales (Palevitch y Craker, 1996). Los carotenoides brindan la coloración las especies del género *Capsicum*, a excepción de las especies con tonalidades purpuras, en las cuales también participan las antocianinas (Lightbourn *et al.*, 2008). Los principales carotenoides presentes en los chiles rojos son capsantina y capsorubina, mientras que la violaxantina, β -caroteno, luteína, anteraxantina y zeaxantina son los más importantes en los chiles amarillos (Hornero-Méndez *et al.*, 2000; Wahyuni *et al.*, 2011). En cambio, la coloración naranja de los chiles se ha relacionado con la presencia de β -caroteno, zeaxantina, violaxantina y β -criptoxantina. La concentración de carotenoides en las especies de *Capsicum* puede variar entre 0.1-3.2 g 100 g⁻¹ de peso seco (Arimboor *et al.*, 2015). Estas variaciones se pueden deber al grado de madurez, diferencias genéticas, prácticas de cosecha y procesamiento.

En un estudio realizado por Segura *et al.* (2013), se encontró que la concentración de carotenoides en diferentes genotipos de chile habanero cultivado en Yucatán, la concentración de carotenoides varió de 1.00 a 1.26 mg 100 g⁻¹ de muestra. Por otra parte, Rodríguez-Maturino *et al.*, (2012) encontraron que la concentración de carotenoides totales presentes en el chile habanero fue de 14 mg g⁻¹ de peso seco.

2.3.4 Flavonoides

Los flavonoides son compuestos fenólicos que se encuentran en una gran cantidad de frutas, vegetales, hierbas y flores (Singh *et al.*, 2017). La estructura de los flavonoides está conformada por dos anillos bencénicos (A y B), los cuales están ligados por un anillo heterocíclico que contiene oxígeno (C). Los flavonoides más comunes en la naturaleza se encuentran agrupados en: flavonas, flavonoides, chalconas, antocianinas, taninos condensados y flavonoles; esta clasificación depende de la unión entre los anillos B y C, de la estructura del anillo B y de los patrones de hidroxilación y glicosilación de los tres anillos (Wang *et al.*, 2018). Hay más de 6,000 flavonoides diferentes que se encuentran en forma libre o ligada como glicósidos. Los flavonoides desempeñan múltiples actividades biológicas en las plantas entre las que destacan la protección contra la radiación UV, fitopatógenos y procesos de señalización celular durante condiciones de estrés (Falcone-Ferreyra *et al.*, 2012; Romano *et al.*, 2013; Terahara, 2015).

En las especies del género *Capsicum*, los glucósidos de quercetina, luteolina, apigenina y catequina son parte de la composición de los flavonoides. Los glucósidos de quercetina se encuentran sólo en la forma O-glucosilada siendo las más abundantes, quercetina-3-O-ramnósido y quercetin-7-O-ramnósido. Los glucósidos de apigenina están presentes como glucósidos, mientras que la luteolina sólo se encuentra en su forma C-glucosilada. La concentración de flavonoides totales en el chile puede variar según el cultivar (Whiting *et al.*, 2012). Menichini *et al.* en 2009, encontraron que el contenido de flavonoides totales en el chile habanero en estado inmaduro era de 138 mg 100g⁻¹ de chile fresco, mientras que en el chile habanero maduro esta concentración disminuía a 45 mg 100g⁻¹ de chile fresco.

2.3.5 Vitamina C

Los frutos del género *Capsicum* son fuentes significativas de ácido ascórbico (vitamina C), siendo una de las mejores fuentes de origen vegetal. Las concentraciones de ácido ascórbico en diversos cultivares varían de 76.1 a 243 mg 100g⁻¹. El contenido de vitamina C en chiles deshidratados es menor debido a que existe una gran pérdida de este compuesto durante el procesamiento térmico y el almacenamiento, la cual puede representar hasta el 75% de la cantidad inicial del ácido ascórbico (Palevitch y Craker, 1996). La vitamina C actúa fisiológicamente como un antioxidante debido a su elevado poder reductor, contrarrestando los efectos nocivos de las especies reactivas de oxígeno (Schlueter y Johnston, 2011).

2.4 Efecto del estrés en la síntesis de metabolitos

Las plantas están constantemente expuestas a condiciones externas, las cuales dependiendo de su intensidad y duración tienen un efecto sobre su crecimiento desarrollo y reproducción, incluso puede inhibir su crecimiento (Urrea-López, 2014). El estrés se define como el conjunto de condiciones que limitan la expresión del potencial de rendimiento genético y varían en función de la susceptibilidad de cada especie (Jones *et al.*, 1989). Las condiciones de estrés externo pueden ser de origen biótico o abiótico, y afectan negativamente la supervivencia, producción y rendimiento de los principales cultivos agrícolas (Mantri *et al.*, 2012). Estos estímulos ambientales también pueden ser ocasionados o exacerbados por la actividad humana, como la degradación química, la pérdida de nutrientes y la salinidad (Oldeman, 1992).

La acumulación de sales en el suelo de cultivo es una de las condiciones de estrés que mayor impacto tiene en la agricultura porque causa pérdidas importantes en la producción de alimentos a nivel mundial. El grado de salinidad en el suelo se debe a causas naturales y prácticas agrícolas, por ejemplo, el manejo inadecuado de sistemas de riego con aguas salinas, el uso sin control de fertilizantes y un drenaje inadecuado de los suelos. Actualmente se estima que la salinidad afecta el 20 % de los suelos bajo riego a nivel mundial (Peleg *et al.*, 2011) pero se estima que para 2050 afecte al 50%, lo cual perjudicará severamente la producción de alimentos (Blumwald y Grover, 2006). El estrés salino en las plantas tiene tres fases: i) generación de estrés osmótico por el aumento de solutos, lo cual dificulta el ingreso del agua a la planta, ii) generación de estrés oxidativo ocasionado como consecuencia del

cierre de los estomas, limitando el suministro de CO₂ e induciendo la generación de especies reactivas de oxígeno (provocando daños a membranas, proteínas y ADN) y iii) desbalance iónico causado por el aumento de los niveles citoplásmicos de Na⁺ y Cl⁻, y la inhibición de K⁺ y Ca²⁺ (Urrea-López, 2014). Además, las altas concentraciones salinas provocan i) alteraciones en rutas metabólicas, ii) inactivación de enzimas, iii) incremento en las tasas de respiración, iv) alteración en la distribución de minerales, v) inestabilidad de la membrana por el desplazamiento del Ca²⁺ por Na⁺, y vi) disminución de la fotosíntesis (Urrea-López, 2014). La respuesta de las plantas al estrés salino es diversa y depende de la fase de desarrollo del estrés. Durante la fase de estrés osmótico, la planta puede acumular compuestos orgánicos solubles neutros conocidos como osmólitos (prolina, glicina, betaína, trealosa, fructosa, manitol) que pueden provocar cambios en la elasticidad de la pared celular sin provocar perturbaciones en las funciones celulares, aunque se encuentren en altas concentraciones (Yancey, 2005).

Para contrarrestar el estrés oxidativo provocado por el incremento en la producción de radicales libres, la planta produce compuestos antioxidantes de bajo peso molecular como el ácido ascórbico, glutatión, tocoferol y carotenoides, enzimas como la superóxido dismutasa, catalasas, ascorbato peroxidasa, glutatión S-transferasa y glutatión peroxidasa las cuales actúan contra estos radicales. También algunos osmólitos como el manitol, protegen las estructuras celulares mediante la eliminación de radicales libres (Urrea-López, 2014). Esta acumulación de metabolitos con actividad antioxidante (ácido ascórbico, compuestos fenólicos, flavonoides, etc.) afectan de forma positiva la calidad nutricional y bioactiva de los productos vegetales (Gill y Tuteja, 2010). Particularmente, las plantas del género *Capsicum* son moderadamente sensibles al estrés por salinidad (Silva *et al.*, 2008). Los efectos provocados por este estrés afectan el rendimiento y los parámetros de calidad de los frutos, debido a cambios en el contenido de compuestos antioxidantes al inhibir la síntesis de ácido ascórbico (Azuma *et al.*, 2010) y en la disminución de la concentración de compuestos fenólicos totales (Navarro *et al.*, 2006). Este efecto puede ser más pronunciado cuando hay altas temperaturas y condiciones de sequía (Rubio *et al.*, 2010).

El análisis y determinación de los metabolitos secundarios producidos por las plantas sometidas a condiciones de estrés son de suma relevancia para la ciencia y tecnología de los alimentos y la agricultura (Singh *et al.*, 2017). En los últimos años, las llamadas disciplinas “ómicas”, metagenómica, proteómica, metabolómica, transcriptómica, entre otras, se han posicionado como una gran herramienta para lograr este objetivo, ya que permiten el estudio de los procesos moleculares que ocurren en un organismo desde los genes hasta los metabolitos. El estudio y comparación del genoma, el transcriptoma, el proteoma y el metaboloma en diferentes situaciones permite la identificación de biomarcadores, es decir, elementos cuya presencia, ausencia o alteración esta correlacionada con determinados estados fisiológicos (Jorge *et al.*, 2016; Sumner *et al.*, 2003).

2.5 Metabolómica como herramienta para el estudio de los metabolitos del chile habanero

2.5.1 Generalidades de la metabolómica

El término de metabolómica fue introducido a principios del siglo XXI. En el 2001, Fiehn señaló que el término de metabolómica debe ser considerado como un análisis exhaustivo y cuantitativo de todos los metabolitos presentes en una célula (Fiehn, 2001). En un sentido más amplio, la metabolómica es una aproximación de la biología de sistemas que se define como el perfil global de todas las moléculas pequeñas (metabolitos) de bajo peso molecular (<1,000 Da) en las células, tejidos, y organismos (Lindon et al., 1999). Al conjunto de metabolitos sintetizados por un sistema biológico se le conoce como metaboloma (Oliver et al., 1998). El metaboloma es el producto final de la interacción existente entre el genoma, transcriptoma y proteoma con el ambiente y por lo tanto está estrechamente relacionado con el fenotipo bioquímico de un sistema, incluyendo también sus características nutricionales, toxicológicas y biológicas (Hoekenga, 2008; Kok et al., 2008; Sumner et al., 2003).

Una de las características más importantes de los estudios metabolómicos es el análisis cualitativo y cuantitativo de una gran cantidad de biomoléculas de sistemas dinámicos y complejos. Actualmente, existen diversos estudios de metabolómica aplicados a distintos organismos sometidos a diferentes condiciones ambientales para ver su respuesta (Bundy et al., 2009), en la caracterización bacteriana (Vaidyanathan et al., 2002) y en estudios de salud humana y nutrición (Watkins y German, 2002). También se ha aplicado en estudios sobre el mejoramiento vegetal (Wahyuni et al., 2014) y en la determinación de biomarcadores metabólicos que sean capaces de medir la respuesta de los fármacos o la presencia de una enfermedad (Lenz et al., 2004). En el área de la ciencia de los alimentos, la metabolómica se ha utilizado para el aseguramiento de la calidad de las materias primas y productos finales (Cevallos-Cevallos et al., 2009), caracterización de alimentos (Ledesma-Escobar et al., 2015; Xiao et al., 2012) y monitoreo de los cambios composicionales en diferentes estados de madurez o bajo ciertas condiciones ambientales en diversos frutos (Aaby y Remberg, 2014; Ledesma-Escobar et al., 2017).

Las estrategias de estudios en metabolómica se dividen en análisis dirigidos o selectivos y no dirigidos, en los análisis dirigidos hay dos enfoques: perfilado de metabolitos y análisis dirigido de metabolitos. En el perfilado de metabolitos se busca la identificación y cuantificación de un número de metabolitos previamente seleccionados, generalmente relacionados a una ruta metabólica específica. La preparación de la muestra e instrumentación buscan aislar dichos metabolitos de posibles efectos de la matriz después de la detección. Para lograr este objetivo, se requiere de la preparación específica de la muestra y separación de otros metabolitos, a través de un análisis cromatográfico seguido de la detección con la técnica UV-Vis o Espectroscopia de masas (MS, por sus siglas en inglés).

En los estudios de metabolómica no selectiva, se incluyen los enfoques de metabolómica de huella dactilar y la metabolómica no dirigida. La metabolómica de huella dactilar es un

análisis rápido, global de alto rendimiento de muestras que provee una clasificación de las estas (Urrea-López, 2014). La metabolómica no dirigida, busca una identificación y cuantificación no selectiva de todos los metabolitos de una muestra biológica. La preparación de la muestra debe ser sencilla para no excluir metabolitos, la selectividad y sensibilidad de la técnica analítica debe ser alta (Dunn y Ellis, 2005; Urrea-López, 2014) en función del tratamiento d los datos.

Los estudios metabolómicos pueden ser clasificados en: i) discriminativos, ii) predictivos y, iii) informativos, como se muestra en la Figura 1 (Cevallos-Cevallos *et al.*, 2009).

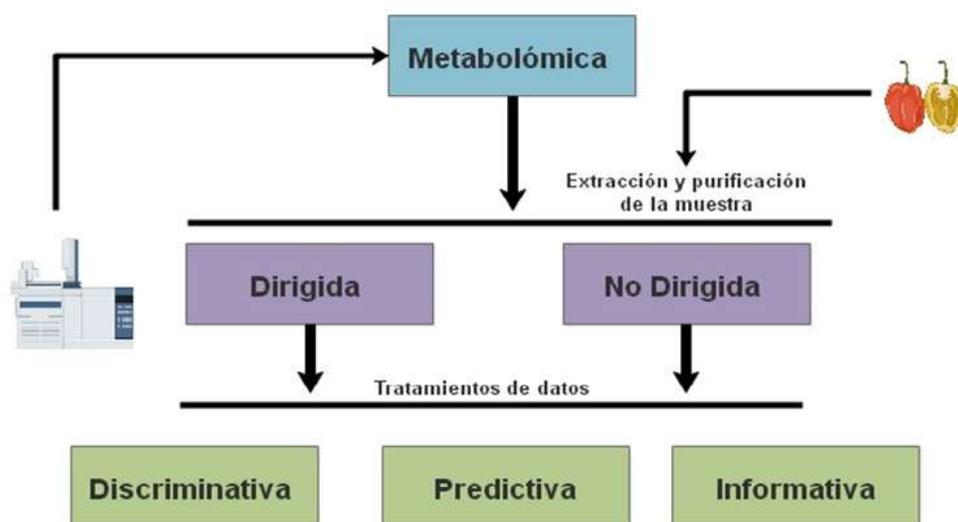


Figura 1. Clasificación general de la metabolómica

Los estudios metabolómicos discriminativos se enfocan en encontrar diferencias entre las poblaciones analizadas sin crear modelos estadísticos. Generalmente, la discriminación se logra con el uso de técnicas de análisis de datos multivariados, siendo el análisis de componentes principales (PCA, por sus siglas en inglés) el más utilizado. Los estudios metabolómicos predictivos permiten crear modelos estadísticos basados en el perfil de metabolitos y la abundancia para predecir una variable que es difícil cuantificar por otros métodos. Estos métodos generalmente son producidos por regresión de mínimos cuadrados parciales (PLS, por sus siglas en inglés). En el caso de los estudios metabolómicos informativos permiten identificar y cuantificar los metabolitos para obtener la información intrínseca de la muestra analizada (Cevallos-Cevallos *et al.*, 2009).

2.5.2 Desarrollo del análisis metabolómico

La detección y análisis del metaboloma presente en una muestra es complejo debido a la gran variabilidad en concentración, peso molecular, solubilidad, polaridad, y volatilidad que tienen los metabolitos (Dunn y Ellis, 2005). En la última dos décadas, se han desarrollado métodos para el análisis, identificación y cuantificación a gran escala de metabolitos en diversos sistemas biológicos (Dixon *et al.*, 2006; Wawrzyniak *et al.*, 2018). Las herramientas

analíticas más usadas son la resonancia magnética nuclear (NMR, por sus siglas en inglés), espectroscopia de infrarrojo por transformada de Fourier (IFTR, por sus siglas en inglés) y la espectrometría de masas (MS). Esta última casi siempre acoplada a técnicas cromatográficas, como la cromatografía de líquidos (LC-MS, por sus siglas en inglés), cromatografía de gases (GC-MS, por sus siglas de inglés) y electroforesis capilar (CE-MS, por sus siglas de inglés) de acuerdo con Cevallos-Cevallos *et al.*, 2009 y Dixon *et al.*, 2006. La Tabla 3 muestra las principales ventajas y limitaciones de las principales plataformas analíticas utilizadas para la identificación y cuantificación de metabolitos.

Tabla 3. Ventajas y limitaciones de las plataformas analíticas más empleadas para la identificación y cuantificación de metabolitos.

Plataforma analítica	Ventajas	Limitaciones	Referencia
Cromatografía de gases acoplada a Espectrofotometría de masas (GC-MS)	Alta reproducibilidad y sensibilidad analítica	Solo es aplicable a compuestos volátiles y térmicamente estables	(Yanes, 2015)
Cromatografía de Líquidos acoplado a Espectrofotometría de masas (LC-MS)	Tiene diferentes métodos de separación (Fase reversa, Interacción hidrofílica, etc.) Amplia cobertura de metabolitos detectados y alta sensibilidad	Baja reproducibilidad en los tiempos de retención. Desviaciones analíticas cuando se tienen una gran cantidad de muestras.	(Dunn y Ellis, 2005; Yanes, 2015)
Electroforesis capilar asociada a Espectrofotometría de masas (CE-MS)	Consume muy poca cantidad de muestra	Solo es aplicable a compuestos polares cargados Limitada robustez y reproducibilidad analítica	(Dunn y Ellis, 2005; Yanes, 2015)
Resonancia magnética nuclear (NMR)	Altamente cuantitativa y reproducible Mínima preparación de la muestra	Poca sensibilidad y baja identificación de compuestos En el análisis	(Yanes, 2015)
Matriz orgánica para la ionización de analitos mediante irradiación por láser (MALDI)	Permite estudiar la localización de compuestos en tejidos biológicos con resolución de hasta 10 μ Análisis muy rápidos	Poca reproducibilidad	(Dunn and Ellis, 2005; Yanes, 2015)

Fuente: Elaboración propia.

El protocolo de trabajo siempre dependerá de la naturaleza de la muestra y el tipo de estudio a realizar. Comúnmente, para analizar el metaboloma de una muestra es necesario la preparación, extracción, derivatización, separación y detección de los metabolitos, hacer el tratamiento de los datos y aplicar el análisis estadístico multivariado.

2.5.3 Metabolómica como herramienta analítica para el análisis del metaboloma del chile habanero

Debido a su alta capacidad biosintética, las plantas tienen metabolomas altamente complejos, pudiendo sintetizar más de 100,000 metabolitos secundarios. Estos metabolitos se dividen en primarios, cuando participan en las funciones básicas de las células (respiración, síntesis de biomoléculas, etc.) y secundarios, cuando no participan en el crecimiento y desarrollo, pero tienen un papel indispensable en la interacción con el ambiente como los mecanismos de defensa contra herbívoros y patógenos (Urrea- López, 2014). Por lo tanto, la medición del metaboloma vegetal puede ser una herramienta útil para proporcionar un panorama del estatus bioquímico de la planta, así como para evaluar las características fisiológicas y de crecimiento inducidas por un factor externo, como el estrés abiótico (Fiehn, 2002; Sumner *et al.*, 2003).

Se han realizado estudios metabolómicos con diferentes especies de chiles principalmente *Capsicum annuum* (Aizat *et al.*, 2014; Becerra-Martínez *et al.*, 2017; Villa-Ruano *et al.*, 2018, 2019) y *Capsicum chinense*. A continuación, se describirán los estudios metabolómicos realizados con *Capsicum chinense* (Aranha *et al.*, 2017; Junior *et al.*, 2012; Urrea-López, 2014; Wahyuni *et al.*, 2013b).

En un estudio realizado por Junior *et al.*, (2012) se analizaron las fracciones volátiles de tres cultivares de chiles provenientes de Brasil en dos diferentes estados de madurez. Las muestras fueron identificadas a través de Microextracción en fase sólida con espacio de cabeza (HS-SPME), Cromatografía de gases acoplada a Espectrometría de masas (GC-MS). En la muestra correspondiente al chile murupi (*Capsicum chinense* Jacq.) se encontraron 77 compuestos en su mayoría ésteres y sesquiterpenos. La concentración de los compuestos fue menor cuando la muestra analizada presentaba una mayor madurez.

En otro estudio, las herramientas metabolómicas fueron utilizadas para la búsqueda de genotipos que la descripción de los atributos de calidad y conservación de la biodiversidad de las especies del género *Capsicum* en colecciones de germoplasma. Aranha *et al.* en 2017, lograron la caracterización de los cultivares de chiles de una colección de germoplasma de Emprapa Clima Temperado basado en su perfil metabólico mediante un análisis metabolómico no dirigido utilizando cromatografía de gases acoplada a espectrofotometría de masas (GC-MS) como plataforma analítica. Se logró la identificación de aminoácidos, azúcares, ácidos orgánicos, capsaicinoides entre otros. Algunos cultivares de *C. chinense* mostraron tener un alto contenido de sacarosa y fructosa mientras que otros presentaron altos contenidos de dihidrocapsaicina. Se concluyó que el perfil metabolómico realizado no permite la agrupación de las muestras de chile por especie; sin embargo, identificaron y cuantificaron de manera simultánea varios compuestos.

Wahyuni *et al.*, (2013b) investigó la diversidad metabólica de 32 muestras de chile maduro provenientes de diferentes cultivares a través de un análisis metabolómico no dirigido con el empleo de las plataformas (LC-MS) y (GC-MS) para la cuantificación de metabolitos semipolares y volátiles en el pericarpio del fruto. Se clasificaron los cultivares de chiles analizados como *C. baccatum*, *C. annuum*, *C. chinense* y *C. frutescens* con ayuda de pruebas de caracterización morfológica, grado de pungencia, origen geográfico y caracterización genotípica.

La plataforma analítica de LC-MS permitió la identificación de 88 compuestos semipolares entre los que destacan los principales flavonoides de las especies del chile. Con relación a los compuestos aromáticos, analizados por GC-MS, se observó que existe una gran variabilidad genética entre ellos. Segundo, los resultados obtenidos del perfil aromático con ayuda de las plataformas analíticas pusieron de manifiesto que estas herramientas son útiles para el mejoramiento de los indicadores de calidad sensorial y funcional de las especies del género *Capsicum*. Finalmente, este estudio mostró que, a diferencia de los perfiles de los metabolitos totales presentes en los tejidos, los análisis dirigidos permitieron la cuantificación de un conjunto específico de metabolitos como los carotenoides, capsaicinoides y vitamina C, E.

Urrea- López en 2014, describió la respuesta fisiológica del chile habanero a nivel de planta y fruto durante la maduración expuesta a diferentes estímulos abióticos en el medio de cultivo a través de la caracterización de enfoques metabolómicos dirigidos y no dirigidos. La metabolómica no dirigida mostró resultados más profundos sobre cambios a nivel de metaboloma como respuesta al estrés debido a las bajas concentraciones de fósforo y nitrógeno, y no presentó ningún efecto para el estrés salino. El cultivo con bajos niveles de fósforo causó el mayor cambio en el perfil de metabolitos en los pericarpios de frutos en los diferentes estadios analizados (verde, intermedio y maduro). También, identificó la presencia de dos metabolitos que no habían sido detectados en el chile habanero, los capsianósidos II y X.

Además de estos estudios, en la Sede Sureste del CIATEJ, se realiza desde el 2017 el proyecto titulado “Análisis de los cambios metabolómicos durante el desarrollo del fruto *Capsicum chinense* Jacq. cultivado en diferentes tipos de suelo (rojo, café y negro)”, el cual es financiado por el Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por Rodríguez-Buenfil desde 2017. El objetivo de este proyecto es estudiar los cambios metabolómicos, con relación a la expresión genética, durante el desarrollo del fruto de *Capsicum chinense* cultivado en tres diferentes tipos de suelo para el establecimiento de un modelo de redes metabólicas en respuesta a estas condiciones. Los resultados de este proyecto serán descritos y analizados en capítulos posteriores del presente libro.

III. Conclusiones

El chile habanero tiene una gran importancia económica, cultural y gastronómica en la región sureste del país. La composición química del chile habanero permite que tenga diferentes usos y aplicaciones, por ejemplo, como nutraceutico debido a que es fuente de metabolitos bioactivos, como aditivo alimentario (colorante, especia y condimento) o simplemente como

ingrediente en la preparación de platillos de la gastronomía yucateca y mexicana. Debido a este interés, se desea conocer el contenido de algunos metabolitos relacionados con la pungencia o su bioactividad. El uso de la metabolómica ha permitido generar información y conocimiento acerca del estado bioquímico del fruto como respuesta a ciertos estímulos ambientales o fisiológicos. Se ha demostrado que las estrategias metabolómicas (dirigidas o no dirigidas) son una buena herramienta para lograr la cuantificación y caracterización reproducible y robusta del contenido de compuestos bioactivos y nutricionales presentes en el chile habanero bajo ciertas condiciones. Además, las estrategias de metabolómica no dirigida han permitido la obtención de las huellas dactilares metabólicas del fruto del género *Capsicum*, ya que permiten la determinación de forma simultánea de los metabolitos bioactivos (capsaicinoides, flavonoides, carotenoides y vitamina C) y aquellos que tienen un impacto en el perfil sensorial (compuestos aromáticos, azúcares, proteínas, etc.).

IV. Referencias

- Aaby, K., y Remberg, S.F. (2014). Strawberry phenolics and impact of ripening. In: Preedy, V. (ed). Processing and impact on active components in food. Academic Press, London, pp. 157–164. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-404699-3.00019-6>
- Aizat, W.M., Dias, D.A., Stangoulis, J.C.R., Able, J.A., Roessner, U., y Able, A.J. (2014). Metabolomics of *Capsicum* ripening reveals modification of the ethylene related-pathway and carbon metabolism. *Postharvest Biology and Technology*, 89, 19–31. <https://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2013.11.004>
- Amorim-Carrilho, K.T., Cepeda, A., Fente, C., y Regal, P. (2014). Review of methods for analysis of carotenoids. *TrAC Trends Analytical Chemistry*, 56, 49–73. <https://doi.org/10.1016/j.trac.2013.12.011>
- Antonio, A.S., Wiedemann, L.S.M., y Veiga Junior, V.F. (2018). The genus: *Capsicum*: a phytochemical review of bioactive secondary metabolites. *RSC Advances*, 8, 25767–25784. <https://doi.org/10.1039/c8ra02067a>
- Aranha, B.C., Hoffmann, J.F., Barbieri, R.L., Rombaldi, C.V., y Chaves, F.C. (2017). Untargeted metabolomic analysis of *Capsicum spp.* by GC–MS. *Phytochemical Analysis*, 28, 439–447. <https://doi.org/10.1002/pca.2692>
- Arimboor, R., Natarajan, R.B., Menon, K.R., Chandrasekhar, L.P., y Moorkoth, V., (2015). Red pepper (*Capsicum annuum*) carotenoids as a source of natural food colors: analysis and stability—a review. *Journal of Food Science and Technology*, 52, 1258–1271. <https://doi.org/10.1007/s13197-014-1260-7>
- Aza-González, C., Núñez-Palenius, H.G., y Ochoa-Alejo, N. (2011). Molecular biology of capsaicinoid biosynthesis in chili pepper (*Capsicum spp.*). *Plant Cell Reports*, 30, 695–706. <https://doi.org/10.1007/s00299-010-0968-8>
- Azuma, R., Ito, N., Nakayama, N., Suwa, R., Nguyen, N.T., Larrinaga-Mayoral, J.Á., Esaka, M., Fujiyama, H., y Saneoka, H., (2010). Fruits are more sensitive to salinity than leaves and stems in pepper plants (*Capsicum annuum* L.). *Scientia Horticulturae*, <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2010.04.006>
- Baenas, N., Belović, M., Ilic, N., Moreno, D.A., y García-Viguera, C. (2019). Industrial use of pepper (*Capsicum annuum* L.) derived products: technological benefits and biological advantages. *Food Chemistry*, 274, 872–885. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2018.09.047>
- Barbero, G.F., Liazid, A., Azaroual, L., Palma, M., y Barroso, C.G. (2016). Capsaicinoid contents in peppers and pepper-related spicy foods. *International Journal of Food Properties*, 19, 485–493. <https://doi.org/10.1080/10942912.2014.968468>

- Barboza, G.E., y De Bem Bianchetti, L. (2005). Three new species of *Capsicum* (*Solanaceae*) and a key to the wild species from Brazil. *Systematic Botanic*, 30, 863–871. <https://doi.org/10.1600/036364405775097905>
- Basu, S.K., y De, A.K. (2003). *Capsicum* historical and botanical perspectives. In: De, S.K. (ed). *Capsicum. The Genus Capsicum*. Taylor and Francis. London, pp. 1–15. <https://doi.org/10.1201/9780203381151>
- Becerra-Martínez, E., Florentino-Ramos, E., Pérez-Hernández, N., Gerardo Zepeda-Vallejo, L., Villa-Ruano, N., Velázquez-Ponce, M., García-Mendoza, F., y Bañuelos-Hernández, A.E. (2017). ¹H NMR-based metabolomic fingerprinting to determine metabolite levels in serrano peppers (*Capsicum annum* L.) grown in two different regions. *Food Research International* 102, 163–170. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2017.10.005>
- Beidokhti, M.N., y Jäger, A.K. (2017). Review of antidiabetic fruits, vegetables, beverages, oils and spices commonly consumed in the diet. *J. Ethnopharmacol*, 201, 26–41. <https://doi.org/10.1016/j.jep.2017.02.031>
- Blumwald, E., y Grover, A. (2006). Salt tolerance, in: *Plant Biotechnology*. John Wiley & Sons, Ltd, Chichester, UK, pp. 206–224. <https://doi.org/10.1002/0470021837.ch11>
- Borges-Gómez, L., Cárdenas, L.C., Novelo, J.R., Fregoso, M.S., Reyes, V., y Villanueva, E. (2010). Capsaicinoides en chile habanero (*Capsicum chinense* Jacq.) bajo diferentes condiciones de humedad y nutrición. *Terra Latinoamericana*, 28, 35–41
- Bundy, J.G., Davey, M.P., y Viant, M.R. (2009). Environmental metabolomics: A critical review and future perspectives. *Metabolomics*, 5, 3–21. <https://doi.org/10.1007/s11306-008-0152-0>
- Carvalho, A.V., de Andrade Mattietto, R., de Oliveira Rios, A., de Almeida Maciel, R., Moresco, K.S., y de Souza Oliveira, T.C. (2015). Bioactive compounds and antioxidant activity of pepper (*Capsicum* sp.) genotypes. *Journal of Food Science Technology*, 52, 7457–7464. <https://doi.org/10.1007/s13197-015-1833-0>
- Castro-Concha, L.A., Tuyub-Che, J., Moo-Mukul, A., Vazquez-Flota, F.A., y Miranda-Ham, M.L. (2014). Antioxidant capacity and total phenolic content in fruit tissues from accessions of *Capsicum chinense* Jacq. (Habanero Pepper) at different stages of ripening. *Science World Journal*, <https://doi.org/10.1155/2014/809073>
- Cevallos-Cevallos, J.M., Reyes-De-Corcuera, J.I., Etxeberria, E., Danyluk, M.D., y Rodrick, G.E. (2009). Metabolomic analysis in food science: a review. *Trends in Food Science and Technology*, 20, 557-566 <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2009.07.002>
- Chen, L., y Kang, Y.H.H. (2014). *In vitro* inhibitory potential against key enzymes relevant for hyperglycemia and hypertension of red pepper (*Capsicum Annuum* L.) including pericarp, placenta, and stalk. *Journal of Food Biochemistry*, 38, 300–306. <https://doi.org/10.1111/jfbc.12048>
- De Swart, E.A.M., Marcelis, L.F.M., y Voorrips, R.E. (2006). Variation in relative growth rate and growth traits in wild and cultivated *Capsicum* accessions grown under different temperatures. *The Journal of Horticultural Science and Biotechnology*, 81, 1029–1037. <https://doi.org/10.1080/14620316.2006.11512167>
- Del Valle-Echevarria, A.R., Kantar, M.B., Branca, J., Moore, S., Frederiksen, M.K., Hagen, L., Hussain, T., y Baumler, D.J. (2019). Aeroponic cloning of *Capsicum* spp. *Horticulturae*, 5, 30. <https://doi.org/10.3390/horticulturae5020030>
- Diario Oficial de la Federación, (2018). NORMA Oficial Mexicana NOM-189-SCFI-2017, Chile habanero de la península de Yucatán (*Capsicum chinense* Jacq.)—especificaciones y métodos de prueba. NOM-189-SCFI-2017
- Diario Oficial de la Federación, (2010). Declaratoria general de protección de la denominación de origen “Chile Habanero de la península de Yucatán”, México.
- Diolintzi, A., Panagiotakos, D.B., y Sidossis, L.S. (2019). From Mediterranean diet to Mediterranean lifestyle: a narrative review. *Public Health Nutrition*, 22, 2703–2713. <https://doi.org/10.1017/S1368980019000612>

- Dixon, R.A., Gang, D.R., Charlton, A.J., Fiehn, O., Kuiper, H.A., Reynolds, T.L., Tjeerdema, R.S., Jeffery, E.H., German, J.B., Ridley, W.P., y Seiber, J.N., (2006). Applications of metabolomics in agriculture. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 54, 8984–8994. <https://doi.org/10.1021/jf061218t>
- Dunn, W.B., y Ellis, D.I. (2005). Metabolomics: current analytical platforms and methodologies. *TrAC - Trends in Analytical Chemistry*, 24, 285–294. <https://doi.org/10.1016/j.trac.2004.11.021>
- Falcone-Ferreira, M.L., Rius, S.P., y Casati, P. (2012). Flavonoids: biosynthesis, biological functions, and biotechnological applications. *Frontier in Plant Science*, 3, 1–15. <https://doi.org/10.3389/fpls.2012.00222>
- Fiehn, O. (2001). Combining genomics, metabolome analysis, and biochemical modelling to understand metabolic networks. *Comp. Funct. Genomics*, 2, 155–168. <https://doi.org/10.1002/cfg.82>
- Fiehn, O. (2002). Metabolomics - the link between genotypes and phenotypes. *Plant Molecular Biology*, 48, 155–171. <https://doi.org/10.1023/A:1013713905833>
- Fiehn, O., Kopka, J., Dörmann, P., Altmann, T., Trethewey, R.N. y Willmitzer, L. (2000). Metabolite profiling for plant functional genomics. *Nature Biotechnology*, 18, 1157–1161. <https://doi.org/10.1038/81137>
- Food and Agricultural Organization of the United Nations, 2019. FAOSTAT. Prod. Quant. Chill. peppers, green 2017. Acceso 3-10-19 <http://www.fao.org/faostat/en/#data/QC>.
- Gill, S.S., y Tuteja, N. (2010). Reactive oxygen species and antioxidant machinery in abiotic stress tolerance in crop plants. *Plant Physiology and Biochemistry*, <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2010.08.016>
- Gobierno de México. (2019). Chile Habanero, con Denominación de Origen Fideicomiso de Riesgo Compartido -Gobierno gob.mx. Chile Habanero, con Denominación Orig. Acceso 8-18-2019 <https://www.gob.mx/firco/articulos/chile-habanero-con-denominacion-de-origen?idiom=es>
- González-Estrada, T., Casanova-Chávez, C., Gutiérrez-Pacheco, L., Torres-Tapia, L., Contreras-Martín, F. y Peraza-Sánchez, S. (2010). Chiles cultivados en Yucatán, in: Durán R. y M. Méndez (Eds) (Ed.), *Biodiversidad y Desarrollo Humano En Yucatán*. CICY, Mérida, pp. 342–344.
- Hervert-Hernández, D., Sáyago-Ayerdi, S.G., y Goñi, I. (2010). Bioactive compounds of four hot pepper varieties (*Capsicum annuum* L.), antioxidant capacity, and intestinal bioaccessibility. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 58, 3399–406. <https://doi.org/10.1021/jf904220w>
- Hoekenga, O.A. (2008). Using metabolomics to estimate unintended effects in transgenic crop plants: Problems, promises, and opportunities. *Journal of Biomolecular Techniques*, 19, 159–166
- Hornero-Méndez, D., De Guevara, R.G.L. y Mínguez-Mosquera, M.I. (2000). Carotenoid biosynthesis changes in five red pepper (*Capsicum annuum* L.) cultivars during ripening. Cultivar selection for breeding. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 48, 3857–3864. <https://doi.org/10.1021/jf991020r>
- Howard, L.R., Talcott, S.T., Brenes, C.H., y Villalon, B., (2000). Changes in phytochemical and antioxidant activity of selected pepper cultivars (*Capsicum* species) as influenced by maturity. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 48, 1713–1720. <https://doi.org/10.1021/jf990916t>
- Jaswir, I., Noviendri, D., Hasrini, R.F., y Octavianti, F. (2011). Carotenoids: sources, medicinal properties and their application in food and nutraceutical industry. *Journal of Medicinal Plants Research*, 5, 7119–7131
- Jayaprakasha, G.K., y Patil, B.S. (2016). A metabolomics approach to identify and quantify the phytochemicals in watermelons by quantitative ¹HNMR. *Talanta*, 153, 268–277. <https://doi.org/10.1016/j.talanta.2016.02.060>
- Jeeatid, N., Techawongstien, S., Suriharn, B., Chanthai, S., Bosland, P.W., y Techawongstien, S. (2018). Influence of water stresses on capsaicinoid production in hot pepper (*Capsicum*

- chinense* Jacq.) cultivars with different pungency levels. Food Chemistry. 245, 792–797. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2017.11.110>
- Jeong, W.Y., Jin, J.S., Cho, Y.A., Lee, J.H., Park, S., Jeong, S.W., Kim, Y.-H., Lim, C.-S., Abd El-Aty, A.M., Kim, G.-S., Lee, S.J., Shim, J.-H., y Shin, S.C. (2011). Determination of polyphenols in three *Capsicum annuum* L. (bell pepper) varieties using high-performance liquid chromatography-tandem mass spectrometry: their contribution to overall antioxidant and anticancer activity. Journal of Separation Science, 34, 2967–74. <https://doi.org/10.1002/jssc.201100524>
- Jones, H.G., Flowers, T.J., y Jones, M.B. (1989). Plants under stress : biochemistry, physiology and ecology and their application to plant improvement. Society for Experimental Biology Seminar Series, ix, 257
- Joo, J.I., Kim, D.H., Choi, J.-W., y Yun, J.W. (2010). Proteomic analysis for antiobesity potential of capsaicin on white adipose tissue in rats fed with a high fat diet. Journal of Proteome Research, 9, 2977–87. <https://doi.org/10.1021/pr901175w>
- Jorge, T.F., Rodrigues, J.A., Caldana, C., Schmidt, R., van Dongen, J.T., Thomas-Oates, J., y António, C. (2016). Mass spectrometry-based plant metabolomics: Metabolite responses to abiotic stress. Mass Spectrometry Reviews, <https://doi.org/10.1002/mas.21449>
- Junior, S., Tavares, A.M., Filho, J.T., Zini, C.A., y Godoy, H.T. (2012). Analysis of the volatile compounds of Brazilian chilli peppers (*Capsicum spp.*) at two stages of maturity by solid phase micro-extraction and gas chromatography-mass spectrometry. Food Research International, 48, 98–107. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2012.02.005>
- Khan, Mahmood, T., Ali, M., Saeed, A., Maalik, A., Khan, F.A., Mahmood, T., Ali, M., Saeed, A., y Maalik, A. (2014). Pharmacological importance of an ethnobotanical plant: *Capsicum annuum* L. Natural Product Research, 28, 1267–74. <https://doi.org/10.1080/14786419.2014.895723>
- Khoo, H.E., Prasad, K.N., Kong, K.W., Jiang, Y., y Ismail, A. (2011). Carotenoids and their isomers: Color pigments in fruits and vegetables. Molecules 16, 1710–1738. <https://doi.org/10.3390/molecules16021710>
- Kok, E.J., Keijer, J., Kleter, G.A., y Kuiper, H.A. (2008). Comparative safety assessment of plant-derived foods. Regulatory Toxicology and Pharmacology, 50, 98–113. <https://doi.org/10.1016/j.yrtph.2007.09.007>
- La Barbera, G., Capriotti, A.L., Cavaliere, C., Montone, C.M., Piovesana, S., Samperi, R., Zenezini Chiozzi, R., y Laganà, A. (2017). Liquid chromatography-high resolution mass spectrometry for the analysis of phytochemicals in vegetal-derived food and beverages. Food Research International, 100, 28–52. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2017.07.080>
- Lang, Y., Kisaka, H., Sugiyama, R., Nomura, K., Morita, A., Watanabe, T., Tanaka, Y., Yazawa, S., y Miwa, T. (2009). Functional loss of pAMT results in biosynthesis of capsinoids, capsaicinoid analogs, in *Capsicum annuum* cv. CH-19 Sweet. Plant J. 59, 953–61. <https://doi.org/10.1111/j.1365-313X.2009.03921.x>
- Ledesma-Escobar, C.A., Priego-Capote, F., y Luque De Castro, M.D. (2015). Characterization of lemon (*Citrus limon*) polar extract by liquid chromatography-tandem mass spectrometry in high resolution mode. Journal of Mass Spectrometry, 50, 1196–1205. <https://doi.org/10.1002/jms.3637>
- Ledesma-Escobar, C.A., Priego-Capote, F., Robles-Olvera, y V.J., Luque de Castro, M.D., 2017. Changes in the composition of the polar fraction of Persian lime (*Citrus latifolia*) during fruit growth by LC–QTOF MS/MS analysis. Food Chemistry, 234, 262–268. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2017.05.009>
- Lee, E.J., Jeon, M.S., Kim, B.D., Kim, J.H., Kwon, Y.G., Lee, H., Lee, Y.S., Yang, J.H., y Kim, T.Y. (2010). Capsiate inhibits ultraviolet B-induced skin inflammation by inhibiting Src family kinases and epidermal growth factor receptor signaling. Free Radical Biology and Medicine, 48, 1133–43. <https://doi.org/10.1016/j.freeradbiomed.2010.01.034>

- Lenz, E.M., Bright, J., Knight, R., Wilson, I.D., y Major, H. (2004). Cyclosporin A-induced changes in endogenous metabolites in rat urine: A metabonomic investigation using high field ^1H NMR spectroscopy, HPLC-TOF/MS and chemometrics. *Journal of Pharmaceutical and Biomedical Analysis*, 35, 599–608. <https://doi.org/10.1016/j.jpba.2004.02.013>
- Lightbourn, G.J., Griesbach, R.J., Novotny, J.A., Clevidence, B.A., Rao, D.D., y Stommel, J.R. (2008). Effects of anthocyanin and carotenoid combinations on foliage and immature fruit color of *Capsicum annuum* L. *Journal of Heredity*, 99, 105–11. <https://doi.org/10.1093/jhered/esm108>
- Lindon, J.C., Nicholson, J.K., y Everett, J.R. (1999). NMR Spectroscopy of biofluids, in: *Annual Reports on NMR Spectroscopy*. Academic Press, pp. 1–88. [https://doi.org/10.1016/S0066-4103\(08\)60035-6](https://doi.org/10.1016/S0066-4103(08)60035-6)
- Liu, Y. y Nair, M.G. (2010). Capsaicinoids in the hottest pepper Bhut Jolokia and its antioxidant and antiinflammatory activities. *Natural Product Communications*, 5, 91–4. <https://doi.org/10.1177%2F1934578X1000500122>
- Luo, X.J., Peng, J., y Li, Y.J. (2011). Recent advances in the study on capsaicinoids and capsinoids. *European Journal of Pharmacology*, 650, 1–7. <https://doi.org/10.1016/j.ejphar.2010.09.074>
- Maji, A.K., y Banerji, P. (2016). Phytochemistry and gastrointestinal benefits of the medicinal spice, *Capsicum annuum* L. (Chilli): a review. *Journal of Chemical Information and Modeling*, 13, 97–122. <https://doi.org/10.1515/jcim-2015-0037>
- Mantri, N., Patade, V., Penna, S., Ford, R., y Pang, E. (2012). Abiotic Stress Responses in Plants: Present and Future, in: *Abiotic Stress Responses in Plants*. Springer New York, New York, NY, pp. 1–19. https://doi.org/10.1007/978-1-4614-0634-1_1
- Melgar-Lalanne, G., Hernández-Álvarez, A.J., Jiménez-Fernández, M., Azuara, E., (2016). Oleoresins from *Capsicum spp.*: extraction methods and bioactivity. *Food and Bioprocess Technology*, 1–26. <https://doi.org/10.1007/s11947-016-1793-z>
- Menichini, Federica, Tundis, R., Bonesi, M., Loizzo, M.R., Conforti, F., Statti, G., De Cindio, B., Houghton, P.J., y Menichini, F. (2009). The influence of fruit ripening on the phytochemical content and biological activity of *Capsicum chinense* Jacq. cv Habanero. *Food Chemistry*, 114, 553–560. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2008.09.086>
- Mokhtar, M., Russo, M., Cacciola, F., Donato, P., Giuffrida, D., Riazi, A., Farnetti, S., Dugo, P., y Mondello, L. (2016). Capsaicinoids and carotenoids in *Capsicum annuum* L.: optimization of the extraction method, analytical characterization, and evaluation of its biological properties. *Food Analytical Methods*, 9, 1381–1390. <https://doi.org/10.1007/s12161-015-0311-7>
- Moo-Huchin, V.M., Estrada-Mota, I., Estrada-León, R., Cuevas-Glory, L., Ortiz-Vázquez, E., De Lourdes Vargas Y Vargas, M., Betancur-Ancona, D., y Sauri-Duch, E., (2014). Determination of some physicochemical characteristics, bioactive compounds and antioxidant activity of tropical fruits from Yucatan, Mexico. *Food Chemistry*, 152, 508–515. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2013.12.013>
- Nascimento, P.L.A., Nascimento, T.C.E.S., Ramos, N.S.M., Silva, G.R., Gomes, J.E.G., Falcao, R.E.A., Moreira, K.A., Porto, A.L.F., y Silva, T.M.S. (2014). Quantification, antioxidant and antimicrobial activity of phenolics isolated from different extracts of *Capsicum frutescens* (Pimenta Malagueta). *Molecules*, 19, 5434–5447. <https://doi.org/10.3390/molecules19045434>
- Navarro, J.M., Flores, P., Garrido, C., y Martinez, V. (2006). Changes in the contents of antioxidant compounds in pepper fruits at different ripening stages, as affected by salinity. *Food Chemistry*, 96, 66–73. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2005.01.057>
- Oboh, G., Puntel, R.L., y Rocha, J.B.T. (2007). Hot pepper (*Capsicum annuum*, Tepin and *Capsicum chinense*, Habanero) prevents Fe²⁺-induced lipid peroxidation in brain – *in vitro*. *Food Chemistry*, 102, 178–185. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2006.05.048>
- Oldeman, L.R. (1992). *Global Extent of Soil Degradation*. ISRIC.

- Oliver, S.G., Winson, M.K., Kell, D.B., y Baganz, F. (1998). Systematic functional analysis of the yeast genome. *Trends in Biotechnology*, 16, 373–8. [https://doi.org/10.1016/S0167-7799\(98\)01214-1](https://doi.org/10.1016/S0167-7799(98)01214-1)
- Oz, A.T., y Kafkas, E. (2017). Phytochemicals in Fruits and Vegetables, in: *Superfood and Functional Food - An Overview of Their Processing and Utilization*. InTech. <https://doi.org/10.5772/66987>
- Padilha, H.K.M., Pereira, E.S., Munhoz, P.C., Vizzotto, M., Valgas, R.A., y Barbieri, R.L. (2015). Genetic variability for synthesis of bioactive compounds in peppers (*Capsicum annuum*) from Brazil. *Food of Science and Technology*, 35, 516–523. <https://doi.org/10.1590/1678-457X.6740>
- Palevitch, D., Craker, L.E., 1996. Nutritional and medical importance of red pepper (*Capsicum* spp.). *Journal of Herbs, Spices and Medicinal Plants*, 3, 55–83. https://doi.org/10.1300/J044v03n02_08
- Pandey, K.B., y Rizvi, S.I. (2009). Plant polyphenols as dietary antioxidants in human health and disease. *Oxidative Medicine and Cell Longevity*, 2, 270–8. <https://doi.org/10.4161/oxim.2.5.9498>
- Paulino-Luis, J., 2013. Producción de chile habanero (*Capsicum chinense*) bajo condiciones de campo en la comarca lagunera. Universidad Autónoma Agraria “Antonio Narro.” Tesis de licenciatura
- Peleg, Z., Apse, M.P., Blumwald, E., 2011. Engineering Salinity and Water-Stress Tolerance in crop plants. pp. 405–443. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-387692-8.00012-6>
- Piccolella, S., Crescente, G., Candela, L., y Pacifico, S. (2019). Nutraceutical polyphenols: new analytical challenges and opportunities. *Journal of Pharmaceutical and Biomedical Analysis*, 175, 112774. <https://doi.org/10.1016/j.jpba.2019.07.022>
- Renard, C.M.G.C., 2018. Extraction of bioactives from fruit and vegetables: State of the art and perspectives. *LWT-Food Science and Technology*, 93, 390–395. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2018.03.063>
- Rodríguez-Buenfil, I.M. (2019). Metabolómica del chile habanero de la Península de Yucatán Acceso 8-26-2019 <https://ciatej.mx/el-ciatej/comunicacion/Noticias/Metabolomica-del-Chile-habanero-de-la-Peninsula-de-Yucatan/128>
- Rodríguez-Maturino, A Valenzuela-Solorio, A Troncoso-Rojas, R., González-Mendoza, D Grimaldo-Juarez, O., Aviles-Marin, M., y Cervantes-Diaz, L. (2012). Antioxidant activity and bioactive compounds of Chiltepin (*Capsicum annuum* var. glabriusculum) and Habanero (*Capsicum chinense*): A comparative study. *Journal of Medicinal Plants Research*, 6, 1758–1763. <https://doi.org/10.5897/jmpr11.1576>
- Romano, B., Pagano, E., Montanaro, V., Fortunato, A.L., Milic, N., y Borrelli, F. (2013). Novel insights into the pharmacology of flavonoids. *Phytotherapy Research*, 27, 1588–1596. <https://doi.org/10.1002/ptr.5023>
- Rosa, A., Deiana, M., Casu, V., Paccagnini, S., Appendino, G., Ballero, M., y Dessí, M.A. (2002). Antioxidant activity of capsinoids. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 50, 7396–7401. <https://doi.org/10.1021/jf020431w>
- Rubio, J.S., Rubio, F., Martínez, V., y García-Sánchez, F. (2010). Amelioration of salt stress by irrigation management in pepper plants grown in coconut coir dust. *Agricultural Water Management*, 97, 1695–1702. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2010.05.026>
- Ruiz-Llau, N., Medina Lara, F., y Martínez Estevez, M. (2011). El chile Habanero su origen y usos. *Ciencia julio-sept*, 70–77.
- SAGARPA, (2017). Chiles y pimientos mexicanos, planeación agrícola nacional 2017-2030. México.
- Scalbert, A., Andres-Lacueva, C., Arita, M., Kroon, P., Manach, C., Urpi-Sarda, M., y Wishart, D. (2011). Databases on food phytochemicals and their health-promoting effects. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 59, 4331–4348. <https://doi.org/10.1021/jf200591d>

- Schlueter, A.K., y Johnston, C.S. (2011). Vitamin C: overview and update. *Complementary Health Practice Review*, 16, 49–57. <https://doi.org/10.1177/1533210110392951>
- Schulze, B., y Spittler, D. (2009). Capsaicin: tailored chemical defence against unwanted “frugivores.” *ChemBioChem*, 10, 428–429. <https://doi.org/10.1002/cbic.200800755>
- SECTUR, (2010). Ruta gastronómica el misterio y el origen de los mayas, Rutas gastronómicas.
- Segura, M.R., Gómez, K.R., Ordoñez, Y.M., y Ancona, D.B. (2013). Polyphenols, ascorbic acid and carotenoids contents and antioxidant properties of Habanero pepper (*Capsicum chinense*) fruit. *Food and Nutrition Sciences*, 4, 47–54. <https://doi.org/10.4236/fns.2013.48A006>
- Servicio de Información Agroalimentaria y pesquera (SIAP). (2018). Atlas agroalimentario 2012-2018. México.
- Shanmugaprakash, M., Jayashree, C., Vinothkumar, V., Senthilkumar, S.N.S., Siddiqui, S., Rawat, V., y Arshad, M. (2015). Biochemical characterization and antitumor activity of three phase partitioned L-asparaginase from *Capsicum annuum* L. *Separation and Purification Technology*, 142, 258–267. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2014.12.036>
- Servicio de Información Agroalimentaria y pesquera (SIAP). (2010). Un panorama del cultivo del chile. México.
- Siddiqui, M.W., Momin, C.M., Acharya, P., Kabir, J., Debnath, M.K., y Dhua, R.S. (2013). Dynamics of changes in bioactive molecules and antioxidant potential of *Capsicum chinense* Jacq. cv. Habanero at nine maturity stages. *Acta Physiologiae Plantarum*, 35, 1141–1148. <https://doi.org/10.1007/s11738-012-1152-2>
- Silva, C., Martínez, V., y Carvajal, M. (2008). Osmotic versus toxic effects of NaCl on pepper plants. *Biologia Plantarum*, 52, 72–79. <https://doi.org/10.1007/s10535-008-0010-y>
- Silva, L.R., Azevedo, J., Pereira, M.J., Valentão, P. y Andrade, P.B. (2013). Chemical assessment and antioxidant capacity of pepper (*Capsicum annuum* L.) seeds. *Food and Chemical Toxicology* 53, 240–8. <https://doi.org/10.1016/j.fct.2012.11.036>
- Singh, B., Kumar, A., y Malik, A.K. (2017). Flavonoids biosynthesis in plants and its further analysis by capillary electrophoresis. *Electrophoresis*, 38, 820–832. <https://doi.org/10.1002/elps.201600334>
- Sumner, L.W., Mendes, P., y Dixon, R.A. (2003). Plant metabolomics: large-scale phytochemistry in the functional genomics era. *Phytochemistry*, 62, 817–836. [https://doi.org/10.1016/S0031-9422\(02\)00708-2](https://doi.org/10.1016/S0031-9422(02)00708-2)
- Sweat, K.G., Broatch, J., Borrer, C., Hagan, K., y Cahill, T.M. (2016). Variability in capsaicinoid content and Scoville heat ratings of commercially grown Jalapeño, Habanero and Bhut Jolokia peppers. *Food Chemistry*, 210, 606–612. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2016.04.135>
- Terahara, N. (2015). Flavonoids in foods: a review. *Natural Product Communications*. 10, 521–8. <https://doi.org/10.1177%2F1934578X1501000334>
- Thiele, R., Mueller-Seitz, E., y Petz, M. (2008). Chili pepper fruits: presumed precursors of fatty acids characteristic for capsaicinoids. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 56, 4219–4224. <https://doi.org/10.1021/jf073420h>
- Urrea-López, R. (2014). Análisis metabolómico diferencial en fruto de chile habanero (*Capsicum chinense* Jacq.) durante maduración y en respuesta a condiciones edáficas subóptimas. Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Monterrey
- Vaidyanathan, S., Kell, D.B., y Goodacre, R. (2002). Flow-injection electrospray ionization mass spectrometry of crude cell extracts for high-throughput bacterial identification. *Journal of the American Society for Mass Spectrometry*, 13, 118–128. [https://doi.org/10.1016/S1044-0305\(01\)00339-7](https://doi.org/10.1016/S1044-0305(01)00339-7)
- Villa-Ruano, N., Ramírez-Meraz, M., Méndez-Aguilar, R., Zepeda-Vallejo, L.G., Álvarez-Bravo, A., Pérez-Hernández, N., y Becerra-Martínez, E. (2019). ¹H NMR-based metabolomics profiling of ten new races from *Capsicum annuum* cv. serrano produced in Mexico. *Food Research International*, 119, 785–792. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2018.10.061>

- Villa-Ruano, N., Velásquez-Valle, R., Zepeda-Vallejo, L.G., Pérez-Hernández, N., Velázquez-Ponce, M., Arcos-Adame, V.M., y Becerra-Martínez, E. (2018). ¹H NMR-based metabolomic profiling for identification of metabolites in *Capsicum annuum* cv. mirasol infected by beet mild curly top virus (BMCTV). *Food Research International*, 106, 870–877. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2018.01.065>
- Wahyuni, Y., Ballester, A.-R., Sudarmonowati, E., Bino, R.J., y Bovy, A.G. (2011). Metabolite biodiversity in pepper (*Capsicum*) fruits of thirty-two diverse accessions: variation in health-related compounds and implications for breeding. *Phytochemistry*, 72, 1358–70. <https://doi.org/10.1016/j.phytochem.2011.03.016>
- Wahyuni, Y., Ballester, A.-R., Sudarmonowati, E., Bino, R.J., y Bovy, A.G. (2013a). Secondary metabolites of *Capsicum* species and their importance in the human diet. *Journal of Natural Products*, 76, 783–93. <https://doi.org/10.1021/np300898z>
- Wahyuni, Y., Ballester, A.R., Tikunov, Y., de Vos, R.C.H., Pelgrom, K.T.B., Maharijaya, A., Sudarmonowati, E., Bino, R.J., y Bovy, A.G. (2013b). Metabolomics and molecular marker analysis to explore pepper (*Capsicum* sp.) biodiversity. *Metabolomics*, 9, 130–144. <https://doi.org/10.1007/s11306-012-0432-6>
- Wahyuni, Y., Stahl-Hermes, V., Ballester, A.R., de Vos, R.C.H., Voorrips, R.E., Maharijaya, A., Molthoff, J., Zamora, M.V., Sudarmonowati, E., Arisi, A.C.M., Bino, R.J., y Bovy, A.G. (2014). Genetic mapping of semi-polar metabolites in pepper fruits (*Capsicum* sp.): towards unravelling the molecular regulation of flavonoid quantitative trait loci. *Molecular Breeding*, 33, 503–518. <https://doi.org/10.1007/s11032-013-9967-0>
- Wang, T.Y., Li, Q., y Bi, K. S. (2018). Bioactive flavonoids in medicinal plants: Structure, activity and biological fate. *Asian Journal of Pharmaceutical Sciences*, 13, 12–23. <https://doi.org/10.1016/j.ajps.2017.08.004>
- Watkins, S.M., y German, J.B. (2002). Toward the implementation of metabolomic assessments of human health and nutrition. *Current Opinion in Biotechnology*, 13, 512–516. [https://doi.org/10.1016/S0958-1669\(02\)00363-4](https://doi.org/10.1016/S0958-1669(02)00363-4)
- Wawrzyniak, R., Kosnowska, A., Macioszek, S., Bartoszewski, R., y Markuszewski, M.J. (2018). New plasma preparation approach to enrich metabolome coverage in untargeted metabolomics: plasma protein bound hydrophobic metabolite release with proteinase K. *Scientific Reports*, 8, 9541. <https://doi.org/10.1038/s41598-018-27983-0>
- Whiting, S., Derbyshire, E., Tiwari, B.K. (2012). Capsaicinoids and capsinoids. A potential role for weight management? A systematic review of the evidence. *Appetite*, 59, 341–348. <https://doi.org/10.1016/j.appet.2012.05.015>
- Xiao, J.F., Zhou, B., y Ressom, H.W. (2012). Metabolite identification and quantitation in LC-MS/MS-based metabolomics. *TrAC - Trends in Analytical Chemistry*, 32, 1–14. <https://doi.org/10.1016/j.trac.2011.08.009>
- Yanes, O. (2015). Metabolómica: la ciencia ómica más multidisciplinaria. *SEBBM*, 7–10.
- Yancey, P.H. (2005). Organic osmolytes as compatible, metabolic and counteracting cytoprotectants in high osmolarity and other stresses. *The Journal of Experimental Biology*, 208, 2819–2830. <https://doi.org/10.1242/jeb.01730>
- Zimmer, A.R., Leonardi, B., Miron, D., Schapoval, E., Oliveira, J.R., y Gosmann, G., (2012). Antioxidant and anti-inflammatory properties of *Capsicum baccatum*: from traditional use to scientific approach. *Journal of Ethnopharmacology*, 139, 228–33. <https://doi.org/10.101>

CAPÍTULO 6

Capsaicinoides en chile habanero (*Capsicum chinense* J.) y factores que afectan su producción

Capsaicinoides in habanero pepper (*Capsicum chinense* J.), and factors that affect its production

López-Puc, Guadalupe¹., Ramírez-Sucre, Manuel O¹. y Rodríguez-Buenfil, Ingrid M.^{1*}

¹Centro de Investigación y Asistencia en Tecnología y Diseño del Estado de Jalisco. Subsede Sureste. Tablaje Catastral 31264 Km 5.5 Carr, Sierra Papacal-Chuburná puerto. Parque Científico Tecnológico de Yucatán. CP 97302 Mérida, Yucatán, México). *autor de correspondencia: irodriguez@ciatej.mx

Resumen

El género *Capsicum* produce diferentes metabolitos, de los cuales, los más característicos son los capsaicinoides, los cuales les confieren el picor o pungencia a los frutos, provocando una sensación de ardor que se percibe al comer el chile, que se debe a la presencia de capsaicina, dihidrocapsaicina y otros compuestos capsaicinoides que son sintetizados en los frutos. Los capsaicinoides tienen propiedades de interés para su uso en la industria alimentaria, agrícola y farmacéutica. Diversos estudios en el género *Capsicum* han demostrado que la producción de capsaicinoides puede ser atribuida al genotipo, al ambiente y a la interacción genotipo-ambiente. Debido a esto, el objetivo del presente capítulo es explicar la importancia de los capsaicinoides y los diferentes factores que afectan su producción, comentar los diferentes trabajos que se han desarrollado para la cuantificación de estos metabolitos en los frutos del género *Capsicum* y presentar los resultados que se han obtenido al evaluar el efecto del tipo de suelo en el que se realiza el cultivo del chile habanero en la Península de Yucatán (*K'ankab lu'um* o suelo rojo, *Box lu'um* o suelo negro y *Chich lu'um* o suelo café) y el grado de madurez (color verde o inmaduro y color naranja o maduro), en el contenido de capsaicinoides (capsaicina, dihidrocapsaicina y capsaicinoides totales). Los resultados obtenidos mostraron que la interacción de los dos factores analizados, así como de cada uno de manera individual, tuvieron efecto sobre el contenido de capsaicinoides del chile habanero, siendo el chile habanero maduro (color naranja) cultivado en suelo rojo el que tuvo el valor más alto de capsaicinoides (4.56 mg/g de chile seco).

Palabras clave: Capsaicinoides, *Capsicum chinense*, suelos de Yucatán, madurez

Abstract

The *Capsicum* genus produces different metabolites, of which the most characteristic are capsaicinoids, which give the fruit an itch or pungency, causing a burning sensation that is perceived when eating the chili, which is due to the presence of capsaicin, dihydrocapsaicin and other capsaicinoids compounds that are synthesized in fruits. Capsaicinoids have properties of interest for use in the food, agricultural, and pharmaceutical industries. Various studies in the *Capsicum* genus have shown that capsaicinoid production can be attributed to genotype, environment, and genotype-environment interaction. Due to this, the objective of this chapter is to explain the importance of capsaicinoids and the different factors that affect

their production, comment on the different works that have been carried out for the quantification of these metabolites in the fruits of the *Capsicum* genus and show the results obtained when evaluating the effect of the type of soil in which the cultivation of the habanero pepper is carried out in the Yucatan Peninsula (*K'ankab lu'um* or red soil, *Box lu'um* or black soil and *Chich lu 'um* or brown soil) and the degree of maturity (immature or green color and ripe or orange color), in the content of capsaicinoids (capsaicin, dihydrocapsaicin, and total capsaicinoids). The results obtained showed that the interaction of the two factors analyzed, as well as each one individually, had an effect on the capsaicinoid content of the habanero pepper, with the mature habanero pepper (orange color) grown in red soil with the highest value of capsaicinoids. (4.56 mg / g of dried chili).

Keywords: Capsaicinoids, *Capsicum chinense*, Yucatan soils, maturity.

I. Introducción

1.1 Importancia del género *Capsicum*

El chile es una planta del género *Capsicum* de la familia Solanaceae. El género es nativo de las zonas tropicales de América Central y del Sur (Aranha et al., 2017) e incluye 38 especies de las cuales *Capsicum annuum* (Cayenne, serrano y jalapeño), *Capsicum chinense* (Habanero), y *Capsicum frutescens* (Tabasco) se encuentran entre las más cultivadas (Ramchiary et al., 2014)

Es el segundo vegetal más consumido en el mundo se caracteriza por sus altos niveles de vitamina C (ácido ascórbico), pro-vitamina A (caroteno) y calcio. Los chiles son los frutos más picantes y coloridos del género *Capsicum* pertenecientes a la familia de las solanáceas. Los chiles se utilizan como condimento en una amplia diversidad de platillos alrededor del mundo (Sweat et al., 2016; Duelund y Mouritsen, 2017). Hay evidencia arqueológica del uso de chiles en Mesoamérica por los habitantes del valle de Tehuacán en el Estado de Puebla, que consumieron chiles aproximadamente en 7000 a.C. Los antiguos nativos domesticaron el chile alrededor del 5200–3400 aC, (MacNeish 1964; Perry et al., 2007). El consumo medio de chiles de *Capsicum* es de 2.5 g/persona/día en la India, 5 g/persona/día en Tailandia (Govindarajan y Sathyanarayana., 1991) y 20 g/persona (correspondiente a una pieza de chile) por día en México (López-Carrillo et al., 1994). La ingesta máxima diaria de la capsaicina en los EE. UU y en Europa se estimó en aproximadamente 0.025 mg/kg de peso corporal/día (Govindarajan y Sathyanarayana., 1991), lo que equivale a 1.5 mg/persona/día. Según las estadísticas de producción de los Alimentos y la Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura (FAO), el mayor productor de chiles es China (FAO 2017), que cosecha más de 16 millones de toneladas anuales. En Latinoamérica, México es el más grande productor de chiles con 2.3 millones de toneladas anuales en 2016 (Penagos-Calvete et al., 2019).

La industria de los alimentos está basada en gran parte en la producción de salsas y pastas, que deben tener cierta calidad, en el caso de los productos a base de chile habanero la calidad está en función de la NOM-189-SCFI-2017 siendo el contenido de capsaicinoides que dan el nivel de pungencia uno de las características de calidad. La pungencia es la sensación organoléptica de calor (Harvell y Bosland, 1997), y es la forma en la que mamíferos perciben la capsaicina y otros compuestos relacionados como los vaninilloides (Díaz et al., 2014). El grado de pungencia depende del genotipo de la planta, y se ve afectado

por estímulos externos como la altitud, luz, estrés por sequía, maduración del fruto, entre otros. (Arce-Rodríguez y Ochoa-Alejo., 2019; Gurung et al., 2011; Gurung et al., 2012; Phimchan et al., 2014; Barbero et al., 2016).

A la fecha, no hay evidencia de cómo el factor del suelo donde es cultivada la planta podría afectar el contenido de capsaicinoides del chile habanero de la Península de Yucatán, por lo que los estudios realizados al respecto podrían ayudar a seleccionar la mejor zona para el cultivo y controlar la calidad de su producción en términos del contenido de los capsaicinoides.

1.2 Definición de los capsaicinoides

Los capsaicinoides son los alcaloides responsables de la pungencia en los frutos del chile, los cuales son sintetizados a partir de intermediarios fenilpropanoides y ácidos grasos de cadena corta (Curry et al., 1999; Aranha et al., 2017). Los capsaicinoides únicamente se han descrito en los frutos de las plantas del género *Capsicum*. Se cree que son producidos en los frutos para proteger las semillas de los ataques de patógenos (Haak et al., 2011). Los capsaicinoides tienen usos en la industria farmacéutica, cosmética y agronómica, entre otras (Arce-Rodríguez y Ochoa-Alejo., 2019).

1.3 Estructura de los capsaicinoides

Los dos capsaicinoides mayoritarios en el chile habanero son la capsaicina y la dihidrocapsaicina que difieren en el grado de insaturación del carbono 9 en la cadena lateral. Hay otros capsaicinoides naturales: nordihidrocapsaicina, homodihidrocapsaicina, homocapsaicina, norcapsaicina y nornorcapsaicina, que difieren en el largo de la cadena ($n=7-10$) así como en el grado de insaturación (Curry et al., 1999; Duelund et al. 2017). Las estructuras de los principales capsaicinoides se muestran en la Figura 1.

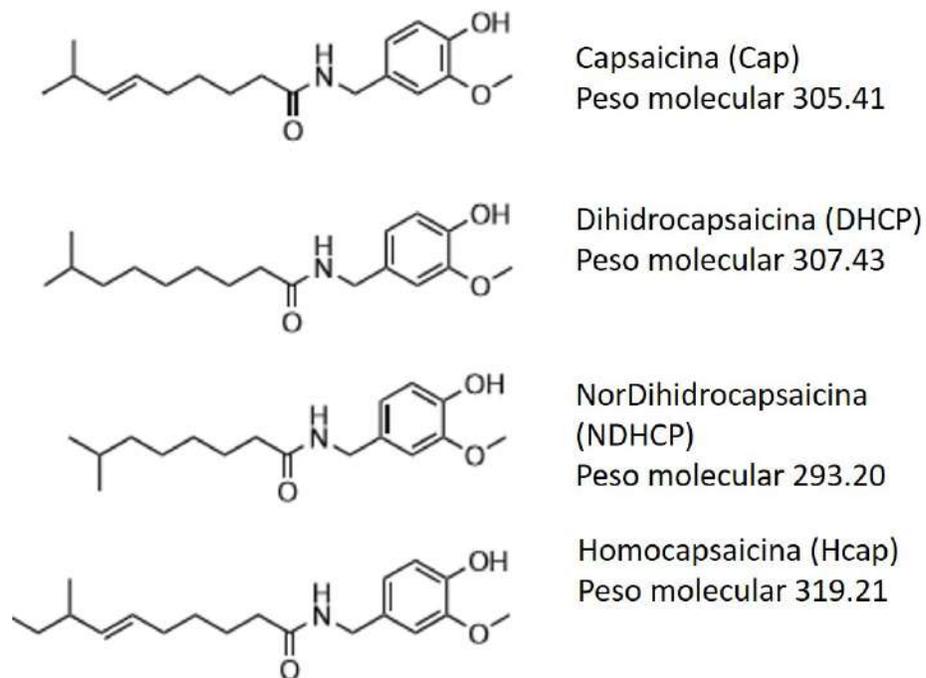


Figura 1. Estructura química y peso molecular de los principales capsaicinoides encontrados en el género *Capsicum* (modificado de Duelund y Mouritsen, 2017).

1.4 Medición de la pungencia

En 1912, el químico Wilbur Scoville desarrolló la escala Scoville que mide el grado de picor de un chile mediante un examen organoléptico. Scoville asignó un valor de cero a los chiles 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 (Cedrón., 2013). En términos de unidades de Scoville (SHU), el número de unidades es igual al número aproximado de veces que el extracto de chile necesitaría ser diluido para que sea imperceptible (Dou et al., 2011). Esta escala Scoville, sigue siendo utilizada para medir y expresar la pungencia de los chiles.

La Tabla 1 describe el grado de picor en unidades Scoville para algunos tipos de chile (Duo et al., 2011). La escala debe entenderse como el factor de dilución que origina que la sustancia en mención deje de picar. Así, para que nuestro gusto no perciba la capsaicina, esta debe ser diluida en un factor de 16 millones, es decir, una solución de capsaicina recién deja de ser picante a concentraciones menores a 62 ppb (partes por billón) (Cedrón., 2013).

Los niveles de pungencia en SHU para los principales capsaicinoides se muestran en la Figura 2 en donde se puede observar que la capsaicina y dihidrocapsaicina son los que tienen el más alto grado de pungencia, y el más bajo la homocapsaicina teniendo aproximadamente la mitad de la pungencia de los anteriormente mencionados.

Tabla 1. Grado de picor en distintos chiles y en capsaicina pura según la escala Scoville

Tipo de chile	Unidades Scoville
Chile campana	0
Chile dulce	<100
Chile poblano	100-500
Chile Anaheim	500-2500
Chile Hungarian wax	4,500-5,000
Chile de cayena	30,000-50,000
Chile Thai	50,000-100,000
Chile habanero	100,000-350,000
Capsaicina	16,000,000

Actualmente la medición organoléptica de Scoville ya no es utilizada, en su lugar se emplean métodos analíticos cuantitativos más precisos para medir los capsaicinoides como la cromatografía líquida de alta presión (HPLC), Cromatografía acoplada a técnicas de detección como ultravioleta (HPLC-UV), detector de diodos (HPLC-DAD), espectrometría de masas (HPLC-MS) e Inyección de flujo con detección coulométrica (lengua electrónica) entre otras, no obstante esto, el nombre Scoville (SHU) de la unidad de medida se ha mantenido . (Al Othman et al., 2011; Rodríguez-Maza et al., 2012; Penagos-Calvete., 2019, Morozova et al., 2019).

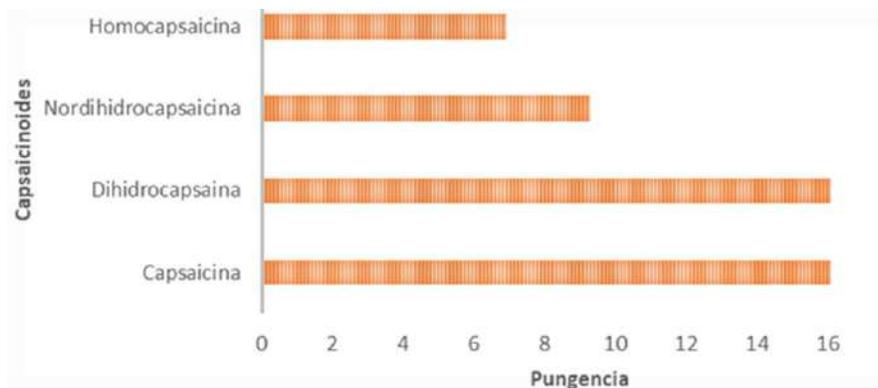


Figura 2. Pungencia de los principales capsaicinoides encontrados en el género *Capsicum* (datos tomados de Duelund y Mouritsen, 2017).

1.5 Ruta metabólica de producción de capsaicinoides

Los capsaicinoides se sintetizan mediante la condensación de Vainillilamina (derivada de la fenilalanina) con un ácido graso de cadena ramificada (valina o precursores de leucina), el paso final combina ambas partes (Figura 3).

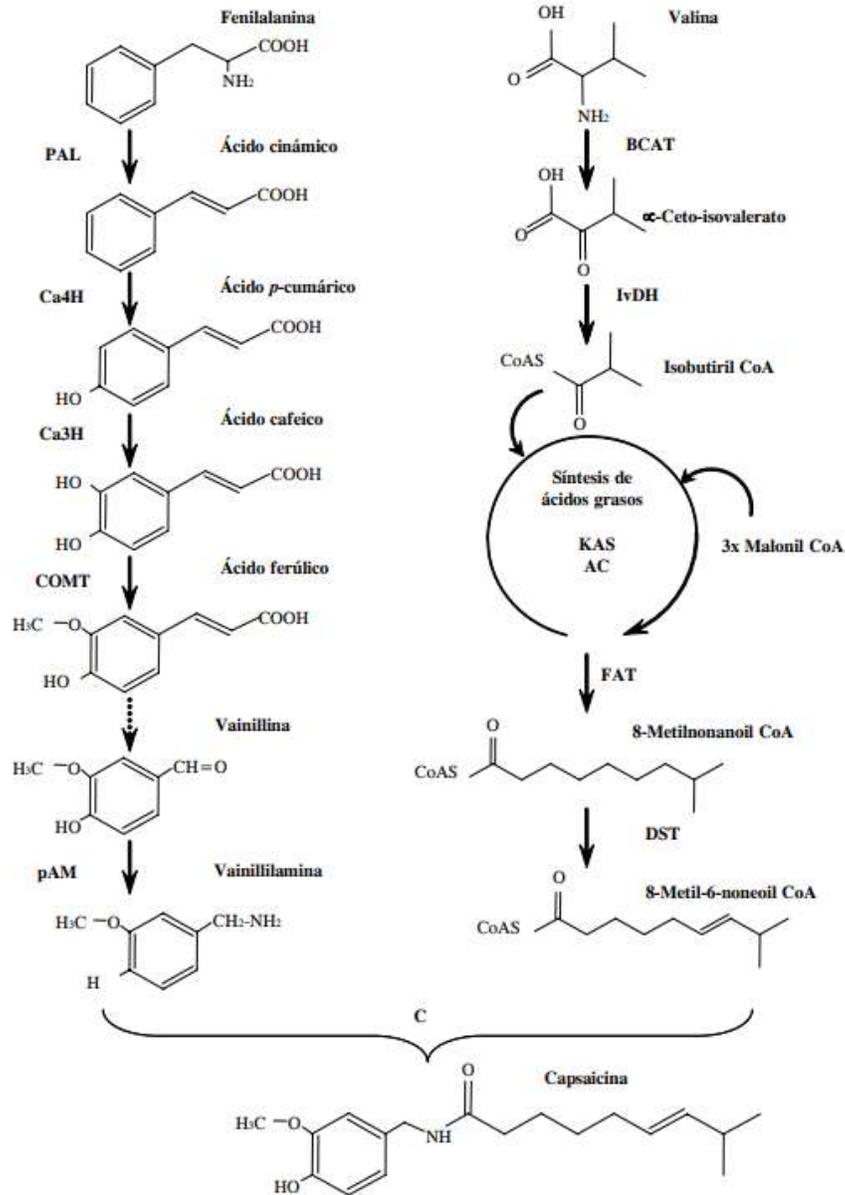


Figura 3. Ruta propuesta para la biosíntesis de los capsaicinoides en el género *Capsicum*. PAL, fenilalanina amonio liasa; Ca4H, ácido cinámico 4 hidroxilasa; Ca3H, cumarato 3 hidroxilasa; COMT, ácido cafeico O-metiltransferasa; pAMT, presunta aminotransferasa de la vainillina; BCAT, aminotransferasa de los aminoácidos ramificados; IvDH, α-isovalerato deshidrogenasa; KAS, β-cetoacil sintasa; ACL, proteína acarreadora de grupos acilo; FAT, tioesterasa; DST, desaturasa; CS, capsaicinoide sintasa. (Figura presentada por Vázquez-Flota et al., 2007 del reporte de Zamski et al., 1987).

Esta ruta metabólica se piensa que ocurre en las membranas de las vacuolas de las células de la placenta del fruto. De esta forma los capsaicinoides se acumulan en las vacuolas y posteriormente se produce una secreción extracelular (Kirschbaum-Titze et al., 2002). También, se encuentran capsaicinoides en otros tejidos de la planta como pericarpio o en las semillas, pero en cantidades mucho menores que en la placenta (Tanaka et al., 2017). El sitio de la síntesis y acumulación de los capsaicinoides ocurre en las células epidérmicas de la placenta (Suzuki et al., 1980).

Dentro de las células, la síntesis de capsaicina ha sido demostrada en la fracción vacuolar y se ha demostrado que los capsaicinoides se acumulan en vacuolas. Los capsaicinoides son secretados extracelularmente en receptáculos entre la capa de la cutícula y la capa epidérmica de la placenta (Suzuki et al., 1980). Estos receptáculos llenos de capsaicinoides aparecen como gotitas de color amarillo pálido a naranja en la placenta de los chiles picantes. Los capsaicinoides comienzan a acumularse aproximadamente 20 días después de la anthesis, y generalmente se mantienen durante el desarrollo del fruto (Suzuki et al., 1980; Sukrasno y Yeoman, 1993).

1.6 Estudios de metabolómica en el género *Capsicum*

La metabolómica es definida como la identificación y cuantificación de moléculas pequeñas (metabolitos) de un sistema biológico en un tiempo específico (Arce-Rodríguez y Ochoa-Alejo, 2019). El contenido de capsaicina en el chile suele variar entre 0.003 hasta 1% en peso (Cedrón, 2013). Estas pequeñas cantidades de capsaicina son suficientes para producir la típica sensación de picor. Cabe destacar que la capsaicina no se encuentra uniformemente distribuida en el fruto por lo que suele concentrarse en las semillas y en la cubierta que las rodea (pericarpio) (Cedrón, 2013).

En el género *Capsicum* la metabolómica se ha utilizado para comparar la biodiversidad en la morfología y los compuestos bioquímicos de 32 accesiones de cuatro especies: *Capsicum annum*, *Capsicum frutescens*, *Capsicum chinense* y *Capsicum baccatum* (Wahyuni et al., 2011). Estas especies fueron seleccionadas por diferentes caracteres morfológicos como el color de la fruta, el sabor y el origen. Mediante cromatografía líquida de alto rendimiento se detectaron metabolitos como los carotenoides y los capsaicinoides. Los resultados mostraron que todas las accesiones no picantes estaban desprovistas de capsaicina; se observó que los niveles de capsaicinoides variaron desde 0.07 hasta 80 mg/100 g de peso fresco en el pericarpio de la fruta. En general, las accesiones picantes acumularon los niveles más altos de capsaicinoides en la placenta. Los análogos de los capsaicinoides no picantes, los capsiatos, se detectaron en niveles bajos en algunas accesiones picantes (Wahyuni et al., 2011).

En *Capsicum annum* se han realizado estudios de cromatografía líquida acoplada con espectrometría de masas (HPLC-MS) para caracterizar metabolitos en la etapa de maduración. Aizat et al. (2014) observaron que durante la maduración del fruto, el almidón, los azúcares y sus derivados se modificaron afectando la abundancia de algunos productos intermedios de la glucólisis y, en consecuencia, otras vías metabólicas que involucran aminoácidos, precursores de color y pungencia como la fenilalanina.

1.7 Factores que afectan la producción de capsaicinoides

El contenido de los capsaicinoides es la más importante característica de calidad del fruto. La concentración de capsaicinoides en las variedades picantes de chiles varía significativamente unas de otras. Las variedades poco picantes de chiles tienen concentraciones de capsaicinoides que van desde los 0.003 % a 0.01 % en peso seco del chile. Las concentraciones de capsaicinoides de las variedades picantes suaves van desde 0.01 % a 0.3 %, y las variedades fuertemente picantes se caracterizan por tener un contenido superior al 0.3 % en capsaicinoides del peso seco total, pudiendo llegar a alcanzarse el 1 %. Esta variación está genéticamente controlada, pero también se ve afectada por variables medio ambientales como la temperatura, la luz, la humedad del suelo (Jeeatid et al., 2017; 2018).

1.7.1 Efecto del genotipo-ambiente en la producción de capsaicinoides

La producción de capsaicinoides se ve afectada por el genotipo, que incluye las especies y el cultivar, el medio ambiente y la interacción genotipo por medio (Zewdie y Bosland, 2000). Esta variación causa un problema para controlar un producto de calidad para las industrias alimentarias y farmacéuticas. Debido a que el genotipo y el ambiente tienen bastante influencia en características como el contenido de capsaicina, es recomendable evaluar la producción de capsaicina de los cultivares de interés en las diferentes zonas donde se desea cultivar. Un ejemplo, del efecto genotipo ambiente es el que reportaron Jeeatid et al., (2018), que cultivaron nueve variedades de chile *C. chinense* en seis ambientes de cultivo (dos en USA y cuatro en Tailandia) bajo condiciones de cultivo protegido, se evaluaron siete cultivares híbridos de pimiento picante y dos cultivares comerciales para la producción de capsaicinoides. Los resultados mostraron diferencias significativas entre cultivares, ambientes e interacciones de cultivar por ambiente para todas las características estudiadas, entre las que se incluyó el contenido de capsaicina.

1.7.2 Efecto de la altitud en la producción de capsaicinoides

Los cultivos de chile exhiben amplias variaciones en la acumulación de capsaicinoides dependiendo de su genotipo y la interacción ambiental. Por lo tanto, Gurung et al., (2011) realizaron experimentos para evaluar las respuestas de capsaicinoides de 14 cultivares de chile en cuatro elevaciones diferentes. Los experimentos se realizaron durante la temporada de lluvias de junio a octubre de 2009 en elevaciones de 200 msnm (Khon Kaen) y 680 msnm (Chiang Mai) en Tailandia y de abril a septiembre de 2010 en elevaciones de 1400 msnm (Lobesa). y 1630 msnm (Kabesa) en Bután. Se observaron diferencias significativas en los cultivares, las localizaciones y las interacciones cultivar por localización. Las grandes variaciones de los efectos de los cultivares indican que es posible seleccionar cultivares para la concentración de capsaicinoides que se adaptan en una amplia gama de entornos.

1.7.3 Efecto de la Luz en la producción de capsaicinoides

La selección de un entorno de cultivo y una variedad que maximice la producción de capsaicinoides es de suma importancia para la industria de extracción de capsaicinoides. La intensidad de la luz es un factor importante en la formación y acumulación de capsaicinoides. Las plantas de chile picante de diferente origen y con diferentes niveles de pungencia muestran diferentes respuestas en una variedad de condiciones de crecimiento (Gurung et al., 2012).

La reducción de la intensidad de la luz puede tener un efecto positivo o negativo en el rendimiento de chile picante y la acumulación de capsaicinoides, según la especie, el grado de sombreado y otras prácticas agrícolas (Rylski y Spigelman, 1986). Jeeatid *et al.* (2017) reportan que la intensidad de la luz que varía entre 700 y 950 $\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ es la mejor para la producción de capsaicinoides.

1.7.4 Efecto de la humedad relativa en la producción de capsaicinoides

Jeeatid *et al.* en (2017) reportaron *C. chinense* Naga Jolokia cultivado en una zona de humedad relativa alta con alta precipitación, se obtuvo un contenido de capsaicinoides 50% más alto que las plantas cultivadas en una zona con baja humedad relativa y precipitación baja). Jeeatid *et al.* (2018) determinaron que una mayor humedad relativa y una menor intensidad de luz dieron lugar a una mayor producción de capsaicinoides.

1.7.5 Efecto del estrés por sequía en la producción de capsaicinoides

En general, las plantas se someten con frecuencia a diferentes tipos de factores estresantes, entre los cuales el estrés por sequía es una condición que frecuentemente enfrentan las plantas que causa cambios fisiológicos, bioquímicos y moleculares (Arce-Rodríguez *et al.*, 2019). El estrés por sequía aumenta la biosíntesis de capsaicinoides, según lo reportado por Phimchan *et al.* (2014), quienes evaluaron la producción de las enzimas fenilalanina amoniaco-liasa (PAL), la cinámica-4-hidroxilasa (C4H), la capsaicina sintasa (CS) y la peroxidasa (POD) que participan en la vía de biosíntesis de los capsaicinoides. Este estudio mostró la acción de estas enzimas bajo estrés por sequía para cultivares de *Capsicum* con niveles de pungencia bajos, medios y altos. En la etapa de floración, las plantas de control se regaron a la capacidad del campo, mientras que las plantas inducidas por la sequía se sometieron a un estrés de sequía gradual. Bajo estrés por sequía, las actividades de las enzimas PAL, C4H, CS y POD aumentaron en comparación con las plantas no estresadas. Un descubrimiento novedoso fue que PAL es la única enzima crítica en la biosíntesis de capsaicinoides bajo estrés por sequía.

1.7.6 Efecto del Dióxido de carbono en la producción de capsaicinoides

El incremento de dióxido de carbono (CO_2) en la atmósfera se cree está provocando el cambio climático y se piensa que esto afectará la producción agrícola. Tomando en cuenta este panorama Garruña Hernández *et al.* (2013) realizaron estudios del efecto del CO_2 en la producción de capsaicinoides, lo cual puede ocasionar cambios organolépticos y nutricionales en este producto alimenticio. En este trabajo determinaron que el CO_2 afecta la acumulación de capsaicinoides en las plantas de chile habanero (*C. chinense*). Las plantas se colocaron en cámaras a diferentes niveles de CO_2 (380, 760 y 1140 $\mu\text{mol} / \text{mol}$), y se recolectaron chiles inmaduros y maduros para cuantificar los capsaicinoides totales. Los chiles maduros mostraron un aumento en los niveles de capsaicinoides, a medida que aumento el CO_2 en la atmósfera. Sin embargo, el contenido de capsaicinoides en los chiles inmaduros inmaduras no aumento por los niveles de CO_2 .

1.7.7 Efecto de la temperatura en la producción de capsaicinoides

Las plantas de chile crecen en regiones tropicales y requieren condiciones de alta temperatura para su desarrollo. En consecuencia, la temperatura óptima de crecimiento está entre 25 y 30 ° C. Los cambios de temperatura afectan muchas funciones fisiológicas y el

desarrollo morfológico (Mateos et al., 2013). Se producen pocos chiles cuando las temperaturas son superiores a 30 ° C durante el día o inferiores a 15 ° C durante la noche y, por lo general, son pequeños. Algunos de los chiles pungentes son más tolerantes a los problemas de amarre de frutos a alta temperatura que el pimiento tipo. Los chiles picantes, como el jalapeño, crecen bien en climas cálidos y con frecuencia pueden producir frutos durante todo el verano. Se cree que el contenido de capsaicinoides varía en condiciones de estrés hídrico o nutricional. Por lo tanto, las altas temperaturas podrían tener efectos importantes sobre el contenido de capsaicina en diferentes etapas de madurez de la fruta en los cultivares de pimiento (Rahman y Inden, 2012).

González-Zamora et al., 2013 realizaron el análisis de capsaicinoides en siete variedades de *C. annuum* (Ancho, cv Matías, de árbol, Chilpetin, Guajillo cv San Luis, Jalapeño cv Don Julio, Puya y Serrano cv Don Diego) cultivados en condiciones de invernadero (sin estrés térmico) y en condiciones de alta temperatura (estrés térmico). Las concentraciones de capsaicinoides totales variaron entre los cultivares, el chile Serrano tuvo las mayores concentraciones de cada uno de los capsaicinoides picantes (capsaicina, dihidrocapsaicina y nordihidrocapsaicina) entre todos los cultivares probados a alta temperatura.

En condiciones de estrés térmico los chiles serranos cv Don Diego tuvieron una concentración de capsaicinoides totales con un valor de 18.05 mg/g de peso seco o 262,916 SHU), mientras que en condiciones de invernadero el Serrano cv Don Diego tuvo una concentración de capsaicinoides totales 6.25 mg/ g de peso seco o 86,427 SHU).

Los resultados mostraron que el contenido de capsaicinoides totales y las unidades Scoville (SHU), para las variedades Serrano, Puya Ancho, Guajillo y pimiento se incrementaron con la temperatura alta, mientras que para las variedades de árbol y Jalapeño disminuyó el contenido de capsaicinoides, esto es último es importante tenerlo en consideración, ya que en este caso el genotipo influye.

1.7.8 Efecto de la fertilización en la producción de capsaicinoides

En experimentos de fertilización se observó que la aplicación de urea como fuente de nitrógeno aumentó significativamente el crecimiento de las plantas y de los frutos manteniendo altos niveles de capsaicina de aproximadamente 12 mg/g de peso seco de fruto (Medina-Lara et al., 2008). En el mismo trabajo se reporta que las plantas bajo estrés, que no tuvieron fertilización (control) tuvieron alto contenido de capsaicina 15 mg/g de peso seco de fruto, y la fertilización con potasio no tuvo efectos positivos sobre el crecimiento o productividad.

1.7.9 Efecto de la maduración del fruto en la producción de capsaicinoides

Barbero et al., 2016, reportaron los porcentajes de diferentes capsaicinoides encontrados en *C. annuum* Peter, y observaron que en el día 10 de maduración los principales capsaicinoides eran dihidrocapsaicina (42.1%), nor-dihidrocapsaicina (28.1 %), y Capsaicina (23.5%). La dihidrocapsaicina fue el principal capsaicinoide hasta el día 50 de la maduración. Después de 50 días, la capsaicina se convirtió en el principal capsaicinoide, mientras que la concentración de dihidrocapsaicina se redujo ligeramente.

La mayoría de los estudios sobre el desarrollo de capsaicinoides en frutos de *Capsicum* han mostrado un aumento en la concentración de capsaicinoides en las primeras etapas del desarrollo del fruto y esto se mantiene durante la maduración, hasta que se alcanza un valor máximo (entre los 40 y 60 días). Después de este tiempo, hay una reversión en la tendencia

de estos resultados, con una reducción marcada en el contenido de capsaicinoides. Este fenómeno está asociado con la presencia de peroxidases, que son capaces de degradar capsaicina y dihidrocapsaicina (Barbero et al., 2016). Morozova et. al., en 2019 realizaron un estudio donde analizaron el contenido de capsaicinoides en 18 muestras de chile habanero crecido en tres diferentes tipos de suelo y con dos estados de madurez en diferentes fechas de cosecha durante el cultivo del chile en invernadero (Tabla 2). Las determinaciones se realizaron empleando dos métodos de cromatografía de líquidos: UHPLC-DAD y HPLC-ECD. El análisis estadístico (ANOVA) demostró que el tipo de suelo y la fecha de cosecha fueron significativos para el contenido de capsaicinoides. Las plantas de chile cultivadas en suelo rojo tuvieron un mayor contenido de capsaicinoides y el contenido de capsaicinoides aumentó a lo largo del cultivo.

Tabla 2. Capsaicinoides totales en muestras de chile habanero crecido en diferentes tipos de suelo. Los resultados fueron analizados por UPLC-DAD y HPLC-ECD y convertidos a unidad Scoville (n=2). (Morozova et al, 2019).

Tiempo de cosecha (DPT)*	Madurez (color)	Suelo	Capsaicinoides (mg/g)	Unidades Scoville	Capsaicinoides (mg/g)	Unidades Scoville
			UHPLC-DAD	SHU*10 ³	HPLC-ECD	SHU*10 ³
160	Inmaduro (verde)	Café	3.7	56	4.1	62
		Negro	3.6	53	4.0	61
		Rojo	4.6	68	4.5	68
	Maduro (Naranja)	Café	4.4	66	4.9	74
		Negro	4.2	63	4.2	63
		Rojo	5.5	83	5.6	84
167	Inmaduro (verde)	Café	5.7	86	5.2	78
		Negro	5.1	77	4.7	71
		Rojo	5.9	89	5.7	86
	Maduro (Naranja)	Café	5.9	89	5.7	86
		Negro	6.6	100	6.5	98
		Rojo	8.2	123	8.7	131
196	Inmaduro (verde)	Café	6.2	93	6.1	92
		Negro	8.2	122	8.1	122
		Rojo	10.8	162	9.4	141
	Maduro (Naranja)	Café	9.0	135	8.6	129
		Negro	7.6	114	7.8	117
		Rojo	9.4	141	9.2	138

*(DPT) Días Posteriores al Trasplante.

1.7.10 Cultivos in vitro para la producción de capsaicinoides

La producción de metabolitos secundarios de alto valor que pueden utilizarse como aditivos alimentarios, nutraceuticos y farmaceuticos ha sido objeto de estudio. Las ventajas de los cultivos de células vegetales sobre la producción agrícola convencional es que son independientes de las variaciones geográficas, estacionales y diversos factores ambientales, se eliminan las influencias biológicas negativas que afectan la producción de metabolitos secundarios en la naturaleza, ofrece un sistema de producción que garantiza el suministro continuo de productos, calidad y rendimiento uniformes Kehie et al., 2016. Tomando en cuenta lo anterior se han propuesto diferentes estrategias para promover la acumulación de capsaicinoides en cultivos *in vitro* (Kehie et al., 2012, 2014, 2016 y Kabita et al., 2019).

En 2012, Kehie et al., estudiaron el efecto de la sacarosa, manitol y NaCl en la producción de capsaicina en cultivos de suspensión celular de *C. chinense*. La adición de sacarosa y manitol en el medio mejoró significativamente la acumulación de capsaicina en cultivos en suspensión de *C. chinense*. En el día 25 de cultivo, el tratamiento con 87.6 mM de sacarosa en el medio, indujo la producción 165 µg de capsaicina por g de peso fresco. En el día 15 del cultivo la adición de 164.68 mM manitol al medio MS indujo la producción de 181.66 µg de por gramo de peso fresco. El uso de 40 mM NaCl en el día 15 de cultivo, favoreció la acumulación de capsaicina a 1,644.1 µg/ g de peso fresco.

Kehie et al., (2014) realizaron la manipulación de estrategias de cultivo para estudiar la influencia del estrés por limitación de nutrientes, el estrés por el pH y la suplementación con precursores en la biosíntesis de capsaicina en suspensión y cultivos de células inmovilizadas de *C. chinense*. Las células se cultivaron en ausencia de uno de los cuatro nutrientes (nitrato de amonio y potasio para el estrés por nitrato y potasio, ortofosfato de potasio dihidrógeno para el estrés por fósforo y sacarosa por estrés por azúcar) para determinar su efecto en la acumulación de capsaicina. Entre los factores de estrés estudiados, el estrés por nitrato mostró una producción máxima de capsaicina el día 20 (505.9 µg/ g de peso fresco) en células inmovilizadas, mientras que en cultivos en suspensión se obtuvo la acumulación máxima (345.5 µg/ g de peso fresco) en el día 10. El pH tuvo influencia en la acumulación de capsaicina; se observó una mayor acumulación de capsaicina (261.6 µg/ g de peso fresco) en cultivos en suspensión a pH 6 en el día 15, mientras que en el caso de cultivos inmovilizados se obtuvo el mayor contenido de capsaicina (433.3 µg/ g de peso fresco) a pH 5 en el día 10. La adición de precursores de capsaicina e intermedios mejoró significativamente la biosíntesis de la capsaicina, la incorporación de vainillina a 100 mM en ambos cultivos celulares inmovilizados y en suspensión dio como resultado un contenido máximo de capsaicina con 499 µg/ g de peso fresco en el día 20 y 1,315.3 µg/ g de peso fresco en el día 10, respectivamente. Entre las diferentes estrategias de cultivo adoptadas para mejorar la biosíntesis de la capsaicina en cultivos celulares de *C. chinense*, las células alimentadas con vainillina dieron como resultado la máxima acumulación de capsaicina. La tasa de producción de capsaicina fue significativamente mayor en las células inmovilizadas en comparación con las células suspendidas.

En 2016 Kehie et al., realizaron cultivos en suspensiones celulares a partir de callos de hipocotilo de *Capsicum chinense* Jacq cv Naga King Chili, para inducir la biosíntesis de capsaicina. La producción eficiente de capsaicina con alto índice de crecimiento se obtuvo al exponer las células a ácido salicílico y moduladores de los canales de calcio en cultivos en suspensión. Los cultivos en fase estacionaria suplementados con 1 mM ácido salicílico tuvieron rendimiento de capsaicina de 567 µg/g de peso fresco. Sin embargo, aun cuando se indujo la producción de capsaicina el ácido salicílico reprimió el crecimiento celular. El crecimiento celular mejoró y el rendimiento de capsaicina fue de 534 µg/g de peso fresco cuando el cultivo celular se suplementó con 0.5 mM de un ionóforo de calcio. En la Tabla 3 se presenta un resumen de los principales factores que afectan la producción de capsaicinoides.

Tabla 3. Principales reportes de factores que influyen en la producción de capsaicinoides en plantas de Chile

Factor estudiado	Especie	Respuesta observada	Autor
Efecto de la fertilización con nitrógeno	<i>Capsicum chinense</i>	Producción de 12 mg/g de capsaicina en frutos secos de plantas fertilizadas con urea como fuente de nitrógeno. Las plantas bajo estrés, que no tuvieron fertilización (control) tuvieron alto contenido de capsaicina 15 mg/g de peso seco de fruto.	Medina-Lara <i>et al.</i> , 2008.
Efecto de la fertilización con Potasio	<i>Capsicum chinense</i>	No tuvo efecto en la producción de capsaicina de frutos en plantas fertilizadas con potasio.	Medina-Lara <i>et al.</i> , 2008.
Efecto de la Altitud	<i>Capsicum annuum</i>	Hubo una correlación significativa entre los contenidos de capsaicina y capsaicinoides totales con las diferentes elevaciones. Los cultivares de frutos pequeños con altamente pungentes mostraron una producción constante de capsaicinoides en diferentes ambientes.	Gurung <i>et al.</i> , 2011.
Efecto de la Humedad relativa	<i>Capsicum chinense</i>	A mayor humedad relativa mayor producción de capsaicinoides.	Jeeatid <i>et al.</i> , 2018.
Efecto del estrés por sequía	<i>Capsicum chinense</i> ; <i>Capsicum annuum</i>	El estrés por sequía aumenta la biosíntesis de capsaicinoides. Se cuantificaron las actividades de las enzimas fenilalanina amonioc-liasa (PAL), la cinámica-4-hidroxilasa (C4H), la capsaicina sintasa (CS) y la peroxidasa (POD). Demostrando que PAL es la única enzima crítica en la biosíntesis de capsaicinoides bajo estrés por sequía.	Phimchan <i>et al.</i> , 2014.
Efecto de la temperatura	<i>Capsicum annuum</i>	Comportamiento heterogéneo respecto al contenido de capsaicinoides a alta temperatura.	González-Zamora <i>et al.</i> , 2013.

Efecto del tiempo de maduración del fruto	<i>Capsicum annuum</i>		Después de 50 días de maduración del fruto, la capsaicina se convirtió en el principal capsaicinoide, mientras que la concentración de dihidrocapsaicina se redujo ligeramente. Esto va relacionado a la presencia de enzimas peroxidasas, que son capaces de degradar capsaicina y dihidrocapsaicina.	Barbero <i>et al.</i> , 2016.
Efecto de la concentración de dióxido de carbono (CO ₂) en la atmosfera	<i>Capsicum chinense</i>		Los chiles maduros mostraron un aumento en los niveles de capsaicinoides al aumentar el CO ₂ en la atmósfera; Mientras que los chiles inmaduros no se vieron afectadas por los niveles de CO ₂	Garruña Hernández <i>et al.</i> , 2013.
Efecto de la interacción genotipo ambiente	<i>Capsicum chinense</i>		La producción de capsaicina depende de la interacción genotipo-ambiente.	Jeeatid <i>et al.</i> , 2018.
Exposición a la luz	<i>Capsicum chinense</i>		Incremento en la acumulación de capsaicinoides por efecto de la luz	Jeeatid <i>et al.</i> , 2017.
Estrés osmótico por NaCl	<i>Capsicum chinense</i> Jacq.cv. King Chili	Naga	El estrés osmótico generado por NaCl permite mejorar la producción de capsaicina en suspensiones celulares	Kehie <i>et al.</i> , 2012.
Efecto de estrés por nutrientes, estrés de pH y la suplementación con precursores en la biosíntesis de capsaicina en suspensión y cultivos de células inmovilizadas	<i>Capsicum chinense</i> Jacq.cv. King Chili	Naga	100 µM de Vanililamina en suspensiones celulares indujo la producción 450.5 µg de capsaicina por g de peso fresco.	Kehie <i>et al.</i> , 2014.
Efecto de la fenilalanina y fenilpropanoides sobre la acumulación de capsaicinoides	<i>Capsicum annuum</i>		El mayor contenido total de capsaicinoides se registró en las células cultivadas en presencia de 100 µM de vainillina, 142.61 µg/g de peso fresco	Núñez-Palenius y Alejo., 2005.

Efecto de la adición de ácido salicílico y calcio en células en suspensión sobre la acumulación de capsaicinoides	<i>Capsicum chinense</i> Jacq.cv. King Chili	Naga	1 mM ácido salicílico y 0.5 mM de un ionoforo de calcio inducen la producción de capsaicina (534 µg/g de peso fresco).	Kehie <i>et al.</i> , 2016.
---	--	------	--	-----------------------------

II. Materiales y métodos

2.1 Evaluación del efecto del tipo de suelo y grado de madurez en la concentración de capsaicinoides en chile habanero.

Como parte del proyecto titulado: Análisis de los cambios metabólicos durante el desarrollo del fruto *Capsicum chinense* Jaq cultivado en diferentes tipos de suelos financiado por el fondo de Ciencia Básica del CONACYT, se desarrollaron cinco cultivos de *Capsicum chinense* en el invernadero de la unidad sureste del CIATEJ, de marzo de 2017 a diciembre de 2019. En este capítulo se presentan los resultados del contenido de capsaicinoides del cultivo cuatro (2018) a los 146 días posteriores al trasplante (DPT) con fecha del 7 de agosto de 2018.

2.1.2 Secado de la muestra

Las muestras de chile de diferente grado de madurez y provenientes de diferentes suelos de Yucatán (rojo, negro y café), fueron secadas en horno a 65°C por 72 h y posterior al secado de los chiles, se realizó la molienda de ellos en un mortero y se pasaron por una malla de # 35 para obtener los polvos de cada tipo de muestra con un tamaño de partícula de 500 µm, los cuales fueron almacenados a temperatura ambiente en bolsas plásticas protegidas de la luz con papel aluminio.

2.1.3 Extracción de capsaicinoides

Se pesaron 50 mg de cada muestra de chile y se colocaron en tubos cónicos de 15 mL, posteriormente se agregaron 4 mL de una mezcla agua:acetonitrilo (80:20) y se agitó con ayuda de un vortex, para su homogenización. Se sonicaron los tubos por 20 minutos a 42 KHz, para finalmente filtrar la muestra con un filtro de membrana de nylon con un tamaño de poro de 0.22 µm y depositarlo en frascos de cromatografía de color ámbar.

2.1.4 Determinación de capsaicinoides por UPLC

Se utilizó un equipo de cromatografía de líquidos de ultra presión (UHPLC) Acquity H Class (Waters, USA) con un detector de arreglo de diodos (DAD) y una columna Acquity UPLC HSS C18 (100 Å, 1.8 µm, 2.1 x 50 mm) (Waters, USA).

Las condiciones cromatográficas para el análisis de la capsaicina e dihidrocapsaicina, consistieron en una fase móvil isocrática conformada por Fase A: Acetonitrilo y Fase B: Agua con ácido fórmico al 0.1%, en una proporción de 60:40 de A:B, la velocidad de flujo fue de 0.2 mL/min, la temperatura de la columna de 27 °C, el volumen de inyección 2 µL y la longitud

de onda fue de 280 nm. Los capsaicinoides totales fueron reportados como la suma de la capsaicina y la dihidrocapsaicina.

2.1.5 Diseño factorial 3 x 2.

Se realizó un diseño factorial 3 x 2 con la finalidad de evaluar el efecto de dos factores sobre la concentración de capsaicinoides totales, siendo el factor A, el tipo de suelo y el factor B el grado de madurez, los niveles de A fueron: rojo (-1), café (0) y negro (+1), mientras que los niveles del factor B fueron: Verde ó inmaduro (-1) y Naranja ó maduro (+1).

2.1.6 Análisis de datos

Se realizó un análisis de varianza (ANOVA) de dos vías con un nivel de confianza del 95 % empleando el paquete estadístico Statgrafics Centurion XVII.II-X64 (Statistical Graphics Corp, USA)

III. Análisis y discusión de resultados

En la figura 4 se puede observar el cromatograma de los estándares de capsaicina y dihidrocapsaicina (Figura 4a) y el contenido de éstos capsaicinoides en muestras de chile habanero maduro cultivado en diferentes suelos (Figura 4b). Los chiles cultivados en suelo rojo son lo que tuvieron el mayor contenido de capsaicina y dihidrocapsaicina, siendo la capsaicina la que estuvo en mayor proporción en las muestras de chile (*Capsicum chinense*).

En la Tabla 4 se presentan los resultados obtenidos para el contenido de los principales capsaicinoides (capsaicina y dihidrocapsaicina) así como el contenido de capsaicinoides totales en chiles habaneros inmaduros (color verde) y maduros (color naranja) en diferentes tipos de suelo del estado de Yucatán cosechados a los 146 DPT, donde se puede observar que el mayor contenido de capsaicinoides se obtuvo en los chiles cultivados en suelo rojo y de entre éstos, el mayor contenido de capsaicinoides se obtuvo en los chiles maduros (color naranja).

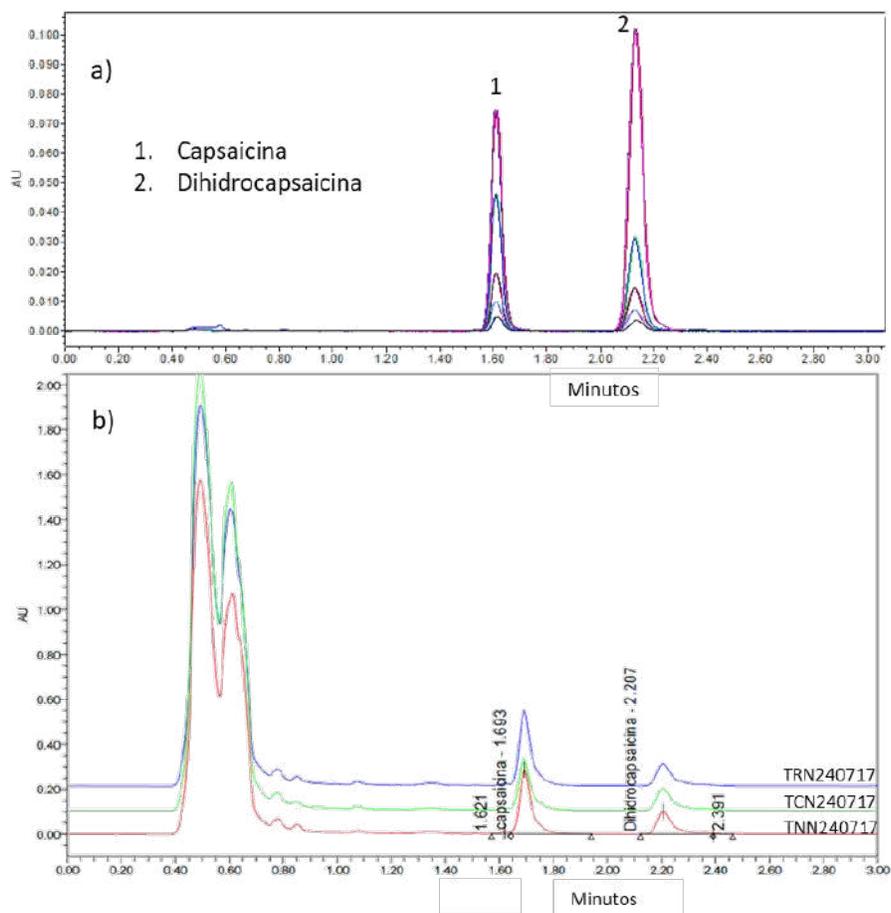


Figura 4. Cromatogramas: UPLC-DAD con columna Acquity UPLC HSS C18 (100 Å, 1,8 mm, 2,1 x 50 mm). a) estándares de capsaicinoides y b) capsaicinoides en muestras de chile habanero maduro provenientes de suelo rojo (TRN240717), suelo café (TCN240717) y suelo negro (TNN240717). Método: velocidad de flujo de 0.2 ml / min. Temperatura de columna: 27 ° C. Fase móvil A: acetonitrilo, Fase B: Ac. Fórmico (0.1 %.). Proporción 60% de A con 40% de B. Volumen de inyección 2 µL y longitud de onda de 280 nm.

Tabla 4. Contenido de capsaicinoides en chiles habaneros con diferente grado de madurez cultivados en diferentes suelos de Yucatán (n=2).

Tipo de Suelo	Grado de madurez	Capsaicina (mg g ⁻¹)	Dihidrocapsaicina (mg g ⁻¹)	Capsaicinoides Totales (mg g ⁻¹)
Roja	Verde	1.99 ± 0.0001 ^a	0.64 ± 0.0001 ^a	2.63 ± 0.0001 ^a
Café	Verde	1.12 ± 0.0001 ^c	0.40 ± 0.0001 ^c	1.52 ± 0.0001 ^c
Negra	Verde	1.62 ± 0.0001 ^b	0.54 ± 0.0001 ^b	2.17 ± 0.0001 ^b
Roja	Naranja	3.52 ± 0.0001 ^e	1.04 ± 0.0001 ^e	4.56 ± 0.0001 ^e
Café	Naranja	2.77 ± 0.0001 ^d	0.79 ± 0.0001 ^d	3.56 ± 0.0001 ^d
Negra	Naranja	2.68 ± 0.0001 ^d	0.87 ± 0.0001 ^d	3.54 ± 0.0001 ^d

Nota: Diferentes letras en la misma columna indica diferencias estadísticas significativas (P ≤ 0.05).

Los análisis estadísticos pusieron de manifiesto que existe un efecto significativo sobre el contenido de capsaicina, dihidrocapsaicina y de capsaicinoides totales en mg/g de chile

seco, debido a la interacción de los factores analizados (tipo de suelo y grado de madurez) así como de cada uno de los factores individuales. La Figura 4 muestra el resultado de la interacción madurez y tipo de suelo en el contenido de capsaicinoides totales donde se puede observar claramente que los chiles maduros (color naranja) independientemente del tipo de suelo donde fueron cultivados, son los que presentan mayor contenido de capsaicinoides totales, y comparando los suelos donde fueron cultivados, el suelo rojo es donde se observa el mayor contenido de capsaicinoides. Otros autores han obtenido resultados similares, Morozova et.al, 2019 encontraron que los chiles de plantas cultivadas en suelo rojo tuvieron un mayor contenido de capsaicinoides (9.5 mg g^{-1}) en comparación con los otros suelos. Rodríguez-Rodríguez, en 2019, determinó que la mayor cantidad de capsaicinoides totales (empleando un método espectrofotométrico) se obtuvo en chiles maduros de color naranja provenientes del suelo negro y que el contenido de capsaicinoides depende principalmente del grado de madurez y los días posteriores al trasplante (DPT) de la cosecha, sin que se descarte la influencia del tipo de suelo.

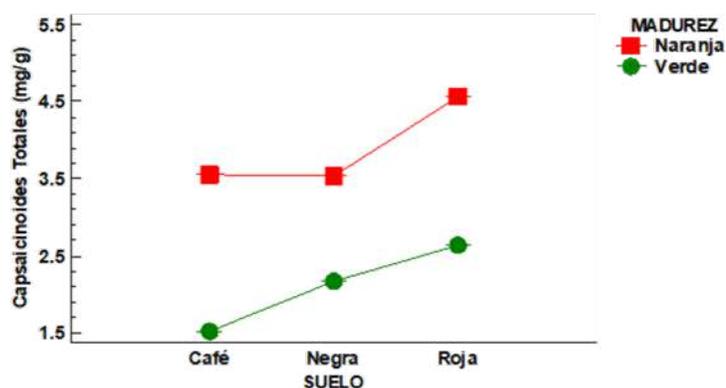


Figura 4. Grafica de interacción del grado de madurez y el tipo de suelo donde fueron cultivados en relación al contenido de capsaicinoides totales en chile habanero.

Diversos autores Gurung *et al.*, (2012); Meckelmann *et al.*, (2015) y Yáñez *et al.*, (2015) han determinado el contenido de capsaicinoides de diversas especies y variedades de *Capsicum* por medio de cromatografía de líquidos (HPLC) los resultados que obtuvieron fueron 6.91-16.65, 0.01-15.15 y 11.34 mg g^{-1} respectivamente, siendo la especie de *Capsicum chinense* la que presentó el mayor contenido de capsaicinoides. Los resultados obtenidos en este trabajo son similares a lo reportado por Meckelmann *et al.*, (2015).

IV. Conclusiones

Los capsaicinoides son los metabolitos presentes en el género *Capsicum* que le confieren la pungencia a los chiles siendo los mayoritarios la capsaicina y la dihidrocapsaicina que son sintetizados en los frutos. El grado de pungencia depende del genotipo de la planta, y se ve afectado por estímulos externos como la altitud, luz, estrés por sequía, maduración del fruto, entre otros. Experimentalmente se determinó que existió un efecto significativo sobre las concentraciones de capsaicina, dihidrocapsaicina y capsaicinoides totales en mg g^{-1} de chile seco (*Capsicum chinense* jacq.), debido a la interacción de los factores analizados: tipo de suelo donde se desarrolló la planta de chile habanero y el grado de madurez del chile, así

como de cada uno de los factores individuales. Los chiles crecidos en suelo rojo fueron los que tuvieron los más altos contenidos de capsaicinoides con valores de 2.63 y 4.56 mg g⁻¹ de chile seco para el chile inmaduro (verde) y maduro (naranja) respectivamente, siendo este último el que tuvo la más alta concentración de capsaicinoides.

V. Referencias

- Aizat, W. M., Dias, D. A., Stangoulis, J. C., Able, J. A., Roessner, U., & Able, A. J. (2014). Metabolomics of *Capsicum* ripening reveals modification of the ethylene related-pathway and carbon metabolism. *Postharvest biology and technology*, 89, 19-31.
- Al Othman, Z. A. A., Ahmed, Y. B. H., Habila, M. A., & Ghafar, A. A. (2011). Determination of capsaicin and dihydrocapsaicin in *Capsicum* fruit samples using high performance liquid chromatography. *Molecules*, 16(10), 8919-8929.
- Aranha, B. C., Hoffmann, J. F., Barbieri, R. L., Rombaldi, C. V., & Chaves, F. C. (2017). Untargeted metabolomic analysis of *Capsicum* spp. by GC-MS. *Phytochemical Analysis*, 28(5), 439-447.
- Barbero, G. F., de Aguiar, A. C., Carrera, C., Olachea, Á., Ferreiro-González, M., Martínez, J., & Barroso, C. G. (2016). Evolution of capsaicinoids in piper pepper (*Capsicum annuum* var. *annuum*) during fruit ripening. *Chemistry & biodiversity*, 13(8), 1068-1075.
- Cedrón J.C. (2013). La molécula destacada: La capsaicina. *Revista de Química PUCP*, 2013, vol. 27, nº 1-2.
- Curry, J., Aluru, M., Mendoza, M., Nevarez, J., Melendrez, M., & O'Connell, M. A. (1999). Transcripts for possible capsaicinoid biosynthetic genes are differentially accumulated in pungent and non-pungent *Capsicum* spp. *Plant Science*, 148 (1), 47-57.
- Díaz-Laviada, I., & Rodríguez-Henche, N. (2014). The potential antitumor effects of capsaicin. In *Capsaicin as a Therapeutic Molecule* (pp. 181-208). Springer, Basel.
- Dou, D., Ahmad, A., Yang, H., & Sarkar, F. H. (2011). Tumor cell growth inhibition is correlated with levels of capsaicin present in hot peppers. *Nutrition and cancer*, 63(2), 272-281.
- Duelund, L., & Mouritsen, O. G. (2017). Contents of capsaicinoids in chillies grown in Denmark. *Food chemistry*, 221, 913-918.
- Govindarajan, V.S.; Sathyanarayana, M.N. *Capsicum*: Production, technology, chemistry, and quality. Part V. Impact on physiology, pharmacology, nutrition, and metabolism; structure, pungency, pain, and desensitization sequences. *Crit. Rev. Food Sci. Nutr.* 1991, 29, 435-473.
- Gurung, T., Techawongstien, S., Suriharn, B., & Techawongstien, S. (2011). Impact of Environments on the Accumulation of Capsaicinoids in *Capsicum* spp. *HortScience*, 46 (12), 1576-1581.
- Gurung, T., Techawongstien, S., Suriharn, B., & Techawongstien, S. (2012). Stability analysis of yield and capsaicinoids content in chili (*Capsicum* spp.) grown across six environments. *Euphytica*, 187(1), 11-18.
- Haak, D. C., McGinnis, L. A., Levey, D. J., & Tewksbury, J. J. (2011). Why are not all chillies hot? A trade-off limits pungency. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*, 279(1735), 2012-2017.
- Harvell, K. P., & Bosland, P. W. (1997). The environment produces a significant effect on pungency of chiles. *HortScience: a publication of the American Society for Horticultural Science (USA)*.

- Jeeatid, N., Suriharn, B., Techawongstien, S., Chanthai, S., Bosland, P. W., & Techawongstien, S. (2018). Evaluation of the effect of genotype-by-environment interaction on capsaicinoid production in hot pepper hybrids (*Capsicum chinense* Jacq.) under controlled environment. *Scientia horticulturae*, 235, 334-339.
- Jeeatid, N., Techawongstien, S., Suriharn, B., Bosland, P. W., & Techawongstien, S. (2017). Light intensity affects capsaicinoid accumulation in hot pepper (*Capsicum chinense* Jacq.) cultivars. *Horticulture, Environment, and Biotechnology*, 58(2), 103-110.
- Kabita, K. C., Sharma, S. K., & Sanatombi, K. (2019). Analysis of capsaicinoid biosynthesis pathway genes expression in callus cultures of *Capsicum chinense* Jacq. cv.'Umorok'. *Plant Cell, Tissue and Organ Culture (PCTOC)*, 1-9.
- Kehie, M., Kumaria, S., & Tandon, P. (2012). Osmotic stress induced-capsaicin production in suspension cultures of *Capsicum chinense* Jacq. cv. Naga King Chili. *Acta physiologiae plantarum*, 34(5), 2039-2044.
- Kehie, M., Kumaria, S., & Tandon, P. (2014). Manipulation of culture strategies to enhance capsaicin biosynthesis in suspension and immobilized cell cultures of *Capsicum chinense* Jacq. cv. Naga King Chili. *Bioprocess and biosystems engineering*, 37(6), 1055-1063.
- Kehie, M., Kumaria, S., & Tandon, P. (2016). Biotechnological enhancement of capsaicin biosynthesis in cell suspension cultures of Naga King Chili (*Capsicum chinense* Jacq.). *Bioprocess and biosystems engineering*, 39(1), 205-210.
- Kirschbaum-Titze, P., Mueller-Seitz, E., & Petz, M. (2002). Pungency in paprika (*Capsicum annuum*). 2. Heterogeneity of capsaicinoid content in individual fruits from one plant. *Journal of agricultural and food chemistry*, 50(5), 1264-1266.
- López-Carillo, L., Avila, M. H., & Dubrow, R. (1994). Chili pepper consumption and gastric cancer in Mexico: a case-control study. *American journal of epidemiology*, 139(3), 263-271.
- MacNeish, R. S. (1964). Ancient mesoamerican civilization. *Science*, 143(3606), 531-537.
- Mateos, R., Jiménez, A., Román, P., Romojaró, F., Bacarizo, S., Leterrier, M., & Palma, J. (2013). Antioxidant systems from pepper (*Capsicum annuum* L.): involvement in the response to temperature changes in ripe fruits. *International Journal of Molecular Sciences*, 14(5), 9556-9580.
- Meckelmann, S. W., Riegel, D. W., van Zonneveld, M., Ríos, L., Peña, K., Mueller-Seitz, E., & Petz, M. (2015). Capsaicinoids, flavonoids, tocopherols, antioxidant capacity and color attributes in 23 native Peruvian chili peppers (*Capsicum* spp.) grown in three different locations. *Eur Food Res Technol*, 273-283.
- Melgar-Lalanne, G., Hernández-Álvarez, A. J., Jiménez-Fernández, M., & Azuara, E. (2017). Oleoresins from *Capsicum* spp.: Extraction methods and bioactivity. *Food and bioprocess technology*, 10(1), 51-76.
- Morozova Ksenia, Rodríguez-Buenfil, Ingrid, López-Domínguez Cindy, Ramírez-Sucre Manuel Ballabio, Davide, Scampicchio Matteo. (2019). Capsaicinoids in Chili Habanero by Flow Injection with Coulometric Array Detection. *Electroanalysis*, 31: 844-850.
- Norma Oficial Mexicana NOM-189-SCFI-2017, Chile habanero de la Península de Yucatán (*Capsicum chinense* Jacq.)—Especificaciones y métodos de prueba. Diario Oficial de la Federación. Miércoles 21 de Febrero de 2018.
- Penagos-Calvete, D., Guauque-Medina, J., Villegas-Torres, M. F., & Montoya, G. (2019). Analysis of triacylglycerides, carotenoids and capsaicinoids as disposable

- molecules from *Capsicum* agroindustry. Horticulture, Environment, and Biotechnology, 1-12.
- Perry, L., Dickau, R., Zarrillo, S., Holst, I., Pearsall, D. M., Piperno, D. R., & Raymond, J. S. (2007). Starch fossils and the domestication and dispersal of chili peppers (*Capsicum spp.* L.) in the Americas. *Science*, 315(5814), 986-988.
- Phimchan, P., Chanthai, S., Bosland, P. W., & Techawongstien, S. (2014). Enzymatic changes in phenylalanine ammonia-lyase, cinnamic-4-hydroxylase, capsaicin synthase, and peroxidase activities in *Capsicum* under drought stress. *Journal of agricultural and food chemistry*, 62(29), 7057-7062.
- Rahman, M. J., & Inden, H. (2012). Effect of nutrient solution and temperature on capsaicin content and yield contributing characteristics in six sweet pepper (*Capsicum annuum* L.) cultivars. *Journal of Food, Agriculture & Environment*, 10 (1 part 1), 524-529.
- Ramchiary, N., Kehie, M., Brahma, V., Kumaria, S., & Tandon, P. (2014). Application of genetics and genomics towards *Capsicum* translational research. *Plant biotechnology reports*, 8(2), 101-123.
- Rodríguez-Maza, M. J., Garcés-Claver, A., Park, S. W., Kang, B. C., & Arnedo-Andrés, M. S. (2012). A versatile PCR marker for pungency in *Capsicum* spp. *Molecular breeding*, 30(2), 889-898.
- Rodríguez Rodríguez J.D. (2019). Evaluación del contenido de capsaicinoides y parámetros de color en frutos de *Capsicum chinense* jacq., cultivados en tres tipos de suelos de Yucatán. Tesis de Ingeniero Bioquímico. Instituto Tecnológico de Acapulco.
- Rylski, I., & Spigelman, M. (1986). Effect of shading on plant development, yield and fruit quality of sweet pepper grown under conditions of high temperature and radiation. *Scientia Horticulturae*, 29(1-2), 31-35.
- Scoville, W. L. (1912). Note on Capsicums. *The Journal of the American Pharmaceutical Association* (1912), 1(5), 453–454. doi:10.1002/jps.3080010520.
- Sukrasno, N., & Yeoman, M. M. (1993). Phenylpropanoid metabolism during growth and development of *Capsicum frutescens* fruits. *Phytochemistry*, 32(4), 839-844.
- Suzuki, T., Fujiwake, H., & Iwai, K. (1980). Intracellular localization of capsaicin and its analogues, capsaicinoid, in *Capsicum* fruit. Microscopic investigation of the structure of the placenta of *Capsicum annuum* var. *annuum* cv. Karayatsubusa. *Plant and Cell Physiology*, 21(5), 839-853.
- Sweat, K. G., Broatch, J., Borrer, C., Hagan, K., & Cahill, T. M. (2016). Variability in capsaicinoid content and Scoville heat ratings of commercially grown Jalapeño, Habanero and Bhut Jolokia peppers. *Food chemistry*, 210, 606-612.
- Tanaka, Y., Nakashima, F., Kirii, E., Goto, T., Yoshida, Y., & Yasuba, K. I. (2017). Difference in capsaicinoid biosynthesis gene expression in the pericarp reveals elevation of capsaicinoid contents in chili peppers (*Capsicum chinense*). *Plant cell reports*, 36(2), 267-279.
- Vázquez-Flota F., Miranda-Ham M. de L., Monforte-González, M., Gutiérrez-Carbajal G., Velázquez-García C. y Nieto- Pelayo Y. (2007). La biosíntesis de capsaicinoides, el principio picante del chile. *Rev. Fitotec. Mex.* Vol. 30 (4): 353 – 360.
- Wahyuni Y, Ballester A-R, Sudarmonowati E, Bino RJ, Bovy AG (2011) Metabolite biodiversity in pepper (*Capsicum*) fruits of thirty-two diverse accessions: variation

in health-related compounds and implications for breeding. *Phytochemistry* 72:1358–1370.

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. *La Granja: Revista de Ciencias de la Vida*, 12-32.

Zamski, E., Shoham, O., Palevitch, D., & Levy, A. (1987). Ultrastructure of capsaicinoid-secreting cells in pungent and nonpungent red pepper (*Capsicum annuum* L.) cultivars. *Botanical Gazette*, 148(1), 1-6.

Zewdie, Y., & Bosland, P. W. (2000). Evaluation of genotype, environment, and genotype-by-environment interaction for capsaicinoids in *Capsicum annuum* L. *Euphytica*, 111(3), 185-190.

CAPÍTULO 7

Polifenoles en chile habanero (*Capsicum chinense* Jacq.) y factores que afectan su producción

Polyphenols in habanero pepper (*Capsicum chinense* Jacq.) and factors that affect their production

Rodríguez-Buenfil, Ingrid M.^{1*}, Oney-Montalvo, Julio E.¹, Gómez-Rincón, Enrique¹,
Ramírez-Sucre, Manuel O.¹,

¹. Centro de Investigación y Asistencia en Tecnología y Diseño del Estado de Jalisco. Subsede Sureste. Tablaje Catastral 31264 Km 5.5 Carr, Sierra Papacal-Chuburná puerto. Parque Científico Tecnológico de Yucatán. CP 97302. Mérida, Yucatán, México. *autor de correspondencia: irodriguez@ciatej.mx

Resumen

Los polifenoles son un grupo de metabolitos secundarios distribuidos principalmente en el reino vegetal. Los frutos de la especie *Capsicum*, como es el caso del chile habanero (*Capsicum chinense* Jacq.), son considerados una fuente importante de estos compuestos, los cuales son ampliamente estudiados debido a los diferentes efectos farmacológicos que han demostrado tener. Debido a esto, el propósito del presente capítulo es: 1) es explicar la importancia de los polifenoles, 2) los diferentes factores que afectan su producción, 3) los diferentes trabajos que se han desarrollado para la cuantificación de estos metabolitos en los frutos del género *Capsicum* y 4) presentar los resultados que se han obtenido al evaluar el efecto del tipo de suelo en el que se realiza el cultivo del chile habanero (*Capsicum chinense* Jacq.) en la península de Yucatán (K'ankab lu'um o suelo rojo, Box lu'um o suelo negro y Chich lu'um o suelo café), el grado de madurez (color verde o inmaduro y color naranja o maduro) en el perfil y cantidad de polifenoles presentes en el fruto. Los resultados indicaron que la mayor concentración de polifenoles totales se obtuvo en el chile proveniente de plantas cultivadas en suelo rojo, maduro (color naranja) y secado mediante la técnica de horno a 65 °C, dando una concentración promedio de 235.13 ± 9.4 mg de GAE 100g⁻¹ de chile seco. La mayor actividad antioxidante (92.47 ± 0.10 %) se obtuvo en los chiles maduros (naranjas) cosechado de plantas cultivadas en suelo café y secados mediante la técnica de liofilización. El polifenol que se encontró en mayor concentración en el chile habanero fue la catequina a una concentración de 145.57 ± 1.72 mg 100g⁻¹ de chile seco.

Palabras clave: polifenoles, flavonoides, catequina, quercetina, actividad antioxidante.

Abstract

Polyphenols are a group of secondary metabolites distributed mainly in the plant kingdom. The fruits of the *Capsicum* species, as is the case of the habanero pepper (*Capsicum chinense* Jacq.), are considered an important source of these compounds, which are widely studied due to the different pharmacological effects they have been shown to have. Due to this, the purpose of this chapter is: 1) to explain the importance of polyphenols, 2) the different

factors that affect its production, 3) the different works that have been developed for the quantification of these metabolites in the fruits of the genus *Capsicum* and 4) present the results that have been obtained when evaluating the effect of the type of soil in which the cultivation of the Habanero pepper (*Capsicum chinense* Jacq.) is carried out in the Yucatan peninsula (K'ankab lu'um or red soil, Box lu'um or black soil and Chich lu'um or brown soil), the degree of maturity (green or immature and orange or mature) in the profile and amount of polyphenols present in the fruit. The results indicated that the highest concentration of total polyphenols was obtained in the peppers from plants grown in red soil, with a degree of orange maturity and dried by the oven technique at 65 ° C, giving an average concentration of 235.13 ± 9.4 mg of GAE 100g^{-1} of dried pepper. The highest antioxidant activity ($92.47 \pm 0.10\%$) was obtained in mature peppers (oranges) harvested from plants grown in brown soil and dried using the lyophilization technique. The polyphenol that was found in the highest concentration in the habanero pepper was catechin at a concentration of 145.57 ± 1.72 mg 100g^{-1} of dried pepper.

Keywords: polyphenols, flavonoids, catechin, quercetin, antioxidant activity.

I. Introducción

Los frutos de la especie *Capsicum*, como es el caso del chile habanero (*Capsicum chinense* Jacq.), son considerados una importante fuente de polifenoles, los cuales son metabolitos secundarios que cumplen funciones de mecanismo de defensa contra factores bióticos o abióticos que pudieran generar algún estrés a la planta (Wahyumi et al., 2013). El perfil y la cantidad de estos polifenoles dependerán de diversos factores que afectaran la síntesis de estos, algunos de los factores reportados son la madurez del fruto, el sistema de cultivo utilizado y los procesos posteriores a la cosecha del chile (Urban et al., 2007).

La importancia del estudio de los polifenoles presentes en el chile habanero se debe a que estos metabolitos no solo forman parte importante del sistema de defensa del fruto, sino que además sus características como su capacidad antioxidante, anticancerígena y antidiabética pueden ser utilizadas por el ser humano para la prevención de enfermedades crónico degenerativas (Powell, 2007). Debido a esto, el propósito del presente capítulo es explicar la importancia de los polifenoles, los diferentes factores que afectan su producción, y los diferentes trabajos que se han desarrollado para la cuantificación de estos metabolitos en los frutos del genero *Capsicum*, además de presentar los resultados que se han obtenido al evaluar el efecto del tipo de suelo en el que se realiza el cultivo del chile habanero (*Capsicum chinense* Jacq.) en la península de Yucatán (K'ankab lu'um o suelo rojo, Box lu'um o suelo negro y Chich lu'um o suelo café), el grado de madurez (color verde o inmaduro y color naranja o maduro) en el perfil y cantidad de polifenoles presentes en el fruto.

1.1 Definición de polifenoles

Los polifenoles son un grupo de metabolitos secundarios distribuidos principalmente en el reino vegetal. Actualmente se han identificado más de 8000 compuestos que están dentro de esta clasificación, como los flavonoides, las antocianinas, los lignanos, las ligninas, los estilbenos y los taninos. Su importancia en los alimentos radica en que contribuyen a las

características de amargor, astringencia, color, sabor, olor y sobre todo brinda estabilidad oxidativa (Bhooshan y Ibrahim, 2009).

Estos compuestos han sido ampliamente estudiados en los últimos años debido a los diferentes efectos farmacológicos que han demostrado tener, como la capacidad de prevenir enfermedades del tipo crónico degenerativas, como es el caso del cáncer, la diabetes y diferentes tipos de enfermedades cardiovasculares (Powell, 2007).

1.2 Estructura de los polifenoles

Los polifenoles son compuestos orgánicos que se caracterizan por estar formados por uno o más anillos aromáticos con uno o más grupos hidroxilo, entre los principales polifenoles presentes en el chile habanero podemos mencionar los ácidos polifenólicos y los flavonoides (Rzepecka *et al.*, 2015).

Los ácidos polifenólicos son compuestos bioactivos que estructuralmente se caracterizan por tener un anillo aromático con uno o más grupos hidroxilo y un grupo carboxílico (Manach *et al.*, 2004). Los flavonoides, son el grupo más grande de polifenoles y el más estudiado en los últimos años debido a los diferentes efectos farmacológicos que estos han presentado en diversos estudios, los flavonoides se caracterizan por estar conformados por 2 anillos de benceno (anillo A y B) y un anillo de pirano (anillo C), con una estructura base de 15 átomos de carbono y un esqueleto C6-C3-C6, tal como se muestra en la Figura 1 (Kochar *et al.*, 2005).

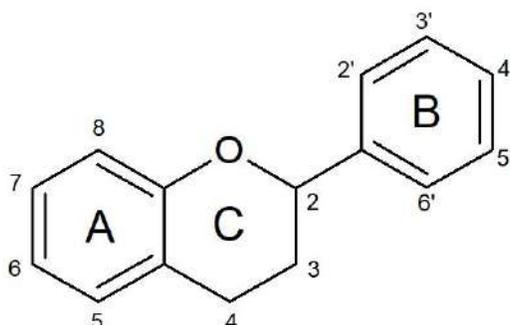


Figura 1. Estructura química de los polifenoles.

La clasificación de los flavonoides se debe a las variaciones estructurales que este grupo de compuestos posee en el anillo de pirano (anillo C). En la Tabla 1 se observa dicha clasificación y se mencionan los polifenoles más importantes que pertenecen a dicha clasificación (Martínez *et al.*, 2002).

Tabla 1. Clasificación de los flavonoides de acuerdo a su estructura química. (Martínez *et al.*, 2002)

Nombre	Descripción	Ejemplos
Antocianidina	Poseen un grupo hidroxilo en posición 3 del anillo C, además de un doble enlace entre los carbonos 3 y 4 del anillo C.	Antocianidina
Flavanos	Poseen un grupo hidroxilo en posición 3 del anillo C.	Catequina
Flavonas	Poseen un grupo carbonilo en posición 4 del anillo C y carecen del grupo hidroxilo en posición 3 del anillo C.	Diosmetina Hesperidina Naringina
Flavanoles	Poseen un grupo carbonilo en posición 4 del anillo C y un grupo hidroxilo en posición 3 del anillo C.	Quercetina Rutina Miricetina

1.3 Investigaciones realizadas de los polifenoles en el chile habanero

Los polifenoles son de los metabolitos principales que se encuentran en el chile habanero, los cuales contribuyen al efecto antioxidante de este tipo de frutos. La presencia de este tipo de metabolitos en el chile habanero (*Capsicum chinense* Jacq.) le proporciona valor agregado a este fruto debido a que ofrece beneficios para la salud del consumidor (principalmente la prevención de enfermedades del tipo crónico degenerativas). De acuerdo con las investigaciones realizadas por Park *et al.* (2012) y Jeong *et al.* (2011) la luteolina, quercetina y kaempferol son los principales polifenoles presentes en el chile habanero (Figura 2).

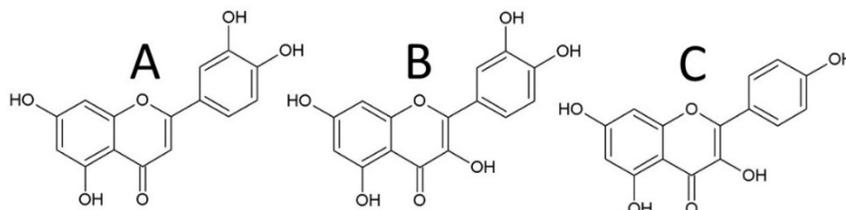


Figura 2. Estructuras químicas de la luteolina (A), quercetina (B) y kaempferol (C).

Sin embargo, las investigaciones de Traconis *et al.* (2012) han reportado la existencia de otros polifenoles en el chile habanero como: Ac. Gálico, Ac. Cumárico, Ac. Cinámico, Rutina y Catequina.

1.4 Vía de síntesis de los polifenoles

La biosíntesis de los polifenoles inicia a partir de la fenilalanina proveniente de la ruta metabólica del fenilpropanoide (Figura 3), esta molécula sufre tres reacciones de forma consecutiva con ayuda de las enzimas fenilalanina amoniaco liasa, cinamato-4-hidroxilasa, y la 4-coumarato-CoA ligasa, para obtener 4-cumaril CoA el cual reacciona con la malonil CoA, esta reacción es catalizada por la enzima chalcona sintetasa para producir naringenina chalcona (Wahyumi *et al.*, 2013). En una segunda etapa de la biosíntesis de polifenoles la naringenina chalcona obtenida anteriormente, es convertida a naringenina mediante la enzima chalcona isomerasa. En esta etapa, la naringenina puede ser biotransformada a dihidrokaempferol con ayuda de la enzima flavona-3-hidrolasa, o en

apigenina mediante la enzima flavona sintetasa, la apigenina por su parte reacciona para formar la luteolina, catalizándose esta reacción por la enzima flavonoide-3-hidrolasa (Wahyumi *et al.*, 2013). En la tercera y última etapa de la biosíntesis de polifenoles el dihidrokaempferol sufre dos reacciones para formar dos compuestos diferentes, el kaempferol y la dihidroquercetina. El kaempferol se forma con ayuda de la enzima flavonol sintetasa, mientras que la reacción para formar la dihidroquercetina es catalizada por la flavonoide-3-hidrolasa. En la etapa final de la vía metabólica de los polifenoles, estos dos compuestos van a reaccionar, uno catalizado por la flavonoide-3-hidrolasa para formar quercetina, y el otro por la flavonol sintetasa (Wahyumi *et al.*, 2013).

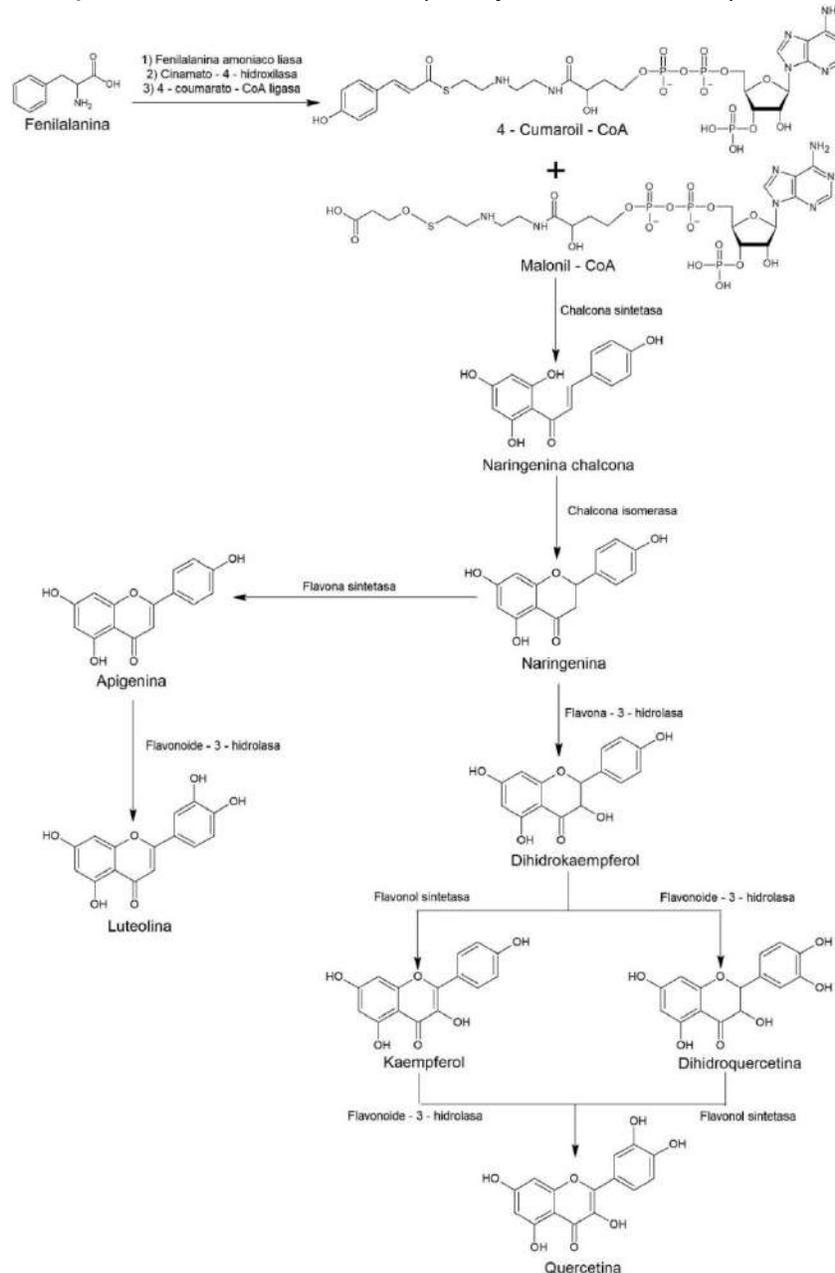


Figura 3. Ruta metabólica para la biosíntesis de polifenoles en el chile habanero (*Capsicum chinense* Jacq.). (Wahyumi *et al.*, 2013)

1.5 Factores que afectan la síntesis de los polifenoles

La producción de polifenoles en el chile habanero (*Capsicum chinense* Jacq.) puede ser afectado por diversos factores, siendo los factores ambientales (estacionalidad, temperatura, altitud y tipo de suelo) y el modo de producción (cantidad de agua utilizada para el riego) los que mayor efecto han demostrado tener en la biosíntesis de este tipo de compuestos (Urban *et al.*, 2007).

Estos factores ambientales tendrán un efecto principalmente sobre dos clases de genes implicados en la biosíntesis de polifenoles, estos son los genes estructurales que codifican enzimas que participan directamente en la formación de flavonoides y genes reguladores que controlan la expresión de los genes estructurales. Algunos de estos genes pueden ser parte de familias de genes (Urban *et al.*, 2007). Un claro ejemplo de lo mencionado anteriormente es el trabajo elaborado por Padda y Picha en el 2008, en donde se muestra la relación negativa que existe entre la temperatura y los niveles de compuestos fenólicos en los tejidos vegetales, en donde temperaturas bajas (aproximadamente de 5 °C) se asocian a un incremento en la concentración de compuestos fenólicos (de 0.55 a 1.26 g kg⁻¹). Esto se debe principalmente a que la exposición a altas temperaturas inhibe la fotosíntesis en la planta, y no puede reemplazar el carbono consumido en la respiración causando una disminución en la disponibilidad de carbohidratos en la planta, provocando también una disminución en el metabolismo secundario de las plantas, como es el caso de los polifenoles (Sampaol *et al.*, 2011).

Por otro lado, el aumento de los niveles de compuestos fenólicos en las frutas puede estar relacionado con el aumento de la actividad de la fenilalanina amoniaco liasa (PAL por sus siglas en inglés) a temperaturas más bajas, dado que el PAL es una enzima importante en la biogénesis de varios compuestos fenólicos, tal como se puede observar en la ruta metabólica para la biosíntesis de polifenoles (mencionada con anterioridad), en el que dicha enzima es la encargada de catalizar la primera reacción que permite la conversión de fenilalanina a 4 – coumaril – CoA, molécula que es precursora en la síntesis de los polifenoles presentes en el chile habanero (*Capsicum chinense* Jacq.) (Sampaol *et al.*, 2011).

También se ha reportado que los factores relacionados con el suelo (nutrientes del suelo y fertilidad) a pesar de tener cierto efecto en la cantidad y perfil de polifenoles presentes, estos factores ejercen poca influencia sobre el metabolismo de los polifenoles, en otras palabras, la mayoría de los nutrientes presentes en los suelos recolectados y sus parámetros de fertilidad no parecen influir significativamente en el metabolismo secundario de los compuestos fenólicos (Bruni y Sacchetti, 2009).

1. 6. Métodos de extracción de polifenoles

En la Tabla 2 se muestran diferentes métodos de extracción de polifenoles, en la cual se puede observar que se han usado diferentes matrices alimentarias (principalmente diferentes variedades de chile del genero *Capsicum*). Entre estos métodos destaca la extracción con metanol o etanol como el primer paso para la obtención de los polifenoles, debido a que este tipo de compuestos presentan una buena solubilidad en estos dos solventes, las técnicas más utilizadas para realizar esta extracción son la maceración y la sonicación, presentando la técnica de sonicación mayores ventajas, como consumo menor de tiempo para realizar la extracción a comparación de la maceración. Posteriormente de llevar a cabo la extracción se centrifuga el extracto para separar los metabolitos extraídos de la matriz sólida, finalmente

se toma el sobrenadante y se realiza el análisis para la determinación de los polifenoles, ya sea por cromatografía de líquidos o alguna otra técnica analítica como la espectrometría ultravioleta-visible para determinar los polifenoles totales. A pesar que las extracciones mediante sonicación reportadas en la Tabla 2 han presentado ventajas, como una buena extracción de polifenoles en tiempos relativamente cortos (de 2 a 10 minutos), sería interesante la aplicación y comparación de técnicas como los fluidos supercríticos y la extracción en fase sólida. Las cuales ya han sido utilizadas en la extracción de polifenoles, pero en otras matrices alimentarias (Casado *et al.*, 2019; Da porto *et al.* 2017).

Tabla 2. Métodos de extracción reportados en la literatura para la extracción de polifenoles en diferentes tipos de matrices.

Polifenol	Matriz	Método de extracción	Referencia
Quercetina Luteolina Kaempferol	<i>C. Annuum</i>	1. Sonicación por 5 minutos en MeOH al 70% 2. Centrifugación a 4000 r.p.m. por 15 minutos	Park <i>et al.</i> , 2012
Quercetina Luteolina Kaempferol	<i>C. Annuum</i>	1. Sonicación por 2 minutos en MeOH al 70%. 2. Columna de sílica.	Jeong <i>et al.</i> , 2011
Ac. Gálico Ac. Cumárico Ac. Cinámico Quercetina Rutina Catequina	<i>C. Annuum</i> <i>C. Chinense</i> Jacq.	1. Extracción con EtOH al 80 %. 2. Centrifugación a 13000 rpm a 4°C por 10 minutos.	Traconis <i>et al.</i> , 2012
Quercetina Luteolina Kaempferol	<i>C. Annuum</i> <i>C. Chinense</i> Jacq.	1. Extracción con EtOH. 2. Hidrolisis ácida (HCl) a 95 °C	Bae <i>et al.</i> , 2012
Luteolina Ac. Cinámico Quercetina	<i>Capsicum annuum</i> L.	1. Extracción MeOH:H ₂ O (7:3) 2. Centrifugación.	Marín <i>et al.</i> , 2004

1. 7. Usos de los polifenoles

Los polifenoles están presentes en cantidades considerables en nuestra dieta debido a que las podemos encontrar en una gran cantidad de frutas y verduras que consumimos de forma diaria. A pesar que no existe un requerimiento para cubrir su ingesta diaria, se recomienda su consumo debido a que este tipo de moléculas poseen una amplia gama de actividades biológicas, siendo la actividad antioxidante uno de los efectos farmacológicos más estudiados, dotándolas de diferentes aplicaciones en la industria farmacéutica y la industria alimentaria (Balasundram *et al.*, 2006).

Actualmente en la industria alimentaria es común utilizar diferentes tipos de antioxidantes sintéticos como hidroxianisol butilado (BHA), hidroxitolueno butilado (BHT) y terc butilhidroquinona, los cuales cumplen la función de aditivos alimenticios que evitan el enranciamiento en los alimentos. Sin embargo, estos compuestos han sido sustituidos poco a poco por diferentes tipos de compuestos fenólicos como los flavonoides y los ácidos hidroxicinámicos. Los polifenoles a comparación de los antioxidantes sintéticos tienen la ventaja de ser compuestos obtenidos de forma natural, una tendencia que en la actualidad va tomando más fuerza e importancia entre los consumidores de este tipo de alimentos (Balasundram *et al.*, 2006).

Además de la actividad antioxidante, otro efecto farmacológico importante de los polifenoles es el hipoglucemiante, el cual es de gran interés para la industria farmacéutica debido a que juega un papel importante para el tratamiento de la diabetes, motivo por el que actualmente existen diferentes estudios en el que se evalúa dicho efecto. Este efecto puede estar relacionado con la inhibición de la digestión de carbohidratos por la inhibición de las enzimas α -amilasa salival y la α -glucosidasa pancreática en el pequeño borde intestinal. El efecto mencionado anteriormente inhibe la absorción de glucosa y la estimulación de la secreción de insulina, además de contribuir en la protección de las células β pancreáticas contra la glucotoxicidad. Los polifenoles también pueden suprimir la liberación de glucosa del hígado y mejorar la captación de glucosa en los tejidos periféricos mediante la modulación de la señalización intracelular (Kim *et al.*, 2016).

Dentro del área de la dermatología, los polifenoles se han utilizado debido a sus efectos antioxidantes que le confieren efectos quimioprotectores contra el daño producido por los rayos ultravioleta (Magliano, J. 2014). Asimismo, cumplen la función de protector solar, ya que tienen la capacidad de absorber de forma completa el espectro de longitud de onda de la región UV-B y en forma parcial el de la región UV-A, además de ser considerados como agentes quimiopreventivos contra el cáncer de piel (Magliano, J. 2014).

1. 8. Investigaciones de la cuantificación de polifenoles en chile habanero

En la Tabla 3 se muestran diferentes investigaciones que se han realizado donde se observan las variaciones en la cantidad y el perfil de polifenoles que reporta cada uno de estos autores. Esto se puede deber a las condiciones de cultivo en las que creció el fruto, así como el grado de madurez de este al momento de realizar la cosecha y el análisis, Como mencionan Urban *et al.* (2007), que reportan estos como los principales factores que tienen efecto en la producción de polifenoles.

Aunque el perfil de polifenoles y la cantidad de estos reportados en la literatura cambia entre los autores, se observa que algunos de estos compuestos están presentes en todas las muestras que se han analizado, como es el caso de la quercetina, la cual es el producto final de la biosíntesis de los polifenoles en los frutos del género *Capsicum*, tal como podemos observar en la ruta de síntesis de los polifenoles (Figura 3). Existen otros polifenoles como la catequina y el kaempferol, que también se reportan en las muestras de *Capsicum chinense* Jacq, indicando que estos son polifenoles característicos de este tipo de frutos.

Tabla 3. Trabajos reportados en la literatura donde se han cuantificado los polifenoles presentes en diferentes especies del genero *Capsicum*.

Genero	Polifenol	Cantidad (mg 100g ⁻¹ de chile seco)	Referencia
<i>Capsicum annuum</i> L.	Ácido gálico	86.59	Hallmann, E. 2012
	Ácido clorogénico	87.70	
	Mircetina	20.44	
	Quercetina	29.21	
	Kaempferol	3.59	
<i>Capsicum chinense</i> Jacq.	Luteolina	8.40	Troconis <i>et al.</i> , 2012
	Ac. Gálico	0.98	
	Ac. Cumárico	0.25	
	Ac. Cinámico	1.25	
	Quercetina	0.15	
	Rutina	0.03	
<i>Capsicum chinense</i> Jacq.	Catequina	1.8	Bae <i>et al.</i> , 2012
	Quercetina	1.51	
	Kaempferol	1.06	
	Apigenin	1.68	
<i>Capsicum frutescens</i>	Catequina	15.35	Nagy <i>et al.</i> , 2015
	Mircetina	2.49	
	Kaempferol	6.97	
	Quercetina	0.91	
	Luteolina	8.46	
	Naringenina	43.13	

II. Materiales y métodos

2.1 Evaluación del efecto del tipo de suelo, grado de madurez y técnica de secado en la concentración de polifenoles en chile habanero.

Como parte del proyecto titulado: Análisis de los cambios metabólicos durante el desarrollo del fruto *Capsicum chinense* Jacq cultivado en diferentes tipos de suelos financiado por el fondo de Ciencia Básica del CONACYT, se desarrollaron cinco cultivos de *Capsicum chinense* en el invernadero de la unidad sureste del CIATEJ, de marzo de 2017 a diciembre de 2019. En este capítulo se presentan los resultados del contenido de polifenoles del cultivo cuatro (2018) a los 209 días posteriores al trasplante (DPT) con fecha del 9 de octubre de 2018.

2.2 Secado de la muestra

La mitad de las muestras de las muestras de chile con diferente grado de madurez y provenientes de diferentes suelos de Yucatán (rojo, negro y café) fueron secadas en horno a 65°C por 72 horas, mientras que la otra mitad se sometió a un secado por liofilización a una temperatura de – 50 °C y una presión de 0.200 mBar durante 72 horas. Posterior al

secado de los chiles, se realizó la molienda de ellos en un mortero y se pasaron por una malla de # 35 para obtener los polvos de cada tipo de muestra con un tamaño de partícula de 500 μm , los cuales fueron almacenados a temperatura ambiente en bolsas plásticas protegidas de la luz con papel aluminio.

2.3 Extracción de polifenoles

Se pesaron 500 mg de cada muestra de chile y se colocaron en tubos cónicos de 15 mL, posteriormente se agregaron 2.5 mL de una mezcla metanol: agua (80:20) y se agitó con ayuda de un vortex, para su homogenización. Se sonicaron los tubos por 30 minutos a 42 KHz, posteriormente el extracto fue centrifugado a 4700 rpm y 4 °C durante 30 minutos, para finalmente filtrar la muestra a través de una membrana de nylon con un tamaño de poro de 0.22 μm y depositarla en viales cromatográficos de color ámbar.

2.4 Determinación de la actividad antioxidante y polifenoles totales por espectroscopia ultravioleta visible

El método utilizado para evaluar la actividad antioxidante es el de inhibición del radical de DPPH (2,2-diphenyl-1-picrylhydrazyl) (Brand *et al.*, 1995). Mientras que los polifenoles totales se determinaron por el método de Folin Ciocalteu (Singleton *et al.*, 1999).

2.5 Determinación de polifenoles por UPLC

Se utilizó un equipo de cromatografía de líquidos de ultra presión (UHPLC) Acquity H Class (Waters, USA) con un detector de arreglo de diodos (DAD) y una columna Acquity UPLC HSS C18 (100 Å, 1.8 μm , 2.1 x 50 mm) (Waters, USA). Las condiciones cromatográficas para el análisis de polifenoles consistieron en dos fases móviles conformada por ácido acético al 0.2% (fase móvil A), y acetonitrilo con ácido acético al 0.1 % (fase móvil B), con un gradiente de elución de 0-10 min de 1 % a 30% de B; 10–12 min 30 % de B; 12-15 min 1 % de B. La velocidad de flujo de la fase móvil fue de 0.5 mL min⁻¹, la temperatura de columna de 45 °C, el volumen de inyección fue 2 μL y longitud de onda de 280 nm.

2.6 Diseño factorial 3 x 2 x 2.

Se realizó un diseño factorial 3 x 2 x 2 con la finalidad de evaluar el efecto de tres factores sobre la concentración de vitaminas, siendo el factor A, el tipo de suelo, el factor B el grado de madurez y el factor C el método de secado. Los niveles de A fueron: rojo (-1), café (0) y negro (+1), los niveles del factor B fueron: verde ó inmaduro (-1) y naranja ó maduro (+1), mientras que los niveles del factor C fueron: horno (-1) y liofilizado (+1).

2.7 Análisis de datos

Se realizó un análisis de varianza (ANOVA) de tres vías con un nivel de confianza del 95% empleando el paquete estadístico Statgraphics Centurion XVII.II-X64 (Statistical Graphics Corp, USA)

III. Análisis y discusión de resultados

En el presente trabajo se determinó el perfil de polifenoles presentes en el chile habanero (*Capsicum chinense* Jacq.) y la concentración de estos mediante la técnica de cromatografía de líquidos de alta eficiencia con detector de arreglo de diodos (UHPLC-DAD), evaluando como el tipo de suelo en el que es cultivada la planta, el grado de madurez del chile y el método de secado al que es sometido después del proceso de cosecha afecta el perfil de polifenoles. Los resultados obtenidos en cada una de estas condiciones evaluadas (tipo de suelo, grado de madurez y método de secado) se encuentran representados en la Tabla 4, en la que se observa que la catequina es el polifenol que está presente de forma individual en una mayor concentración ($145.57 \pm 1.72 \text{ mg } 100\text{g}^{-1}$) en el chile habanero maduro (color naranja) obtenido de plantas cultivadas en tierra roja y secado en horno a $65 \text{ }^\circ\text{C}$. Estos resultados concuerdan con lo reportado por Traconis *et al.* (2012), en el que la catequina también fue el polifenol que se reportó en una mayor concentración ($1.8 \text{ mg } 100\text{g}^{-1}$ de chile seco) en el chile habanero. Otros polifenoles que se cuantificaron mediante esta técnica fueron el ácido cinámico ($58.96 \text{ mg } 100\text{g}^{-1}$ de chile seco), la rutina ($20.54 \text{ mg } 100\text{g}^{-1}$ de chile seco) y el ácido clorogénico ($19.49 \text{ mg } 100\text{g}^{-1}$ de chile seco) por mencionar los que se encontraron en una mayor concentración. En la figura 4 se muestra el cromatograma obtenido con los estándares de polifenoles y el cromatograma para una muestra de chile habanero verde sembrado en tierra roja.

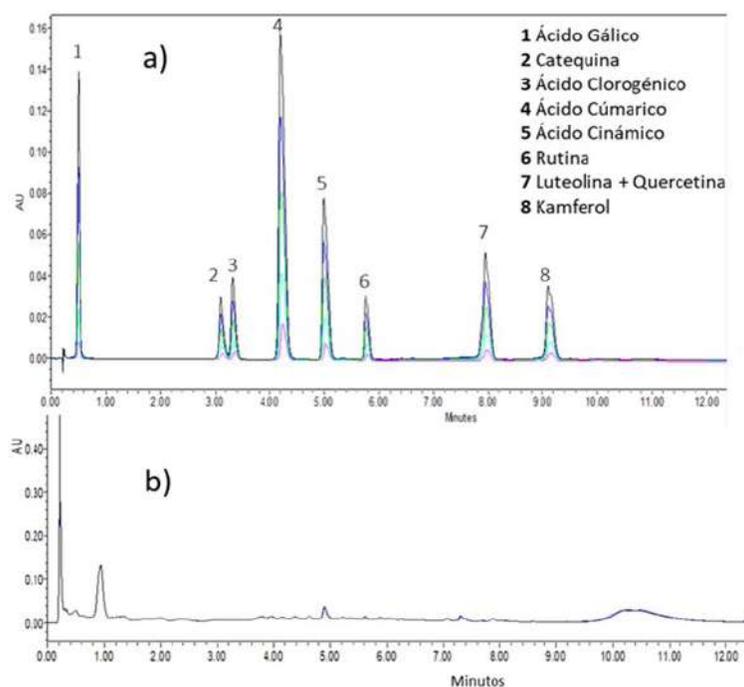


Figura 4. Cromatogramas: UPLC-DAD con columna Acquity UPLC HSS C18 ($100 \text{ }^\circ\text{A}$, $1,8 \text{ mm}$, $2,1 \times 50 \text{ mm}$). a) estándares de polifenoles y b) polifenoles en muestra (código TRV181404H) de chile habanero. Método: velocidad de flujo de $0,5 \text{ ml / min}$. Temperatura de columna: $45 \text{ }^\circ\text{C}$. Fase móvil A: ácido acético ($0,2\%$), Fase B: Acetonitrilo con ácido acético ($0,1 \%$). Gradiente de elución: 0-10 min de 1% a 30% de B; 10-12 min 30% de B; 12-15 min 1% de B. Volumen de inyección $2 \mu\text{L}$ y longitud de onda de 280 nm .

También se realizó la determinación de polifenoles totales presentes en el chile habanero (*Capsicum chinense* Jacq.) mediante la técnica de espectroscopia ultravioleta-visible, evaluando los factores mencionados con anterioridad. Los resultados del análisis para cada una de las condiciones evaluadas se representa en la Tabla 5, en esta se puede observar que la mayor concentración presente de polifenoles totales (235.13 ± 9.4 mg de GAE 100g^{-1} de chile seco) se obtuvo en los chiles cosechados de plantas cultivadas en el suelo rojo, con grado de madurez naranja y secado mediante el método de horno a $65\text{ }^{\circ}\text{C}$. Estos resultados son similares a los obtenidos mediante la técnica de UHPLC-DAD, en la que se obtuvo que bajo estas mismas condiciones de madurez, suelo rojo y secado por horno, la concentración de polifenoles totales ($132.89 \pm$ mg 100g^{-1} de chile seco) es mayor en comparación de las otras condiciones evaluadas. Asimismo, en la Tabla 5 se muestran los resultados obtenidos en la evaluación de la actividad antioxidante, en donde la muestra de chile habanero maduro y deshidratado por liofilización tuvo la mayor actividad antioxidante (92.26 – 92.47 %).

Se realizó un análisis de varianza con un nivel de confianza del 95 % en el que se evaluó el efecto del tipo de suelo, el grado de madurez y la técnica de secado sobre la concentración total de polifenoles totales, obteniendo como resultado que los tres factores evaluados así como sus interacciones tienen efecto significativo, siendo el método de secado el factor que tiene mayor influencia en la concentración de estos compuestos. Esto seguido del grado de madurez que presenta el fruto y por último el tipo de suelo en el que se cultivó la planta. En la Figura 5 se representa el análisis estadístico realizado para la actividad antioxidante, en donde se observa que los chiles provenientes de tierra roja y maduros (color naranja) tienen mayor capacidad antioxidante. La mayor actividad antioxidante en las condiciones mencionadas anteriormente puede ser propiciado por la presencia de capsaicinoides en el chile, que de acuerdo a lo reportado por Morozova *et al.* (2019) se encuentran en mayor concentración en los chiles habaneros maduros provenientes de plantas cultivadas en suelo rojo. En el diagrama de Pareto (Figura 6) se puede observar que todos los factores probados así como sus interacciones tuvieron efecto sobre la concentración de polifenoles totales, siendo el método de secado de la muestra el que ejerció el mayor efecto, seguido por la interacción del grado de madurez del chile y el tipo de secado de la muestra.

El análisis de correlación entre los resultados de polifenoles mediante cromatografía líquida y espectrofotometría ultravioleta-visible se muestran en la Figura 7. En donde se obtuvo una correlación de 0.9917 entre ambos resultados, indicando que existe una correlación positiva alta entre ambas técnicas analíticas. Sin embargo hay que tomar en cuenta que los valores obtenidos por espectrofotometría ultravioleta-visible son en general más altos a los que se obtienen por UHPLC-DAD, lo cual puede deberse a que existan moléculas, distintas a los polifenoles, que absorban a la longitud de onda empleada (765 nm).

Tabla 4. Resultados obtenidos de la cuantificación de polifenoles en chile habanero (*Capsicum chinense* Jacq.) a los 252 días post trasplante, cultivado en diferentes tipos de suelo, con diferente grado de madurez y sometido a diferentes procesos de secado.

Tipo de suelo	Grado de madurez	Método de secado	Catequina (mg 100g ⁻¹)	Ac. Clorogénico (mg 100g ⁻¹)	Ac. Cumárico (mg 100g ⁻¹)	Ac. Cinámico (mg 100g ⁻¹)	Rutina (mg 100g ⁻¹)	Quercetina + Luteolina (mg 100g ⁻¹)	Kaempferol (mg 100g ⁻¹)
Rojo	Verde	Horno a 65 °C	34.40±0.05 ^d	17.29±0.11 ^c	1.60±1.01 ^{cde}	3.53±0.02 ^d	2.44±1.48 ^e	1.93±0.04 ^g	2.95±0.01 ^d
Café	Verde	Horno a 65 °C	30.58±0.23 ^e	12.04±0.58 ^f	0.54±0.01 ^e	2.16±0.05 ^k	1.55±0.07 ^f	1.82±0.01 ^h	2.67±0.04 ^e
Negro	Verde	Horno a 65 °C	56.97±0.94 ^c	12.75±0.33 ^f	0.81±0.03 ^d	2.63±0.09 ^j	2.07±0.18 ^e	1.98±0.03 ^g	2.28±0.01 ^f
Rojo	Naranja	Horno a 65 °C	145.57±1.72 ^a	19.49±0.20 ^a	9.82±6.50 ^b	30.12±0.17 ^b	20.54±0.49 ^a	4.37±0.14 ^b	5.21±0.08 ^b
Café	Naranja	Horno a 65 °C	95.85±3.39 ^b	18.14±0.16 ^b	16.98±0.86 ^a	58.96±3.63 ^a	0.0±0.00 ^g	7.07±5.28 ^a	6.59±0.03 ^a
Negro	Naranja	Horno a 65 °C	62.14±6.29 ^c	19.23±2.72 ^{ab}	2.91±0.74 ^c	7.69±0.69 ^c	0.71±1.01 ^g	3.79±0.04	3.51±0.11 ^c
Rojo	Verde	Liofilizado	8.62±1.75 ^{hi}	11.88±1.01 ^{fg}	0.51±0.01 ^e	3.19±0.02 ^h	2.88±0.1 ^d	1.66±0.01 ⁱ	0.00±0.00 ^g
Café	Verde	Liofilizado	8.7±0.20 ^h	11.42±0.11 ^f	0.25±0.02 ^f	2.87±0.04 ⁱ	2.87±0.13 ^d	3.68±0.02 ^d	0.00±0.00 ^g
Negro	Verde	Liofilizado	11.42±0.16 ^f	13.49±0.13 ^e	0.34±0.01 ^f	3.19±0.04 ^h	4.35±0.63 ^b	4.02±0.00 ^c	0.00±0.00 ^g
Rojo	Naranja	Liofilizado	7.31±0.17 ⁱ	14.17±0.02 ^d	0.13±0.01 ^g	4.06±0.03 ^e	4.07±0.08 ^b	2.39±0.02 ^e	0.00±0.00 ^g
Café	Naranja	Liofilizado	10.32±0.11 ^g	10.37±1.75 ^g	0.0±0.00 ^h	3.99±0.08 ^f	3.34±0.05 ^c	2.15±0.03 ^f	0.00±0.00 ^g
Negro	Naranja	Liofilizado	8.04±0.49 ^h	9.36±0.33 ^g	0.0±0.00 ^h	3.36±0.05 ^g	2.43±0.24 ^e	1.77±0.12 ^h	0.00±0.00 ^g

Nota: Diferentes letras en la misma columna indica diferencias estadísticas significativas ($P \leq 0.05$).

Tabla 5. Resultados obtenidos en la cuantificación de polifenoles totales en *Capsicum chinense* Jacq., a los 252 días post trasplante, cultivado en tres tipos de suelo cosechado en dos estados de madurez y sometido a dos métodos de secado diferentes.

Tipo de suelo	Grado de madurez	Método de secado	Polifenoles totales (mg GAE 100g ⁻¹)	Polifenoles totales (mg 100g ⁻¹)*	Actividad antioxidante (%)
Rojo	Verde	Horno a 65 °C	64.14 ± 0.60	48.76 ± 0.00	82.97 ± 0.00
Café	Verde	Horno a 65 °C	51.37 ± 0.52	42.40 ± 0.00	80.58 ± 0.00
Negro	Verde	Horno a 65 °C	79.47 ± 1.47	56.31 ± 0.00	84.94 ± 0.00
Rojo	Naranja	Horno a 65 °C	235.13 ± 9.14	132.89 ± 0.00	86.91 ± 0.20
Café	Naranja	Horno a 65 °C	203.59 ± 13.29	117.69 ± 0.00	78.26 ± 0.50
Negro	Naranja	Horno a 65 °C	99.99 ± 36.26	66.28 ± 0.00	79.03 ± 0.20
Rojo	Verde	Liofilizado	28.73 ± 2.89	31.21 ± 0.00	90.50 ± 0.10
Café	Verde	Liofilizado	29.79 ± 0.53	31.77 ± 0.00	90.22 ± 0.30
Negro	Verde	Liofilizado	36.81 ± 0.38	35.21 ± 0.00	86.21 ± 0.20
Rojo	Naranja	Liofilizado	32.13 ± 0.25	32.85 ± 0.00	92.26 ± 0.01
Café	Naranja	Liofilizado	30.18 ± 1.48	31.94 ± 0.00	92.47 ± 0.10
Negro	Naranja	Liofilizado	24.96 ± 1.23	29.40 ± 0.00	92.33 ± 0.01

Nota: (*) Indican los polifenoles totales cuantificados por cromatografía de líquidos.

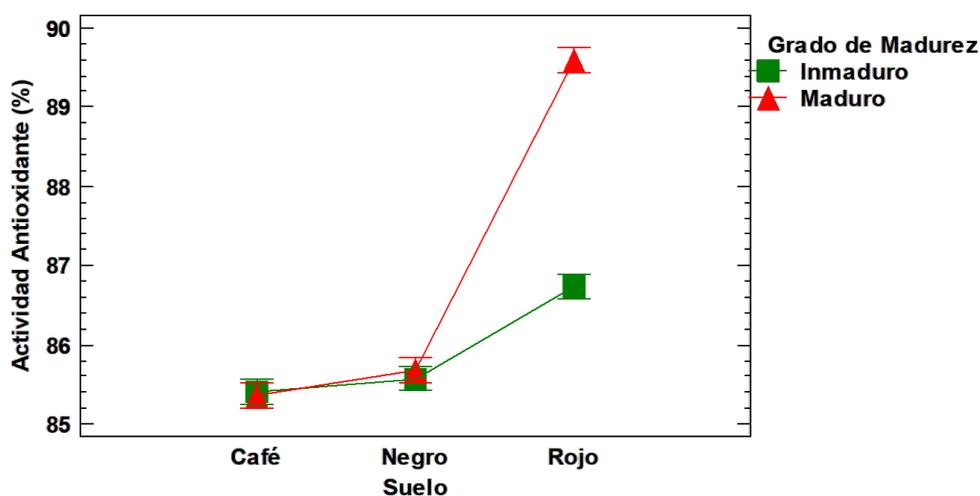


Figura 5. Gráfico de interacción doble suelo – grado de madurez para la actividad antioxidante de *Capsicum chinense* Jacq. a los 252 días post trasplante.

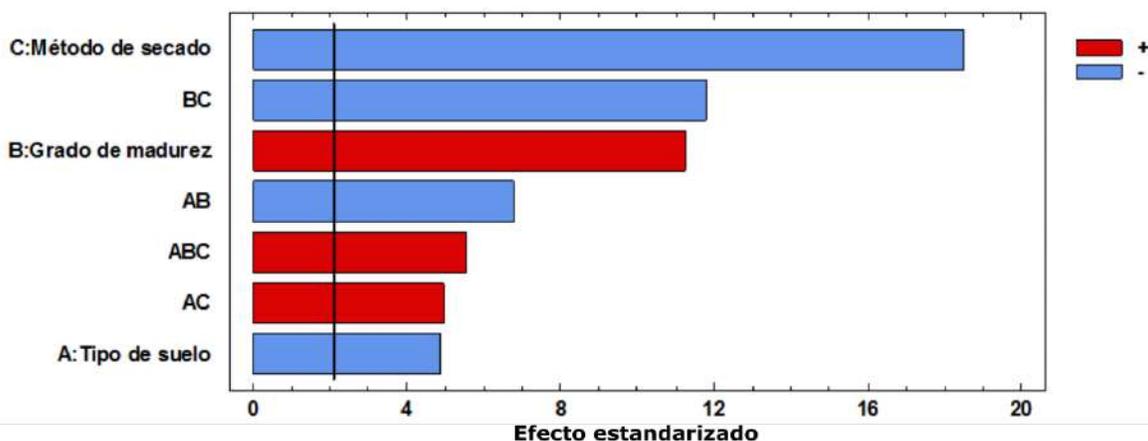


Figura 6. Diagrama de Pareto obtenido del diseño 3 x 2 x 2 para evaluar el efecto de los factores sobre la concentración de polifenoles totales (AB, AC, BC y ABC corresponde a las interacciones de los factores).

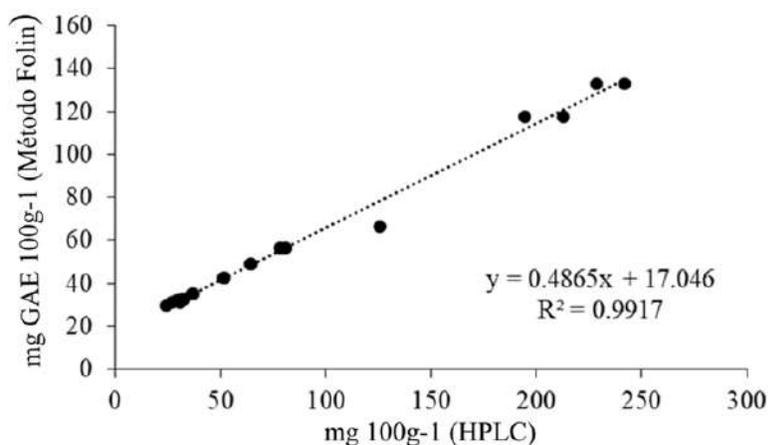


Figura 7. Correlación de la concentración de polifenoles totales determinado por el método de Folin y por cromatografía de líquidos de alta eficiencia (HPLC).

IV. Conclusiones

La presencia de polifenoles en el chile habanero (*Capsicum chinense* Jacq.) proporciona valor agregado a este producto, debido a que ofrece beneficios para la salud del consumidor (principalmente la prevención de enfermedades del tipo crónico degenerativas). En la literatura se reportan como los principales polifenoles en chiles, la luteolina, quercetina, kaempferol, ácido gálico, ácido cumárico, ácido cinámico, rutina y catequina en un rango de concentración de 0.03 a 15.35 mg 100g⁻¹ de chile seco. Experimentalmente se determinó que los tres factores evaluados (grado de madurez, tipo de suelo y técnica de secado) tienen efecto significativo sobre la concentración de polifenoles totales en el chile habanero

(*Capsicum chinense* Jacq.), obteniéndose la mayor concentración en el chile cosechado de plantas cultivadas en suelo rojo, maduro (color naranja) y secado mediante la técnica de horno a 65 °C, dando una concentración promedio de 235.13 ± 9.4 mg de GAE 100g⁻¹ de chile seco. La mayor actividad antioxidante se presentó en los chiles maduros (naranjas) obtenidos de plantas cultivadas en suelo café y secados mediante la técnica de liofilización, teniendo una actividad antioxidante promedio de 92.47 ± 0.10 %. El polifenol que se encontró en mayor concentración en los frutos de chile habanero (*Capsicum chinense* Jacq.) y se consideró como el mayoritario, fue la catequina a una concentración de 145.57 ± 1.72 mg 100g⁻¹ de chile seco.

V. Referencias

- Bae, H., Jayaprakasha G.K., Jifon, J., Patil, B.S. (2012) Extraction efficiency and validation of an HPLC method for flavonoid analysis in peppers. *Food Chemistry*. 130, 751 – 758. DOI: 10.1016/j.foodchem.2011.07.041
- Balasundram N., Sundram, K., Samman, S. (2006). Phenolic compounds in plants and agri-industrial by-products: Antioxidant activity, occurrence, and potential uses. *Food Chemistry*, (99) 191–203. doi:10.1016/j.foodchem.2005.07.042
- Bhooshan K.P., Ibrahim, S.R. (2009). Plant Polyphenols as dietary antioxidants in human health and disease. *Oxidative Medicine and Cellular Longevity*. 25, 270 – 278. DOI: 10.4161/oxim.2.5.9498
- Brand W, Cuvelier ME, Berset C (1995). Use of free radical method to evaluate antioxidant activity. *LWT- Food Science and Technology*. 28 (1) 25 – 30. [https://doi.org/10.1016/S0023-6438\(95\)80008-5](https://doi.org/10.1016/S0023-6438(95)80008-5)
- Bruni, R., Sacchetti, G. (2009). Factors Affecting Polyphenol Biosynthesis in Wild and Field Grown St. John's Wort (*Hypericum perforatum* L. Hypericaceae/Guttiferae). *Molecules*, 14, 682 – 725. DOI: 10.3390/molecules14020682
- Casado, N., Morante-Zarzero, S., Pérez-Quintanilla, D., Cámara, J. S., & Sierra, I. (2018). Dispersive solid-phase extraction of polyphenols from juice and smoothie samples using hybrid mesostructured silica followed by ultra-high-performance liquid chromatography-ion-trap tandem mass spectrometry. *Journal of agricultural and food chemistry*, 67(3), 955-967. <https://doi.org/10.1021/acs.jafc.8b05578>
- Da Porto, C., & Natolino, A. (2017). Supercritical fluid extraction of polyphenols from grape seed (*Vitis vinifera*): Study on process variables and kinetics. *The Journal of Supercritical Fluids*, 130, 239-245. <https://doi.org/10.1016/j.supflu.2017.02.013>
- Hallmann, E., Rembiałkowska, E. (2012). Characterisation of antioxidant compounds in sweet bell pepper (*Capsicum annuum* L.) under organic and conventional growing systems. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 92 (12), 2409 – 2415. DOI: 10.1002/jsfa.5624
- Jeong, W.Y., Jin, J.S., Cho, Y.A., Lee, J.H., Park, S., Jeong, S.W., Kim, Y.H., Lim, C.S. (2011). Determination of polyphenols in three *Capsicum annuum* L. (bell pepper) varieties using high – performance liquid chromatography - tandem mass spectrometry: Their contribution to overall antioxidant and anticancer activity. *J. Sep. Sci.* 34, 2967 – 2974. DOI: 10.1002/jssc.201100524
- Kim, Y., Keogh B. J., Clifton, M. P. (2016). Polyphenols and Glycemic Control. *Nutrients*. 8, 17, 1 – 27. DOI: 10.3390/nu8010017
- Kochar, A., Nagi, M. (2005). Effect of supplementation of traditional medicinal plants on blood glucose in non-insulin-dependent diabetics: A Pilot Study. *J. Med. Food*. 8, 545 – 549. DOI: 10.1089/jmf.2005.8.545

- Magliano, J. (2014). Antioxidantes de uso tópico en Dermatología. Tendencias en Medicina. (44) 91 – 96.
- Manach, C., Scalbert, A., Morand, C., Rémésy, C., Jiménez, L. (2004). Polyphenols: food sources and bioavailability. *Am J Clin Nutr* 2004; 79: 727 – 747. <https://doi.org/10.1093/ajcn/79.5.727>
- Marín, A., Ferreres, F., Barberán, F.T., Gil, M. (2004). Characterization and Quantitation of Antioxidant Constituents of Sweet Pepper (*Capsicum annuum* L.). *J. Agric. Food Chem.* 52, 3861 – 3869. DOI: 10.1021/jf0497915
- Martínez F.S., González, G.J., Culebras, J.M., Tuñón M.J. (2002). Los flavonoides: propiedades y acciones antioxidantes. *Nutr. Hosp.* 17: 271 – 278. https://www.researchgate.net/publication/237359143_Los_flavonoides_propiedades_y_acciones_antioxidantes
- Morozova, K., Rodríguez-Buenfil, I., López-Domínguez, C., Ramírez-Sucre, M., Ballabio, D., & Scampicchio, M. (2019). Capsaicinoids in Chili Habanero by Flow Injection with Coulometric Array Detection. *Electroanalysis*, 31(5), 844 – 850. DOI: 10.1002/elan.201800705
- Nagy, Z., Daood, H., Ambrózy, Z., & Helyes, L. (2015). Determination of polyphenols, capsaicinoids, and vitamin C in new hybrids of chili peppers. *Journal of analytical methods in chemistry*. 2015. <https://doi.org/10.1155/2015/102125>
- Padda M.S., Picha D.H. (2008). Effect of low temperature storage on phenolic composition and antioxidant activity of sweet potatoes. *Postharvest Biol Tec.* 47: 176 – 180. <https://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2007.06.014>
- Park, S., Young, W.J., Han, J.L.; Kim, Y.; Woo, S.J., Kim, G.S., Won, D.B., Lim, C.S., Sung, J.J., Jung, S.L., Chul, S.S. (2012) Determination of polyphenol levels variation in *Capsicum annuum* L. cv. Chelsea (yellow bell pepper) infected by anthracnose (*Colletotrichum gloeosporioides*) using liquid chromatography – tandem mass spectrometry. *Food Chemistry*. 130, 981 – 985. DOI: 10.1016/j.foodchem.2011.08.026
- Powell, K. (2007) Functional foods from biotech—an unappetizing prospect?. *Nature biotechnology*. 25 (5), 525 – 531. DOI: 10.1038/nbt0507-525
- Rzepecka-Stojko, A., Stojko, J., Kurek-Górecka, A., Górecki, M., Kabała-Dzik, A., Kubina, R., Buszman, E. (2015). Polyphenols from bee pollen: structure, absorption, metabolism and biological activity. *Molecules*, 20 (12), 21732 – 21749. <https://doi.org/10.3390/molecules201219800>
- Sampaio, B.L., Baral, F., Ferrill, P.H., Da Costa Santos, S., De Paula, J.R. (2011). Influence of environmental factors on the concentration of phenolic compounds in leaves of *Lafouzia pacari*. *Revista Brasileira de Farmacognosia*, 21(6), 1127 – 1137. <https://dx.doi.org/10.1590/S0102-695X2011005000177>
- Singleton, V.L.; Orthofer, R.; Lamuela-Raventos, R.M. (1999) Analysis of total phenols and other oxidation substrates and antioxidants by means of Folin-Ciocalteu reagent. *Method Enzymol*, 299, 152–178. [https://doi.org/10.1016/S0076-6879\(99\)99017-1](https://doi.org/10.1016/S0076-6879(99)99017-1)
- Troconis, T.; Rojas L.; Hernandez, R.; Villa, T.; Maldonado, M.; Dorantes, A.; Tellez, M; Jaramillo, F. (2012). Biochemical and Molecular Analysis of Some Commercial Samples of Chili Peppers from Mexico. *Journal of Biomedicine and Biotechnology*. 10, 1 – 11. DOI: 10.1155/2012/873090
- Urban, L., Berti, L., Bourgaud, F., Gautier, H., Léchaudel, M., Joas, J., & Sallanon, H. (2007). The effect of environmental factors on biosynthesis of carotenoids and polyphenolics in fruits and vegetables: a review and prospects. In *II International Symposium on Human Health Effects of Fruits and Vegetables: FAVHEALTH 2007* 841, 339 - 344.
- Wahyumi, Y., Ballester, A.R., Sudarmonowati, E., Bino, R.J., Bovy, A. G. (2013) Secondary Metabolites of *Capsicum* Species and Their Importance in the Human Diet. *Journal of Natural Products*. 76, 783 – 793. <https://doi.org/10.1021/np300898z>

CAPÍTULO 8

Carotenoides en chile habanero (*Capsicum chinense* Jacq.) y factores que afectan su producción

Carotenoids in habanero pepper (*Capsicum chinense* Jacq.) and factors that affect its production

Oney-Montalvo, Julio E.¹, Zamacona-Ruiz, Melissa¹, Ramírez-Sucre, Manuel O.¹, Rodríguez-Buenfil, Ingrid M.^{1*}

¹Centro de Investigación y Asistencia en Tecnología y Diseño del Estado de Jalisco. Subsede Sureste. Tablaje Catastral 31264 Km 5.5 Carr, Sierra Papacal-Chuburná puerto. Parque Científico Tecnológico de Yucatán. CP 97302. Mérida, Yucatán, México. *autor de correspondencia: irodriguez@ciatej.mx

Resumen

Los carotenoides son un grupo de metabolitos presentes en el chile habanero (*Capsicum chinense* Jacq.), estos son ampliamente estudiados por sus efectos farmacológicos y sus aplicaciones en la industria alimentaria, el perfil de estos compuestos y la cantidad en la que se encuentran presentes en el fruto depende de diferentes factores que afectan la ruta metabólica a partir de la cual son sintetizados. En el presente trabajo se evaluaron tres factores, el tipo de suelo en el que es cultivada la planta donde crece el chile habanero (*K'ankab lu'um* o suelo rojo, *Box lu'um* o suelo negro y *Chich lu'um* o suelo café), el grado de madurez que presenta el fruto al momento de realizarse la cosecha (inmaduro o verde y maduro o naranja), y la técnica de secado utilizada después de la cosecha (horno o liofilizado). La mayor concentración de carotenoides totales fue cuantificada en el chile habanero liofilizado, cosechado en estado maduro (naranja) y producido por plantas cultivadas en suelo negro (*Box lu'um*), dando un valor promedio de 134.41 ± 0.13 mg $100g^{-1}$ de chile seco. El grado de madurez fue el factor que tuvo efecto significativo sobre la producción de luteína y β -caroteno, obteniendo como resultado que estos carotenoides se encuentran a una mayor concentración en el chile habanero de color verde (inmaduro) cultivado en la tierra café (*Chich lu'um*), con una concentración promedio de luteína de 38.56 ± 0.14 mg $100g^{-1}$ de chile seco, y de β -caroteno de 13.02 ± 0.28 mg $100g^{-1}$ de chile seco.

Palabras clave: carotenoides, β – caroteno, luteína, capsantina, zeaxantina.

Abstract

Carotenoids are a group of metabolites present in habanero pepper (*Capsicum chinense* Jacq.), these are widely studied for their pharmacological effects and their applications in the food industry, the profile of these compounds and the amount in which they are present in the fruit depends on different factors that affect the metabolic pathway from which they are synthesized. In the present work, three factors were evaluated, the type of soil in which the plant is grown where the habanero pepper grows (*K'ankab lu'um* or red soil, *Box lu'um* or black soil and *Chich lu'um* or brown soil), the degree of maturity of the fruit at harvest time (immature or green and mature or orange), and the drying technique used after harvesting (oven or lyophilized). The highest concentration of total carotenoids was quantified in

lyophilized habanero pepper, harvested in a mature state (orange) and produced by plants grown in black soil (*Box lu'um*), giving an average value of 134.41 ± 0.13 mg 100 g^{-1} of chili dry. The degree of maturity was the factor that had a significant effect on the production of lutein and β -carotene, obtaining as a result that these carotenoids are found at a higher concentration in habanero pepper green (immature) cultivated in the brown soil (*Chich lu'um*), with an average lutein concentration of 38.56 ± 0.14 mg 100 g^{-1} of dried chilli, and β -carotene of 13.02 ± 0.28 mg 100 g^{-1} of dried chili.

Keywords: carotenoids, β -carotene, lutein, capsanthin, zeaxanthin.

I. Introducción

Los frutos pertenecientes a la clasificación *Capsicum*, como es el caso del chile habanero (*Capsicum chinense* Jacq.), se caracterizan por ser una fuente rica de carotenoides (Campos *et al.*, 2013). Estos son un grupo de pigmentos liposolubles de gran importancia para la industria alimentaria, donde son utilizados como colorantes naturales, y para la industria farmacéutica, debido a que estos han demostrado tener una amplia gama de efectos farmacológicos, destacando su actividad antioxidante y su potencial actividad anticancerígena, lo que les otorga la capacidad de prevenir diferentes tipos de enfermedades (Wahyumi *et al.*, 2013).

En la literatura se reporta que la concentración y el perfil de carotenoides presentes en el chile habanero se ven afectados por diversos factores, como la madurez del fruto, las condiciones de cultivo (tipo de suelo, riego, luz, etc.), y los métodos de procesamiento posteriores a la cosecha (Álvarez *et al.*, 2011). Debido a lo mencionado anteriormente, es importante evaluar el tipo de suelo en el que es cultivada la planta de chile habanero y el grado de madurez en el que estos frutos son cosechados, con la finalidad de comprender como estos factores afectan la biosíntesis de carotenoides, y de esta forma mejorar la producción de estos compuestos en el chile habanero.

En el presente capítulo se explica la importancia de los carotenoides, los diferentes factores que afectan su producción, y los diferentes trabajos que se han desarrollado para la cuantificación de estos metabolitos en los frutos del género *Capsicum*. Siendo el principal propósito del presente trabajo el explicar cómo los diferentes factores afectan la producción de carotenoides en el chile habanero (*Capsicum chinense* Jacq.), especialmente el suelo en el que se realiza el cultivo en la península de Yucatán (K'ankab o suelo rojo, Boxlu'um o suelo negro y Ch'ich 'lu'um o suelo café), así como del grado de madurez (color verde o inmaduro y color naranja o maduro) en el perfil y cantidad de carotenoides presentes en el fruto. Esto con la finalidad de identificar la mejor etapa de recolección, y poder darle un valor agregado al chile habanero que es cultivado en la región.

1. 1. Definición de carotenoides

Los carotenoides son compuestos ampliamente distribuidos en la naturaleza, estos son sintetizados principalmente por organismos fotosintéticos (como plantas, algas y cianobacterias) y algunos no fotosintéticos (cierto tipo de hongos y bacterias). (El-Agamey *et al.*, 2004; Tapiero *et al.*, 2004).

En la actualidad se encuentran reportados en la literatura más de 600 carotenoides, los cuales se clasifican de acuerdo a su estructura en carotenos, xantofilas y licopeno. De estos, solo 40 forman parte de la dieta humana, y aproximadamente 20 han sido identificados en la

sangre y el tejido humano, siendo los principales el B-caroteno, el α -caroteno, el licopeno, la luteína y la criptoxantina (Jomova *et al.*, 2013; Rutz *et al.*, 2016).

1. 2. Estructura de los carotenoides

Todos los carotenoides poseen como características químicas comunes una estructura poliisoprenoide, una larga cadena conjugada de doble enlace y una simetría casi bilateral alrededor del doble enlace central (Hempel *et al.*, 2016). Los diferentes carotenoides se van a derivar esencialmente por modificaciones en la estructura base, como ciclaciones en los grupos finales, y la presencia de grupos funcionales con oxígeno, lo que contribuye a las propiedades antioxidantes que estos presentan, así como sus colores característicos (Rao y Rao, 2007). En la Figura 1 se representa la estructura de los carotenoides más comunes, y que podemos encontrar en el chile habanero (*Capsicum chinense* Jacq.) y casi todos los frutos del genero *Capsicum*, en esta figura también podemos observar las características estructurales mencionadas con anterioridad.

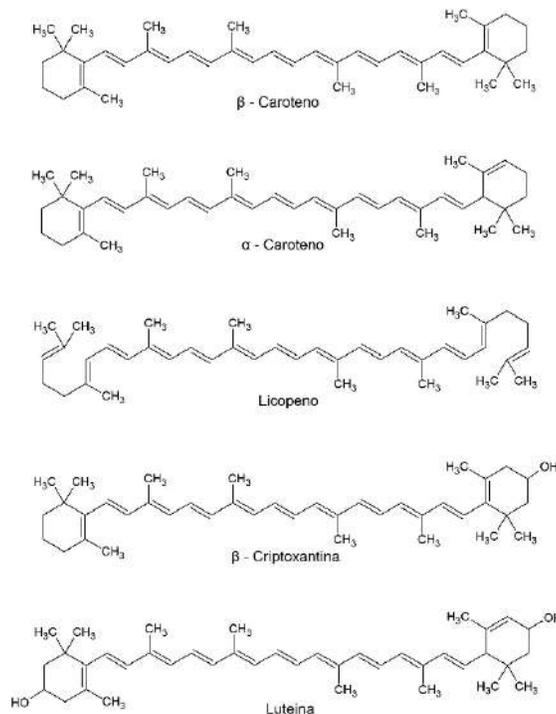


Figura 1. Estructura química de los carotenoides más comunes (Rao y Rao, 2007).

Otra característica estructural a mencionar de los carotenoides es que los dobles enlaces conjugados que estos poseen pueden sufrir isomerización, dando lugar a la formación de los isómeros cis o trans, siendo los isómeros trans los más estables, y en consecuencia los que se encuentran en mayor proporción en los alimentos (Schenk *et al.*, 2014).

1.3. Presencia documentada de los carotenoides en el chile habanero

Los frutos del genero *Capsicum* son considerados una de las principales fuentes de carotenoides entre los cultivos de hortalizas, estos se van a caracterizar por tener colores verdes, rojos, amarillos, y naranjas, los cuales van a depender del perfil de carotenoides presente y de la cantidad en la que estos se encuentran (Lightbourn *et al.*, 2008).

En los chiles de color rojo los principales carotenoides reportados son la capsantina y la capsorrubina, mientras que la violaxantina, el β -caroteno, la luteína, la anteraxantina y la zeaxantina son los pigmentos más importantes en los chiles de color amarillo (Hornero *et al.*, 2000). El chile habanero contiene el mismo perfil de carotenoides que los chiles de color rojo, pero la proporción en la que estos se encuentra es diferente, y dependerá de diversos factores, siendo uno de los más importantes el grado de madurez que presente el fruto (Guzman *et al.*, 2010.).

En la literatura se reportan diferentes trabajos donde se ha determinado el perfil de carotenoides presentes en el chile habanero (*Capsicum chinense* Jacq.), en la Tabla 1 se mencionan algunos de estos trabajos que se han realizado, en los cuales se puede observar que los carotenoides reportados varía entre cada autor. A pesar de lo mencionado anteriormente, ciertos tipos de carotenoides como la luteína, la capsantina, la β -criptoxantina y el β - Caroteno se han reportado en la mayoría de los trabajos realizados, indicando que estos carotenoides son característicos del chile habanero (*Capsicum chinense* Jacq.), y forman parte de la vía de biosíntesis de carotenoides en este tipo de frutos, de la cual hablaremos más adelante.

Tabla 1. Carotenoides reportados en el chile habanero (*Capsicum chinense* Jacq.) y concentración en la que estos se encuentran.

Genero	Carotenoides reportados	Referencia
<i>Capsicum chinense</i>	Luteína Licopeno β - Criptoxantina β - Caroteno	Troconis <i>et al.</i> , 2012.
<i>Capsicum chinense</i>	β - Criptoxantina β - Caroteno α - Caroteno Capsantina Zeaxantina	Howard <i>et al.</i> , 2000.
<i>Capsicum chinense</i>	Luteína Luteoxantina β - Criptoxantina Capsantina Zeaxantina Anteraxantina	Giuffrida <i>et al.</i> , 2013.
<i>Capsicum chinense</i>	β - Caroteno Capsantina	Guzmán <i>et al.</i> , 2010
<i>Capsicum chinense</i>	β - Caroteno	Debnath <i>et al.</i> , 2012
<i>Capsicum chinense</i>	Zeaxantina	Agostini <i>et al.</i> , 2017

1. 4. Vía de síntesis de los carotenoides

Los frutos del genero *Capsicum* han sido ampliamente estudiados para comprender la química y la biosíntesis de los carotenoides en las plantas, esto debido a que los chiles acumulan carotenoides de coloración amarilla, naranja o roja durante su proceso de maduración, durante las primeras etapas estos presentan un color verde debido a la presencia de cloroplastos, pero conforme ocurre la maduración del fruto estos orgánulos sufren modificaciones para convertirse en cromoplastos, los cuales son plastidios que se caracterizan por la acumulación de carotenoides (Gómez *et al.*, 2013; Saini *et al.*, 2015).

Los estudios que se han realizado han dado como resultado que existe relación en la concentración de β -caroteno, la β -criptoxantina y la criptocapsina, lo que sugiere que estos carotenoides están involucrados en la misma vía metabólica y que podrían ser intermediarios de esta (Gómez *et al.*, 2013). También se ha determinado una relación negativa entre los niveles de los tres carotenoides mencionados anteriormente y las xantofilas (capsantina, capsorrubina, neoxantina, mutatoxantina, luteoxantina y criptoflavina), lo que indica que la síntesis de estos compuestos durante la maduración fue paralela a una disminución del β -caroteno, la β – criptoxantina y criptocapsina, y por lo tanto son precursores potenciales de las xantofilas (Gómez *et al.*, 2013). Asimismo, se sugirió que el β -caroteno, la β -criptoxantina y la zeaxantina eran precursores de la violaxantina y la anteraxantina, las que a su vez eran los precursoras de la capsorubina y la capsantina, respectivamente (Saini *et al.*, 2015). Sobre la base de estos resultados, se propuso una vía de síntesis de carotenoides en *Capsicum* representada en la Figura 2 y explicada a continuación.

La biosíntesis de los carotenoides se puede dividir en 5 etapas, la primera etapa consiste en la condensación de 2 moléculas de geranylgeranyl difosfato, las cuales son sintetizadas en la vía del metileritritolofosfato para formar 15-cis-fitoeno, esta reacción es catalizada por la enzima fitoeno sintetasa. En la segunda etapa el 15-cis-fitoeno sufre dos reacciones de forma secuencial para dar paso a la formación del licopeno, esto con la ayuda de dos enzimas desaturadas, la fitoeno desaturasa y la caroteno desaturasa (Gómez *et al.*, 2013; Saini *et al.*, 2015).

El tercer paso en la biosíntesis de carotenoides consiste en la ciclación del licopeno, esta se limita a la formación de un anillo de seis miembros en uno o ambos extremos del precursor acíclico. Estos grupos finales simplemente difieren en la posición de un doble enlace en el anillo de ciclohexano. El tipo de grupo final depende de la naturaleza de la enzima ciclasa. La formación de β -caroteno es catalizada por la enzima licopeno- β -ciclasa, que agrega un anillo β a cada extremo final del licopeno para producir el β -caroteno. En el caso del α -caroteno, la enzima licopeno- ϵ -ciclasa adhiere un anillo ϵ al licopeno y genera δ -caroteno; posteriormente la licopeno- β -ciclasa une un anillo β al extremo final del δ -caroteno para producir el α -caroteno (Gómez *et al.*, 2013; Saini *et al.*, 2015).

Durante la cuarta etapa las moléculas de β -caroteno y α -caroteno sufren reacciones de hidroxilación en sus anillos, dando lugar a la formación de xantofilas, como la luteína y la zeaxantina, las cuales pueden seguir sufriendo reacciones de oxidación para dar lugar a diferentes carotenoides, como la violaxantina, el capsantin y la capsorubina. En la quinta y última etapa la violaxantina se transforma con la ayuda de la enzima neoxantina sintetasa en neoxantina, para finalmente convertirse en ácido abscísico (ABA) (Gómez *et al.*, 2013; Saini *et al.*, 2015).

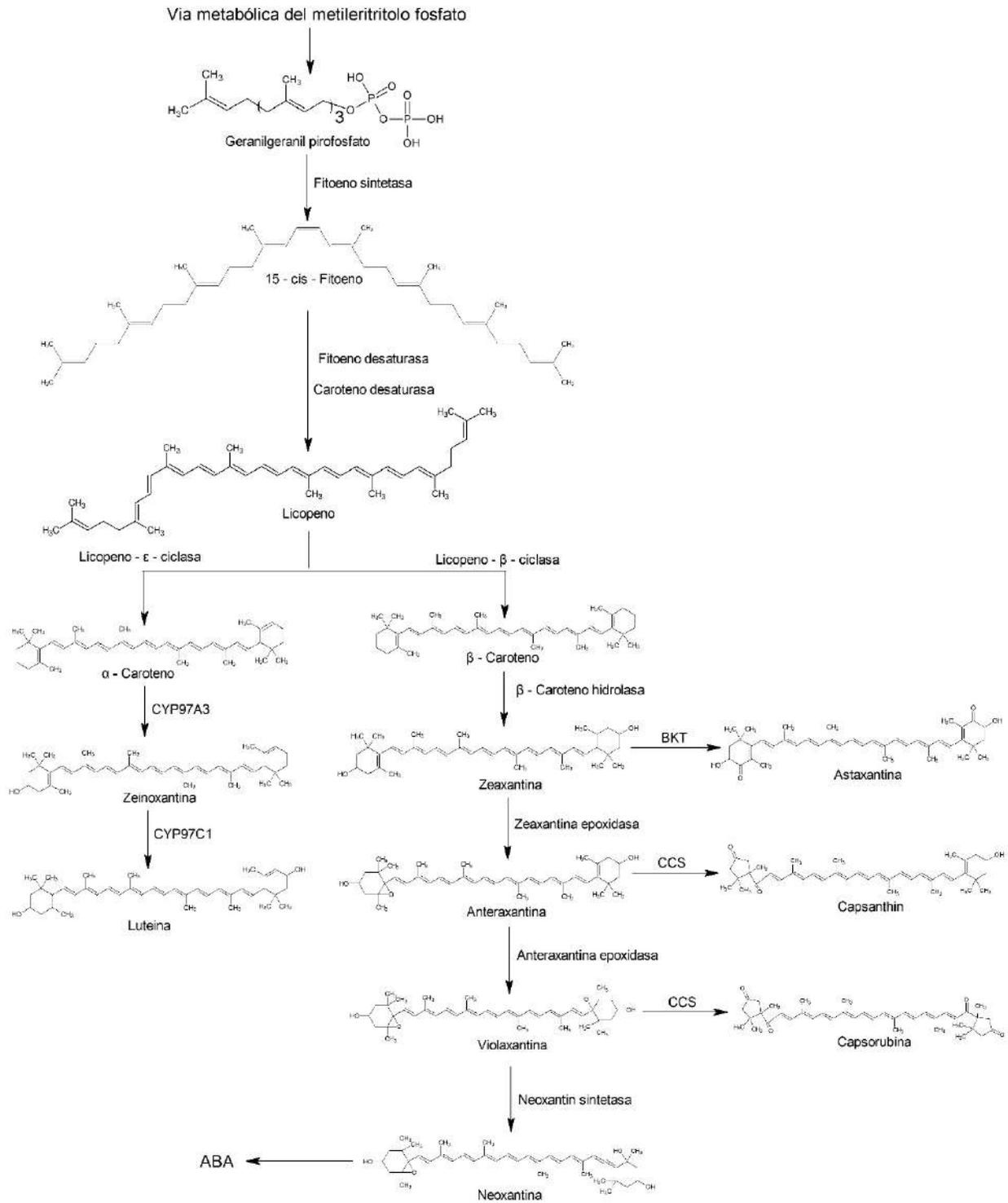


Figura 2. Ruta metabólica para la biosíntesis de carotenoides en el chile habanero (*Capsicum chinense* Jacq.). (Gómez *et al.*, 2013)

1. 5. Factores que afectan la síntesis de los carotenoides

Existen diversos factores que pueden afectar significativamente la síntesis de los carotenoides, entre los principales podemos mencionar el desarrollo del fruto, la presencia del ácido abscísico (ABA), la cantidad de luz a la cual está expuesto el cultivo, el contenido de sal presente en el agua de riego, la cantidad de agua utilizada para el riego, y la temperatura. Estos factores actuarán principalmente generando un efecto en la enzima fitoeno sintetasa, la cual es considerada un limitante en la velocidad de biosíntesis de carotenoides, motivo por el cual los cambios que esta pueda sufrir en su expresión o actividad alteraran la producción de los carotenoides en el fruto o en la planta. Por ejemplo, una sobreexpresión de dicha enzima mejora el contenido total de carotenoides, además de aumentar sustancialmente la síntesis de β -caroteno (Ramesh *et al.*, 2018).

El efecto de la cantidad de luz sobre la producción de carotenoides ha sido estudiado por Bae y Choy en el 2008, demostrando que a mayor tiempo de exposición a la luz por parte de la planta, esta producirá una mayor cantidad de carotenoides a comparación de cuando está en ausencia de la luz, este efecto se asoció a que la luz permite la expresión del gen encargado de la producción de la enzima fitoeno sintetasa, encargada de la síntesis del 15 – cis – fitoeno, intermediario en la ruta de biosíntesis de los carotenoides.

Como se había mencionado anteriormente, la madurez del fruto es otro factor que afecta a la formación de los carotenoides, esto se debe principalmente a que conforme se da el proceso de maduración, la cantidad de clorofila presente disminuye, provocando que se aumente la producción del citocromo FR, el cual absorbe la luz a una longitud entre 705 – 740 nm, esto provoca una respuesta fisiológica en la planta que altera la expresión de los genes, contribuyendo a la formación de la enzima fitoeno sintetasa (Toledo *et al.*, 2010 y Toledo *et al.*, 2014).

Los otros factores mencionados con anterioridad presentan un efecto más específico sobre cierto grupo de carotenoides. Por ejemplo, las altas temperaturas no tienen efecto sobre la producción de estos compuestos, pero las bajas temperaturas contribuye la síntesis de luteína, violaxantin y anteraxantin. La salinidad por otro lado propicia la producción de clorofila a y b, la cual afecta negativamente la síntesis de carotenoides. Mientras que el estrés generado por la sequía, aumenta la producción de luteína, violaxantina y anteraxantina, pero en menor medida a comparación de las bajas temperaturas (Fanciullino *et al.*, 2014; Munne *et al.*, 2013, Poiroux *et al.*, 2014).

En el caso del β -caroteno, no se ha visto un efecto por parte de la temperatura, la salinidad y el estrés generado por la sequía, esto se puede deber a que dichos factores afectan los últimos pasos de la ruta metabólica de la síntesis de carotenoides, los que corresponden al proceso de oxidación de los anillos, y da lugar a los carotenoides que tienen grupos hidroxilo en su estructura molecular. (Fanciullino *et al.*, 2014; Munne *et al.*, 2013, Poiroux *et al.*, 2014).

1. 6. Métodos de extracción de carotenoides reportados

Para poder realizar la cuantificación de los carotenoides en frutos del genero *Capsicum*, se han desarrollado diversos métodos de extracción, algunos de estos están representados en la Tabla 2, en donde podemos observar que la mayoría constan de tres etapas, las cuales

son la extracción de los carotenoides presentes en la muestra, la purificación del extracto, y la saponificación del extracto obtenido de la muestra. En los ejemplos mencionados la mayoría realiza la extracción utilizando acetona, y en algunos casos es utilizado una mezcla de solventes orgánicos que sean afines a los diferentes carotenoides de interés. El proceso de purificación se realiza con la finalidad de eliminar interferencias presentes que pudieran afectar el análisis, usando en la mayoría de los trabajos dietil éter (DEE) con NaCl al 10 %, mientras que la saponificación es llevada a cabo con una solución de KOH en metanol para la eliminación de otros compuestos liposolubles como ácidos grasos que pudieran estar presentes en las muestras a analizar.

Tabla 2. Métodos de extracción reportados en la literatura para la obtención de carotenoides en diferentes muestras de Chile.

Matriz	Extracción	Purificación	Saponificación	Referencia
<i>C. chinense</i>	Acetona	-	-	Troconis <i>et al.</i> , 2012.
<i>C. chinense</i>	Acetona	-	KOH al 20% en MeOH	Howard <i>et al.</i> , 2000.
<i>C. chinense</i>	Acetona	DEE-10% NaCl	-	Giuffrida <i>et al.</i> , 2013.
<i>C. annuum</i>	Acetona	-	KOH al 20% en MeOH	Kosa <i>et al.</i> , 2001
<i>C. annuum</i>	Acetona	-	-	Cserhati <i>et al.</i> , 2000
<i>C. annuum</i>	Acetona	DEE-10% NaCl	-	Hornero <i>et al.</i> , 2000
<i>C. annuum</i>	Acetona	DEE-10% NaCl	30 % KOH en MeOH	Kim <i>et al.</i> , 2004
<i>C. annuum</i>	Acetona	DEE-10% NaCl	20 % KOH en MeOH	Marín <i>et al.</i> , 2004
<i>C. annuum</i>	Acetona	DEE-10% NaCl	20 % KOH en MeOH	Pérez <i>et al.</i> , 2004
<i>C. annuum</i>	MeOH:acetona:DCM (2:2:1)	-	-	Daood <i>et al.</i> , 2005
<i>C. annuum</i>	Acetona	DEE-water	KOH en MeOH	Guerrero <i>et al.</i> , 2006
<i>C. annuum</i>	Acetona	DEE-10% NaCl	-	Kevresan <i>et al.</i> , 2009
<i>C. annuum</i>	MeOH-EA-éter de petróleo (1:1:1)	-	-	Cacciola <i>et al.</i> , 2012
<i>C. annuum</i>	Acetona – NaHCO ₃	DEE-10% NaCl	-	Giuffrida <i>et al.</i> , 2013
<i>C. annuum</i>	CaCO ₃ – MeOH, acetona, hexano	-	40 % KOH en metanol	Cervantes <i>et al.</i> , 2014

1. 7. Usos de los carotenoides

Los carotenoides son compuestos de gran interés comercial, principalmente para la industria farmacéutica, donde son utilizados debido a los efectos farmacológicos que han demostrado tener (Ramaraj y Jang-Seu, 2018). Entre estos efectos farmacológicos destaca la capacidad de estos compuestos de prevenir diferentes tipos de cáncer, por ejemplo, cáncer de mama, hepático, intestinal, leucémico, pulmonar, oral y de próstata. Esta actividad anticancerígena implica una variedad de mecanismos, incluida la inducción de la apoptosis celular y la

supresión de la proliferación celular. Entre los carotenoides que se caracterizan por tener esta actividad, se encuentra el β – caroteno, la astaxantina, la cantaxantina, la zeaxantina, y la β – criptoxantina (Nishino *et al.*, 2002).

Recientes trabajos también han demostrado que los carotenoides pueden ser efectivos para tratar y controlar la diabetes, ya que se ha confirmado que los niveles de carotenoides en la dieta y las concentraciones de estos en la sangre se asocian inversamente con los niveles de glucosa en sangre durante los periodos de ayuno, además de que se ha demostrado que tienen la capacidad de prevenir la resistencia a la insulina (Ylonen *et al.*, 2003).

Otros de los efectos farmacológicos que se reportan de los carotenoides son la actividad antiinflamatoria y antioxidante, además de ayudar a prevenir y tratar la obesidad (Miyashita *et al.*, 2009 y Okada *et al.*, 2008). La actividad antiinflamatoria que presenta este tipo de compuestos ha llamado la atención de muchos investigadores, ya que los carotenoides podrían potencialmente usarse como medicamentos para prevenir y controlar enfermedades inflamatorias crónicas, esto gracias a su capacidad de inhibir la producción de óxido nítrico, prostaglandinas E2 y citoquinas proinflamatorias, así como sus efectos inhibitorios sobre enzimas como la sintasa de óxido nítrico inducible y la ciclooxigenasa-2 (Peerapornpisal *et al.*, 2010).

La actividad antioxidante que presentan los carotenoides es utilizada en la industria cosmética para la producción de cremas y ungüentos que tienen la capacidad de prevenir los daños ocasionados por agentes externos, como los rayos ultravioleta, los cuales causan ruptura y daño a las células de la piel, ocasionando las arrugas y resequedad. El poder utilizar estos pigmentos naturales como agentes terapéuticos para superar estos problemas, ha ocasionado una creciente demanda mundial de carotenoides, especialmente los de origen natural, ya que el consumidor los prefiere en lugar de los que son sintetizados químicamente (Masaki, 2010).

En lo referente a la industria alimentaria, los carotenoides son utilizados como colorantes o aditivos naturales para la producción de alimentos con propiedades nutracéuticas, los cuales han ido ganando popularidad en los últimos años, siendo el β -caroteno y la luteína los más utilizados para estos fines (Irwandi *et al.*, 2011).

1. 8. Trabajos donde se ha cuantificado carotenoides en chile habanero

Anteriormente se han realizado diferentes estudios en los que se han determinado el contenido de carotenoides en muestras de chile del genero *Capsicum*, en la Tabla 3 se representan algunos de estos estudios que se han realizado, en el que podemos observar variaciones en la cantidad y el perfil de carotenoides que reporta cada uno de estos autores, esto se puede deber a las condiciones de cultivo utilizadas por cada uno de los autores, así como el grado de madurez de este al momento de realizar las cosecha y el análisis. Algunos autores como Debnath *et al.* (2012) y Guzmán *et al.* (2010) reportan al β – caroteno como el carotenoide mayoritario en las especies del genero *Capsicum chinense*, con concentraciones de 185.9 y 58.0 mg 100g⁻¹ respectivamente. Por otro lado Howard *et al.* (2000) y Pugliese *et al.*, (2013) reportan como carotenoide prioritario al capsantin, con una concentración de 6.754 mg 100g⁻¹ y de 1.04 mg 100g⁻¹ respectivamente.

Tabla 3. Trabajos reportados en la literatura donde se han cuantificado los carotenoides presentes en diferentes especies del genero *Capsicum*.

Genero	Carotenoide	Cantidad (mg 100g ⁻¹)	Referencia
<i>Capsicum chinense</i>	Luteina	3.75	Troconis et al., 2012
	Licopeno	3.75	
	β – Criptoxantin	5.59	
	β – Caroteno	6.29	
<i>Capsicum chinense</i>	β – Criptoxantin	0.353	Howard et al., 2000.
	β – Caroteno	0.861	
	α – Caroteno	0.222	
	Capsantin	6.754	
	Zeaxantin	0.47	
<i>Capsicum chinense</i>	Luteina	0.48	Giuffrida et al., 2013.
	Luteoxantin	0.07	
	β – Criptoxantin	0.41	
	Capsantin	0.45	
	Zeaxantin	1.08	
	Anteraxantin	0.99	
<i>Capsicum chinense</i>	β – Caroteno	58.0	Guzmán et al., 2010
	Capsantin	30.3	
<i>Capsicum chinense</i>	Capsantin	1.04	Pugliese et al., 2013
	Anteraxantin	0.14	
	Violaxantin	0.09	
	β – Criptoxantin	0.09	
	β – Caroteno	0.01	
<i>Capsicum chinense</i>	β – Caroteno	185.9	Debnath et al., 2012
<i>Capsicum chinense</i>	Zeaxantina	5.60	Agostini et al., 2017
<i>Capsicum annum n</i>	β – Caroteno	28.0	Guzmán et al., 2010
	Capsantin	21.0	
<i>Capsicum annum n</i>	Zeaxantin	0.28	Pugliese et al., 2013
	Anteraxantin	0.25	
	Violaxantin	1.12	
	Neoxantin	0.54	
	Luteina	0.61	
	β – Criptoxantin	0.28	
	β – Caroteno	0.55	
<i>Capsicum baccatum</i>	β – Caroteno	20.0	Guzmán et al., 2010
	Capsantin	96.0	
<i>Capsicum baccatum</i>	Capsantin	2.3	Pugliese et al., 2013
	Zeaxantin	0.7	
	Anteraxantin	1.16	
	Violaxantin	1.72	
	Neoxantin	0.30	

II. Materiales y métodos

2.1 Evaluación del efecto del tipo de suelo, grado de madurez y método de secado en la concentración de carotenoides en chile habanero.

Como parte del proyecto titulado: Análisis de los cambios metabólicos durante el desarrollo del fruto *Capsicum chinense* Jacq cultivado en diferentes tipos de suelos financiado por el fondo de Ciencia Básica del CONACYT, se desarrollaron cinco cultivos de *Capsicum chinense* en el invernadero de la unidad sureste del CIATEJ, de marzo de 2017 a diciembre de 2019. En este capítulo se presentan los resultados del contenido de carotenoides del cultivo cuatro (2018) a los 160 días posteriores al trasplante (DPT) con fecha del 21 de agosto de 2018.

2.2 Secado de la muestra

La mitad de las muestras de las muestras de chile con diferente grado de madurez y provenientes de diferentes suelos de Yucatán (rojo, negro y café) fueron secadas en horno a 65°C por 72 horas, mientras que la otra mitad se sometió a un secado por liofilización a una temperatura de - 50 °C y una presión de 0.200 mBar durante 72 horas. Posterior al secado de los chiles, se realizó la molienda de ellos en un mortero y se pasaron por una malla de # 35 para obtener los polvos de cada tipo de muestra con un tamaño de partícula de 500 μ m, los cuales fueron almacenados a temperatura ambiente en bolsas plásticas protegidas de la luz con papel aluminio.

2.3 Extracción de carotenoides

Se pesaron 500 mg de cada muestra de chile y se colocaron en tubos cónicos de 15 mL, posteriormente se agregaron 4 mL de hexano y se agitó con ayuda de un vortex para su homogenización. Se sonicaron los tubos por 20 minutos a 42 KHz, después el extracto fue centrifugado a 3500 rpm y 4 °C durante 30 minutos, se evaporó el sobrenadante y se resuspendió en 1 mL de hexano, para finalmente filtrar la muestra a través de un filtro de membrana de nylon con un tamaño de poro de 0.22 μ m y depositarla en viales cromatográficos de color ámbar.

2.4 Determinación de carotenoides totales por espectroscopia ultravioleta visible.

Se realizó la medición de los extractos por espectroscopia ultravioleta visible a 450 nm de acuerdo a la metodología desarrollada por Zamacona-Ruiz *et al.* (2018).

2.5 Determinación de carotenoides por UPLC

Se utilizó un equipo de cromatografía de líquidos de ultra presión (UHPLC) Acquity H Class (Waters, USA) con un detector de arreglo de diodos (DAD) y una columna Acquity UPLC HSS C18 (100 Å, 1.8 μ m, 2.1 x 50 mm) (Waters, USA).

Las condiciones cromatográficas para el análisis de carotenoides consistieron en una fase móvil isocrática conformada por acetonitrilo:metanol (70:30) con un flujo de 0.5 ml min⁻¹. La temperatura de la columna fue de 35 °C, el volumen de inyección de 2 μ L y la longitud de onda de 475 nm.

2.6 Diseño factorial 3 x 2 x 2

Se realizó un diseño factorial 3 x 2 x 2 con la finalidad de evaluar el efecto de dos factores sobre la concentración de carotenoides, siendo el factor A, el tipo de suelo, el factor B el grado de madurez y el factor C el método de secado. Los niveles de A fueron: rojo (-1), café (0) y negro (+1), los niveles del factor B fueron: verde ó inmaduro (-1) y naranja ó maduro (+1), mientras que los niveles del factor C fueron: horno (-1) y liofilizado (+1).

2.7 Análisis de datos

Se realizó un análisis de varianza (ANOVA) de tres vías con un nivel de confianza del 95% empleando el paquete estadístico Statgrafics Centurion XVII.II-X64 (Statistical Graphics Corp, USA)

III. Análisis y discusión de resultados

En el presente trabajo se determinó la cantidad de carotenoides totales presentes en el chile habanero (*Capsicum chinense* Jacq.) mediante la técnica de espectroscopia de Uv-vis, evaluando como el tipo de suelo en el que es cultivada la planta donde crece el fruto de chile habanero, el grado de madurez que este presenta y el método de secado al que es sometido después del proceso de cosecha afecta la cantidad de carotenoides totales, los resultados obtenidos en cada una de estas condiciones evaluadas se encuentran representadas en la Tabla 4.

Se realizó un análisis de varianza multifactorial a los resultados obtenidos de la cuantificación de carotenoides totales en *Capsicum chinense jacq* a los 160 DPT, de acuerdo a los resultados obtenidos en dicho análisis, todas las interacciones de los factores y los factores individuales: cosecha, estado de madurez, método de secado y suelo tuvieron un efecto significativo en el contenido de carotenoides totales, corroborando lo reportado por Ramesh *et al.*, 2018, que menciona estos factores como de los principales que repercuten en la concentración de carotenoides presentes.

La mayor concentración de carotenoides totales se obtuvo en los chiles provenientes de plantas crecidas en suelo negro, con grado de madurez naranja (maduro) y secado mediante la técnica de liofilización, este resultado se debe en gran medida al grado de madurez que presenta el fruto, debido a que conforme se va dando la madurez de este, aumenta la biosíntesis y acumulación de carotenoides en los plastidios (Gómez *et al.*, 2013; Saini *et al.*, 2015). Mientras que el método de secado por liofilización utilizado después de la cosecha para la conservación y almacenamiento de los chiles obtuvo los mejores resultados en carotenoides totales debido a que dicha metodología trabaja a una temperatura de - 40°C para realizar el proceso de secado, motivo por el cual la pérdida por la oxidación o degradación de estos compuestos es menor a comparación del secado por horno a 65 °C durante 48 horas. Esto es corroborado por lo reportado por Fratianni *et al.*, 2010, que evaluaron la estabilidad de diferentes carotenoides a diferentes temperaturas, en el que se obtuvo como resultado que la violaxantina y la anteraxatina sufren degradación a temperaturas mayores a los 60 °C.

Tabla 4. Resultados obtenidos en la cuantificación de carotenoides totales en *Capsicum chinense* Jacq., a los 160 días post trasplante, cultivado en tres tipos de suelo cosechado en dos estados de madurez y sometido a dos diferentes métodos de secado.

Tipo de suelo	Grado de madurez	Método de secado	Carotenoides totales (mg 100g ⁻¹ de chile seco)
Rojo	Verde	Horno a 65 °C	24.63 ± 0.24
Café	Verde	Horno a 65 °C	64.62 ± 0.06
Negro	Verde	Horno a 65 °C	53.56 ± 0.30
Rojo	Naranja	Horno a 65 °C	45.28 ± 0.06
Café	Naranja	Horno a 65 °C	55.55 ± 0.26
Negro	Naranja	Horno a 65 °C	55.0 ± 0.15
Rojo	Verde	Liofilizado	42.93 ± 0.07
Café	Verde	Liofilizado	59.58 ± 0.01
Negro	Verde	Liofilizado	56.31 ± 0.02
Rojo	Naranja	Liofilizado	41.04 ± 0.21
Café	Naranja	Liofilizado	38.96 ± 0.11
Negro	Naranja	Liofilizado	134.41 ± 0.13

En la Figura 3, se observa que los chiles maduros (naranjas) cosechados a partir de plantas cultivadas en suelo negro presentaron un mayor contenido de carotenoides totales ($94.71 \pm 0.14 \text{ mg } 100\text{g}^{-1}$) respecto a los otros suelos, por el contrario los chiles provenientes del suelo rojo mostraron el menor contenido de carotenoides totales en ambos estados de maduración ($33.78 \pm 0.27 \text{ mg } 100\text{g}^{-1}$ en el chile inmaduro y $43.16 \pm 0.36 \text{ mg } 100\text{g}^{-1}$ en el maduro), esto ocasionado por que el tipo de suelo en el que se cultiva el chile habanero (*Capsicum chinense* Jacq.) está relacionado con el contenido de metabolitos presentes en este, ya que de acuerdo a lo reportado por Rodríguez *et al.*, (2017), cada suelo posee una composición fisicoquímica diferente que afecta la biosíntesis de los carotenoides.

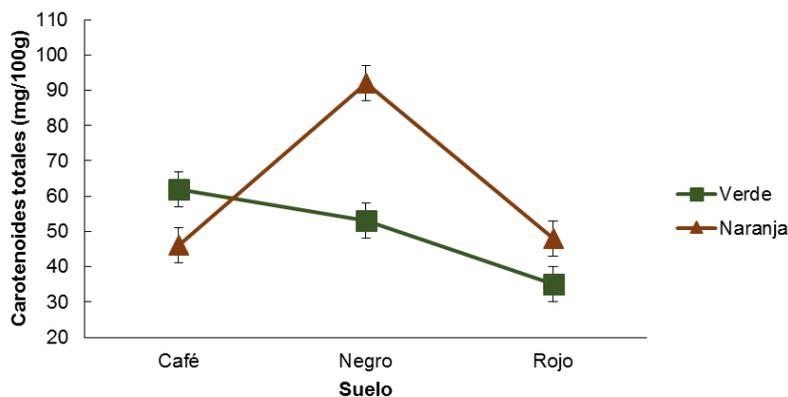


Figura 3. Gráfico de interacción doble Suelo-Estado de maduración para carotenoides totales (mg 100 g⁻¹ de chile seco) en *Capsicum chinense* Jacq.

El método de secado que conserva mejor a los carotenoides en la liofilización, los chiles secados por este método presentaron una mayor concentración de carotenoides totales en ambos estados de maduración (Figura 4), esto es debido a que el secado en horno a 65 °C durante 48 horas pudo ocasionar la oxidación y degradación de estos compuestos, mientras que el secado por liofilización se realiza a una temperatura de - 40 °C, permitiendo una mayor protección de los carotenoides a los procesos oxidativos y degradativos.

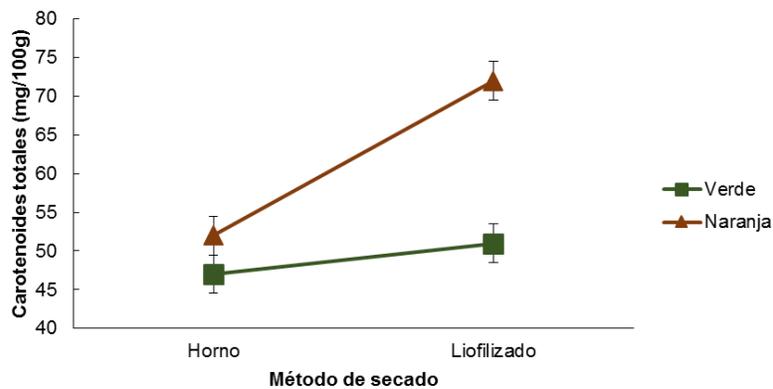


Figura 4. Gráfico de interacción doble método de secado-estado de maduración para carotenoides totales (mg 100 g⁻¹ de chile seco) en *Capsicum chinense* Jacq.

También se determinó la concentración de β -caroteno y luteína en muestras de chile habanero mediante la técnica de cromatografía de líquidos de ultra presión con detector de arreglo de diodos (UPLC-DAD) evaluando los factores mencionados anteriormente en la determinación de estos carotenoides.

En la figura 5 se muestra el cromatograma obtenido con los estándares de carotenoides analizado, siendo la luteína la que tiene el tiempo de retención más bajo (TR = 0.3839 min) en comparación del β -caroteno (TR= 4.0054 min).

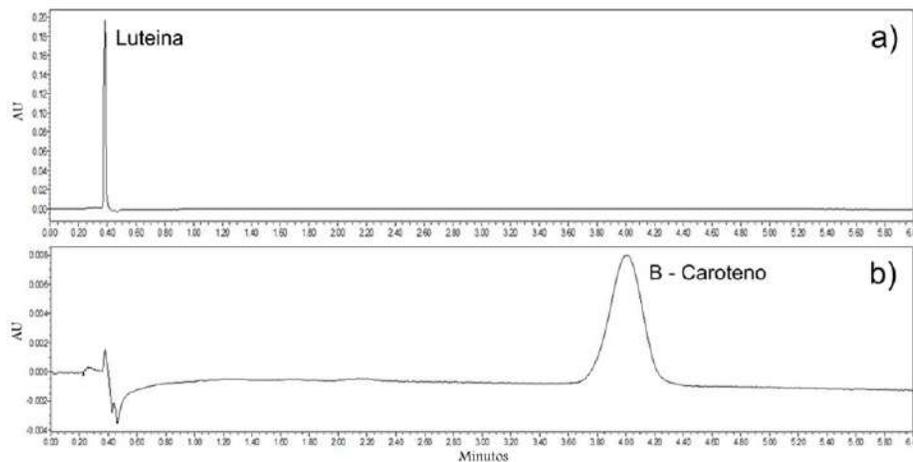


Figura 5. Cromatogramas: UPLC-DAD con columna Acquity UPLC HSS C18 (100 Å, 1,8 mm, 2,1 x 50 mm). a) Estándar de luteína y b) estándar de β -caroteno. Método: flujo de 0.5 ml min⁻¹. Temperatura de columna: 35 °C. Fase móvil acetonitrilo:metanol (70:30). Volumen de inyección de 2 μ L y longitud de onda de 475 nm.

Los resultados del análisis para cada una de las condiciones evaluadas se representa en la Tabla 5, en esta se puede observar que la mayor concentración presente de β – caroteno y luteína se obtuvo en los chiles crecidos en plantas cultivadas en el suelo café, con grado de madurez verde y secado mediante el método de liofilización.

Tabla 5. Resultados obtenidos de la cuantificación de carotenoides en chile habanero (*Capsicum chinense* Jacq.) cultivado en diferentes tipos de suelo, con diferente grado de madurez y sometido a diferentes procesos de secado.

Tipo de suelo	Grado de madurez	Método de secado	Caroteno (mg 100g ⁻¹ de chile seco)	Luteína (mg 100g ⁻¹ de chile seco)
Rojo	Verde	Horno a 65 °C	8.677 ± 0.141	18.352 ± 0.282
Café	Verde	Horno a 65 °C	10.410 ± 0.283	25.626 ± 2.548
Negro	Verde	Horno a 65 °C	10.783 ± 1.694	28.754 ± 8.472
Rojo	Naranja	Horno a 65 °C	0.988 ± 0	9.087 ± 0.559
Café	Naranja	Horno a 65 °C	0.299 ± 0.141	7.682 ± 0.423
Negro	Naranja	Horno a 65 °C	0.298 ± 0.140	8.146 ± 0.281
Rojo	Verde	Liofilizado	8.875 ± 0.141	27.024 ± 0.423
Café	Verde	Liofilizado	13.021 ± 0.283	38.562 ± 0.142
Negro	Verde	Liofilizado	7.288 ± 0.424	28.654 ± 0.141
Rojo	Naranja	Liofilizado	3.697 ± 0.141	15.388 ± 0.283
Café	Naranja	Liofilizado	0 ± 0	0 ± 0
Negro	Naranja	Liofilizado	3.210 ± 0.284	14.848 ± 0.284

El análisis estadístico realizado a los resultados obtenidos (Tabla 5) de la determinación de β – caroteno dio como resultado que el grado de madurez es el factor que presenta efecto significativo sobre la concentración de carotenoides, mientras que los otros factores evaluados (tipo de suelo y método de secado) no tuvieron efecto significativo sobre la concentración de este analito en el fruto, tal como se observa en la Figura 6.

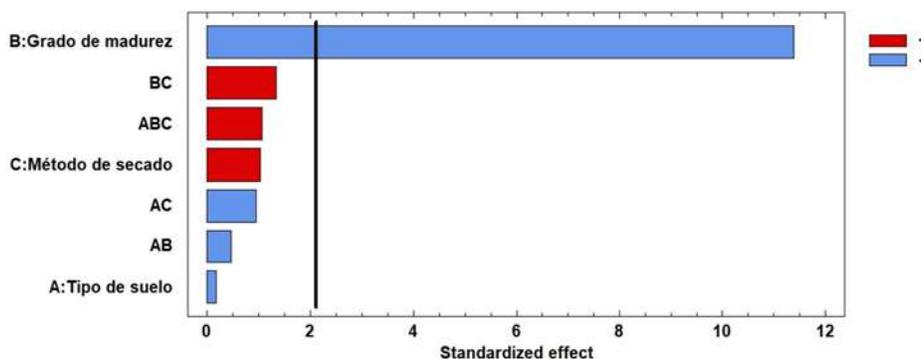


Figura 6. Diagrama de Pareto obtenido del diseño 3 x 2 x 2 para evaluar el efecto de los factores sobre la concentración de β – caroteno (AB, AC, BC y ABC corresponde a las interacciones de los factores).

En la Figura 7 se representan los resultados obtenidos del análisis estadístico, en el que se determinó que el grado de madurez es el único factor que tiene efecto significativo en la cantidad de luteína presente en el chile habanero, indicando además que los frutos inmaduros son los que presentan una mayor concentración de este carotenoide. El hecho de que la madurez sea el factor que tiene mayor efecto sobre la concentración de estos dos compuestos, y que estos se encuentran en mayor concentración en el chile inmaduro (verde) se debe a que ambos son intermediarios en la ruta de biosíntesis de carotenoides, esto quiere decir que conforme se vaya dando la madurez del fruto, estos dos carotenoides serán

transformados dando paso a la formación de las xantofilas (Gómez *et al.*, 2013; Saini *et al.*, 2015)

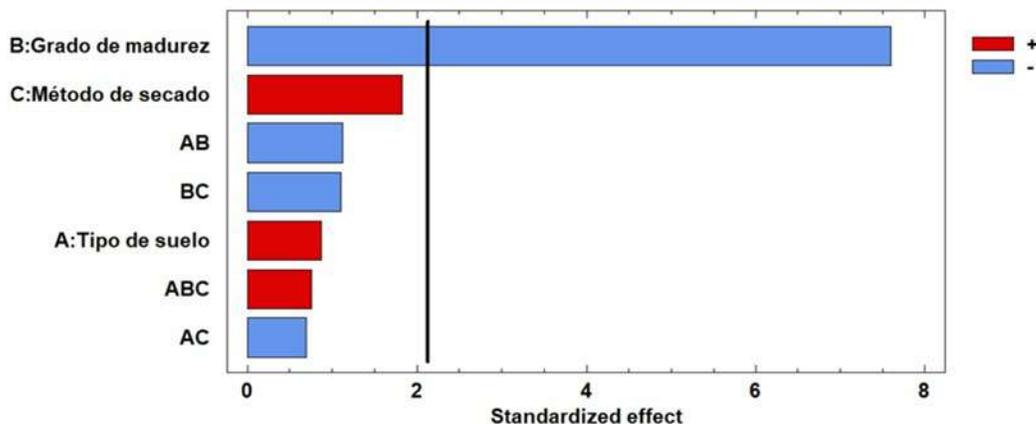


Figura 7. Diagrama de Pareto obtenido del diseño 3 x 2 x 2 para evaluar el efecto de los factores sobre la concentración de luteína caroteno (AB, AC, BC y ABC corresponde a las interacciones de los factores).

IV. Conclusiones

El chile habanero (*Capsicum chinense* Jacq.) se caracteriza por ser una fuente de carotenoides, reportándose como los principales: β -caroteno, α -caroteno, licopeno, β -criptoxantina y luteína. Estos compuestos son de gran interés para la industria farmacéutica, donde son utilizados por su capacidad para prevenir diferentes tipos de cáncer y controlar la diabetes. Experimentalmente se determinó que el valor máximo de carotenoides totales ($134.41 \pm 0.13 \text{ mg } 100\text{g}^{-1}$ de chile seco) fue cuantificado en el chile habanero liofilizado, cosechado en estado maduro (naranja) producido por plantas cultivadas en suelo negro (*Box lu'um*) a los 160 DPT. En el caso del β – caroteno y la luteína, de los tres factores que se evaluaron, el grado de madurez fue el que tuvo efecto significativo sobre estos 2 carotenoides, encontrándose la mayor concentración de estos en el chile inmaduro (verde) crecido en plantas cultivadas en suelo café (*Ch'ich 'lu'um*) y secado mediante la técnica de liofilización, con una concentración promedio de luteína de $38.56 \pm 0.14 \text{ mg } 100\text{g}^{-1}$ de chile seco, y de β -caroteno de $13.02 \pm 0.28 \text{ mg } 100\text{g}^{-1}$ de chile seco. Estos carotenoides se encontraron en mayor concentración en el chile inmaduro (verde) debido a que son intermediarios en la ruta de biosíntesis de carotenoides, esto significa que conforme se da el proceso de maduración del fruto, estos dos carotenoides son transformados dando paso a la formación de las xantofilas.

V. Referencias

- Bae, G.; Choi, G. (2008). Decoding of Light Signals by Plant Phytochromes and Their Interacting Proteins. *Annu. Rev. Plant Biol.* 2008, 59, 281–311. DOI: 10.1146/annurev.arplant.59.032607.092859
- Borges, G.L., Moo, C.K., Ruiz, J.N., Osalde, M.B., González, C.V., Yam, C.C., Can, F.P. (2014). Suelos destinados a la producción de chile habanero en Yucatán: características físicas y

- químicas predominantes. *Agrociencia*. 48, 347 – 359. http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1405-31952014000400001
- Cacciola, F., Donatoc, P., Giuffrida, D., Torreb, G., Dugob, P., Mondellob, L. (2012). Ultra high pressure in the second dimension of a comprehensive two-dimensional liquid chromatographic system for carotenoid separation in red chili peppers. *J Chromatogr A*. 1255: 244 – 251. DOI: 10.1016/j.chroma.2012.06.076
- Campos, M. R. S., Gómez, K. R., Ordo, Y. M., & Ancona, D. B. (2013). Polyphenols, ascorbic acid and carotenoids contents and antioxidant properties of habanero pepper (*Capsicum chinense*) fruit. DOI:10.4236/fns.2013.48A006
- Cervantes-Paz, B., Yahia, E.M., Ornelas-Paz, J.J., Victoria-Campos, C.I., Ibarra-Junquera, V., Pérez-Martínez, J.D., Escalante-Minakata, P. (2014). Antioxidant activity and content of chlorophylls and carotenoids in raw and heat-processed Jalapeño peppers at intermediate stages of ripening. *Food Chem* 146:188 – 196. DOI: 10.1016/j.foodchem.2013.09.060
- Cserhati, T., Forgacs, E., Morais, M.H., Mota, T., Ramos, A. (2000). Separation and quantitation of colour pigments of chili powder (*Capsicum frutescens*) by high-performance liquid chromatography-diode array detection. *J Chromatogr A* 896 (1–2): 69 – 73. <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/11093641>
- Daood, H.G., Biacs, P.A. (2005). Simultaneous determination of sudan dyes and carotenoids in red pepper and tomato products by HPLC. *J Chromatogr Sci* 43 (9): 461 – 465. <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/16212791>
- El-Agamey, A., Lowe, G.M., McGarvey, D.J., Mortensen, A., Phillip, D.M., Truscott, T.G. (2004). Carotenoid radical chemistry and antioxidant/pro-oxidant properties. *Arch Biochem Biophys* 430: 37 – 48. DOI: 10.1016/j.abb.2004.03.007
- Fanciullino, A. L.; Bidel, L. P. R.; (2014). Urban, L. Carotenoid Responses to Environmental Stimuli: Integrating Redox and Carbon Controls into a Fruit Model. *Plant, Cell Environ*. 37 (2), 273 – 289. DOI: 10.1111/pce.12153
- Fратиanni, A., Cinquanta, L., & Panfili, G. (2010). Degradation of carotenoids in orange juice during microwave heating. *LWT-Food Science and Technology*, 43(6), 867-871. DOI:10.1016/j.lwt.2010.01.011
- Giuffrida, D., Dugo, P., Torre, G., Bignardi, C. Cavazza, A., Corradini, C., Dugo, G. (2013). Characterization of 12 *Capsicum* varieties by evaluation of their carotenoid profile and pungency determination. *Food Chemistry*. 140, 794 – 802. DOI: 10.1016/j.foodchem.2012.09.060
- Gómez-García, M., Ochoa-Alejo, N. (2013). Biochemistry and Molecular Biology of Carotenoid Biosynthesis in Chili Peppers (*Capsicum spp.*). *Int. J. Mol. Sci.*, 14, 19025 – 19053; DOI:10.3390/ijms140919025
- Guil-Guerrero JL, Martínez-Guirado C, del Mar Reboloso-Fuentes M, Carrique-Pérez A (2006) Nutrient composition and antioxidant activity of 10 pepper (*Capsicum annuum*) varieties. *Eur Food Res Technol* 224(1): 1 – 9. https://www.researchgate.net/publication/225622632_Nutrient_composition_and_antioxidant_activity_of_10_pepper_Capsicum_annuum_varieties
- Guzmán, I., Hamby, S., Romero, J., Bosland, P. W., O'Connell, M. A. (2010). Variability of Carotenoid Biosynthesis in Orange Colored *Capsicum spp.* *Plant Sci*, 179, 49 – 59. DOI: 10.1016/j.plantsci.2010.04.014
- Hempel, J., Schädle, C. N., Leptihn, S., Carle, R., & Schweiggert, R. M. (2016). Structure related aggregation behavior of carotenoids and carotenoid esters. *Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry*, 317, 161-174. <https://doi.org/10.1016/j.jphotochem.2015.10.024>
- Howard, L. R., Talcott, S. T., Brenes, C. H., Villalon, B. (2000). Changes in Phytochemical and Antioxidant Activity of Selected Pepper Cultivars (*Capsicum Species*) As Influenced by Maturity. *J. Agric. Food Chem.* 48, 1713 – 1720. <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/10820084>
- Hornero-Mendez, D., de Guevara, R. G. L., Minguez-Mosquera, M. I. (2000). Xanthophyll Esterification Accompanying Carotenoid Overaccumulation in Chromoplast of *Capsicum*

- annuum Ripening Fruits Is a Constitutive Process and Useful for Ripeness Index. *J. Agric. Food Chem.* 48, 1617 – 1622. DOI: 10.1021/jf9912046
- Hornero-Méndez, D., De Guevara, R.G., Mínguez-Mosquera, M.I. (2000). Carotenoid biosynthesis changes in five red pepper (*Capsicum annuum* L.) cultivars during ripening. Cultivar selection for breeding. *J Agric Food Chem* 48: 3857 – 3864. DOI: 10.1021/jf991020r
- Irwandi, J., Dedi, N., Fitri, H., Fitri, O. (2011). Carotenoids: Sources, medicinal properties and their application in food and nutraceutical industry. *Journal of Medicinal Plants Research.* 5 (33) 7119 – 7131. DOI: 10.5897/JMPRx11.011
- Jomova, K., Valko, M. (2013). Health protective effects of carotenoids and their interactions with other biological antioxidants. *Eur J Med Chem* 70: 102–110. DOI: 10.1016/j.ejmech.2013.09.054
- Kevresan, Z.S., Mandic, A.P., Kuhajda, K.N., Sakac, M.B. (2009). Carotenoid content in fresh and dry pepper (*Capsicum annuum* L) fruits for paprika production. *Food Process Qual Saf* 1–2:21 – 27. http://fins.uns.ac.rs/e-journal/index.php?mact=Magazines.cntnt01.details.0&cntnt01hierarchyid=6&cntnt01sortby=magazine_id&cntnt01sortorder=asc&cntnt01summarytemplate=current&cntnt01detailtemplate=detaljno&cntnt01cd_origpage=180&cntnt01magazineid=53&cntnt01returnid=188
- Kim, S., Park, J.B., Hwang, I.K. (2004). Composition of main carotenoids in Korean red pepper (*capsicum annuum*, L) and changes of pigment stability during the drying and storage process. *J Food Sci* 69 (1): FCT39 – FCT44. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2621.2004.tb17853.x>
- Kosa, A., Cserhati, T., Forgacs, E., Morais, H., Mota, T., Ramos, A.C. (2001). Profiling of colour pigments of chili powders of different origin by high-performance liquid chromatography. *J Chromatogr A* 915(1–2):149–154. <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/11358243>
- Lightbourn, G.J., Griesbach, R.J., Novotny, J.A., Clevidence, B.A., Rao, D.D., Stommel, JR. (2008). Effects of anthocyanin and carotenoid combinations on foliage and immature fruit color of *Capsicum annuum* L. *Hered.* 99, 105 – 111. DOI: 10.1093/jhered/esm108
- Masaki, H. Role of antioxidants in the skin: Anti-aging effects. *J. Dermatol. Sci.* 2010, 58, 85 – 90. DOI: 10.1016/j.jdermsci.2010.03.003
- Marín, A., Ferreres, F., Tomás-Barberán, F.A., Gil, M.I. (2004). Characterization and quantitation of antioxidant constituents of sweet pepper (*Capsicum annuum* L.). *J Agric Food Chem* 52 (12): 3861 – 3869. DOI: 10.1021/jf0497915
- Medina, F.L., Echeverria, I.M., Pacheco, R.A., Ruiz, N.L., Guzman, A., Martinez, M.E. (2008). Influence of Nitrogen and Potassium Fertilization on Fruiting Capsaicin Content in Habanero Pepper (*Capsicum chinense* Jacq.). *Soil Management, Fertilization, and Irrigation.*, 43, 1549 – 1554. <http://agris.fao.org/agris-search/search.do?recordID=US201300927004>
- Miyashita, K. (2009). Function of marine carotenoids. *Forum Nutr.* 61, 136 – 146. DOI: 10.1159/000212746
- Munne-Bosch, S.; Queval, G.; Foyer, C. H. (2013). The Impact of Global Change Factors on Redox Signaling Underpinning Stress Tolerance. *Plant Physiol.*161 (1), 5 – 19. DOI: <https://doi.org/10.1104/pp.112.205690>
- Nishino, H., Murakoshi, M., Li, T., Takemura, M., Kuchide, M., Kanazawa, M., Mou, X., Wada, S., Masuda, M., Ohsaka, Y. (2002) Carotenoids in cancer chemoprevention. *Cancer Metastasis Rev.* 21, 257 – 264. <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/12549764>
- Okada, T.; Nakai, M.; Maeda, H.; Hosokawa, M.; Sashima, T.; Miyashita, K. (2008). Suppressive effect of neoxanthin on the differentiation of 3T3-L1 adipose cells. *J. Oleo Sci.* 57, 345 – 351. https://www.jstage.jst.go.jp/article/jos/57/6/57_6_345/pdf
- Peerapornpisal, Y., Amornlerdpison, D., Jamjai, U., Taesotikul, T., Pongpaibul, Y., Nualchareon, M., Kanjanapothi, D. (2010). Antioxidant and anti-inflammatory activities of brown marine alga, *Padina minor* Yamada. *Chiang Mai J. Sci.* 37, 507 – 516. <http://aunilo.uum.edu.my/Find/Record/th-cmuir.6653943832-3635/Details>

- Pérez-López, A.J., Núñez-Delicado, E., López-Nicolas, J.M., Amor, F.M.D., Carbonell-Barrachina, A.A. (2007). Effects of agricultural practices on color, carotenoids composition, and minerals contents of sweet peppers, cv. almuden. *J Agric Food Chem* 55: 8158 – 8164. DOI: 10.1021/jf071534n
- Poiroux-Gonord, F.; Fanciullino, A. L.; Bert, L.; Urban, L. (2012). Effect of Fruit Load on Maturity and Carotenoid Content of Clementine (*Citrus Clementina* Hort. Ex Tan.) Fruits. *J. Sci. Food Agric.* 92 (10), 2076 – 2083. DOI: 10.1002/jsfa.5584
- Pugliese, A., Rosa, M., Tundis, R., O'Callaghan, Y., Galvin, K., Menichini, F., O'Brien, N. (2013). The effect of domestic processing on the content and bioaccessibility of carotenoids from chili peppers (*Capsicum* species). *Food Chemistry* 141. 2606 – 2613. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2013.05.046>
- Ramaraj, S., Jang-Seu, K. (2018). A Review of the Biological Activities of Microalgal Carotenoids and Their Potential Use in Healthcare and Cosmetic Industries. *Mar. Drugs*. 16, 26. DOI: 10.3390/md16010026
- Ramesh, K., Young-Soo, K. (2018). Significance of Genetic, Environmental, and Pre- and Postharvest Factors Affecting Carotenoid Contents in Crops: A Review. *J. Agric. Food Chem.* 66, 5310 – 5324. DOI: 10.1021/acs.jafc.8b01613
- Rao, A.V., Rao, L.G. (2007). Carotenoids and human health. *Pharmacological Research*. 55: 207 – 216. DOI:10.1016/j.phrs.2007.01.012
- Rodríguez, I.M., Ramírez, M.O., Echevarría, I. (2017). Soils of Yucatan: effect on the growth of the habanero chili plant (*Capsicum chinense*). *Agricultural Research & Technology*, 8 (1), 1 – 2. DOI: 10.19080/ARTOAJ.2017.08.555730.
- Rutz, J.K., Borges, C.D., Zambiasi, R.C., da Rosa, C.G., da Silva, M.M. (2016). Elaboration of microparticles of carotenoids from natural and synthetic sources for applications in food. *Food Chem* 202: 324–333. DOI: 10.1016/j.foodchem.2016.01.140
- Saini, R.K., Nile, S.H., Park, S. (2015). Carotenoids from fruits and vegetables: Chemistry, analysis, occurrence, bioavailability and biological activities. *Food Research International*. 76, 735 – 750. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2015.07.047>
- Schenk, E. R., Mendez, V., Landrum, J. T., Ridgeway, M. E., Park, M. A., & Fernandez-Lima, F. (2014). Direct observation of differences of carotenoid polyene chain cis/trans isomers resulting from structural topology. *Analytical chemistry*, 86(4), 2019-2024. <https://doi.org/10.1021/ac403153m>
- Tapiero, H., Townsend, D.M., Tew, K.D. (2004). The role of carotenoids in the prevention of human pathologies. *Biomed Pharmacother* 58: 100–110. DOI: 10.1016/j.biopha.2003.12.006
- Toledo-Ortiz, G.; Huq, E.; Rodríguez-Concepcion, M. Direct Regulation of Phytoene Synthase Gene Expression and Carotenoid Biosynthesis by Phytochrome-Interacting Factors. *Proc. Natl. Acad. Sci. U. S. A.* 2010, 107 (25), 11626 – 11631. DOI: 10.1073/pnas.0914428107
- Toledo-Ortiz, G.; Johansson, H.; Lee, K. P.; Bou-Torrent, J.; Stewart, K.; Steel, G.; Rodríguez-Concepcion, M.; Halliday, K. J. (2014). The HY5-PIF Regulatory Module Coordinates Light and Temperature Control of Photosynthetic Gene Transcription. *PLoS Genet.* 10 (6), e1004416. DOI: 10.1371/journal.pgen.1004416
- Troconis, T., Rojas L., Hernandez, R., Villa, T., Maldonado, M., Dorantes, A., Tellez, M, Jaramillo, F. (2012). Biochemical and Molecular Analysis of Some Commercial Samples of Chilli Peppers from Mexico. *Journal of Biomedicine and Biotechnology*. 10, 1 – 11. DOI: 10.1155/2012/873090
- Wahyumi, Y., Ballester, A.R., Sudarmonowati, E., Bino, R.J., Bovy, A. G. (2013) Secondary Metabolites of *Capsicum* Species and Their Importance in the Human Diet. *Journal of Natural Products.*, 76, 783 – 793. <https://doi.org/10.1021/np300898z>
- Ylonen, K., Alfthan, G., Groop, L., Saloranta, C., Aro, A., Virtanen, S.M. (2003). Dietary intakes and plasma concentrations of carotenoids and tocopherols in relation to glucose metabolism in subjects at high risk of type 2 diabetes: The Botnia dietary study. *Am. J. Clin. Nutr.* 77, 1434 – 1441. DOI: 10.1093/ajcn/77.6.1434

Zamacona-Ruiz, M., Ramírez-Sucre, M. y Rodríguez-Buenfil, I. (2018) Comparación de dos métodos de extracción y secado para la cuantificación de carotenoides en chile habanero. Revista del Centro de Graduados e Investigación. Instituto Tecnológico de Mérida, 33 (73), 65 – 68. <http://www.revistadelcentrodegraduados.com/2019/06/comparacion-de-dos-metodos-de.html>

CAPÍTULO 9

Vitaminas en chile habanero (*Capsicum chinense* Jacq.) y factores que afectan su producción

Vitamins in habanero pepper (*Capsicum chinense* Jacq.) and factors that affect their production

Oney-Montalvo, Julio E.¹, Ramírez-Sucre, Manuel O.¹, Rodríguez-Buenfil, Ingrid M.^{1*}

¹Centro de Investigación y Asistencia en Tecnología y Diseño del Estado de Jalisco. Subsede Sureste. Tablaje Catastral 31264 Km 5.5 Carr, Sierra Papacal-C huburná puerto. Parque Científico Tecnológico de Yucatán. CP 97302. Mérida, Yucatán, México. *autor de correspondencia: irodriguez@ciatej.mx

Resumen

El chile habanero (*Capsicum chinense* Jacq.) es reconocido por ser una excelente fuente de vitamina A, E y C. La concentración de las vitaminas en el chile dependerá de diferentes factores que afectan la biosíntesis de estos compuestos. Por esta razón, en el presente trabajo se evaluó la influencia del tipo de suelo, el grado de madurez y el método de secado utilizado después de la cosecha en la concentración de vitaminas. Las plantas de donde provinieron los chiles fueron cultivadas en tres tipos de suelos nombrados a acorde a la clasificación maya como: *K'ankab lu'um* (suelo rojo), *Box lu'um* (suelo negro) y *Chich lu'um* (suelo café). Los resultados indicaron que la mayor concentración de vitamina C se obtuvo en el chile proveniente de plantas cultivadas en suelo negro, con grado de madurez naranja y secado mediante la técnica de liofilización, dando una concentración promedio de 136.55 ± 0.36 mg $100g^{-1}$ de chile seco. Mientras que la mayor concentración de vitamina E se obtuvo en el chile proveniente de plantas cultivadas en el suelo rojo, con grado de madurez naranja y secado mediante la técnica de horno a 65 °C, con una concentración promedio de 9.27 ± 2.06 mg $100g^{-1}$ de chile seco. Concluyéndose que los factores evaluados en el presente trabajo tienen un efecto significativo en la concentración de vitaminas en el chile habanero.

Palabras clave: vitaminas, chile, ácido L-ascórbico, α – tocoferol, madurez.

Abstract

The habanero pepper (*Capsicum chinense* Jacq.) is recognized for being an excellent source of vitamins A, E and C. The concentration of vitamins in the pepper will depend on different factors that affect the biosynthesis of these compounds. For this reason, this work evaluated the influence of the soil type, the degree of maturity and the drying technique used after the harvest on the concentration of vitamins. The plants where the peppers came from were grown in three types of soils named according to the Mayan classification as: *K'ankab lu'um* (red soil); *Box lu'um* (black soil); *Chich lu'um* (brown soil). The results indicated that the highest concentration of vitamin C was obtained in the peppers from plants grown in black soil, with a degree of orange maturity and dried by the lyophilization technique, giving an average concentration of 136.55 ± 0.36 mg $100g^{-1}$ of pepper dry. While the highest concentration of vitamin E was obtained in the peppers from plants grown in the red soil, with

an orange maturity degree and dried by the oven technique at 65 ° C, with an average concentration of $9.27 \pm 2.06 \text{ mg } 100\text{g}^{-1}$ of dried pepper. Concluding that the factors evaluated in the present work have a significant effect on the concentration of vitamins in the habanero pepper.

Keywords: vitamins, pepper, L-ascorbic acid, α -tocopherol, maturity.

I. Introducción

1.1 Generalidades

El chile habanero (*Capsicum chinense* Jacq.) es considerado una fuente importante de vitaminas, siendo las principales por su importancia y cantidad en la que están presentes en el chile la vitamina C (ácido ascórbico), la vitamina A que se encuentra en forma de carotenoides (provitamina A) y la vitamina E que comprende al grupo de los tocoferoles. Estas vitaminas son ampliamente estudiadas debido a que son muy utilizadas en la industria alimenticia y farmacéutica (Castro *et al.* 2014).

El perfil y concentración de vitaminas presentes en el chile habanero se debe a diversos factores como: la cantidad de radiación solar, la temperatura, el grado de madurez, los procesos de cosecha y el tratamiento o tipo de almacenamiento del chile después de la cosecha. Debido a esto, es importante evaluar cómo estos factores influyen en la biosíntesis y degradación de estas vitaminas, y poder determinar las condiciones adecuadas de cultivo que permitan la mayor producción y conservación de este tipo de metabolitos en el chile habanero (Tamaoki *et al.* 2003; Chennupati *et al.* 2011).

En este capítulo se abordan los siguientes aspectos: 1) La revisión bibliográfica de las principales vitaminas reportadas en el chile habanero (*Capsicum chinense* Jacq.), las vías por las cuales se lleva a cabo la biosíntesis de estos compuestos, los factores que afectan su producción, y la importancia de estos para la industria. 2) Se muestran los resultados de la determinación de estas vitaminas en chile habanero obtenido de plantas cultivadas en diferentes tipos de suelos característicos de la Península de Yucatán (*K'ankab lu'um* o suelo rojo, *Boxlu'um* o suelo negro y *Ch'ich 'lu'um* o suelo café) con diferente grado de madurez (inmaduro o verde y maduro o naranja), y dos técnicas de secado (horno o liofilizado) utilizadas después de la cosecha.

1.2 Definición de vitaminas

Las vitaminas son un grupo de compuestos orgánicos que se encuentran distribuidos en diferentes tipos de plantas y animales, estas son indispensables en pequeñas cantidades para el correcto funcionamiento del cuerpo, ya que cumplen la función de coenzimas en diferentes procesos metabólicos (Kaplan *et al.* 2007). Estas se clasifican principalmente de acuerdo a sus características de solubilidad, dividiéndose en dos grupos: 1) vitaminas hidrosolubles, aquellas que tienen la capacidad de disolverse en agua y 2) vitaminas liposolubles, aquellas que son solubles en disolventes orgánicos de baja polaridad (Halver, 2003). En los frutos del género *Capsicum* al igual que otras frutas y verduras son una rica fuente de vitaminas, reportándose principalmente la vitamina A, E y C (Wahyumi *et al.* 2013). La vitamina C es una vitamina hidrosoluble que desempeña múltiples funciones biológicas, principalmente actuando como cofactor para diversas enzimas que participan en la biosíntesis de colágeno y carnitina, en la conversión de neurotransmisores dopamina a

norefinefrina y en el metabolismo de la tirosina, además de ser un regulador de hierro dentro del organismo. El ser humano no posee la capacidad de sintetizar esta vitamina, por lo que se debe consumir en la dieta para un correcto funcionamiento del organismo y evitar enfermedades que puedan estar asociadas a su deficiencia (Hacisevkd A. 2009).

Por otro lado la vitamina E es considerado el principal antioxidante soluble en lípidos en el sistema de defensa antioxidante de las células, y se obtiene exclusivamente a través de la dieta. El término "vitamina E" se refiere a una familia de ocho homólogos naturales que son sintetizados por plantas a partir del ácido homogentísico, de los cuales cuatro pertenecen al grupo de los tocoferoles y los otros cuatro al grupo de los tocotrienoles (Hess 2017).

1.3 Estructura de las vitaminas

El ácido L-ascórbico es un ácido dibásico conformado estructuralmente por un grupo enediol integrado en un anillo de lactona heterocíclica de cinco miembros, se considera que las propiedades químicas y físicas que caracterizan al ácido ascórbico están relacionadas con esta parte de su estructura. La molécula de ácido ascórbico además posee dos átomos de carbono asimétricos que provoca que aparte del ácido L-ascórbico existan tres estereoisómeros: el ácido D-ascórbico, el ácido D-isoascórbico y el ácido L-isoascórbico, los cuales presentan poca o nula actividad antiescorbútica a comparación del ácido L-ascórbico (Foyer 2017).

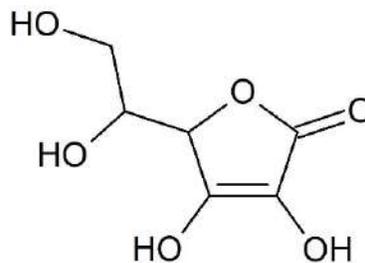


Figura 1. Estructura química del ácido ascórbico (vitamina C). (Foyer 2017)

Por otro lado, los tocoferoles son compuestos derivados de los isoprenoides, conformados estructuralmente por una parte polar derivada del metabolismo de aminoácidos aromáticos y una cadena hidrocarbonada saturada derivada de la vía metabólica del geranilgeranil difosfato. Estos compuestos se pueden clasificar en α , β , o γ , según su número y posición de los grupos metilos en el anillo aromático. Cada compuesto de tocoferol tienen una actividad diferente de la vitamina E, siendo el α – tocoferol (Figura 2) el que presenta la mayor actividad vitamínica, además de encontrarse en una mayor concentración en los frutos del genero *Capsicum* a comparación de los otros tocoferoles (DellaPenna y Pogson, 2006).

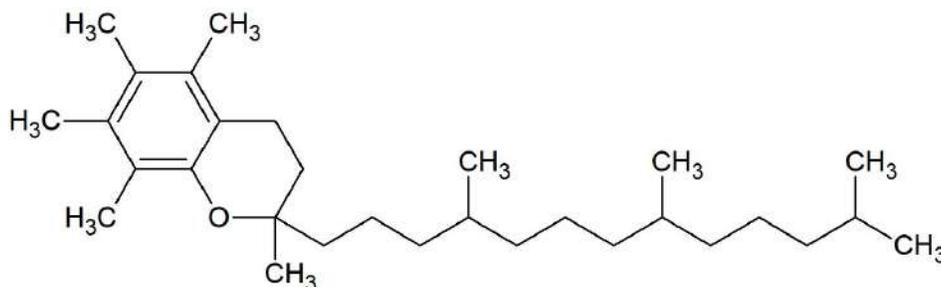


Figura 2. Estructura química del α – tocoferol (Vitamina E). (DellaPenna y Pogson, 2006)

1.4 Presencia documentada de las vitaminas en el chile habanero

Como se había mencionado con anterioridad, en la literatura se reporta la presencia principalmente de tres vitaminas en el chile habanero (*Capsicum chinense* Jacq.), dentro de la clasificación de vitaminas hidrosolubles destaca la vitamina C o ácido ascórbico, mientras que dentro de las vitaminas liposolubles las principales son la vitamina A (retinol) y la vitamina E (α -tocoferol) (Wahyumi *et al.* 2013).

Los frutos del genero *Capsicum* como el chile habanero, son una fuente rica de vitamina C, reportándose concentraciones para este tipo de frutos que van de los 43 a los 247 mg 100g⁻¹ de chile fresco, llegando a contribuir entre un 50 a un 100% de los requerimientos diarios de esta vitamina (Wahyumi *et al.* 2013).

En el caso de la vitamina E, esta se encuentra presente en este tipo de frutos en diferentes tipos de vitámeros, como α -tocoferol, β -tocoferol, γ -tocoferol y δ -tocoferol, siendo el α -tocoferol el más importante debido a que se encuentra en una mayor proporción, además de poseer la mayor actividad vitamínica de los vitámeros mencionados con anterioridad. La concentración de esta vitamina en los frutos del genero *Capsicum* va de los 2 a los 17 mg 100g⁻¹ de chile (Wahyumi *et al.* 2013).

1.5 Vía de síntesis de las vitaminas

La biosíntesis de vitamina C está ampliamente relacionada con la producción y cantidad de azúcares presentes en el fruto, siendo la D-glucosa-6-fosfato quien actúa como precursor de la ruta de síntesis. Esta molécula va a sufrir diferentes tipos de reacciones catalizadas por dos enzimas isomerasa, la glucosa-6-fosfato isomerasa y la manosa-6-fosfato isomerasa, lo que da la formación de la D-manosa-6-fosfato la cual sufrirá posteriormente otras dos reacciones más para la formación de GDP-D-manosa (Valpuesta y Botella, 2004).

La GDP-D-manosa reaccionará con ayuda de la enzima GDP-Manosa-3,5-epimerasa, para dar lugar a la formación de la GDP-L-Galactosa, que a su vez formará L-galactosa-1 fosfato que llevará a cabo una reacción catalizada con la enzima L-galactosa fosfatasa para obtener L-galactosa, que finalmente sufrirá 2 reacciones de forma simultánea con ayuda de las enzimas L-galactosa deshidrogenasa y L-galactona-1,4-lactona deshidrogenasa para finalmente obtener el ácido ascórbico o vitamina C (Valpuesta y Botella, 2004).

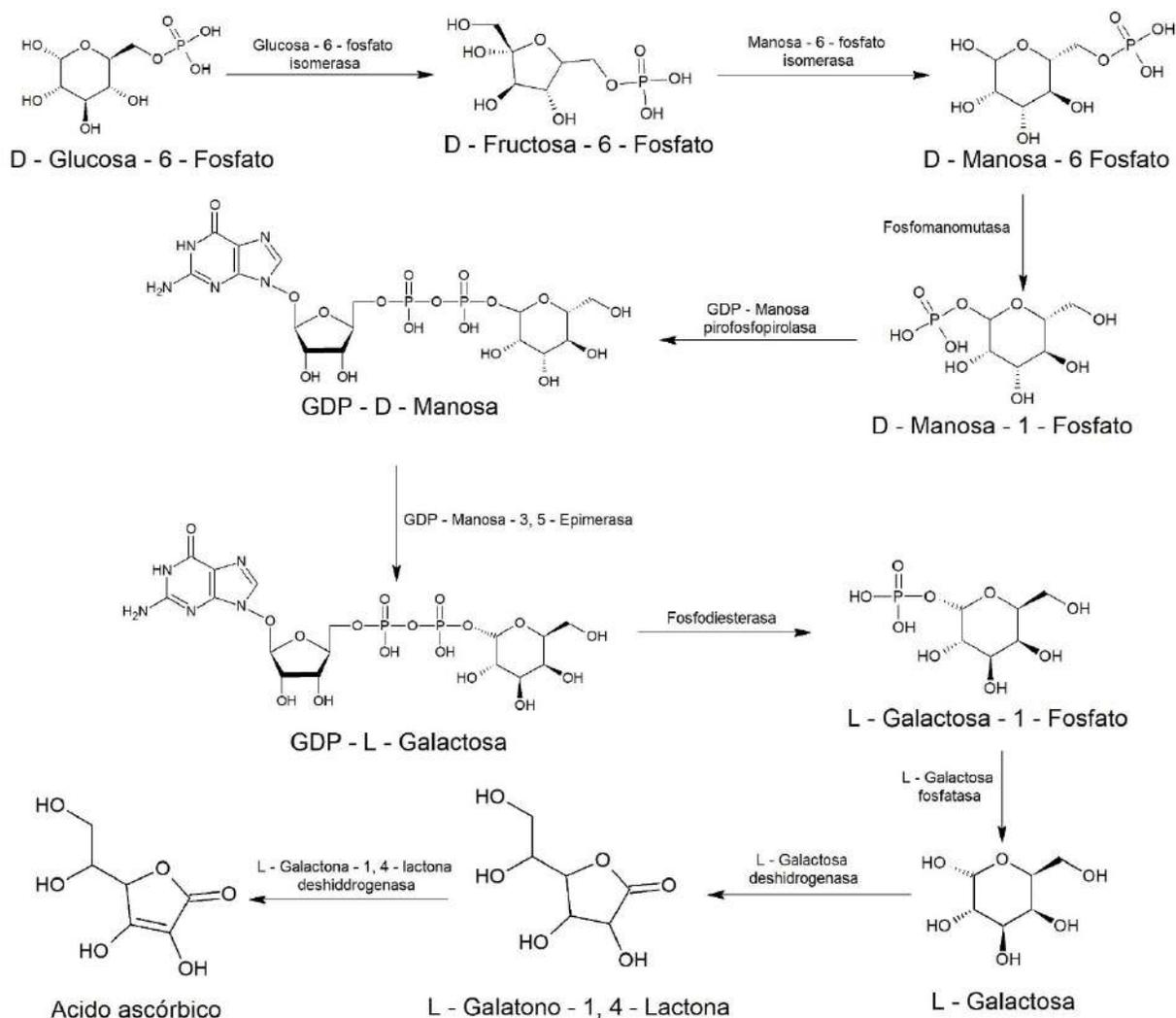


Figura 3. Ruta metabólica para la biosíntesis de ácido ascórbico (vitamina C) en el chile habanero (*Capsicum chinense* Jacq.). (Valpuesta y Botella, 2004)

En el caso de la biosíntesis de los tocoferoles en las plantas es un proceso que se puede dividir en cuatro etapas (Figura 4). En la primera se da la formación del ácido homogentísico a partir del ácido p-hidroxipiruvato el cual es un producto de la ruta del shikimato, esta reacción es catalizada por la enzima p-hidroxifenilpiruvato dioxigenasa. En la segunda etapa el ácido homogentísico con ayuda de la enzima ácido homogentísico fitil transferasa reacciona con el fitil di fosfato, formando la 2-metil-6-fetil-1,4-benzoquinol. A partir de este compuesto se pueden llevar a cabo dos reacciones, una catalizada por la metil transferasa, la cual forma 2,3-dimetil-5-finil-benzoquinol, y otra catalizada por la tocoferal cicliasa que produce el δ -tocoferol, estas reacciones corresponden a la tercera etapa de la biosíntesis de tocoferoles (Laurent y Dean, 2010).

Finalmente en la cuarta etapa de la síntesis de tocoferoles, el 2,3-dimetil-5-finil-benzoquinol es convertido a γ -tocoferol por la enzima tocoferol cicliasa, para posteriormente ser convertido a α -tocoferol pero en esta ocasión por la enzima γ -tocoferol metil transferasa. Mientras que el δ -tocoferol por su parte es transformado en β -tocoferol por la enzima δ -tocoferol metil transferasa (Laurent y Dean, 2010).

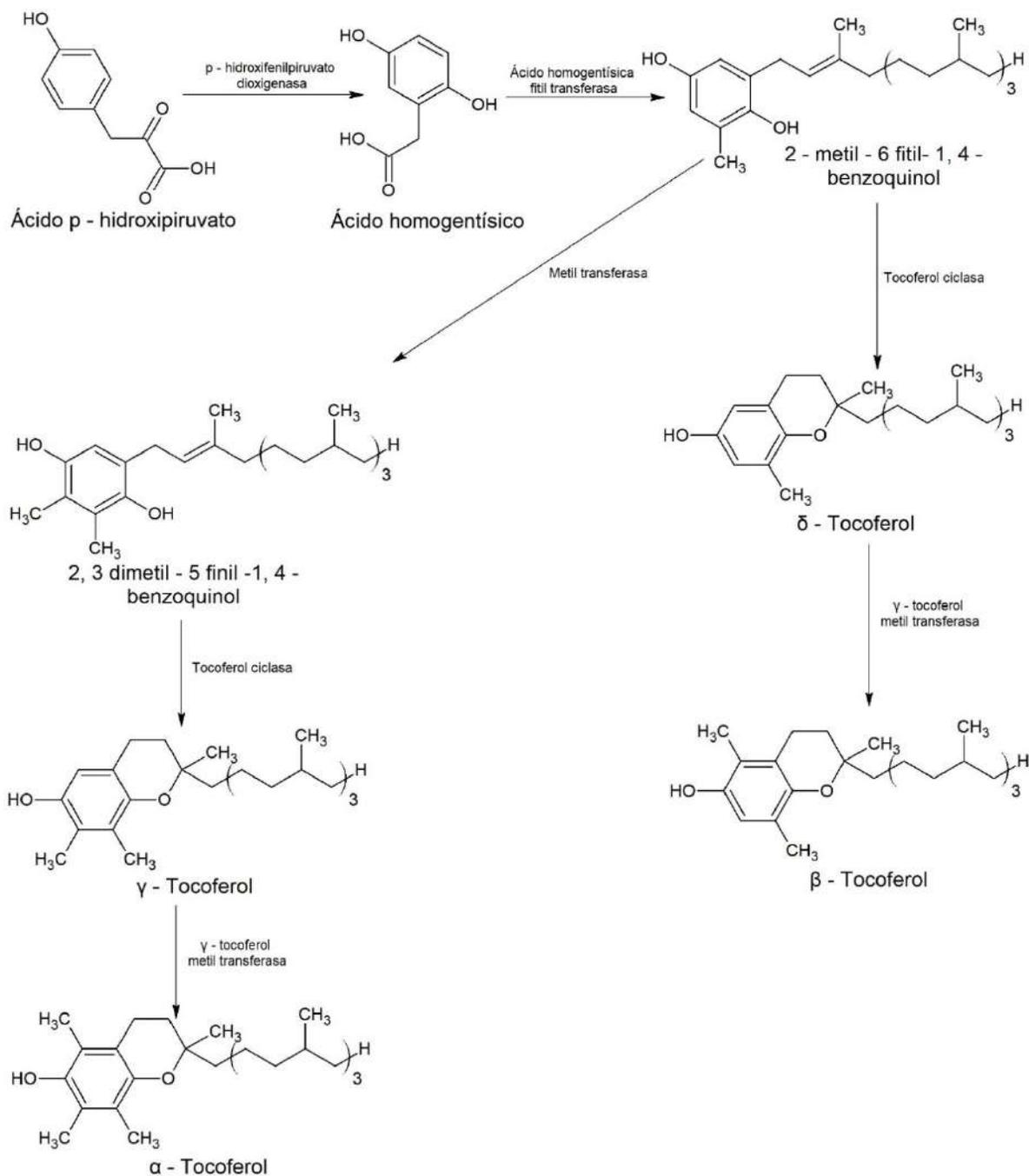


Figura 4. Ruta metabólica para la biosíntesis de tocoferoles (vitamina E) en el chile habanero (*Capsicum chinense* Jacq.). (Laurent y Dean, 2010)

1.6 Factores que afectan la síntesis de las vitaminas

En la literatura se reportan diferentes factores que afectan la síntesis de ácido ascórbico en el chile habanero los que acuerdo a Tamaoki *et al.* (2003) se clasifican como los principales: la cantidad de radiación solar a la que el fruto y la planta son sometidos, el grado de madurez del chile y los procesos posteriores a la cosecha, comprendiendo el tratamiento y el tipo de almacenamiento.

El estudio realizado por Tamaoki *et al.* (2003) demostró que el paso limitante para la síntesis de ácido ascórbico es en el que se lleva a cabo la transformación del L-galactono-1,4-lactona a ácido ascórbico con la ayuda de la enzima L-galactono-1,4-lactona deshidrogenasa, por lo que los factores anteriormente mencionados puedan afectar dicha reacción o la producción de la enzima que lleva a cabo la reacción, afectando directamente la producción de ácido ascórbico.

El grado de madurez es una de los factores que afecta la biosíntesis del ácido ascórbico, debido a que está relacionada con la cantidad de azúcares presentes. Los azúcares son considerados precursores para la producción de ácido ascórbico. Además que la expresión del gen que sintetiza la enzima L-galactono-1,4-lactona deshidrogenasa está relacionada con el grado de madurez, expresándose en mayor medida conforme aumenta la madurez del chile habanero (Tamaoki *et al.* 2003).

Mientras que la cantidad de radiación solar a la que está expuesto el fruto y la planta, también afecta la producción de la enzima L-galactono-1,4-lactona deshidrogenasa, reportándose durante el día un incremento en la producción de esta, pero durante la noche la cantidad de la enzima decrece de forma considerable, por lo que se deduce que si el fruto es expuesto a una mayor cantidad de luz durante un tiempo prolongado, la concentración de ácido ascórbico será mayor (Tamaoki *et al.* 2003).

En el caso de la vitamina E, se han reportado que los principales factores que afectan a la síntesis de este compuesto son la temperatura, la cantidad de radiación solar a la que es sometido el cultivo, el estrés oxidativo que este pudiera sufrir, así como el grado de madurez que presente el fruto (Chennupati *et al.* 2011; Kanwischer *et al.* 2005).

Los resultados del estudio realizado por Chennupati *et al.* 2011 indicaron que la temperatura afecta la producción de α -tocoferol, reportándose un incremento entre 675 y 752 % en la cantidad presente de esta vitamina al aumentar la temperatura del cultivo. Aunque la respuesta de los tocoferoles específicos fue diferente con respecto al α -tocoferol, observándose el efecto contrario para el δ -tocoferol y el γ -tocoferol, Esta respuesta opuesta del δ -tocoferol y del γ -tocoferol sugiere que la temperatura actúa negativamente sobre la enzima γ -tocoferol metil transferasa o el gen responsable de su síntesis.

En el caso de la luz y el estrés oxidativo Kanwischer *et al.* 2005 reportaron que al exponer el cultivo a una mayor cantidad de luz y a condiciones de estrés oxidativo la cantidad de tocoferoles presentes en el fruto aumentará considerablemente, obteniendo hasta un incremento del 50% de tocoferoles totales. Kanwischer *et al.* 2005 asociaron este fenómeno a que se presenta una sobre expresión del gen VTE1, encargado de la síntesis de la enzima tocoferol ciclasa, la cual convierte el 2-metil-6-fitil-1, 4-benzoquinol en δ -tocoferol, y la 2, 3-dimetil-5-finil-benzoquinol en γ -tocoferol.

1.7 Métodos de extracción de vitaminas aplicados

La importancia de determinar las vitaminas presentes en diferentes muestras alimentarias para realizar un control de la presencia y cantidad de estas, ha propiciado el desarrollo de diferentes metodologías que permitan la extracción de estas moléculas y a su vez su cuantificación de forma exacta y precisa (Santos *et al.* 2012).

En el caso de las muestras pertenecientes al género *Capsicum* como es el caso del chile habanero se han reportado diferentes métodos, algunos de estos los podemos ver representados en la Tabla 1, en los cuales se extraen principalmente tres tipos de vitaminas, por parte de las vitaminas hidrosolubles la vitamina C o ácido ascórbico, mientras que de las vitaminas liposolubles la vitamina E o tocoferoles (principalmente α -tocoferol) y provitamina

A (abarcando los carotenoides, principalmente β – caroteno), aunque en el presente capítulo no abarcaremos la provitamina A porque se hablará más a fondo de los carotenoides que forman parte de esta clasificación en otro capítulo de este libro.

Una característica que distingue a los métodos de extracción de la Tabla 1 es que las condiciones a utilizar dependen de la vitamina de interés, utilizándose principalmente una maceración con ácido meta fosfórico a pH 3 para la extracción de vitamina C, esto debido a las características polares que tiene esta molécula. Mientras que para la vitamina E se reportan diferentes métodos que van desde el uso de fluidos supercríticos a la sonicación de la muestra utilizando un solvente que pueda solubilizar a los tocoferoles, como es el caso de la acetona y del acetonitrilo.

Tabla 1. Métodos reportados en la literatura, para la extracción de vitaminas en muestras del genero *Capsicum*.

Especie	Vitaminas	Método de extracción	Referencia
<i>C. annum</i>	E Provitamina A	Fluidos supercríticos	Romo <i>et al.</i> 2012
<i>C. annum</i>	E	Maceración con acetona	Wesoowska <i>et al.</i> 2011
<i>C. annum</i>	E	Sonicación con acetonitrilo por 30 minutos	Supradip <i>et al.</i> 2015
<i>C. annum</i>	E	Maceración con acetona y centrifugación	Ramesh <i>et al.</i> 2015
<i>C. chinense</i>	C	Maceración a 30 °C con un buffer por 30 minutos	Flavia <i>et al.</i> 2013
<i>C. annum</i>	C	Maceración con ácido meta fosfórico y centrifugación	Topuz <i>et al.</i> 2007
<i>C. annum</i>	C	Maceración con ácido meta fosfórico y centrifugación	Deepa <i>et al.</i> 2007
<i>C. chinense</i>	C	Maceración con ácido meta fosfórico al 3 %	Bae <i>et al.</i> 2014

1.8 Usos de las vitaminas

De los metabolitos presentes en el chile habanero (*Capsicum chinense* Jacq.), las vitaminas son las que tienen más tiempo de ser estudiadas, y por lo tanto son ampliamente usadas debido al amplio conocimiento que ya se tienen de ellas, siendo el más conocido su aplicación como suplementos alimenticios, en el que estas contribuyen a que las personas alcancen su requerimiento vitamínico diario, evitando así diferentes tipos de padecimientos que se presentan cuando existe una deficiencia de alguna vitamina (Halver, 2003).

Entre otras aplicaciones de la vitamina C podemos mencionar aquellas relacionadas con sus características antioxidantes. Estudios realizados con anterioridad, como el de Khassaf *et al.* 2003 demuestran que la ingesta de vitamina C tiene la capacidad de influenciar en la habilidad de los linfocitos para expresar enzimas protectoras en respuesta al estrés oxidativo que ocurre al desempeñar alguna actividad física, indicando que la suplementación de esta vitamina es recomendable en deportistas.

La vitamina E está asociada como una alternativa para al tratamiento de diferentes enfermedades dermatológicas, a pesar de esto todavía no hay pruebas suficientes de estudios controlados sobre la eficacia de esta vitamina en el tratamiento de trastornos dermatológicos específicos. Sin embargo en el área de la dermatología la vitamina E ha demostrado mediante diversos estudios la capacidad de tener efecto fotoprotectores, además de proporcionar beneficios dermatológicos que superan el propósito de los cosméticos y pueden extenderse a un área que se ha denominado "cosmecéuticos" (Keen y Hassan 2016).

Estudios tópicos han demostrado que la aplicación de vitamina E antes de la exposición a los rayos UV reduce significativamente las respuestas agudas de la piel, como eritema y edema, formación de células de quemaduras solares, peroxidación de lípidos, aducto de ácido desoxirribonucleico (ADN), inmunosupresión y unión inducida por ultravioleta A (UVA) de fotosensibilizantes y quimioluminiscencia. Las reacciones cutáneas crónicas debidas a la exposición prolongada a los rayos ultravioleta B (UVB) o UVA, como las arrugas en la piel, y la incidencia de tumores en la piel también disminuyeron con las formulaciones tópicas de vitamina E (Keen y Hassan 2016).

1.9. Trabajos previos de vitaminas en chile

Debido a la importancia del estudio de las vitaminas presentes en muestras de chile, se han desarrollado en los últimos años diferentes métodos que permitan la cuantificación de estas en forma confiable para el control de calidad, en la Tabla 2 se muestran algunos de estos trabajos en los que se determinan 2 tipos de vitaminas, principalmente la vitamina C y la vitamina E. En la Tabla 2 también se puede observar que los diferentes autores citados obtuvieron diferentes resultados al cuantificar la concentración de vitaminas en chiles del genero *Capsicum*. La vitamina E se reporta en concentraciones que van de 1.40 a 16.80 mg 100g⁻¹ de chile seco, mientras que la vitamina C se ha encontrado en una mayor concentración que va de los 53.2 a los 280 mg 100g⁻¹ de chile seco.

Tabla 2. Trabajos reportados donde se han cuantificado la concentración de vitaminas en chiles de genero *Capsicum*.

Especie	Vitamina	mg 100g ⁻¹ de chile seco	Referencia
<i>C. annuum</i>	E	1.40	Romo <i>et al.</i> 2012
<i>C. annuum</i>	E	2.83	Wesoowska <i>et al.</i> 2011
<i>C. annuum</i>	E	4.39	Supradip <i>et al.</i> 2015
<i>C. annuum</i>	E	1.46	Ramesh <i>et al.</i> 2015
<i>C. chinense</i>	E	3.80	Wahyumi <i>et al.</i> 2011
<i>C. chinense</i>	E	16.08	Chun <i>et al.</i> 2006
<i>C. chinense</i>	E	2.77 – 5.90	Menichini <i>et al.</i> 2009
<i>C. chinense</i>	C	98.10	Flavia <i>et al.</i> 2013
<i>C. annuum</i>	C	75.1 – 93.15	Topuz <i>et al.</i> 2007
<i>C. annuum</i>	C	88.40 – 94.25	Deepa <i>et al.</i> 2007
<i>C. chinense</i>	C	78.2 – 230.5	Bae <i>et al.</i> 2014
<i>C. annuum</i>	C	173.7 – 280.0	Kumar <i>et al.</i> 2009
<i>C. chinense</i>	C	53.20	Wahyumi <i>et al.</i> 2011
<i>C. chinense</i>	C	193.15	Hussain <i>et al.</i> 2011
<i>C. chinense</i>	C	187.24 – 281.73	Campos <i>et al.</i> 2013

II. Materiales y métodos

2.1 Evaluación del efecto del tipo de suelo, grado de madurez y la técnica de secado en la concentración de vitaminas en chile habanero.

Como parte del proyecto titulado: Análisis de los cambios metabólicos durante el desarrollo del fruto *Capsicum chinense* Jacq cultivado en diferentes tipos de suelos financiado por el fondo de Ciencia Básica del CONACYT, se desarrollaron cinco cultivos de *Capsicum chinense* en el invernadero de la unidad sureste del CIATEJ, de marzo de 2017 a diciembre de 2019. En este capítulo se presentan los resultados del contenido de vitamina C y E del cultivo cuatro (2018) a los 209 días posteriores al trasplante (DPT) con fecha del 9 de octubre de 2018.

2.2 Secado de la muestra

La mitad de las muestras de chile con diferente grado de madurez y provenientes de diferentes suelos de Yucatán (rojo, negro y café) fueron secadas en horno a 65°C por 72 horas, mientras que la otra mitad se sometió a un secado por liofilización a una temperatura de - 50 °C y una presión de 0.200 mBar durante 72 h. Posterior al secado de los chiles, se realizó la molienda de ellos en un mortero y se pasaron por una malla de # 35 para obtener los polvos de cada tipo de muestra con un tamaño de partícula de 500 μ m, los cuales fueron almacenados a temperatura ambiente en bolsas plásticas protegidas de la luz con papel aluminio.

2.3 Extracción de vitamina C

Se pesaron 50 mg de cada muestra de chile y se colocaron en tubos cónicos de 15 mL, posteriormente se agregaron 4 mL de una mezcla agua:acetonitrilo (80:20) y se agitó con ayuda de un vortex, para su homogenización. Se sonicaron los tubos por 20 minutos a 42 KHz, para finalmente filtrar la muestra con una membrana de nylon con un tamaño de poro de 0.22 μ m y depositarlo en viales cromatográficos de color ámbar.

2.4 Extracción de vitamina E

Se pesaron 500 mg de cada muestra de chile y se colocaron en tubos cónicos de 15 mL, posteriormente se agregaron 4 mL de hexano y se agitó con ayuda de un vortex para su homogenización. Se sonicaron los tubos por 20 minutos a 42 KHz, después el extracto fue centrifugado a 4700 rpm y 4 °C durante 30 minutos, se evaporó el sobrenadante y se resuspendió en 1 mL de acetonitrilo-Metanol (50:50), para finalmente filtrar la muestra con una membrana de nylon con un tamaño de poro de 0.22 μ m, y depositarlo en viales cromatográficos de color ámbar.

2.5 Determinación de vitaminas por UPLC

Se utilizó un equipo de cromatografía de líquidos de ultra presión (UHPLC) Acquity H Class (Waters, USA) con un detector de arreglo de diodos (DAD) y una columna Acquity UPLC HSS C18 (100 Å, 1.8 μ m, 2.1 x 50 mm) (Waters, USA).

Las condiciones cromatográficas para el análisis de vitamina C consistió en una fase móvil isocrática conformada por agua con ácido fórmico al 0.1%, con una velocidad de flujo de 0.25 mL min⁻¹, la temperatura de la columna fue de 27 °C, el volumen de inyección de 2 µL y la longitud de onda de 244 nm.

Mientras que las condiciones cromatográficas para el análisis de vitamina E consistió en una fase móvil conformada por acetonitrilo-Metanol (50:50) con ácido fórmico al 0.2%, con una velocidad de flujo de 0.5 mL min⁻¹, la temperatura la de columna fue de 35 °C, el volumen de inyección de 2 µL y la longitud de onda de 290 nm.

2.6 Diseño factorial 3 x 2 x 2

Se realizó un diseño factorial 3 x 2 x 2 con la finalidad de evaluar el efecto de tres factores sobre la concentración de vitaminas, siendo el factor A, el tipo de suelo, el factor B el grado de madurez y el factor C el método de secado. Los niveles de A fueron: rojo (-1), café (0) y negro (+1), los niveles del factor B fueron: verde ó inmaduro (-1) y naranja ó maduro (+1), mientras que los niveles del factor C fueron: horno (-1) y liofilizado (+1).

2.7 Análisis de datos

Se realizó un análisis de varianza (ANOVA) de tres vías con un nivel de confianza del 95% empleando el paquete estadístico Statgrafics Centurion XVII.II-X64 (Statistical Graphics Corp, USA)

III. Análisis y discusión de resultados

En la Tabla 3 se reportan los resultados obtenidos de la cuantificación de vitamina C y vitamina E en chiles habanero con dos grados de madurez: Inmaduro (verde) y maduro (naranja) provenientes de plantas cultivadas en tres tipos de suelo: suelo rojo (*K'ankab lu'um*), suelo negro (*Boxlu'um*) y suelo café (*Ch'ich 'lu'um*). Una vez realizada la cosecha, las muestras de chile fueron sometidas a secado mediante dos técnicas diferentes: horno y liofilizado. Estos factores fueron seleccionados con la finalidad de evaluar el efecto de estos factores en la concentración de vitamina C y E. En la figura 5a se muestra el cromatograma obtenido con los estándares de vitaminas A y E y en la Figura 5b, el cromatograma de una muestra de chile habanero maduro cultivado en suelo rojo, en donde fue posible identificar y cuantificar la vitamina E, mientras que para la vitamina A no fue posible detectar su presencia.

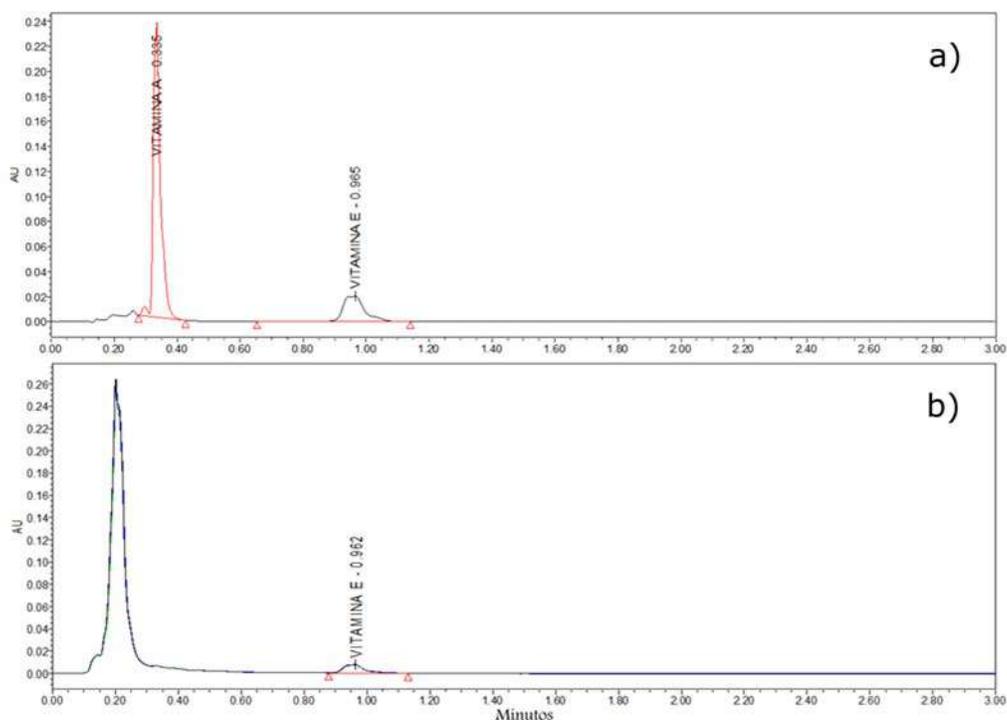


Figura 5. Cromatogramas: UPLC-DAD con columna Acquity UPLC HSS C18 (100 Å, 1,8 mm, 2,1 x 50 mm). a) estándares de vitamina y b) vitaminas en muestra de chile habanero maduro crecido en suelo rojo (código TRN181009H). Método: velocidad de flujo de 0.5 ml min⁻¹. Temperatura de columna: 35 °C. Fase móvil: Acetonitrilo-Metanol (50:50) con ácido fórmico 0.2%. Volumen de inyección 2 µL y longitud de onda de 290 nm.

Los resultados obtenidos de la cuantificación de ambas vitaminas dio como resultado que la más alta concentración de vitamina C (136.55 ± 0.36 mg 100g⁻¹ de chile seco) se dio en el chile habanero proveniente de las plantas cultivada en suelo negro, con grado de madurez naranja y secado mediante la técnica de liofilización, mientras que la mayor concentración de vitamina E (9.27 ± 2.06 mg 100g⁻¹ de chile seco) se obtuvo en el fruto obtenido de plantas cultivadas en el suelo rojo, con grado de madurez naranja y secado mediante la técnica de horno a 65 °C.

Los resultados obtenidos en la Tabla 3 fueron sometidos a un análisis estadístico para determinar cuál de los factores estudiados tuvieron un efecto significativo sobre la concentración de cada una de las vitaminas cuantificadas. En la Figura 6 se representa el gráfico de interacción entre el tipo de suelo y el estado de maduración sobre la concentración de vitamina C en *Capsicum chinense* Jacq. en el que se puede observar que dicha interacción tiene efecto significativo sobre la concentración de vitamina C, indicando que la mayor concentración de esta vitamina se obtuvo en los chiles provenientes de plantas cultivadas en suelo negro y con grado de madurez naranja (maduro), esto se debe a que la madurez del fruto está relacionada con la cantidad de azúcares presentes, los cuales son precursores para la producción de ácido ascórbico, además que la expresión del gen que sintetiza la enzima L-galactono-1, 4-lactona deshidrogenasa está relacionada con el grado de madurez, expresándose en mayor medida conforme aumenta la madurez de este (Tamaoki *et al.* 2003).

Tabla 3. Resultados obtenidos de la cuantificación de vitaminas en el chile habanero (*Capsicum chinense* Jacq.)

Tipo de suelo	Grado de madurez	Método de secado	Vitamina C mg 100g ⁻¹ de chile seco	Vitamina E mg 100g ⁻¹ de chile seco
Rojo	Verde	Horno a 65 °C	63.49 ± 0.00	2.13 ± 0.07
Café	Verde	Horno a 65 °C	66.62 ± 1.65	1.92 ± 0.23
Negro	Verde	Horno a 65 °C	68.22 ± 0.63	3.42 ± 1.59
Rojo	Naranja	Horno a 65 °C	76.49 ± 1.44	9.27 ± 2.06
Café	Naranja	Horno a 65 °C	96.51 ± 0.45	7.85 ± 1.42
Negro	Naranja	Horno a 65 °C	79.17 ± 1.75	5.84 ± 0.08
Rojo	Verde	Liofilizado	39.41 ± 1.08	2.06 ± 0.24
Café	Verde	Liofilizado	46.76 ± 0.46	1.71 ± 0.52
Negro	Verde	Liofilizado	42.02 ± 0.86	1.32 ± 0.54
Rojo	Naranja	Liofilizado	33.72 ± 1.56	5.75 ± 0.02
Café	Naranja	Liofilizado	88.97 ± 0.00	5.52 ± 0.03
Negro	Naranja	Liofilizado	136.55 ± 0.36	6.88 ± 1.55

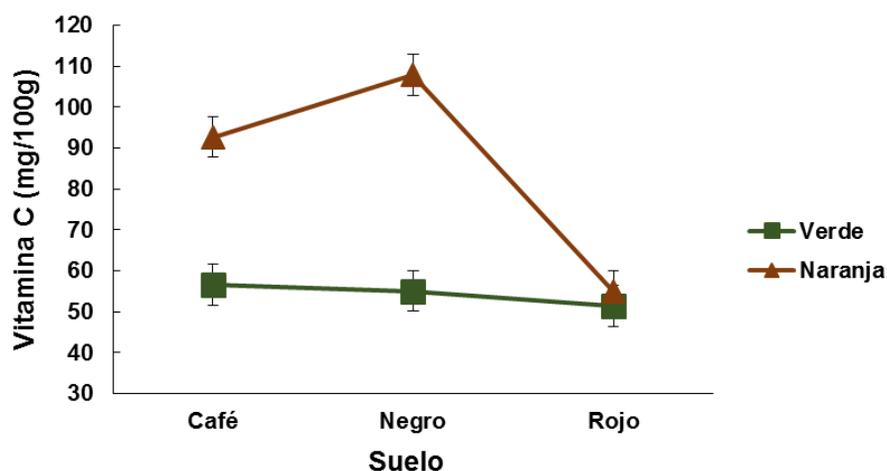


Figura 6. Gráfico de interacción doble suelo - estado de maduración para vitamina C (mg 100g⁻¹ de chile seco) en *Capsicum chinense* Jacq.

En la Figura 7 se representa el gráfico de interacción doble entre el método de secado y el estado de maduración sobre la cantidad de vitamina E en *Capsicum chinense* Jacq., en la cual se observa que el grado de madurez es el factor que tiene mayor efecto sobre la concentración de vitamina E, obteniéndose las más altas concentraciones de esta vitamina cuando el chile se encuentra en estado maduro (naranja). Esto coincide con lo reportado por Wahyumi *et al.* 2013, quienes reportan que la concentración de esta vitamina en los frutos del género *Capsicum* aumenta proporcionalmente al grado de madurez, tomando en cuenta la ruta de biosíntesis de esta vitamina se puede comprender que a mayor grado de madurez la concentración de la vitamina aumente, debido a que el α -tocoferol es el producto final de esta.

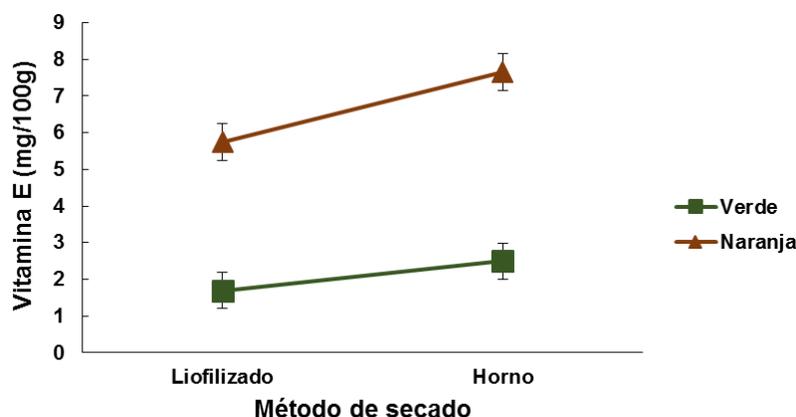


Figura 7. Gráfico de interacción doble método de secado - estado de maduración para vitamina E (mg 100g⁻¹ de chile seco) en *Capsicum chinense* Jacq.

IV. Conclusiones

Las principales vitaminas reportadas en el chile habanero (*Capsicum chinense* Jacq.) son la vitamina A, C y E, cuya síntesis en el chile es afectada por factores como: la radiación solar, el grado de madurez, el estrés oxidativo, la temperatura y los procesos posteriores a la cosecha. Experimentalmente se determinó que el grado de madurez y el tipo de suelo tienen efecto significativo sobre la concentración de vitamina C en el chile habanero obteniéndose la mayor concentración de esta vitamina en el chile cosechado de plantas cultivadas en suelo negro (*Box lu'um*), con grado de madurez naranja y secado mediante la técnica de liofilización, dando una concentración promedio de 136.55±0.36 mg 100g⁻¹ de chile seco. En el caso de la vitamina E el grado de madurez fue el factor que tuvo el mayor efecto significativo sobre la concentración de esta vitamina, encontrándose la mayor concentración en chiles cosechados de plantas cultivadas en el suelo rojo (*K'ankab lu'um*), con grado de madurez naranja y secado mediante la técnica de horno a 65 °C, con una concentración promedio de 9.27±2.06 mg 100g⁻¹ de chile seco. Los factores evaluados en el presente trabajo tuvieron un efecto significativo en la concentración de vitaminas en el chile habanero y la información obtenida en el presente trabajo podría ser útil en el sector agroalimentario para la producción de chile habanero de interés comercial enfocado a su contenido de vitaminas.

V. Referencias

- Bae, H., Jayaprakasha, G. K., Crosby, K., Yoo, K. S., Leskovar, D. I., Jifon, J., & Patil, B. S. (2014). Ascorbic acid, capsaicinoid, and flavonoid aglycone concentrations as a function of fruit maturity stage in greenhouse-grown peppers. *Journal of Food Composition and Analysis*, 33(2), 195 – 202. DOI: 10.1016/j.jfca.2013.11.009
- Campos, M. R. S., Gómez, K. R., Ordoñez, Y. M., & Ancona, D. B. (2013). Polyphenols, ascorbic acid and carotenoids contents and antioxidant properties of habanero pepper (*Capsicum chinense*) fruit. *Food and Nutrition Sciences*, 4(08), 47. <http://dx.doi.org/10.4236/fns.2013.48A006>
- Castro-Concha, L. A., Tuyub-Che, J., Moo-Mukul, A., Vazquez-Flota, F. A., & Miranda-Ham, M. L. (2014). Antioxidant capacity and total phenolic content in fruit tissues from accessions of

- Capsicum chinense* Jacq. (Habanero Pepper) at different stages of ripening. The Scientific World Journal. <http://dx.doi.org/10.1155/2014/809073>
- Chennupati, P., Seguin, P., Liu, W. (2011) Effects of High Temperature Stress at Different Development Stages on Soybean Isoflavone and Tocopherol Concentrations. J. Agric. Food Chem. 59, 24, 13081-13088. <https://doi.org/10.1021/jf2037714>
- Chun, J., Lee, J., Ye, L., Exler, J., & Eitenmiller, R. R. (2006). Tocopherol and tocotrienol contents of raw and processed fruits and vegetables in the United States diet. Journal of Food Composition and Analysis, 19(2-3), 196-204. <https://doi.org/10.1016/j.jfca.2005.08.001>
- Deepaa, N., Charanjit, K., Binoy G., Balraj, S., Kapoor, H.C. (2007). Antioxidant constituents in some sweet pepper (*Capsicum annuum* L.) genotypes during maturity. LWT - Food Science and Technology. 40. 121 – 129. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2005.09.016>
- DellaPenna, D.; Pogson, B.J. (2006). Vitamin synthesis in plants: tocopherols and carotenoids. Annu. Rev. Plant Biol. 57, 711 – 738. DOI: 10.1146/annurev.arplant.56.032604.144301
- Flávia, A., Teodorol, P., Alves R.B., Ribeiro, L. B., Reis, K., Reifschneider, F.J., Fonseca, M.J., Da Silva J., Agostini, T. (2013). Vitamin C content in Habanero pepper accessions (*Capsicum chinense*). 31. <http://dx.doi.org/10.1590/S0102-05362013000100009>
- Foyer, C. H. (2017). Ascorbic acid. In Antioxidants in higher plants (pp. 31-58). CRC press. <https://www.crcpress.com/Antioxidants-in-Higher-Plants/Alscher-Hess/p/book/9781138550551>
- Hacisevki A. (2009). An overview of ascorbic acid biochemistry. J. Fac. Pharm, Ankara. 38 (3) 233 – 255. https://www.researchgate.net/publication/286591958_An_overview_of_ascorbic_acid_biochemistry
- Halver, J. E. (2003). The vitamins. In Fish nutrition (pp. 61-141). Academic Press. <https://trove.nla.gov.au/version/30947457>
- Hussain, Iqbal, Lajber Khan, and A. Marwat. "Analysis of vitamin C in selected medicinal plants." Journal of the chemical society of Pakistan 33.2 (2011): 260-262. https://inis.iaea.org/search/search.aspx?orig_q=RN:42069373
- Hess, J. L. (2017). Vitamin E, α -tocopherol. In Antioxidants in higher plants (pp. 111-134). CRC Press. <https://www.taylorfrancis.com/books/e/9781315149899/chapters/10.1201/9781315149899-5>
- Ishikawa T., Dowdle J., Smirnoff N. Progress in manipulating ascorbic acid biosynthesis and accumulation in plants. Physiologia Plantarum. 126: 343–355 <https://doi.org/10.1111/j.1399-3054.2006.00640.x>
- Kaplan, B. J., Crawford, S. G., Field, C. J., & Simpson, J. S. A. (2007). Vitamins, minerals, and mood. Psychological bulletin, 133(5), 747. <https://doi.org/10.1037/0033-2909.133.5.747>
- Kanwischer, M., Porfirova, S., Bergmüller, E., & Dörmann, P. (2005). Alterations in tocopherol cyclase activity in transgenic and mutant plants of Arabidopsis affect tocopherol content, tocopherol composition, and oxidative stress. Plant Physiology, 137(2), 713-723. <https://doi.org/10.1104/pp.104.054908>
- Keen, M. A., & Hassan, I. (2016). Vitamin E in dermatology. Indian dermatology online journal, 7(4), 311. DOI: 10.4103/2229-5178.185494
- Khassaf, M., McArdle, A., Esanu, C., Vasilaki, A., McArdle, F., Griffiths, R. D., Brodie, D.A., Jackson, M. J. (2003). Effect of Vitamin C Supplements on Antioxidant Defence and Stress Proteins in Human Lymphocytes and Skeletal Muscle. The Journal of Physiology, 549(2), 645 – 652. DOI: 10.1113/jphysiol.2003.040303
- Kumar, O.A., Subba, S.T. (2009). Ascorbic Acid Contents in Chili Peppers (*Capsicum* L.). Notulae Scientia Biologicae, 1(1), 50-52. <https://doi.org/10.15835/nsb113445>
- Laurent, M. S., Dean, D. (2010). Biosynthesis, regulation and functions of tocopherols in plants. Plant Physiology and Biochemistry. 48. 301 – 309. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2009.11.004>

- Menichini, F., Tundis, R., Bonesi, M., Loizzo, M. R., Conforti, F., Statti, G., Menichini, F. (2009). The influence of fruit ripening on the phytochemical content and biological activity of *Capsicum chinense* Jacq. cv Habanero. *Food Chemistry*, 114(2), 553-560. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2008.09.086>
- Ramesh K.S., Keum, Y.S. (2015). GC–MS and HPLC–DAD analysis of fatty acids and tocopherols in sweet peppers (*Capsicum annuum* L.). *Journal of food measurement and characterization*. 10 (3), 685 – 689. DOI:10.1007/s11694-016-9352-x
- Romo, A., Yetano A.I., González C., Sáiz, M.J., González C.J. (2012). Supercritical fluid extraction and microencapsulation of bioactive compounds from red pepper (*Capsicum annum* L.) by-products. 133. 1045 – 1049. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2012.01.062>
- Santos, J., Mendiola, J. A., Oliveira, M. B. P. P., Ibáñez, E., & Herrero, M. (2012). Sequential determination of fat-and water-soluble vitamins in green leafy vegetables during storage. *Journal of Chromatography A*, 1261, 179-188. <https://doi.org/10.1016/j.chroma.2012.04.067>
- Supradip, S., Walia, S., Kundu, A. Kaur, C., Singh, J., Sisodia R. (2015). Capsaicinoids, Tocopherol, and Sterols Content in Chili (*Capsicum* sp.) by Gas Chromatographic-Mass Spectrometric Determination. *Journal International Journal of Food Properties*. 18, 1535 – 1545. <https://doi.org/10.1080/10942912.2013.833222>
- Tamaoki, M. (2003). Light-controlled expression of a gene encoding l-galactono-γ-lactone dehydrogenase which affects ascorbate pool size in *Arabidopsis thaliana*. [https://doi.org/10.1016/S0168-9452\(03\)00122-5](https://doi.org/10.1016/S0168-9452(03)00122-5)
- Topuz, A., Ozdemir, F. (2007). Assessment of carotenoids, capsaicinoids and ascorbic acid composition of some selected pepper cultivars (*Capsicum annuum* L.) grown in Turkey. *Journal of Food Composition and Analysis* 20, 596 – 602. <https://acnpsearch.unibo.it/OpenURL?id=tisearch:ti-ex&sid=google&rft.auinit=A&rft.aulast=Topuz&rft.atitle=Assessment+of+carotenoids%2c+capsaicinoids+and+ascorbic+acid+composition+of+some+selected+pepper+cultivars+%28Capsicum+annuum+L%2e%29+grown+in+Turkey&rft.title=Journal+of+food+composition+and+analysis+%28Print%29&rft.volume=20&rft.issue=7&rft.date=2007&rft.page=596>
- Valpuesta V., Botella, M. A. (2004). Biosynthesis of L-ascorbic acid in plants: new pathways for an old antioxidant. *TRENDS in Plant Science*. 9, 573 – 577. DOI: 10.1016/j.tplants.2004.10.002
- Wahyuni, Y.; Ballester, A. R.; Sudarmonowati, E.; Bino, R. J.; Bovy, A. G. (2011). Metabolite biodiversity in pepper (*Capsicum*) fruits of thirty-two diverse accessions: Variation in health-related compounds and implications for breeding. *Phytochemistry*, 72, 1358–1370. doi:10.1016/j.phytochem.2011.03.016
- Wahyuni, Y., Ballester, A.R., Sudarmonowati, E., Bino, R.J., Bovy, A. G. (2013) Secondary Metabolites of *Capsicum* Species and Their Importance in the Human Diet. *Journal of Natural Products*. 76, 783 – 793. <https://doi.org/10.1021/np300898z>
- Wesoowska A., Jadczyk, D., Grzeszczuk M. (2011). Chemical composition of the pepper fruit extracts of hot cultivars *Capsicum annuum* L. *Acta Sci Pol Hortorum Cultus*, 10(1), 171 – 184. http://scholar.googleusercontent.com/scholar?q=cache:fDOe3ATmCf0J:scholar.google.com/+extraction+of+vitamin+E+of+capsicum&hl=es&as_sdt=0,5&as_ylo=2005&as_yhi=2019

CAPÍTULO 10

Métodos electroquímicos para la detección de capsaicinoides en chile habanero

Electrochemical methods for detection of capsaicinoids in chili habanero

Morozova, Ksenia ¹, Scampicchio, Matteo ^{1*}

¹Free University of Bozen-Bolzano, Faculty of Science and Technology, Piazza Università 5, 39100, Bolzano, Italy.

*autor de correspondencia: matteo.scampicchio@unibz.it

Resumen

Una lengua electrónica es un dispositivo hecho de sensores específicos que responden a algún compuesto químico relacionado con gustos específicos. Estas se clasifican en lenguas electrónicas de inyección de flujo, amperométricas, potenciométricas y voltamétricas. La lengua electrónica con detección coulométrica se utilizó para medir el contenido de capsaicinoides en 18 chiles cultivados en 2017 y 24 chiles recolectados en 2018 de diferentes tipos de suelo y etapa de madurez. Las plantas se cultivaron en un invernadero con tres tipos diferentes de suelos calizos con nombres mayas: *K'áankab lu'um* (suelo rojo), *Box lu'um* (suelo negro) o *Ch'ich 'lu'um* (suelo pedregoso o marrón). La madurez del chile se definió por el color correspondiente al verde (inmaduro) y al naranja (maduro). El análisis estadístico de varianza (ANOVA) bidireccional mostró que los factores de madurez del chile y tipo de suelo sobre la respuesta de contenido de capsaicinoides fueron significativamente diferentes para las muestras analizadas (Tukey HSD, $p < 0.001$). Además, las plantas de chile cultivadas en el suelo rojo presentaron un mayor contenido de capsaicinoides tanto para el chile verde ($7.5 \pm 1.6 \text{ mg g}^{-1}$) como para el naranja ($9.5 \pm 2.6 \text{ mg g}^{-1}$). En general, el desarrollo de lenguas electrónicas ofrece un nuevo enfoque prometedor para las industrias alimentarias, con aplicaciones interesantes desde el control de calidad de materias primas o productos terminados hasta el control de procesos en línea en forma de un sistema de alerta temprana.

Palabras claves: Lengua electrónica, inyección de flujo, chile habanero, capsaicinoides.

Abstract

An electronic tongue is a device made of specific sensors responding to some chemical compound that are related to specific tastes. These are classified into electronic flow injection, amperometric, potentiometric and voltammetric. The electronic tongue with coulometric detection was used to measure the content of capsaicinoids in 18 chili peppers grown in 2017 and 24 chili gathered in 2018 from different types of soil and maturity stage. The plants were grown in a greenhouse with three different types of limestone soils with Mayan names: *K'áankab lu'um* (red soil), *Box lu'um* (black soil) or *Ch'ich 'lu'um* (stony soil or brown). The maturity of chili was defined by the color corresponding to green (immature) orange (ripe). Two-way ANOVA analysis showed that the maturity and the soil factors on capsaicinoid content were significantly different for the analyzed samples (Tukey HSD, $p < 0.001$).

Moreover, the chili plants cultivated in the red soil had higher capsaicinoid content both for green ($7.5 \pm 1.6 \text{ mg g}^{-1}$) and for orange chili ($9.5 \pm 2.6 \text{ mg g}^{-1}$). Overall, the development of electronic tongues offers a new promising approach for food industries, with interesting applications from the quality control of raw materials or finished products to the on-line process control in the form of an early warning system.

Keywords: Electronic tongue, flow injection, chili habanero, capsaicinoids.

I. Introducción

El sabor es una propiedad sensorial que puede afectar en gran medida el grado de calidad de cualquier alimento. Sin embargo, a pesar de la importancia del sabor, la evaluación de su intensidad es una de las mediciones más desafiantes. La intensidad del sabor es el resultado de una mezcla compleja de diferentes compuestos, cuya suma conduce a una experiencia sensorial única en nuestra lengua (Gardner y Bartlett, 1994). Sin embargo, dado que las lenguas humanas están conectadas por el sistema nervioso central, se ven muy afectadas por una serie de fuentes complejas y subjetivas de variabilidad, como ansiedad, problemas de salud o estrés, solo por citar algunas. No solo el alimento en sí, después de ser fabricado por la industria, puede variar su sabor y olor, sino que especialmente los consumidores pueden tener una percepción muy diferente de lo que es amargo, dulce, salado o agrio. El patrimonio cultural, el grado de educación, el género, la edad, la religión o incluso el estado de ánimo de un consumidor pueden afectar aún más la percepción de sus sentidos.

Debido a la naturaleza subjetiva de los sentidos humanos, la industria alimentaria necesita métodos de control de calidad que puedan medir rápida y objetivamente el sabor de los alimentos. A medida que el mercado se globaliza, es cada vez más importante que la industria alimentaria tenga acceso a sensores que puedan proporcionar rápidamente la intensidad del sabor de lo que se fabrica, posiblemente hasta en línea. Solo a través de la caracterización rápida y objetiva del sabor, la industria alimentaria puede garantizar que sus productos alimenticios puedan satisfacer la experiencia sensorial esperada de consumidores específicos. Esto es especialmente cierto para los productos alimenticios a base de chile. El chile habanero (*Capsicum chinense*) es una de las principales especies hortícolas explotadas comercialmente en la península de Yucatán en México. Asimismo, la demanda de chile está aumentando en los mercados nacionales e internacionales debido a su alto contenido de capsaicinoides acumulados. El chile se usa ampliamente en muchas cocinas de todo el mundo como especia para agregar picor a los platillos, mejorar la conservación de las comidas (especialmente las carnes) y, debido a su contenido en compuestos bioactivos como capsaicinoides, para mantener una vida saludable.

Los compuestos responsables del picante en el chile son los capsaicinoides. En detalle, los capsaicinoides son vanililamidas de ácidos grasos presentes en algunas variedades de chiles. Se activan en los receptores vaniloides del cuerpo humano, que tienen un papel principal en la termorregulación y también en la sensación de calor excesivo (Jordt y Julius, 2002). El período de sensación de calor puede ser seguido por un período prolongado de inhibición de los receptores, que se utiliza en los procedimientos para aliviar el dolor en medicina (Robbins *et al.*, 1998).

El contenido de capsaicinoides en los chiles varía no solo en función de la variedad de pimiento, sino también en función de la parte de la fruta, su madurez y condiciones agrícolas (González-Zamora *et al.*, 2013). La sensación más fuerte de picante es causada por los dos

miembros principales de esta clase, la capsaicina (predominante) y la dihidrocapsaicina (menos abundante). El "calor" (*hotness*) del picante se cuantificó originalmente mediante una prueba sensorial de Scoville (Scoville, 1912). La prueba, introducida inicialmente en 1912, se basa en la maceración del pimiento molido, dejado durante la noche en alcohol. Después de agitar y filtrar, esta solución alcohólica se agrega a una solución de agua azucarada en proporciones definidas hasta que un picor débil es perceptible en la lengua. Esta prueba imprecisa y demandante fue abandonada hace ya mucho tiempo y reemplazada por la determinación cromatográfica, aunque los resultados todavía se expresan como unidades "de calor" Scoville (SHU) (Davis, Markey, Busch y Busch, 2007). La medición con cromatografía líquida, generalmente combinada con detección de arreglo de diodos (DAD) (Schmidt, Fiechter, Fritz y Mayer, 2017; Stipcovich, Barbero, Ferreiro-González, Palma y Barroso, 2018) o espectrometría de masas (Duelund y Mouritsen, 2017) es el método más adecuado y preciso para la determinación de SHU en la aplicación de laboratorio. Sin embargo, estos métodos requieren equipos especializados y personal calificado, lo que limita la aplicación de los mismos por un gran número de operadores y productores de Chile. Por lo tanto, existe un interés especial en desarrollar métodos rápidos y simples para el análisis de capsaicinoides en Chile con métodos electroquímicos.

Actualmente, existen una serie de técnicas convencionales que pueden caracterizar tentativamente el sabor de los alimentos. En los últimos años, las llamadas "lenguas electrónicas" han ganado una creciente popularidad, especialmente en el campo del control de calidad de los alimentos. Una lengua electrónica o "*e-tongue*" se define como "un sistema multisensor, que consiste en una serie de sensores selectivos bajos y utiliza procedimientos matemáticos avanzados para el procesamiento de señales basado en el reconocimiento de patrones (PARC) y / o el análisis de datos multivariados" (Preedy, 2016). La literatura existente sobre lenguas electrónicas es extensa y comprende la combinación de diferentes sensores como transductores electroquímicos, potenciométricos, conductimétricos, ópticos y piezoeléctricos. El éxito creciente de este enfoque analítico se atribuye principalmente a su simplicidad, detección rápida, asequibilidad, posibilidad de miniaturización e idoneidad para la detección en línea (Escuder-Gilabert y Peris, 2010).

Para este propósito, el presente capítulo tiene como objetivo describir los desarrollos recientes en las técnicas rápidas, de bajo costo, multi-elementales, simples y objetivas para el análisis de capsaicinoides en Chile. La lengua electrónica es un nombre común de los dispositivos como sensores electroquímicos que responden al sabor específico (compuestos solubles), que utiliza una serie de sensores simples y no específicos y un sistema de software de reconocimiento de patrones (Deisingh, Stone y Thompson, 2004).

En consecuencia, este capítulo propondrá brevemente una clasificación de las lenguas electrónicas disponibles actualmente. Luego, se ejemplificará la teoría principal detrás de estas técnicas. Finalmente, se presentará y discutirá una lista de ejemplos prácticos.

II. Revisión bibliográfica

2.1 Descripción general de la lengua electrónica

Una lengua electrónica es un dispositivo hecho de sensores específicos que responden a algún compuesto químico relacionado con gustos específicos. Su principio de funcionamiento se basa en la transducción de intensidades de señales superpuestas registradas por una serie de sensores en un valor de sabor mediante sistemas de softwares

quimiométricos. Las lenguas electrónicas, sin embargo, no intentan reproducir la fisiología de la lengua humana. En cambio, están destinadas a ser sistemas analíticos diseñados para clasificar líquidos (ya sea bebidas alimenticias o cualquier otra muestra de alimentos que se pueda disolver convenientemente en un solvente) utilizando una matriz de sensores con especificidades superpuestas cuyas señales pueden procesarse mediante análisis de reconocimiento de patrones multivariados. Tal enfoque imita el principio de la lengua humana, aunque los sensores que se usan típicamente en las lenguas electrónicas están muy lejos de los que se encuentran en las células de yema gustativa de las lenguas humanas. En la práctica, una serie de sensores selectivos cruzados miden los cambios en las señales electrónicas (es decir, voltaje, corriente o frecuencia) como respuesta a la concentración de algunos productos químicos contenidos en la muestra. El patrón y la magnitud de tales cambios pueden correlacionarse con los estímulos gustativos mediante el desarrollo de modelos de reconocimiento de patrones multivariados.

El corazón de un sistema de lengua electrónica es la matriz de sensores. Tal conjunto de sensores responde a diferentes especies químicas contenidas en la muestra de alimentos, que deben correlacionarse con la sensación de sabor general. Generalmente, los sensores utilizados en las lenguas electrónicas se seleccionan o diseñan para proporcionar una señal eléctrica cuya intensidad es proporcional a la concentración de tales especies químicas. La señal puede dar información directamente sobre el sabor a medir o, requerir de tratamientos de datos complejos. La extracción de esta compleja información se obtiene mediante el diseño de algoritmos quimiométricos con el objetivo de correlacionar la huella digital de la matriz de sensores en un valor de sabor. En general, el desarrollo de tales algoritmos o modelos de reconocimiento de patrones requiere al menos dos pasos. Un primer período de entrenamiento durante el cual se miden muestras de sabor conocido con la lengua electrónica en el que las señales resultantes se registran y se recopilan en una base de datos, constituyendo la biblioteca de gustos. En tal período se desarrolla el algoritmo de reconocimiento de patrones. Después del período de entrenamiento, las muestras desconocidas son reconocidas a continuación y se describe un modelo de percepción que intenta imitar el gusto. La percepción del gusto surge por las interacciones fisicoquímicas entre algunas moléculas presentes en los alimentos y el complejo sistema de cientos de yemas gustativas celulares ubicadas en la lengua. El sabor de los alimentos se puede modelar como una combinación de cinco sabores específicos básicos presentados a continuación.

2.2 Clasificación de lenguas electrónicas

Los siguientes métodos pertenecen a los principales métodos de medición

2.2.1 Lenguas electrónicas de inyección de flujo.

El análisis de flujo es el nombre genérico de todas las técnicas analíticas que se basan en la introducción, el procesamiento y la detección de muestras líquidas en medios fluidos. El análisis de inyección de flujo se basa en una corriente de flujo caracterizada por varios parámetros, como el caudal, los volúmenes y la composición, que se impulsa continuamente gracias a una bomba peristáltica o, menos comúnmente, por una bomba de pistón, flujo gravitacional u otros. La inyección de la muestra en la corriente portadora generalmente se realiza mediante un circuito que asegura la inyección de un volumen fijo. Sin embargo, también se pueden usar otros, como los inyectores basados en el tiempo. Los aspectos esenciales para la caracterización de tales sistemas analíticos basados en el flujo se han

discutido en la literatura (Vicente, 2002). Una vez que la muestra inyectada se transporta hacia uno o más detectores, se registra la salida de la señal. La señal analítica puede basarse en un único principio de detección (es decir, una serie de sensores amperométricos) o surtirse en diferentes sensores basados en principios de detección independientes (es decir, una serie de sensores electroquímicos, espectrofotométricos y conductimétricos). Todos estos detectores pueden proporcionar una señal transitoria simétrica o asimétrica en forma de pico, dependiendo del modo elegido de introducción de la muestra, los parámetros de flujo y la geometría del canal de análisis por inyección en flujo (FIA, por sus siglas en inglés: Flow Injection Analysis). Por lo tanto, para lograr resultados consistentes y reproducibles, todos los parámetros antes mencionados deben ser estandarizados. Además, el procesamiento de la señal puede desempeñar un papel importante en los sistemas de inyección de flujo. Generalmente la altura del pico y el área del pico son las variables medidas. Como ejemplo para la calibración del sensor, se recomienda proceder inyectando primero una solución estándar que contenga un compuesto con concentración y comportamiento conocidos con respecto a los sensores utilizados. La intensidad de señal obtenida (altura o área del pico) se utiliza como referencia. A continuación, la muestra se inyecta y la altura del pico (o su área) se divide por una de las soluciones estándar. Al usar este procedimiento, se pueden obtener resultados consistentes aunque el sensor muestre desviaciones o el rendimiento del sistema cambie ligeramente con el tiempo.

2.2.2 Lenguas electrónicas amperométricas.

En los sensores amperométricos, la corriente se mide mientras que el potencial se mantiene fijo. La elección del potencial debe considerar diferentes factores, como el material del electrodo, el analito y las condiciones ambientales (pH, fuerza iónica, temperatura, etc.). Si el electrodo de trabajo se coloca en una solución agitada (modo batch) o en una corriente de flujo (modo continuo), y con el potencial de trabajo fijado en un valor correspondiente a la región de meseta de corriente limitante (*limiting current plateau region*), entonces la ley que relaciona la corriente como una función de una sola especie redox se puede escribir como:

$$I = \frac{nFAC}{d}$$

Donde n es el número de electrones, A es el área de superficie, D es el coeficiente de difusión, F es la constante de Faraday y d es el grosor de la capa difusiva. Si hay más de una especie redox en la solución, la corriente global generada en el electrodo de trabajo es el resultado de la contribución de cada especie redox.

Durante la detección amperométrica, se produce una reacción electroquímica en la superficie del sensor y se mide la corriente resultante. Con el método amperométrico solo tiene lugar una electrólisis parcial. Por lo tanto, para ser adecuado para este tipo de detección, el compuesto de interés debe ser electroactivo (al potencial aplicado, en la solución utilizada y al pH predominante). Esto es tanto una limitación como una ventaja: una limitación, ya que solo se pueden detectar especies electroactivas; y una ventaja, porque la detección puede ser en gran medida selectiva. Por lo tanto, es posible detectar componentes electroactivos sin la interferencia de los compuestos no electroactivos.

Utilizando una serie de sensores que funcionan a diferentes potenciales, es posible elegir entre varios compuestos electroactivos, ya que a bajo potencial positivo / negativo, solo se pueden detectar compuestos reductores / oxidantes fuertes. Por el contrario, a grandes

potenciales de detección, se detectan los compuestos electroactivos totales. Finalmente, el pH, la fuerza iónica y la actividad electroquímica tanto del solvente como del electrolito, así como la presencia de impurezas electroactivas (como oxígeno disuelto o metales traza) pueden afectar significativamente la señal del sensor. Un inconveniente importante de estos sensores es que durante las reacciones de oxidación o reducción, los analitos se adsorben primero en la superficie del sensor para intercambiar electrones y comenzar a fluir la corriente. Dependiendo de la naturaleza de los analitos y el tipo de material del sensor, el proceso posterior de desorción puede ser lento o impedirse por completo, lo que puede alterar significativamente la superficie del sensor. Tal alteración puede, a su vez, causar un efecto en la respuesta durante el tiempo. Para superar este inconveniente, los electrodos de serigrafía desechables (*screen-printed electrodes*) ahora están disponibles en el mercado. Dichos sensores son muy económicos, fáciles de usar, se ensamblan en sistemas de lotes o celdas de flujo, y no requieren pasos de limpieza o pulido mecánico. Además, la tecnología de impresión de carbón es hoy en día muy precisa y permite la producción de sensores muy reproducibles a bajo costo (Scampicchio, Ballabio, Arecchi, Cosio, y Mannino, 2008).

2.2.3 Lenguas electrónicas potenciométricas.

Los sensores potenciométricos miden la diferencia de potencial entre dos electrodos en condiciones de ausencia de flujo de corriente. El potencial medido puede usarse para determinar la cantidad analítica de interés, generalmente la concentración de algún componente de la solución. La señal de un sensor potenciométrico se basa en la ecuación de Nernst. Esta ecuación predice una dependencia lineal de la respuesta del sensor, E , sobre el logaritmo de una función de la actividad de la solución con el ion (Walczak, Dryer, Jacobson, Foss y Flynn, 1997):

$$E = E_{1/2} - \frac{0.0592}{2} \times \log \frac{[H_2Q]}{[Q]} - 0.0592 \times pH$$

Donde $E_{1/2}$ incluye correcciones al potencial de reducción estándar para coeficientes de actividad y coeficientes de difusión, el pH es el pH de la solución.

Sin embargo, cuando hay más de un ion en la muestra, la señal generalizada es el resultado de la contribución de cada ion (también llamada especie interferente), multiplicada por un coeficiente de selectividad, k . El primer intento de diseñar una lengua electrónica basada en sensores potenciométricos ha sido desarrollado por el grupo de Toko, a la que llaman "sensor de sabor" (Tahara y Toko, 2013). Este dispositivo constaba de ocho electrodos potenciométricos hechos de diferentes membranas lipídicas-poliméricas. También, Legin et al. (1997) propusieron una lengua electrónica basada en sensores potenciométricos de estado sólido. Este tipo de sensor tiene dos inconvenientes principales. Primero, la señal está estrictamente relacionada con la temperatura. En segundo lugar, el potencial de membrana se ve afectado por la adsorción de los componentes de la solución (Bratov, Abramova e Ipatov, 2010). Además, los sensores potenciométricos solo pueden detectar iones libres y requieren una calibración frecuente. Además, la adición de un tampón (buffer) particular puede causar grandes errores, especialmente en el registro de concentraciones más bajas debido a posibles rastros del analito o iones interferentes en los reactivos (Vlasov, Legin, Rudnitskaya, Di Natale y D'Amico, 2005). A pesar de estos inconvenientes, los sensores potenciométricos siguen siendo el tipo de sistema de lengua electrónica más utilizado.

2.2.4 Lenguas electrónicas voltamétricas.

Los sensores voltamétricos están hechos con los mismos materiales que los sensores amperométricos. La diferencia es evidente en el potencial aplicado. En el caso de los sensores amperométricos, el potencial se mantiene durante el experimento; en cambio, en el caso de sensores voltamétricos, el potencial cambia continuamente siguiendo una rampa bien definida. Las rampas potenciales típicas pueden ser lineales, y la técnica correspondiente se llama voltamperometría de barrido lineal; alternativamente, el potencial se puede alternar entre dos valores limitantes con una tasa definida, y esta técnica se llama voltametría cíclica; También el potencial puede ser pulsado con una cierta amplitud y frecuencia, como en el caso del pulso diferencial o la voltamperometría de onda cuadrada (*square wave voltammetry*). Todas estas técnicas se caracterizan por una señal que depende de la capacidad de los analitos para oxidarse y / o reducirse. Esta capacidad de discriminación se puede mejorar aún más modificando la superficie de los sensores voltamétricos con diversos materiales (como óxidos metálicos, polímeros, nanomateriales, etc.) obteniendo superficies con diversa sensibilidad y selectividad hacia una variedad de especies. La ola de potencial actual (current-potential wave) puede usarse como huella digital para caracterizar el sabor de los alimentos. Aunque la resolución obtenida durante el análisis de matrices complejas como los alimentos no es comparable a la obtenida por la espectrometría de infrarrojo cercano (NIR por sus siglas en inglés: Near Infrared), las dos ventajas más importantes son la alta sensibilidad y la versatilidad de los sensores que permiten el desarrollo de grandes variedades de aplicaciones.

2.3 Aplicaciones para el análisis de capsaicinoides en chiles

2.3.1 Lengua electrónica amperométrica

En un trabajo reciente de Dejmkova, Morozova y Scampicchio (2018), un electrodo de carbono vítreo doble (*double glassy carbon electrode*) fue colocado en una celda de flujo electroquímico para desarrollar una estimación simple y rápida del picor en 23 variedades de chiles. Los chiles se secaron al calor a 65 °C y se molieron mediante molino vibratorio. En el ensayo final, la extracción de capsaicinoides se realizó agitando 0.2 g del polvo de chile con 10 mL de acetonitrilo durante 15 minutos a temperatura ambiente. Las alícuotas se filtraron utilizando filtros de membrana de 0,45 µm directamente en los viales de HPLC de 2 ml.

Para la detección, el electrodo de la corriente ascendente (upstream electrode), E1, se estableció en el potencial más alto; la corriente observada en este electrodo correspondió a la oxidación electroquímica directa de las especies redox contenidas en la muestra de chile (Figura 1). El electrodo de la corriente descendente (downstream electrode), E2, se estableció en un potencial más bajo y su corriente correspondió a la reducción de los productos de oxidación generados en el electrodo de la corriente ascendente.

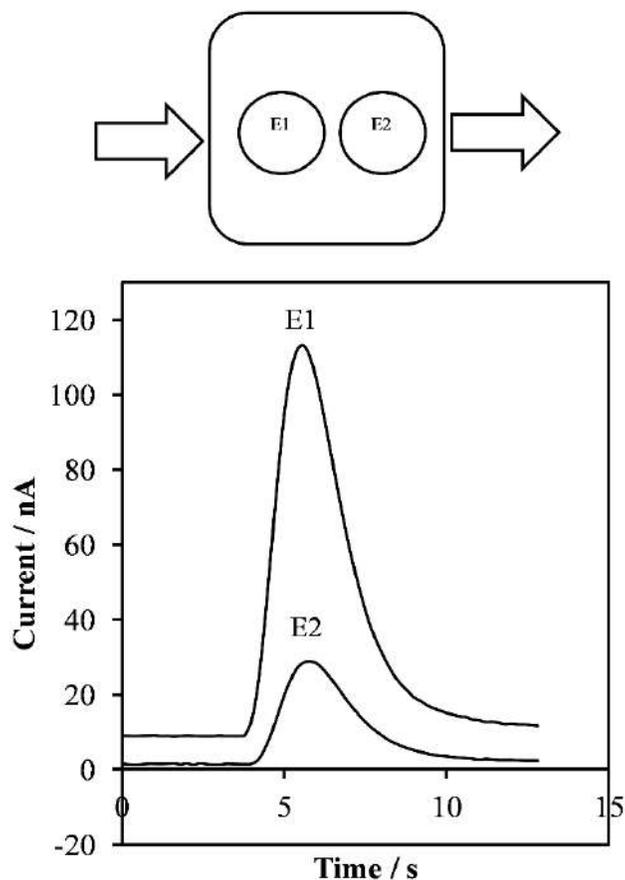


Figura 1. Señal típica de una inyección del extracto de chile en una lengua electrónica amperométrica de inyección de flujo con dos electrodos preparados a +1000 mV y +600 mV.

En la Figura 1 el electrodo de la corriente ascendente se ajustó a +1000 mV, mientras que el electrodo de la corriente descendente se mantuvo constante a +600 V. El primer electrodo E1 se usó para la oxidación preliminar parcial de las impurezas en el extracto, mientras que el electrodo E2 fue eficiente para el análisis de capsaicinoides en el extracto de chile. Luego se investigó el efecto del pH de la fase móvil sobre la selectividad de la determinación de capsaicinoides. Dentro del rango de pH entre 2 y 6, la mejor selectividad se logró usando una fase móvil a pH 4. La repetibilidad de la detección en ambos electrodos se observó usando una solución de capsaicina de 200 μ M; diez inyecciones repetidas mostraron una respuesta estable con RSD inferior al 5%.

Finalmente, se aplicó el método basado en la lengua amperométrica con inyección electrónica de flujo para medir el contenido de capsaicina y dihidrocapsaicina en 23 variedades de chile, desde leve hasta muy picante. Los resultados se compararon con el contenido de capsaicinoides medidos por cromatografía líquida. Los resultados expresados en unidades Scoville se muestran en la Tabla 1. El método proporciona una estimación confiable del picor de las muestras con picores superiores a 20 000 SHU. El resultado calculado de la detección electroquímica es 10% mayor en comparación con el método estándar debido a la presencia de impurezas. Sin embargo, el método es una alternativa rápida y simple al análisis sensorial y las mediciones con sistemas analíticos complejos, como la cromatografía líquida

Tabla 1. Picor de diferentes variedades de chiles expresado como equivalentes de unidades Scoville medido con HPLC-DAD y lengua electrónica con detección amperométrica.

Variedad de chile	Pungencia por HPLC-DAD SHU	Pungencia por SHU	ED
Trinidad Perfume	120 ± 120	500 ± 2100	
Ají Dulce Amarillo	350 ± 70	7600 ± 700	
Peter Pepper	790 ± 210	15100 ± 1900	
Ubatuba Cambuci	7500 ± 140	10800 ± 3700	
Laranja	9100 ± 890	17000 ± 1300	
Cayenne Rojo	14800 ± 250	64800 ± 15800	
Brasilian Pumpkin	19800 ± 750	12900 ± 2500	
Cayenne Anaranjado	20900 ± 1220	17000 ± 1300	
Brasilian Starfish	23200 ± 760	31200 ± 3800	
Bulgarian Amarillo	40000 ± 860	55900 ± 10500	
Hot Paper Lantern	43800 ± 1890	60900 ± 2300	
Habanero Mostaza	44300 ± 1940	59500 ± 6500	
Scotch Bonnet Amarillo	44700 ± 1700	52100 ± 3300	
Sarg	52700 ± 1510	37000 ± 4900	
Lemon Drop	56600 ± 2350	61600 ± 3600	
Limon	88500 ± 3020	80500 ± 6900	
Fatalii White	147300 ± 7970	157400 ± 13900	
Gelbe Zwerge	162300 ± 7870	174500 ± 21900	
Habanero Hot Lemon	175000 ± 14590	187400 ± 21400	
Pimenta da Neyde	184700 ± 4250	220200 ± 32200	
Trinidad Scorpion	237900 ± 15440	269500 ± 18000	
Bhut Jolokia Rust	559500 ± 6210	515100 ± 44700	
Bhutlah SLP Red	580000 ± 12010	587400 ± 44300	

2.3.2 Lengua electrónica basada en coulometría de inyección de flujo (*flow injection coulometry*)

El método de inyección de flujo basado en coulometría de inyección de flujo fue desarrollado para la medición de capsaicinoides en chiles. El método se basa en la señal coulométrica de capsaicinoides y los picos de impurezas obtenidos por cromatografía líquida de alta resolución con detector coulométrico (HPLC-ECD) (Morozova et al., 2019).

La Figura 2 muestra las señales típicas sin procesar del sistema de cromatografía líquida de alto rendimiento (HPLC-ECD) con columna C18 y acoplado al detector coulométrico con dieciséis sensores coulométricos, cada uno con un potencial diferente de +100 a +850 V (vs. un electrodo de platino de referencia), después de la inyección de 20 µL de extracto de chile diluido 1:100. Se detectaron cuatro capsaicinoides en todas las muestras investigadas: nordihidrocapsaicina (Tiempo de retención, RT 5.9 min), capsaicina (RT 6.2 min), dehidrocapsaicina (RT 10.1 min) y homocapsaicina (RT 11.2 min). El pico observado al comienzo del cromatograma (RT 0.9 min) probablemente se atribuye a la vitamina C y otros compuestos en los extractos de chile, que se consideran impurezas para el análisis de capsaicinoides. Para los capsaicinoides principales (capsaicina y dehidrocapsaicina), la

sensibilidad de la detección electroquímica fue diez veces mayor, en comparación con la detección de cromatografía líquida de ultra alta resolución con arreglo de diodos (UHPLC-DAD), que se midió con las concentraciones crecientes de soluciones estándar de capsaicina (Figura 2-B). El análisis cuantitativo se realizó con soluciones estándar de capsaicina en el rango de 10 a 100 μM . La señal actual aumentaba linealmente en función de la concentración (pendiente = $1.55 \pm 0.03 \mu\text{A } \mu\text{M}^{-1}$, $R^2 = 99.8\%$). La RSD del área del pico para 10 inyecciones de solución de capsaicina (14,4 μM) fue del 5%. El límite de detección fue de 5 μM .

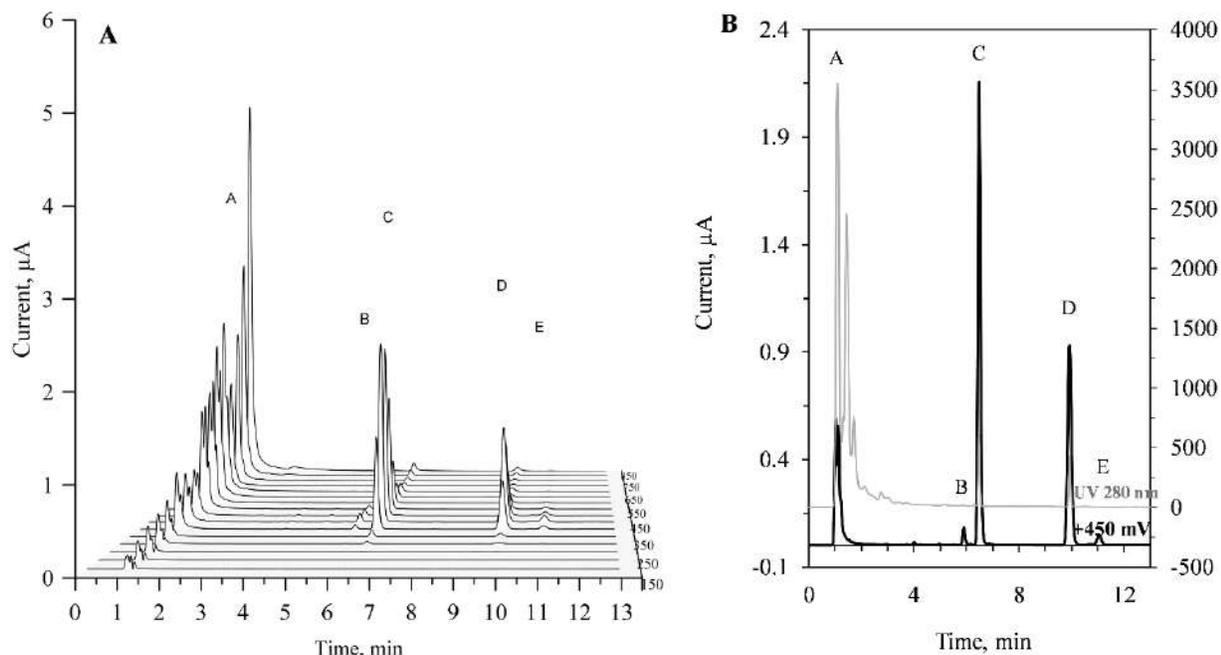


Figura 2. (A) Cromatograma típico del análisis de un extracto de chile por cromatografía líquida de alta resolución acoplada a un detector coulométrico con 16 sensores coluométricos a potenciales de +100 a +850 mV con una intersección de 50 mV (vs. electrodo de referencia de platino): A - impurezas, B - nordihidrocapsaicina, C - capsaicina, D - deshidrocapsaicina, E - homocapsaicina. (B) - Comparación de las señales obtenidas midiendo el extracto de chile diluido con UV 280 nm (extracto diluido 1:10) y el canal de la lengua electrónica en equilibrio a +450 mV (extracto diluido 1: 100).

Para desarrollar un método de inyección de flujo rápido, se definió un rango de potenciales, en el cual el pico actual de la impureza representaría el más bajo en comparación con la señal actual de capsaicina y dihidrocapsaicina. Para este propósito, la señal actual de capsaicinoides totales (una suma de señales actuales de capsaicina y dihidrocapsaicina) y la respuesta de la impureza se trazaron en función del potencial aplicado (Figura 3). La respuesta más alta de los capsaicinoides en combinación con el pico de impureza más bajo se logró en el rango de +400 a +450 mV (frente al electrodo de referencia de platino), lo que arrojó el porcentaje de error más bajo del 15-16%. Por lo tanto, estos potenciales se eligieron para el monitoreo adicional en el método de inyección de flujo.

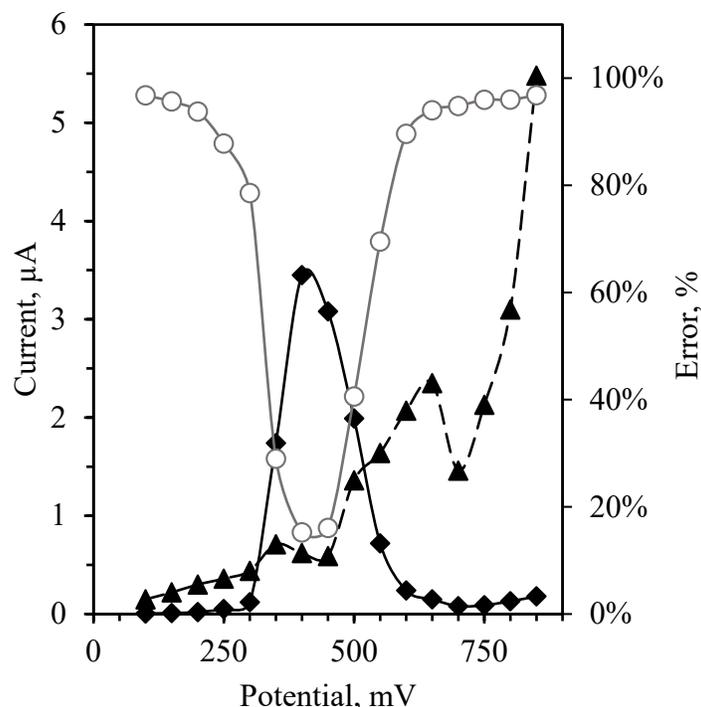


Figura 3. En el primer eje OY: señal de corriente de 16 sensores coulométricos de capsaicinoides (■ cuadrados negros), pico de impurezas (▲ triángulos negros, línea discontinua) trazados en función del potencial aplicado. En el segundo eje OY: porcentaje de error potencial calculado debido a la presencia de las impurezas para el análisis de inyección de flujo (○ círculos grises).

Como siguiente paso, se desarrolló un método de inyección de flujo para la detección de capsaicinoides en chiles. La Figura 4a muestra las señales típicas sin procesar que se obtuvieron después de la inyección de una muestra de extracto de chile en un sistema con 16 sensores coulométricos preparados a potenciales de +100 a +850 mV con un incremento de 50 mV (vs. electrodo de referencia de platino). Después de una inyección de una muestra, la señal de corriente resultante conduce a un pico agudo, que dura menos de 15 s. La recopilación de las señales registradas de cada uno de los 16 canales dio como resultado una gráfica tridimensional. El intervalo entre dos mediciones consecutivas fue de aproximadamente 30 s.

En la Figura 4b, el gráfico muestra áreas de pico acumulativo de cada señal de corriente en función del tiempo, lo que resulta en un voltamograma hidrodinámico. La intensidad actual y las áreas de los picos correspondientes aumentaron con el potencial aplicado. Esto, eventualmente, reveló la tendencia de una muestra a oxidarse. En el caso de las muestras de chile, se observaron dos puntos de inflexión, respectivamente, a +500 y +700 mV. La presencia de dos puntos de inflexión indicó que la oxidación del extracto de chile se puede describir mediante dos procesos principales de transferencia de electrones. Un primer proceso (por debajo de +500 mV) puede atribuirse a los antioxidantes fuertes, que muestran una fácil transferencia de electrones (como vitamina C o capsaicinoides) y su extensión puede usarse para expresar el poder antioxidante de las muestras. Este proceso está separado por aproximadamente +200 mV de un segundo proceso de oxidación (superior a +650 mV), que explica principalmente la oxidación de las impurezas

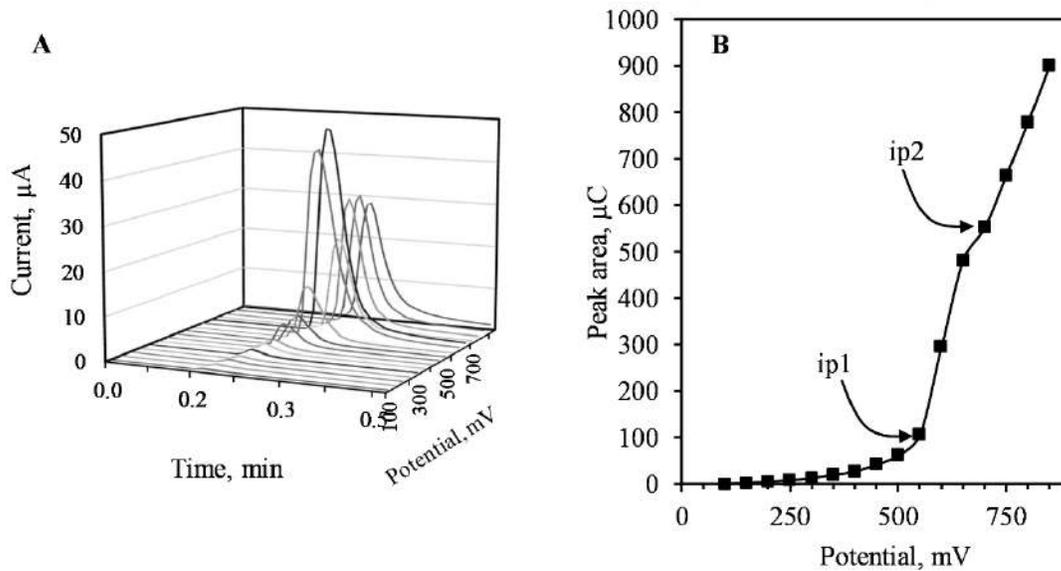


Figure 4. Señal típica de una inyección de extracto de chile en un sistema con coulometría de inyección de flujo preparada a potenciales de +100 a +850 mV con un paso de 50 mV. (B) Voltamograma hidrodinámico correspondiente del extracto de chile, cada punto trazado en el gráfico corresponde a un canal del detector de arreglo coulométrico (coullarray).

Como aplicación final, se analizaron 18 extractos de chile con el método de inyección de flujo y los resultados se compararon con los resultados de la cuantificación de capsaicina y dihidrocapsaicina con un método HPLC-ECD con separación cromatográfica en unidades Scoville. La mejor correlación se encontró con el sensor coulométrico preparado a +450 mV ($R^2 = 0.94$) debido al error menor, lo anterior debido a la presencia del pico de impureza como se discutió anteriormente. La Figura 5 muestra la respuesta de la señal del sensor coulométrico a +450 mV en relación con la concentración detectada de capsaicinoides convertidos a unidades Scoville.

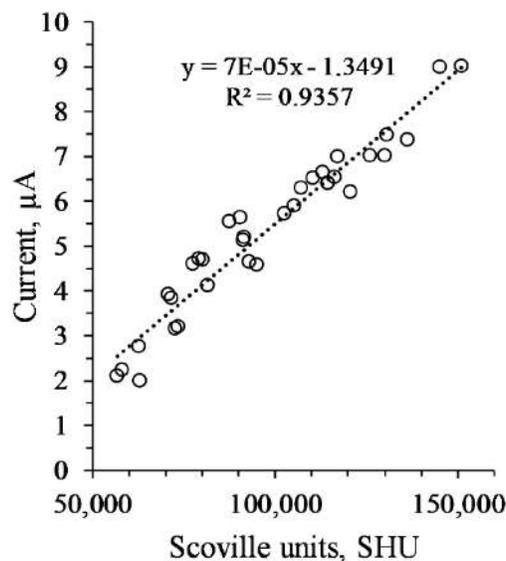


Figura 5. Gráfico de correlación entre la señal actual del sensor coulométrico preparado a +450 mV frente al índice Scoville calculado para 18 muestras de chile

2.3.3 Efecto del tipo de suelo y la madurez de los chiles sobre el contenido de capsaicinoides.

La lengua electrónica con detección coulométrica se utilizó para medir el contenido de capsaicinoides en 18 chiles cultivados en 2017 y 24 chiles recolectados en 2018 de diferentes tipos de suelo y etapa de madurez. Las plantas se cultivaron en un invernadero con tres tipos diferentes de suelos calizos con nombres mayas: K'áankab lu'um (suelo rojo), Box lu'um (suelo negro) o ch'ich 'lu'um (suelo pedregoso o marrón), del municipio de Suma de Hidalgo, Yucatán, México. La madurez del chile se definió por el color correspondiente al verde (inmaduro) y al naranja (maduro).

La Tabla 2 reporta los valores medios del contenido de capsaicinoides medidos usando la lengua electrónica con detección coulométrica. El análisis ANOVA bidireccional mostró que la madurez y los factores del suelo fueron significativamente diferentes para las muestras analizadas (Tukey HSD, $p < 0.001$). Además, las plantas de chile cultivadas en el suelo rojo presentaron un mayor contenido de capsaicinoides tanto para el chile verde como para el naranja. La interacción del tipo de suelo y el año de cosecha no fueron significativamente diferentes para las muestras medidas, lo que significa que el efecto del tipo de suelo fue el mismo tanto en 2017 como en 2018.

Tabla 2. Resultados del análisis de capsaicinoides totales en muestras de chile cultivadas en tres suelos diferentes por lengua electrónica con detección coulométrica ($n = 42$). ANOVA: letras diferentes corresponden a las medias significativamente diferentes usando Tukey HSD.

Madurez	Tipo de suelo	Contenido de capsaicinoides (mg g^{-1})	\pm Desv Est	ANOVA
Verde	Negro	5.2	1.9	A
	Rojo	7.5	1.6	AB
	Café	6.4	2	AB
Anaranjado	Negro	7.9	2.5	AB
	Rojo	9.5	2.6	B
	Café	9.4	2.18	B

III. Conclusión

El gusto es uno de los cinco sentidos clásicos además de ver, oír, oler y sentir. Hoy en día, la medición técnica de las características del sabor, como el picante de los chiles es posible por medio de lenguas electrónicas. Las muestras de chile se pueden analizar de forma rápida y directa. La señal obtenida por los sensores electrónicos se modela mediante algoritmos quimiométricos multivariados para obtener patrones de sabor típicos de muestras de chile, que se pueden utilizar para obtener información importante sobre la calidad del producto. En general, el desarrollo de lenguas electrónicas ofrece un nuevo enfoque prometedor para las industrias alimentarias, con aplicaciones interesantes desde el control de calidad de materias primas o productos terminados hasta el control de procesos en línea en forma de un sistema de alerta temprana.). El análisis estadístico de varianza (ANOVA) bidireccional realizado a los resultados de muestras de chile cultivado en diferentes suelos, mostró que los factores de madurez del chile y tipo de suelo sobre la respuesta de contenido de capsaicinoides

(medidos por lengua electrónica con detección coulométrica) fueron significativamente diferentes para las muestras analizadas (Tukey HSD, $p < 0.001$). Además, las plantas de chile cultivadas en el suelo rojo presentaron un mayor contenido de capsaicinoides tanto para el chile verde ($7.5 \pm 1.6 \text{ mg g}^{-1}$) como para el naranja ($9.5 \pm 2.6 \text{ mg g}^{-1}$).

IV. Referencias

- Bratov, A., Abramova, N., & Ipatov, A. (2010). Recent trends in potentiometric sensor arrays—A review. *Analytica Chimica Acta*, 678(2), 149–159. <http://doi.org/10.1016/j.aca.2010.08.035>
- Davis, C. B., Markey, C. E., Busch, M. a., & Busch, K. W. (2007). Determination of capsaicinoids in habanero peppers by chemometric analysis of UV spectral data. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 55, 5925–5933. <http://doi.org/10.1021/jf070413k>
- Deisingh, A. K., Stone, D. C., & Thompson, M. (2004). Applications of electronic noses and tongues in food analysis. *International Journal of Food Science and Technology*, 39(6), 587–604. <http://doi.org/10.1111/j.1365-2621.2004.00821.x>
- Dejmkova, H., Morozova, K., & Scampicchio, M. (2018). Estimation of Scoville index of hot chili peppers using flow injection analysis with electrochemical detection. *Journal of Electroanalytical Chemistry*, 821, 82–86. <http://doi.org/10.1016/j.jelechem.2018.01.056>
- Duelund, L., & Mouritsen, O. G. (2017). Contents of capsaicinoids in chillies grown in Denmark. *Food Chemistry*, 221, 913–918. <http://doi.org/10.1016/j.foodchem.2016.11.074>
- Escuder-Gilabert, L., & Peris, M. (2010). Review: Highlights in recent applications of electronic tongues in food analysis. *Analytica Chimica Acta*, 665(1), 15–25. <http://doi.org/10.1016/j.aca.2010.03.017>
- Gardner, J. W., & Bartlett, P. N. (1994). A brief history of electronic noses. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 18(1–3), 210–211. [http://doi.org/10.1016/0925-4005\(94\)87085-3](http://doi.org/10.1016/0925-4005(94)87085-3)
- González-Zamora, A., Sierra-Campos, E., Luna-Ortega, J., Pérez-Morales, R., Ortiz, J., & García-Hernández, J. (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(11), 13471–13486. <http://doi.org/10.3390/molecules181113471>
- Jordt, S.-E., & Julius, D. (2002). Molecular Basis for Species-Specific Sensitivity to “Hot” Chili Peppers. *Cell*, 108(3), 421–430. [http://doi.org/10.1016/S0092-8674\(02\)00637-2](http://doi.org/10.1016/S0092-8674(02)00637-2)
- Legin, A., Rudnitskaya, A., Vlasov, Y., Di Natale, C., Davide, F., & D’Amico, A. (1997). Tasting of beverages using an electronic tongue. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 44(1–3), 291–296. [http://doi.org/10.1016/S0925-4005\(97\)00167-6](http://doi.org/10.1016/S0925-4005(97)00167-6)
- Morozova, K., Rodríguez-Buenfil, I., López-Domínguez, C., Ramírez-Sucre, M., Ballabio, D., & Scampicchio, M. (2019). Capsaicinoids in Chili Habanero by Flow Injection with Coulometric Array Detection. *Electroanalysis*, 31(5), 844–850. <http://doi.org/10.1002/elan.201800705>
- Preedy, V. R. (2016). *Electronic noses and tongues in food science*. (M. L. R. Mendez, Ed.). Academic Press.
- Robbins, W. R., Staats, P. S., Levine, J., Fields, H. L., Allen, R. W., Campbell, J. N., & Pappagallo, M. (1998). Treatment of Intractable Pain with Topical Large-Dose Capsaicin. *Anesthesia & Analgesia*, 86(3), 579–583. <http://doi.org/10.1213/00000539-199803000-00027>
- Scampicchio, M., Ballabio, D., Arecchi, A., Cosio, S. M., & Mannino, S. (2008). Amperometric electronic tongue for food analysis. *Microchimica Acta*, 163(1–2), 11–21.

<http://doi.org/10.1007/s00604-008-0915-8>

- Schmidt, A., Fiechter, G., Fritz, E.-M., & Mayer, H. K. (2017). Quantitation of capsaicinoids in different chilies from Austria by a novel UHPLC method. *Journal of Food Composition and Analysis*, 60, 32–37. <http://doi.org/10.1016/j.jfca.2017.03.015>
- Scoville, W. L. (1912). Note on *Capsicums*. *The Journal of the American Pharmaceutical Association* (1912), 1(5), 453–454. <http://doi.org/10.1002/jps.3080010520>
- Stipcovich, T., Barbero, G. F., Ferreiro-González, M., Palma, M., & Barroso, C. G. (2018). Fast analysis of capsaicinoids in Naga Jolokia extracts (*Capsicum chinense*) by high-performance liquid chromatography using fused core columns. *Food Chemistry*, 239, 217–224. <http://doi.org/10.1016/j.foodchem.2017.06.098>
- Tahara, Y., & Toko, K. (2013). Electronic Tongues—A Review. *IEEE Sensors Journal*, 13(8), 3001–3011. <http://doi.org/10.1109/JSEN.2013.2263125>
- Vicente, S. (2002). Spectrophotometric flow-injection determination of nickel in biological materials. *Talanta*, 57(3), 475–480. [http://doi.org/10.1016/S0039-9140\(02\)00045-0](http://doi.org/10.1016/S0039-9140(02)00045-0)
- Vlasov, Y., Legin, A., Rudnitskaya, A., Di Natale, C., & D'Amico, A. (2005). Nonspecific sensor arrays (“electronic tongue”) for chemical analysis of liquids (IUPAC Technical Report). *Pure and Applied Chemistry*, 77(11), 1965–1983. <http://doi.org/10.1351/pac200577111965>
- Walczak, M. M., Dryer, D. A., Jacobson, D. D., Foss, M. G., & Flynn, N. T. (1997). pH Dependent Redox Couple: An Illustration of the Nernst Equation. *Journal of Chemical Education*, 74(10), 1195. <http://doi.org/10.1021/ed074p1195>

CAPÍTULO 11

Evaluación química y uso potencial de subproductos de *Capsicum chinense* Jacq., cultivado en dos tipos de suelo de Yucatán

Chemical evaluation and potential use of by-products of *Capsicum chinense* Jacq., cultivated in two types of soil from Yucatan

Chel-Guerrero, Lilian D.^{1*} Ruíz-Gutiérrez, Mónica C.¹ y Rodríguez-Buenfil, Ingrid M.¹

¹Centro de Investigación y Asistencia en Tecnología y Diseño del Estado de Jalisco. Subsede Sureste. Tablaje Catastral 31264 Km 5.5 Carr, Sierra Papacal-Chuburná puerto. Parque Científico Tecnológico de Yucatán. CP 97302 Mérida, Yucatán, México). *autor de correspondencia: lchelg_al@ciatej.edu.mx

Resumen

El objetivo de la investigación fue evaluar el contenido químico y el uso potencial de los pedúnculos, las hojas y los tallos de *Capsicum chinense* Jacq. var. Jaguar, cultivado en suelos, “*K’áankab lu’um*” o suelos rojos y “*Box luúm*” o suelos negros; mediante la obtención de harinas de subproductos (secado en horno), la realización de análisis proximal (métodos de la AOAC), la obtención de extractos metanólicos vía maceración (EMM) y por extracción asistida por ultrasonido (EEAU), la realización de análisis cualitativo de EMM (pruebas colorimétricas estandarizadas), la determinación del contenido de fenoles totales (CFT, Folin-Ciocalteu) y la determinación de capacidad antioxidante de EMM y EEAU (DPPH). Obteniéndose que, en todas las muestras se detectaron cumarinas, flavonoides y terpenoides; en hojas, además saponinas. Las hojas del suelo negro, presentaron mayor cantidad de proteínas y grasas (18.42 ± 0.01 y 9.75 ± 0.29 g 100 g⁻¹, respectivamente), las hojas del suelo rojo mostraron la mayor cantidad de carbohidratos (52.23 g 100 g⁻¹), los tallos del suelo rojo, exhibieron mayor cantidad de fibra (36.76 ± 0.12 g 100 g⁻¹), y los pedúnculos del suelo negro, mostraron mayor cantidad de cenizas (18.11 ± 0.00 g 100 g⁻¹). Los pedúnculos de suelo negro, exhibieron mayor CFT (48.09 ± 0.65 mg EAG 100 g ES⁻¹) y los pedúnculos y los tallos de suelo rojo, presentaron el mayor porcentaje de inhibición (91.10 ± 0.24 y 91.01 ± 0.08). Concluyendo que los pedúnculos, hojas y tallos de *Capsicum chinense* J., var. Jaguar cultivado en suelos negro y rojo de Yucatán, son fuente de compuestos bioactivos y tienen potencial uso alimenticio y farmacéutico como pudiera ser empleado para el desarrollo de súper alimentos.

Palabras clave: Subproductos, *Capsicum chinense*, suelos de Yucatán, contenido nutricional, capacidad antioxidante.

Abstract

The objective of this research was to evaluate the chemical content and potential use of the peduncles, leaves and stems of *Capsicum chinense* Jacq. var. Jaguar, cultivated in black (“*Box luúm*”) and red (“*K’áankab lu’um*”) soils of Yucatán; by obtaining flours from by-products (oven drying), performing proximal analysis (AOAC methods), obtaining methanolic

extracts via maceration (EMM) and by ultrasonic assisted extraction (EEAU), performing qualitative analysis of EMM (standardized colorimetric tests), the determination of the total phenolic content (CFT, Folin-Ciocalteu) and the determination of antioxidant capacity of EMM and EEAU (DPPH). Obtaining that, in all samples coumarins, flavonoids and terpenoids were detected; in leaves, plus saponins. The black soil leaves had a higher amount of protein and fat (18.42 ± 0.01 and 9.75 ± 0.29 g 100 g⁻¹, respectively), the red soil leaves showed the highest amount of carbohydrates (52.23 g 100 g⁻¹), the stems of the red soil exhibited a greater amount of fiber (36.76 ± 0.12 g 100 g⁻¹), and the peduncles of the black soil showed a greater amount of ashes (18.11 ± 0.00 g 100 g⁻¹). The peduncles of black soil, exhibited greater CFT (48.09 ± 0.65 mg EAG 100 g ES⁻¹) and the peduncles and stems of red soil, presented the highest percentage of inhibition ($91.10\% \pm 0.24$ and $91.01\% \pm 0.08$). Concluding that the peduncles, leaves and stems of *Capsicum chinense* J., var. Jaguar grown in black and red soils of Yucatán, are a source of bioactive compounds and have potential food and pharmaceutical use as it could be used for the development of superfoods.

Keywords: By-products, *Capsicum chinense*, Yucatan soils, nutritional content, antioxidant capacity.

I. Introducción

1.1 Desechos agrícolas como fuente de biocompuestos

La investigación enfocada al aprovechamiento de desechos agrícolas y aprovechamiento integral de especies vegetales, que contienen compuestos bioactivos que pueden ser usados para el desarrollo de alimentos con potencial uso en la prevención y/o tratamiento de enfermedades de interés mundial como el cáncer, enfermedades cardiovasculares y diabetes, resulta de especial interés para los gobiernos de los países, para la industria alimenticia, industria farmacéutica y para la sociedad en general.

Por lo anterior, resulta fundamental la investigación enfocada en la búsqueda de fuentes alimenticias alternas con alto valor nutricional, alimentos funcionales y de alimentos nutraceuticos, con potencial uso en la prevención y/o tratamiento de enfermedades de interés mundial como el cáncer, enfermedades cardiovasculares y diabetes. La literatura científica indica que diversos órganos de especies frutihortícolas, como son hojas, tallos, semillas, cáscaras y flores, contienen compuestos bioactivos y que este material vegetal podría utilizarse como fuente de estos compuestos para la elaboración de alimentos funcionales. Adicionalmente, el aprovechamiento de desechos agrícolas mediante alternativas innovadoras y el aumento de valor de los productos origen, derivado de su uso integral, conllevaría de manera paralela a la disminución del impacto ambiental, disminución de su costo de producción y también, incrementaría la sostenibilidad de su producción y procesamiento, generando beneficios económicos para los involucrados a lo largo y ancho de la cadena productiva (Santagapita, 2016).

Esta estrategia enfocada en la generación de alternativas innovadoras que permitan una mayor diversificación de uso seguro y aprovechamiento sustentable de las diversas especies que existen o son cultivadas en el territorio de un país, resultando de gran relevancia para México, ya que es el cuarto país con mayor diversidad de especies, y representa un gran

reto para el ecosistema de la investigación científica, pues a pesar de que nuestro país ocupa el onceavo lugar de producción agrícola a nivel mundial, representando un volumen de 263 millones de toneladas, en el caso de plantas frutales generalmente se aprovecha y comercializa únicamente el fruto (SIAP, 2017), con excepcionales casos como el de la guayaba (*Psidium guajava* L.), utilizada en la medicina tradicional azteca y de la cual se derivó el primer fitomedicamento mexicano comercializado como QG-5® empleado para el alivio de la colitis, que es un extracto seco de hojas de guayaba, el cual contiene flavonoides particularmente quercetina, consistiendo en un contenido estandarizado de 0.8 a 1.2 mg equivalentes de quercetina (PLM, 2016, Kamath *et al.*, 2008; Begum *et al.*, 2004; Lozoya, 2002). Como complemento del fundamento para apuntalar la ejecución de esta estrategia en el país, lo representa el hecho de que alrededor del 47 % de la población no tiene acceso a alguna institución de salud pública, debiendo optar por medicina alternativa, por lo que las autoridades sanitarias del país tienen especial interés en la investigación de plantas medicinales, ya que a pesar de que se tiene un registro de más de 3,500 especies de plantas que han sido utilizadas en la herbolaria tradicional mexicana para el tratamiento de diversas enfermedades como cáncer, diabetes y problemas renales y a pesar de que ocupa el segundo lugar a nivel mundial en el número de plantas medicinales registradas, únicamente un pequeño grupo (10 %) de las mismas han sido estudiadas desde el punto de vista farmacológico, fitoquímico y toxicológico (Alonso-Castro *et al.*, 2017; García de Alba García *et al.*, 2012;).

El Chile habanero (*Capsicum chinense* Jacq.), perteneciente a la familia de las Solanáceas, y cuyos frutos y hojas, se han reportado con uso en la medicina tradicional para curar asma, tos, dolor de garganta, dolor de dientes, dolor muscular, enfermedades gastrointestinales y artritis (Roy, 2016); es la principal especie hortícola explotada comercialmente en el sureste de México (Borges *et al.*, 2010), donde prevalecen dos tipos de suelo, “*K’áankab lu’um*” o suelos rojos y “*Box lu’um*” o suelos negros (Rodríguez-Buenfil *et al.*, 2017); es reconocido con la Denominación de origen Chile habanero de la Península de Yucatán en el año 2010, siendo el estado de Yucatán el principal productor. (Borges-Gómez *et al.*, 2014). Sin embargo, *C. chinense*, es una de las especies frutales con potencial subutilizado, ya que en la actualidad solo se comercializa el fruto, aunque, durante el proceso de cultivo e industrialización, una cantidad importante de subproductos (hojas, tallos y pedúnculos), son desechados, aproximadamente 4.8 millones de plantas y 108 millones de pedúnculos al año (considerando 22,000 plantas/ha, SIAP, 2017; SAGARPA, 2015); desechos que podrían ser aprovechados en las industrias alimenticia y/o farmacéutica, ya que aunque no se encontraron reportes científicos sobre el potencial farmacológico específicos de hojas, tallos y pedúnculos de *C. chinense* cultivado en suelos de Yucatán, si existen algunos reportes científicos que indican que diversos órganos de *Capsicum chinense* Jacq., contienen compuestos bioactivos como polifenoles, alcaloides y terpenoides (Herrera-Pool *et al.*, 2019; Gayathri *et al.*, 2016), tipos de compuestos relacionados con la prevención de enfermedades cardiovasculares y de algunos tipos de cáncer.

Por lo anterior se evaluó el potencial de subproductos agrícolas de *Capsicum chinense* J. (hojas, tallos y pedúnculos), cultivado en dos tipos de suelos característicos del estado de Yucatán (*K’áankab lu’um* (suelos rojos), y *Box lu’um* (suelos negros)), como fuente de compuestos bioactivos y de su posible inclusión en alimentos.

Existen numerosas investigaciones que se han realizado en diversos órganos de plantas frutales como son las hojas, tallos, semillas y raíces (Van-Breemen, 2015; Sagar *et al.*, 2018), que indican que tienen compuestos bioactivos, como en el caso de las hojas de manzana que contienen, entre otros compuestos, quercetina, catequina y epicatequina, o el caso de la semilla de mango que contiene ácido gálico y ácido elágico y el caso de la cáscara de Kiwi que contiene ácido cafeico y ácido p-cumarico y micro y macro nutrientes que pueden ser aprovechados en las industrias de alimentos y farmacéutica, como por ejemplo, la proteína actinidina en semillas de kiwi (actinidina) y la proteína similar a la vicilina de las semillas de sandía (Sagar *et al.*, 2018), e incluso, algunos extractos de plantas, se están comercializando en el mercado de suplementos alimenticios, sin embargo, tan solo el 10 % de las especies vegetales han sido estudiadas en este sentido (Citado en Chel-Guerrero *et al.*, 2018). Particularmente, sobre órganos del género *Capsicum* existen escasas investigaciones con ese enfoque y más específico de la especie *chinense*, solo fueron encontrados dos estudios al respecto (Gayathri *et al.*, 2016; Herrera-Pool *et al.*, 2019).

1.2 Nutrientes esenciales para el ser humano

Las proteínas (algunos aminoácidos como la fenilalanina y la leucina), algunos ácidos grasos (ácido alfa-linolénico y ácido linoleico), las vitaminas (como A, C, D), las sales minerales (potasio, magnesio, zinc, etc.) y el agua, son nutrientes esenciales para el ser humano, el cual no es capaz de producirlos y debe adquirirlos mediante la dieta. Estos nutrientes, le resultan necesarios para mantenerse sano y ejecutar sus diversas funciones (movimiento, reproducción, crecimiento, etc.), pues en caso de no recibirlos por un periodo prolongado de tiempo, podría incluso morir. Asimismo, el ser humano para mantener un adecuado funcionamiento de su intestino y a fin de prevenir enfermedades como el cáncer de colon, diabetes y enfermedades cardiovasculares, requiere integrar fibra en su dieta, a pesar de que la fibra de origen vegetal no le sea posible digerir y, por lo tanto, no le represente un aporte de energía (Olivares *et al.*, 2003). Las necesidades de estos nutrientes están en función del género, la edad y la actividad física realizada, por ejemplo, en el caso de un hombre y una mujer de entre 18 y 30 años, de 60 Kg de peso y con actividad física ligera requerirán 2,500 y 2,050 Kcal día⁻¹ esta energía será aportada por los nutrientes de su dieta (Tabla 1).

Estas necesidades el ser humano las cubre a través de la dieta, en la Tabla 2, se presentan los aportes de algunos alimentos generalmente incluidos en la dieta mixta latinoamericana.

Tabla 1. Cantidad mínima diaria de nutrientes recomendada para cubrir las necesidades de un hombre y una mujer sanos con la dieta mixta latinoamericana.

Nutriente/Tipo de Población	Hombre ¹	Mujer ¹
Proteína (g/día)	60	60
Carbohidratos (g/día)	281	230
Grasas (g/día)	94	34
Fibra (g/día)	25	25

¹Entre 18 y 30 años, de 60 Kg de peso con actividad física ligera. Tabla de elaboración propia con datos de Olivares *et al.* (2003).

Tabla 2. Información nutricional de algunos alimentos generalmente incluidos en la dieta mixta latinoamericana.

Nutriente/Producto	Carne de pollo	Leche entera	Arroz	Pan Blanco	Pera
Proteína (g/100 g)	29.5	3.2	0.3	7.6	0.4
Carbohidratos (g/100 g)	0	4.5	27.9	50.6	15.0
Grasas (g/100 g)	7.7	3.2	2.7	3.3	0.1
Fibra (g/100 g)	0	0	0.4	2.4	3.1

Tabla de elaboración propia con datos de Fatsecret, 2019.

Debido a la alta tasa de crecimiento poblacional, existe la necesidad de generar nuevas alternativas de alimentos, y una tendencia, es la valorización de residuos de la industria alimentaria y del sector agrícola como fuente de estos nutrientes para el ser humano (FAO, 2017), lo cual involucra directamente el compromiso del sector de investigación para el desarrollo de los mismos, teniendo un papel principal en esta importante tarea.

1.3 Alimentos Funcionales

Dada la gran relevancia de la dieta, existe un interés público en los llamados alimentos funcionales, los cuales son alimentos o productos alimenticios que además de su aporte natural de sustancias nutritivas, contienen compuestos bioactivos que proporcionan un beneficio a la salud. En el desarrollo de estos productos alimenticios funcionales, resulta relevante el satisfacer la expectativa del consumidor de tener productos saludables, pero al mismo tiempo, agradables al paladar (Santagapita, 2016). La investigación científica sobre la composición nutrimental, química y bioactividad de los desechos agroindustriales (como son hojas, tallos, raíces, semillas), provenientes de plantas frutales empleadas en la medicina tradicional, y la evaluación de su uso potencial en la suplementación de alimentos y/o en la industria farmacéutica, se encuentra en pleno desarrollo (Bharat-Helkar *et al.*, 2016), ejemplos de ello, es la evaluación del contenido químico y nutricional de las hojas de *Moringa olifera* (moringa) y *Azadirachta indica* (neem) (Tabla 3).

La moringa y el neem, son productos que se comercializan en el mercado de los suplementos alimenticios como capsulas de harina de las hojas de estas plantas (Piping Rock Health Products, LLC, 2019; Leone *et al.*, 2018; Shanmugavel *et al.*, 2018; Dash *et al.*, 2017; Madaki *et al.*, 2016; Offor, 2015; Rabiou-Abdulkadir *et al.*, 2015; Begum *et al.*, 2014; Venkatachalam *et al.*, 2012; Pérez-Gutierrez *et al.*, 2008). Asimismo, la evaluación de potencial farmacéutico de estos materiales vegetales, ha reportado el desarrollo del primer fitomedicamento mexicano comercializado como QG-5®, empleado para el alivio de la colitis, que parte de un extracto seco de hojas de guayaba (Tabla 3), el cual contiene flavonoides particularmente quercetina, consistiendo en un contenido estandarizado de 0.8 a 1.2 mg equivalentes de quercetina (PLM, 2016; Kamath *et al.*, 2008; Begum *et al.*, 2004; Lozoya, 2002). Es importante mencionar que, para las harinas con potencial uso en la industria alimentaria, debe considerarse el porcentaje de humedad menor al 15.5 %, debido a que es un factor crítico en el control de microorganismos durante el almacenamiento (CODEX-STAN-152-1985).

Tabla 3. Composición nutrimental y química de harina y de extractos metanólicos de hojas de plantas frutales utilizadas en la medicina tradicional.

Nutrientes/Grupo químico	<i>Moringa olifera</i> ¹	<i>Psidium guajava</i> ¹	<i>Azadirachta indica</i> ¹
Humedad (%)		10.74 ± 0.08	9.50 ± 0.24
Proteínas ²	30.6 ± 0.8	18.64 ± 0.05	1.58 ± 0.34
Carbohidratos ²		54.53 ± 0.25	78.12 ± 0.35
Lípidos ²	5.6 ± 0.3	1.37 ± 0.36	2.07 ± 0.35
Fibra total ²	32.8 ± 0.2	10.37 ± 0.05	5.92 ± 0.47
Fibra soluble ²	5.7 ± 0.1		
Fibra insoluble ²	27.1 ± 0.2		
Almidón ^{2,3}	11.3		
Azúcares ²	4.6 ± 0.1		
Cenizas ²	15.1 ± 0.3	4.35 ± 0.21	2.81 ± 0.21
Sodio ⁴	502 ± 5		180.65 ± 8.83
Potasio ⁴	1492 ± 13		235.65 ± 5.05
Calcio ⁴	2997 ± 27		170.05 ± 10.12
Hierro ⁴	30.2 ± 0.3		
Polifenoles totales mg EAG/g ⁵	23.91 ± 0.2		
Saponinas totales mg EAO/g ⁶	16.92 ± 0.6		
Flavonoides ⁴	+++	0.40 ± 0.02	++
Taninos ⁴	++	0.55 ± 0.01	++
Glucósidos ⁴	+++	3.76 ± 0.08	+++
Alcaloides ⁴	++	0.04 ± 0.00	++
Esteroides ⁴	-	0.09 ± 0.00	
Saponinas ⁴	++	3.01 ± 0.01	+
Terpenoides ⁴	++		
Vitamina A ⁴	218 ± 0.89		180 ± 0.10
Vitamina C ⁴			287 ± 6.22
Actividad antioxidante % de Inhibición ⁷	58.62 ± 1.13	87	41.8 ± 4.0
TPC mg EAG/g ⁵	6.27 ± 0.12	8.00 ± 0.1	6.8 ± 2.1
Forma comercializada	Suplemento alimenticio (cápsulas)	Fitofármaco (tabletas)	Suplemento alimenticio (cápsulas)

¹Los valores son la media y errores estándares. ²g por 100 g de materia seca ³Estimado por diferencia. ⁴mg por 100 g de materia seca. ⁵EAG: Equivalentes de ácido gálico por g de materia seca. ⁶Equivalentes de ácido Oleoico por g de materia seca. ⁷Determinado por DPPH. Tabla de elaboración propia con datos de Piping Rock Health Products, LLC, 2019; Leone *et al.*, 2018; Shanmugavel *et al.*, 2018; Dash *et al.*, 2017; Madaki *et al.*, 2016; Offor, 2015; Rabi-Abdulkadir *et al.*, 2015; Begum *et al.*, 2014; Venkatachalam *et al.*, 2012; Pérez-Gutierrez *et al.*, 2008.

En el caso de la harina de *Moringa olifera* (MO), se han realizado estudios para evaluar su potencial alimenticio y farmacológico, como lo reportan Sengev *et al.* (2013), quienes determinaron el efecto de la suplementación con polvo de hoja de MO sobre algunas propiedades físico-químicas (como altura, peso, humedad, fibra y cenizas) y sensoriales (color, textura y sabor) del pan de trigo, reportando que el pan fue elaborado exitosamente y observando un aumento en los nutrientes como fibra, proteína y grasas, pero que presentó deficiencias en las características físicas como volumen y altura del pan y que el aumento de polvo de hoja de MO en el pan, redujo drásticamente la preferencia / aceptabilidad de quienes lo evaluaron.

Por su parte, Leoné *et al.* (2018), probaron la efectividad de MO, para reducir la respuesta de la glucosa posprandial en sujetos diabéticos; estudio que se realizó probando diferentes dosis de la harina, variando de 14 a 30 g por día durante 1 a 6 meses, concluyendo que la suplementación con una dosis muy baja puede no ser suficiente para lograr el efecto deseado, mientras que la suplementación con una dosis demasiado alta (por arriba de 20 g día⁻¹), aunque brinda el efecto deseado, resulta desagradable para el paciente, debido a que las hojas tienen un sabor amargo, lo que hace que las preparaciones de alimentos con MO sean poco apreciadas, de manera que no se puede usar fuera del contexto de la investigación.(Leone *et al.*, 2018; Ntila *et al.*, 2019).

Por muchos años, la investigación científica se centró en el aprovechamiento de las hojas de plantas medicinales, sin embargo, actualmente también se está evaluando el potencial de otros órganos subutilizados de estas plantas, como son semillas, tallos, cáscaras (Vilchez *et al.*, 2011), que han demostrado contener nutrientes y compuestos bioactivos, como el estudio realizado por Akhtar *et al.* (2018), en el cual, se evaluaron además de hojas, cortezas, flores, tallos y espinas de 61 especies de plantas medicinales, encontrando que son fuente de compuestos bioactivos, detectando ácido gálico y rutina en la mayoría de los extractos de estas plantas con importantes actividades antioxidantes y concluyendo que este estudio identifica plantas con propiedades antimicrobianas y antioxidantes que podrían usarse para el aislamiento de los agentes terapéuticos deseados. Así también, el estudio realizado por Jaafar *et al.* (2009), quienes evaluaron el contenido nutrimental de la pulpa y los tallos de *Hylecereus polyhizus* (Pitahaya), encontrando que el tallo presentó resultados más altos que la pulpa (Humedad: 82.5-83.0 vs 96.0-98.0 g 100 g⁻¹; Proteína 0.159-0.229 vs 0.120-0.270 g 100 g⁻¹; Grasas: 0.21-0.61 vs 0.09-0.23 g 100 g⁻¹; Fibra cruda: 0.7-0.9 g vs 0.02-0.05 g 100 g⁻¹ y Ácido ascórbico (vitamina C) 8-9 mg L⁻¹ 63.71-132.95 mg L⁻¹) y concluyendo que debido al rico contenido nutrimental encontrado en el pedúnculo de esta fruta, puede ser útil para prevenir los factores de riesgo de ciertas enfermedades y el estudio realizado por Shivanand y Rajanna (2017), quienes evaluaron el valor terapéutico del pedúnculo de *Capsicum annuum* var. *glabriusculum* (Dunal) Heiser & Pickersgill, cultivado en hogares en Kannada, India, en donde localmente se usa como remedio contra la fiebre y para curar la úlcera, encontrando que el extracto metanólico de la muestra presenta compuestos bioactivos como son compuestos fenólicos, taninos, flavonoides, alcaloides, glucósidos, terpenoides y saponinas, un contenido de fenoles totales igual a 29.051 ± 0.21 mg de Equivalentes de ácido gálico g de peso fresco⁻¹, flavonoides totales de 2.778 ± 0.14 mg de quercetina g de peso fresco⁻¹, actividad antioxidante de 26.05 % de inhibición a una concentración de 1 mg mL⁻¹ (DPPH), de 1304.23 ± 21.98 µg Equivalente de Ácido ascórbico g de peso fresco⁻¹, concluyendo que esta matriz vegetal es una prometedora fuente de antioxidantes naturales y que el pedúnculo de *Capsicum annuum* var. *glabriusculum* (Dunal) Heiser & Pickersgill, posee propiedades antioxidantes que confirman su potencial terapéutico. Derivado de lo anterior, resulta importante la continuidad de estudios de este tipo, para evaluar el potencial alimenticio y farmacológico de órganos subutilizados de plantas medicinales y que los órganos de especies del género *Capsicum* son buenos candidatos de estudio por su contenido químico y potencial terapéutico.

1.4 Antioxidantes

La producción de especies reactivas de oxígeno, especies reactivas de nitrógeno y otros radicales libres, especies inestables de elevada reactividad), y su neutralización mediante la acción de antioxidantes (compuestos capaces de proteger los sistemas biológicos contra las reacciones y/o procesos que puedan producir un efecto potencialmente dañino) son un proceso natural del metabolismo celular de los organismos vivos. Sin embargo, cuando se produce una perturbación de este equilibrio entre radicales libres y antioxidantes, proceso conocido como estrés oxidativo, puede provocar degradación de biomoléculas. Cuando esta lesión oxidativa, afecta proteínas, lípidos y ácidos nucleicos, los cuales son de gran importancia biológica para un organismo, puede incluso conducir a muerte celular, teniendo este proceso fuerte implicación en mecanismos patogénicos de enfermedades como la diabetes, cáncer y enfermedades neurodegenerativas (Kattappagari *et al.*, 2015).

Los antioxidantes pueden actuar tanto en el espacio intracelular como en el espacio extracelular, y pueden ser endógenos y exógenos. Los antioxidantes endógenos están basados en enzimas que se encuentran en el organismo, como la superóxido dismutasa (SOD), la glutatión peroxidasa (GPX), la catalasa (CAT) y la transferrina o ceruloplasmina; por su parte, los antioxidantes exógenos son adquiridos mediante la dieta, y entre estos se encuentran, las vitaminas A, E y C, carotenoides, flavonoides, polifenoles y los minerales selenio y zinc. Los mecanismos de acción de los antioxidantes son, la prevención de la formación de radicales libres (mecanismo de las enzimas SOD, GPX y CAT), mediante la descomposición del peróxido de hidrógeno o la quelación de los metales, la inactivación de los radicales libres ya formados (eliminadores o secuestrantes de radicales libres), mediante la inhibición del inicio de la cadena redox y evitando su propagación (mecanismo de las vitaminas, flavonoides y polifenoles) y por último, el mecanismo de reparación, los cuales reparan los daños y reconstruyen la membrana (mecanismo de enzimas proteasas y transferrinas) (Nimse y Pal, 2015). Algunos antioxidantes sintéticos que son utilizados comúnmente son: Butil hidroxitolueno (BHT), hidroxibutilanisol (BHA), galato de propilo y tertbutilhidroquinina, causan problemas de salud, dañando al hígado, debido a su toxicidad y carcinogenicidad, por lo que la búsqueda y desarrollo de antioxidantes más seguros a partir de fuentes naturales ha ido aumentando. En este sentido, estudios científicos han demostrado que las plantas son una fuente rica de antioxidantes como son vitaminas A, C, E, compuestos fenólicos, taninos y ligninas y que altas concentraciones de estos fitoquímicos pueden proteger contra el daño producido por los radicales libres, por lo que cada vez existe más interés en determinar la presencia de estos compuestos en los diversos órganos vegetativos así como la determinación de su capacidad antioxidante y su bioactividad (Altemimi *et al.*, 2017).

Para la extracción de estos compuestos de varias partes de plantas, tales como hojas y semillas, se utilizan múltiples técnicas, entre las que se encuentran la extracción mediante el uso de disolventes de polaridades diferentes, extracción asistida por microondas (EAM) y extracción asistida por ultrasonido (EEAU). Encontrando que para la extracción de compuestos fenólicos de plantas con un alto grado de precisión se requiere usar disolventes de polaridades diferentes y que los disolventes altamente polares como el metanol tiene una alta eficacia para la extracción de antioxidantes. Por su parte, la EAM se ha utilizado como alternativa a las técnicas convencionales para la extracción de antioxidantes, resultando un método más óptimo que la extracción con varios disolventes para la extracción de compuestos fenólicos y debido a que reduce el tiempo de extracción y el volumen de disolvente requerido, al calentar el disolvente, y presenta alta sensibilidad hacia cierto tipo de compuestos como los capsacinoides (Altemimi *et al.*, 2017; Williams *et al.*, 2004).

Debido a que se requieren tecnologías amigables con el medio ambiente, la extracción de compuestos fenólicos por EEAU ha crecido en los últimos años, pues con esta tecnología, se reduce la cantidad de disolvente y la energía utilizada. El ultrasonido con niveles mayores de 20 kHz, se utiliza para romper las paredes celulares de las plantas, lo que ayuda a mejorar la capacidad del disolvente para penetrar las células y obtener un mayor rendimiento de extracción. Es un método sencillo que resulta eficaz para la extracción de compuestos fenólicos y con actividad antioxidante, pues al mantener controlada la temperatura de funcionamiento baja durante todo el proceso, evita la pérdida y degradación de compuestos termolábiles de la muestra (Altemimi *et al.*, 2017; García-Salas *et al.*, 2010; Barbero *et al.*, 2008). En el caso específico para la obtención de extractos con alta capacidad antioxidante, las condiciones reportadas para este método, son usando metanol (80 %) como disolvente y

un tiempo de extracción de 30 min (Gómez-Rincón *et al.*, 2018). A efecto de determinar capacidad antioxidante, es de mencionar, que no existen métodos internacionalmente aceptados, debido en parte, a la diversidad de matrices por analizar; ya que un solo método no reflejaría la capacidad antioxidante total, pues no existe alguno que determine tanto la capacidad de anitoxidantes lipofílicos como la capacidad de antioxidantes hidrofílicos, que considere todos los posibles mecanismos de acción antioxidante y que a su vez, evalúe la reactividad del antioxidante frente a las diferentes especies reactivas (Altemimi *et al.*, 2017; Moharram y Youssef, 2014; Londoño, 2011). En la Tabla 4, se presentan las características de los métodos más utilizados para medir capacidad antioxidante.

Tabla 4. Comparación de métodos para evaluar la capacidad antioxidante en función del mecanismo, criterio de valoración, método de cuantificación y adaptabilidad para medir antioxidantes lipofílicos e hidrofílicos.

Método	Mecanismo	Punto final	Cuantificación	Lipófilos-hidrofílicos	Relevancia biológica ³
ORAC	TAH ¹	Tiempo	Área bajo la curva	Si	+++
TRAP	TAH ¹	Fase de inducción	Cl ₅₀ , Fase de inducción	No	+++
FRAP	TE ²	Tiempo	Absorbancia	No	--
ABTS	TE ²	Tiempo	Absorbancia, Cl ₅₀	Si	-
DPPH	TE ²	Tiempo	Absorbancia, Cl ₅₀	No	-
Peroxidación lipídica LDL	TE ²	Fase de inducción		No	+++

¹TAH: Transferencia de un átomo de hidrógeno; ²TE: Transferencia de un electrón; ³Del más (+++) al menos relevanta (---). Fuente: (Altemimi *et al.*, 2017; Moharram y Youssef, 2014; Londoño ver mi tesis para la bibliografía).

Dentro de los métodos relacionados en la tabla anterior, el método DPPH, que es un método indirecto, ha sido empleado para el estudio preliminar de capacidad antioxidante de matrices vegetales y alimentos, por su rapidez, simplicidad de ejecución (no involucra muchos pasos y reactivos) y bajo costo, comparado con otras modelos de prueba (Altemimi *et al.*, 2017; Moharram y Youssef, 2014; Londoño, 2011; Chel-Guerrero *et al.*, 2018). Por lo tanto, debido a que las plantas de manera natural poseen una amplia variedad de compuestos bioactivos, las propiedades de estos compuestos, dependerán de la naturaleza de la planta, del sistema utilizado para aislar estos compuestos y el método seguido para evaluar su bioactividad, requiriendo el desarrollo de investigaciones para valorar el aprovechamiento de las innumerables especies y sus órganos, que hasta el día de hoy se mantienen desconocidas o poco conocidas.

1.5 Subproductos de *Capsicum chinense*

El Chile habanero (*Capsicum chinense* Jacq.), pertenece a la familia de las Solanáceas, y cuyos frutos y hojas, se han reportado con uso en la medicina tradicional para curar asma, tos, dolor de garganta, dolor de dientes, dolor muscular, enfermedades gastrointestinales y artritis (Roy, 2016); es la principal especie hortícola explotada comercialmente en el sureste de México (Borges *et al.*, 2010), donde prevalecen dos tipos de suelo, “*K’áankab lu’um*” o suelos rojos y “*Box lu’um*” o suelos negros, los cuales son suelos poco profundos < 25 cm y ricos en fragmentos gruesos (Rodríguez-Buenfil *et al.*, 2017). Es reconocido con Denominación de origen y el estado de Yucatán en el año 2015, tuvo alrededor de 218.89 ha cultivadas (SIAP, 2017; SAGARPA, 2015; Borges-Gómez *et al.*, 2014;), ver Figura 1.

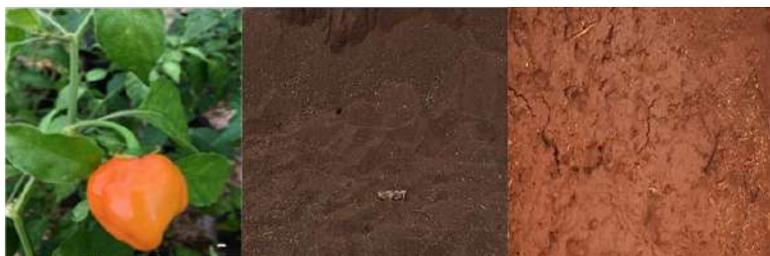


Figura 1. Planta *C. chinense* y tipos de suelo donde se cultiva en Yucatán (a) Planta de chile habanero, b) Suelo negro (*Box lu'um*, c) Suelo rojo (*K'áankab lu'um*).

Durante el proceso de cultivo e industrialización, una cantidad importante de subproductos (hojas, tallos y pedúnculos, Figura 2), son desechados, aproximadamente 4.8 millones de plantas (considerando 22,000 plantas/ha) y en muchos casos se quema para evitar problemas fitosanitarios; de igual manera, en la industria, donde se procesa alrededor del 20 % de la producción (433.2 t/año), siendo aproximadamente 108 millones de frutos, de los que se desecha el pedúnculo (SIAP, 2017; SAGARPA, 2015); desechos que podrían ser aprovechados en las industrias alimenticia y/o farmacéutica, ya que existen algunos reportes científicos que indican que diversos órganos de *Capsicum chinense* Jacq., contienen compuestos bioactivos como polifenoles, alcaloides y terpenoides (Gayathri *et al.*, 2016), tipos de compuestos relacionados con la prevención de enfermedades cardiovasculares y de algunos tipos de cáncer (Alves *et al.*, 2017).



Figura 2. Órganos de *C. chinense* (a) Pedúnculos, b) Hojas y c) Tallos).

1.6 Características de *C. chinense* var. Jaguar

El chile habanero es un arbusto de ciclo anual con un hábito de crecimiento determinado; la variedad Jaguar, es una variedad de polinización libre desarrollada por el Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP) con número de registro CHL-008-101109 en el Catálogo Nacional de Variedades Vegetales y Título de Obtentor número 0664. Jaguar prospera satisfactoriamente en suelos arcillosos, donde normalmente otros genotipos de habanero ven afectada su producción, es una variedad adaptada a las condiciones ambientales del trópico, como son alta temperatura y humedad y tiene alta tolerancia a plagas como la mancha bacteriana y a enfermedades virales (Tut *et al.*, 2013). Esta variedad se caracteriza por plantas con altura de 80 a 90 cm en campo abierto y de 1.80 cm en sistemas de agricultura protegida, tiene cobertura de follaje que va de 75 a 120 cm, el follaje es glabro e inicia su floración y cosecha de 70-85 y 115-120 días después de la siembra, respectivamente.

Produce frutos uniformes, de color verde esmeralda que se tornan anaranjado brillante en madurez total, alcanza rendimientos de alrededor de 15 a 30 t/ha, a cielo abierto con tecnología de media a alta, llegando a alcanzar las 43 t/ha, en condiciones de agricultura protegida (Ramírez-Meraz *et al.*, 2018). En la Tabla 5, se realiza una descripción botánica de los órganos de esta planta.

Tabla 5. Descripción botánica del pedúnculo, la hoja, el tallo y el fruto de *C. chinense* var Jaguar.

Característica/Órgano	Pedúnculo	Hoja	Tallo	Fruto
Forma	n.d. ¹	Simples, lisas, alternas y de forma lanceolada	Cilíndrico, erecto, glabro o pubescente	Baya hueca en forma triangular-acampanulada
Color	n.d.	Diferentes tonos de verde	n.d.	Verde esmeralda (estado inmaduro) y anaranjado (estado de madurez total)
Longitud	n.d.	6.5 a 10.5 cm	30 a 120 cm	3.8 a 5.5 cm
Ancho	n.d.	3.0 a 15 cm	n.d.	n.d.
Diámetro	n.d.	n.d.	0.9 y 3.1 cm	2.5 a 3 cm
Peso	n.d.	n.d.	n.d.	6.5 a 12 g

¹n.d. no disponible. Tabla de elaboración propia con datos de Tut *et al.*, 2013.

Los frutos de esta variedad, reúnen las características especificadas en la Norma Mexicana para Chiles Frescos (CTNNPAP, 2007).

1.7 Valor nutricional de *C. chinense*

EL fruto de *C. chinense*, se puede consumir directamente o puede ser usado en extractos para aumentar el valor nutricional en diferentes alimentos y dietas (Segura-Campos *et al.*, 2013). Sharma *et al.* (2017), indican que resultado del análisis proximal realizado a frutos de *C. chinense* J., cultivados en la India, presentan un alto contenido de fibra cruda y carbohidratos (Tabla 6).

Tabla 6. Composición proximal de los frutos de *Capsicum chinense* J., cultivado en la India.

Muestra/Nutrientes (g 100 g ⁻¹)	Humedad	Cenizas	Grasas	Proteína	Fibra cruda	CHO ¹
<i>Capsicum chinense</i>	8.43±0.20	7.33±0.15	5.06±0.05	8.2±0.15	29.26±0.03	50±0.01

¹CHO: Carbohidratos. Fuente: Sharma *et al.*, 2017

En este sentido, a la fecha no se encontraron reportes de contenido nutrimental de pedúnculos, hojas y tallos de *C. chinense* J., var Jaguar, por lo que sería interesante contar con dicha información y poderlo comparar con el contenido de los frutos.

1.8 Metabolitos y bioactividad de *C. chinense*

Los frutos de diversas especies del género *Capsicum* han sido muy estudiados, en gran medida debido a sus valores comerciales y medicinales, en los cuales se han reportado múltiples compuestos bioactivos (Figura 3), como compuestos fenólicos (principalmente ácido gálico, ácido benzoico, cafeína, catequina, ácido clorogénico, catecol, epicatequina, ácidos cafeico, vanílico, ferúlico, isoferúlico, resveratrol, elágico, p-cumárico y cinámico), flavonoides (principalmente naringenina, rutina, hesperidina, rosmarinico, quercetina, quercetrina, naringina, kaempferol, hesperitina, apigenina y luteoliana) y especialmente capsaicinoides, principalmente capsaicina e hidrocapsaicina (Shivanand y Rajanna, 2017; Shaimaa *et al.*, 2016).

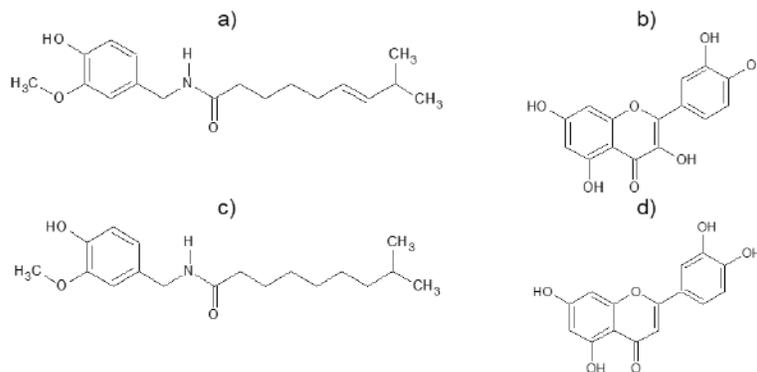


Figura 3. Algunos de los principales compuestos bioactivos encontrados en frutos de especies del género *Capsicum* (a) Capsaicina, b) Quercetina, c) Dihidrocapsaicina y d) Luteolina).

El *C. chinense*, es un símbolo de pungencia por sus altos contenidos de capsaicinoides, de entre 56,000 y 162,000 unidades scoville (Morozova *et al.*, 2019), siendo la capsaicina y la dihidrocapsaicina, los más abundantes en los frutos, aunque están ausentes en órganos vegetativos (Amruthraj *et al.*, 2014; Borges-Gómez *et al.*, 2010; Ruiz-Lau *et al.*, 2010). La actividad antioxidante, antiinflamatoria, bactericida, anticáncer y antidiabética, presentada por esta especie ha sido atribuida principalmente a la capsaicina; sin embargo estudios revelan que su consumo en grandes cantidades (DL₅₀ 0.5 a 5 g/Kg) por periodo prolongado pueden causar efectos colaterales como gastritis crónica; por lo que sería interesante identificar otro tipo de compuestos bioactivos presentes en la especie, en tejidos como las hojas, tallos y pedúnculos donde el contenido de capsaicina es nulo o muy bajo.

Respecto al contenido de compuestos bioactivos en subproductos de *C. chinense*, actualmente solo se encontró un reporte del extracto acetona:acetonitrilo de hojas de chile habanero cultivado en la India en el que se indica presencia de polifenoles, alcaloides, taninos, flavonoides y terpenoides (Gayathri *et al.*, 2016) y un reporte del contenido en hojas y raíces de *C. chinense* variedad Chichen Itzá (cultivado en invernadero en el municipio de Suma, Yucatán, México), en el que se indica que dentro de los compuestos fenólicos extractables detectados en las hojas, se encuentran ácidos fenólicos como son, compuestos derivados del ácido clorogénico e hidroxicinámico y flavonoides como luteolina, quercetina, crisoeriol o apigenina que brindan protección contra el estrés oxidativo y que los compuestos fenólicos no extractables detectados en las raíces también son ácidos fenólicos que se

acumulan en la pared celular y proporcionan resistencia mecánica y protección contra el ataque de patógenos en las raíces (Herrera-Pool *et al.*, 2019).

Por otra parte, no hay evidencia científica sobre el potencial farmacológico de hojas, tallos y pedúnculos de *C. chinense* variedad Jaguar, cultivado en suelos leptosoles de Yucatán, el más común en la zona, lo cual es relevante estudiar, debido a que estudios científicos han demostrado que diferentes variedades de la misma especie, las variaciones geográficas y los factores ambientales tienen impacto en el contenido químico y potencial farmacológico de las especies vegetales (Vélez-Terranova *et al.*, 2014).

Por lo anterior, el objetivo de la presente investigación, consistió en la evaluación del contenido químico y uso potencial de los pedúnculos, las hojas y los tallos de *Capsicum chinense* Jacq. var. Jaguar cultivado en suelos negro y rojo de Yucatán.

II. Materiales y Métodos

2.1 Estrategia general del trabajo

En el presente estudio se evaluó el contenido nutrimental y riqueza antioxidante de los subproductos de *C. chinense* var. Jaguar (hojas, tallos y pedúnculos) y del fruto en estado de maduro (color naranja), cultivado en dos tipos de suelos de Yucatán (suelo negro y suelo rojo). La estrategia del trabajo propuesta se dividió en 5 fases (ver Figura 4): Obtención de harinas de hojas, tallos, pedúnculos y frutos, por secado en horno (realizando curva de secado hasta obtener una humedad < 5 %, para garantizar su facilidad de almacenamiento); Realización de análisis proximal de las harinas, determinación de proteínas, lípidos, fibra y cenizas, mediante métodos estandarizados por la AOAC y determinación de carbohidratos (obtenido por diferencia al 100 %); Obtención de extractos de las harinas obtenidas mediante maceración con metanol (EMM) y extracción con metanol al 80% asistida con ultrasonido (EEAU); Estudio fitoquímico: Análisis cualitativo de los EMM, mediante pruebas colorimétricas estandarizadas y Análisis cuantitativo mediante la determinación de contenido de fenoles totales por el método de Folin-Ciocalteu y Actividad farmacológica: Evaluación de la capacidad antioxidante de los EMM y de los EEAU, mediante DPPH. Finalmente, se analizaron los resultados para identificar el potencial farmacológico y alimenticio de los subproductos y del fruto de *Capsicum chinense* J., planta frutícola cultivada en el estado de Yucatán.

2.2 Material vegetal

El material vegetal (hojas, tallos, pedúnculos y frutos) del chile habanero variedad Jaguar, se obtuvo del cultivo realizado en invernadero en el Centro de Investigación y Asistencia en Tecnología y Diseño del Estado de Jalisco, A.C. (CIATEJ) Subsede Sureste (Latitud N 21° 8' 1.288" y Longitud O 89° 46' 52.26"), realizado en dos tipos de suelo, suelos rojos (K'áankab lu'um) y suelos negros (Box lu'um), siendo plantas de la cosecha número 12, con 265 DPT, siendo la última cosecha esperada de dichas plantas.

2.3 Primera fase. Obtención de harinas

Convencionalmente, para retirar la humedad de las plantas, se recomiendan temperaturas de secado bajas entre 30 y 50 ° C, a fin de proteger los ingredientes activos sensibles; y debido a que es un rango de temperatura al cual, generalmente, se obtiene un contenido de humedad menor al 15 %, lo que permite su preservación exitosa, dado que se inhibe el crecimiento microbiano y previene los cambios bioquímicos (Muller and Heindl, 2006; Orphanides *et al.*, 2013).

Para la obtención de las harinas, primeramente, se separaron los diferentes órganos de las plantas, es decir, pedúnculos, hojas y tallos. Posteriormente, se procedió a su secado en horno, utilizando un horno de acero inoxidable, modelo HS60-AID, marca NOVATECH (en el caso de los tallos, se trozaron para un fácil manejo, utilizando un cuchillo) y se realizaron curvas de secado, considerando las condiciones propuestas por Anwar *et al.* (2013) y por Pavlić *et al.* (2018), de secar a una temperatura de 40° C y 44° C, respectivamente, a fin de no dañar compuestos termolábiles; por lo que, para una primera aproximación, se tomó únicamente una de las muestras (pedúnculos de plantas cultivadas en suelo negro), comparando la variación del contenido de humedad a diferentes tiempos bajo estas dos condiciones, siendo los tiempos analizados de 4, 8, 16, 24, 48, y 72 h, después, se procedió a realizar molido y tamizado (tamiz Fisher Scientific #35) y a la determinación del contenido de humedad del material vegetal mediante una termobalanza (marca Ohaus), para lo cual se pesaron 0.5 g de muestra.

La isoterma de humedad es propiedad característica de cada especie vegetal, por lo que ha de establecerse para cada especie e incluso para órganos de una misma especie (Müller and Heindel, 2006), por ello, se procedió a repetir el experimento pero analizando otra muestra, en este caso pedúnculos de plantas cultivadas en suelo rojo, a una de las dos condiciones de temperatura bajo las cuales se llevó el análisis (44° C) y a los tiempos de análisis mencionados (4, 8, 16, 24, 48, y 72 h), temperatura que en el proceso descrito en el párrafo anterior, resultó con muestras con menor contenido de humedad (comparando el resultado obtenido de humedad a iguales condiciones de tiempo), a fin de elegir el mejor tiempo de secado a la condición de temperatura probada.

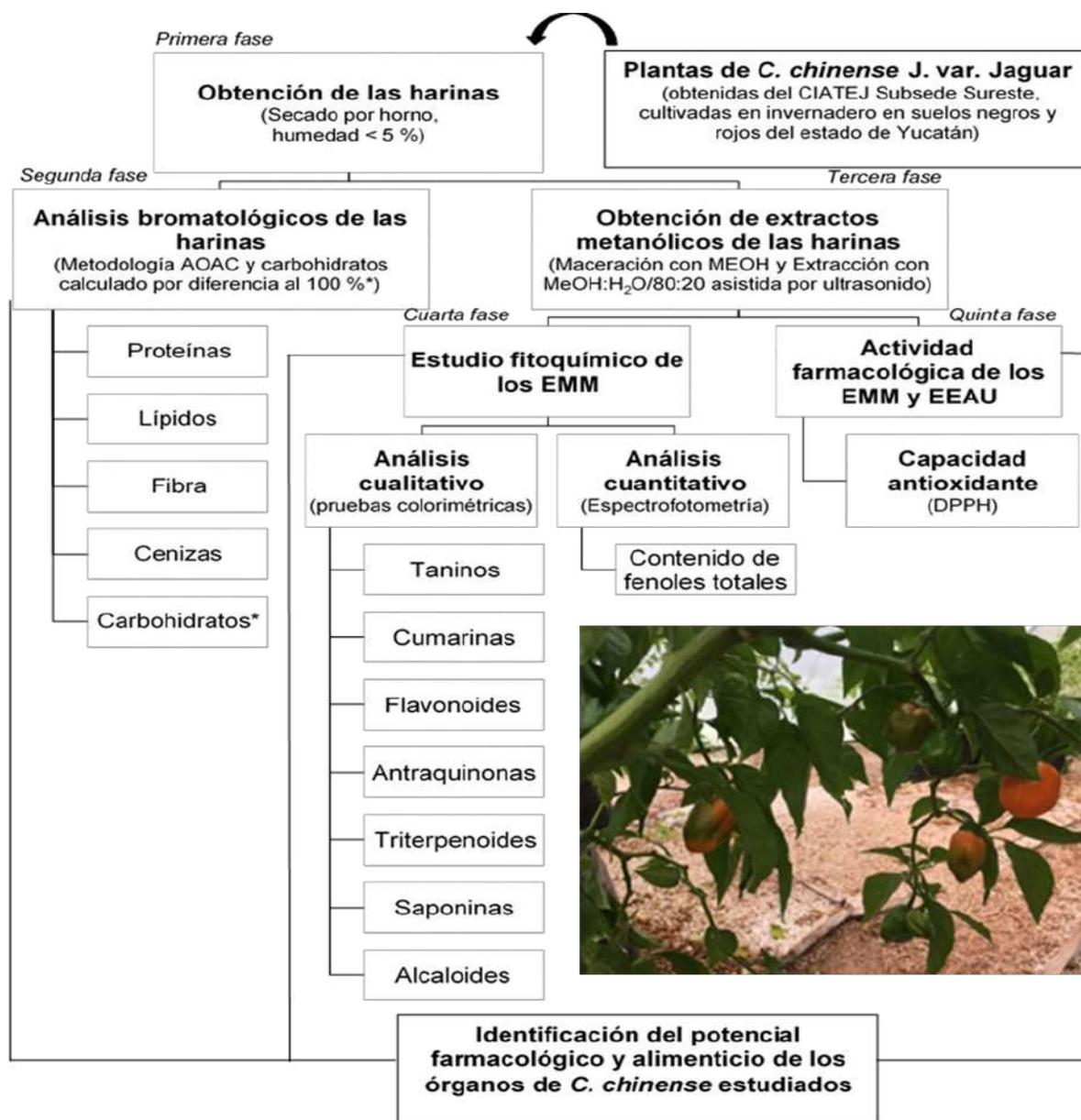


Figura 4. Estrategia general del trabajo

Luego, se procedió a repetir el experimento pero analizando las muestras de los tres tipos de subproductos (pedúnculos, hojas y tallos de suelos negro y rojo) a la temperatura de 44° C y a los tiempos de análisis mencionados (4, 8, 16, 24, 48, y 72 h).

Finalmente se eligió la condición de temperatura y tiempo para procesar cada muestra, que cumpla con un contenido de humedad que esté dentro de lo que marca la norma oficial mexicana NOM-247-SSA1-2008, la cual indica un nivel máximo de 15 % de humedad, para garantizar un almacenamiento efectivo, pero que también garantice que la muestra no se apelmace en el proceso de molido y tamizado y que sea el menor tiempo de secado.

2.4 Segunda fase. Análisis bromatológicos

El análisis proximal de las harinas obtenidas, humedad, cenizas totales, fibra cruda, lípidos y proteína se realizó por duplicado utilizando los siguientes métodos: Determinación de humedad mediante lo indicado en la NMX-F-428-1982; determinación de cenizas mediante método de la AOAC 942.05; determinación de proteínas mediante método Kjeldahl AOAC 976.05; determinación de grasas o lípidos mediante lo indicado en la NMX-F-089-S-1978; determinación de fibra usando el método de la AOAC 962.09; y determinación de carbohidratos, calculado mediante diferencia porcentual (AOAC,2000). Los valores de los proximales, fueron expresados en g 100 g⁻¹ de muestra seca. Los experimentos se llevaron a cabo por duplicado.

2.5 Tercera fase. Obtención de extractos

Los extractos se obtuvieron mediante dos métodos, usando el método de maceración con metanol (EMM) y el método de extracción asistida por ultrasonido (EEAU). Para los EMM (Citados en Chel-Guerrero *et al.*, 2018), se pesaron 5 g de cada muestra, se homogeneizaron en 50 mL de metanol de grado HPLC (marca Sigma Aldirch), se agitó a 160 rpm en una incubadora con agitación (marca Labtech modelo LSI-3016A, Jalisco, México), durante 24 h a temperatura ambiente (28° C). Cada extracto se filtró con papel Whatman No. 2, a continuación, el disolvente se evaporó al vacío a 40° C, usando un evaporador rotatorio (marca Buchi, modelo B-491, Flawil, Suiza). Para los EEAU, se pesaron 0.5 g de cada una de las muestras a las cuales se les añadió 2.5 mL de metanol de grado HPLC (marca Sigma Aldirch) al 80 %, posteriormente se sonicaron durante 30 minutos (Sonicador marca Branson, modelo 3510, Danbury, EE.UU.), se realizó un centrifugado por 30 min a 4700 rpm a 4° C (Centrífuga marca Thermo scientific modelo Mega Fuge 40R, Langensfeld, Alemania), se recuperó el sobrenadante y de nuevo se realizó el mismo proceso de centrifugación por 30 minutos a 4700 rpm a una temperatura de 4° C, finalmente el sobrenadante se filtró con papel millipore de 0.45 µm (Oney-Montalvo *et al.*, 2018). Todos los extractos secos se almacenaron a -20° C hasta su análisis.

2.6 Cuarta fase. Estudio fitoquímico de los EMM

Para determinar la presencia de fitoquímicos en las muestras, se disolvieron dos miligramos de cada extracto en 10 ml de agua destilada, excepto en el caso de la determinación de flavonoides, para lo cual, únicamente se disolvió 1 mg de extracto en 1 ml de metanol). Estas soluciones se probaron para detectar la presencia de fitoquímicos activos siguiendo metodologías estándar: Taninos: prueba de gelatina; Cumarinas: prueba de fluorescencia, flavonoides: prueba de Coolborn y Bolatito; Triterpenoides: prueba de Salkowsky; Saponinas: prueba de espuma; Antraquinonas y Alcaloides: TLC (citados en Aarland *et al.*, 2016). Las determinaciones se realizaron por duplicado.

Para determinar el contenido de fenoles totales (CFT), se empleó la metodología descrita por Singleton y Rossi, y adaptada por Gómez-Rincón *et al.*, (2018), para lo cual, se tomaron 50 µL de extracto, se le añadieron 3 mL de agua desionizada y se agitó con un vortex, posteriormente se añadieron 250 µL del reactivo de Folin-Ciocalteu (2 N) y se dejó reposar por 5 min, posteriormente, se añadieron 750 µL de Na₂CO₃ (20 %) y 950 µL de agua desionizada, se agitó vigorosamente con un vórtex y se dejó reposar por 30 min. Finalmente, se determinó la absorbancia de cada muestra en un espectrofotómetro a una longitud de

onda de 765 nm (Espectrofotómetro marca Jenway, modelo 6715 UV/Visible, Staffordshire, Reino Unido). Se preparó una curva estándar con ácido gálico con concentraciones de 0 a 100 µg mL⁻¹. Los resultados se expresan como mg equivalentes de ácido gálico 100 g de extracto seco⁻¹. Las determinaciones se realizaron por triplicado.

2.7 Actividad farmacológica de los EMM y EEAU

Para determinar la capacidad antioxidante de los EMM y EEAU, se utilizó el ensayo de 2,2-difenil-1-picrilhidrazilo (DPPH) según lo descrito por Brand-Williams *et al.*, y adaptado por Gómez-Rincón *et al.* (2018). Para lo cual, se pesaron 3.3 mg de DPPH y se disolvieron en 100 mL de metanol grado HPLC, se realizó el ajuste de la solución a 0.7 ± 0.02 de absorbancia, determinada a 515 nm (Espectrofotómetro marca Jenway, modelo 6715 UV/Visible, Staffordshire, Reino Unido), posteriormente, se tomaron muestras de 100 µL de extracto seco y se le añadieron 3.9 mL de la disolución de DPPH con absorbancia ajustada y se agitaron con vortex, dejándose reaccionar en reposo por 30 min. Finalmente, se tomaron las lecturas en el espectrofotómetro a 515 nm y se realizaron los cálculos del porcentaje de inhibición, utilizando la siguiente ecuación:

$$\% \text{ de I} = (\text{abs DPPH} - \text{abs de la muestra} / \text{abs DPPH}) * 100$$

En donde:

% de I = porcentaje de inhibición (de actividad antioxidante)

Abs DPPH = Absorbancia inicial de la solución radical de DPPH.

Abs de la muestra = Absorbancia de cada una de las muestras analizadas

Los experimentos se llevaron a cabo por triplicado.

2.8 Análisis estadístico

Los resultados de los experimentos se expresaron como la media \pm la desviación estándar (excepto para el caso de los pesos de las muestras los cuales se expresan en g). Las diferencias estadísticamente significativas entre los grupos se calcularon utilizando un análisis de varianza de una vía y para las interacciones entre grupos se utilizó un análisis de varianza multifactorial (los factores analizados fueron tipo de suelo, tipo de extracción y tipo de subproducto y las interacciones fueron tipo de suelo-tipo de extracción, tipo de suelo-tipo de subproducto y tipo de extracción-tipo de subproducto), seguido de la prueba de Tukey, con un $P < 0.05$ tomado como significativo. El análisis de datos se realizó con el paquete estadístico Statgraphics Centurion 18 - X64.

III. Análisis y discusión de resultados

3.1 Primera fase. Obtención de harinas

Los resultados del proceso de secado a temperaturas de 40 y 44 °C, demostraron que para los pedúnculos de suelo negro (muestra ejemplo para curva de humedad), si existe efecto de la temperatura, del tiempo y de su interacción en el porcentaje de humedad ($P = 0.0000$ en todos los casos), observándose que para este tipo de muestras, para un tiempo ≤ 48 h, la temperatura de 44° C proporciona un menor porcentaje de humedad de la muestra. Debido a lo anterior, se procedió a analizar a esta condición de temperatura de 44° C, la muestra de

pedúnculo de tierra roja para también observar su comportamiento, encontrando que únicamente el tiempo tiene efecto en el porcentaje de humedad (Figura 5). Este comportamiento fue según lo esperado, ya que generalmente las temperaturas más altas requieren menor tiempo de secado principalmente por el incremento en la diferencia de temperatura entre el subproducto y la migración de agua (Olguín-Rojas *et al.*, 2019).

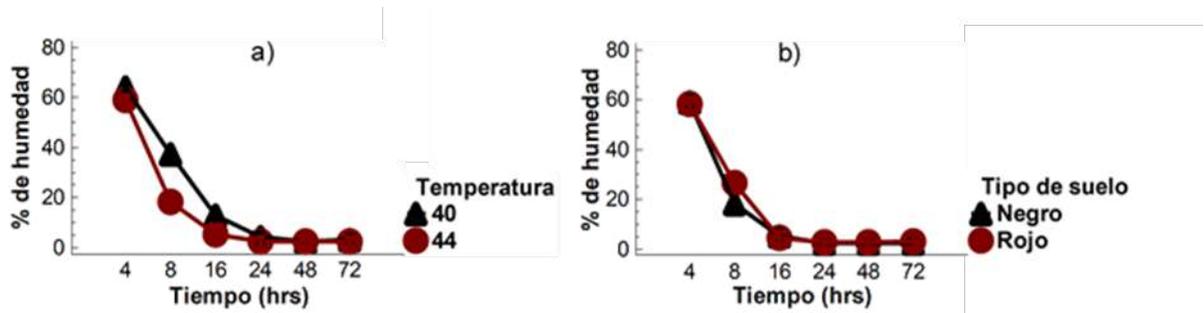


Figura 5. Gráficos de interacción de tiempo y temperatura en el porcentaje de humedad de pedúnculos de *C. chinense* var Jaguar (a) Pedúnculos de suelo negro y b) Pedúnculos de suelo negro y rojo).

Derivado de estos resultados, se procedió a determinar las condiciones de tiempo a una temperatura de 44° C de todos los subproductos de suelos negro y rojo, para obtener una humedad < 5 %. En la Tabla 7, se presentan las condiciones para cada tipo de subproducto, siendo de 48 h para pedúnculos y tallos y de 240 h para hojas a una temperatura de 44° C de secado en horno. A estas condiciones no se compacta el material vegetal facilitando su tamizado y su adecuado almacenaje (CODEX-STAN-152-1985).

La curva de humedad es característica de cada especie vegetal, sin embargo, a efecto de analizar los resultados obtenidos, es posible comentar que los contenidos de humedad del material vegetal en estudio, obtenidos a 40 °C y 44 °C por 48 h (humedad < 5%) en horno convencional, son menores a los reportados por Quintanilla-Medina *et al.*, (2018), quienes indican que para las hojas de moringa, a una temperatura de 40 °C por 48 h secadas en estufa de aire forzado, se tuvo un valor del 18 %, incluso son menores que la humedad obtenida con un secado a 50 °C por 48 h de estas hojas de moringa, la cual fue de 14 %. Asimismo, estos autores, reportan que para este material de moringa, secado a 60° C durante 48 h, la humedad fue eliminada por completo.

Para efectos del presente estudio, se trabajará con las condiciones de secado obtenidas, siendo una primera aproximación, sin embargo, si se deseara secar a mayor escala estos materiales vegetales sería recomendable optimizar las condiciones de secado, ya que este proceso representa altos costos de inversión y energía. En la Tabla 7, también se presenta el porcentaje de material aprovechable por tipo de subproducto y tipo de suelo, encontrando que los pedúnculos tienen un valor de alrededor del 10 % de materia aprovechable, en tanto que las hojas y los tallos, un valor de alrededor del 20 %.

Tabla 7. Resultados del proceso de secado de subproductos de *C. chinense* J., var Jaguar

Muestra	Tiempo de secado en horno a 44° C (h)	% de humedad inicial (promedio)	% de humedad final (promedio)	Peso del material fresco (g)	Peso de la harina (g)	% de materia aprovechable
PSN ¹	48	82.19 ± 1.02	2.49 ± 0.42	83	9	10.84
PSR ²	48	81.30 ± 1.45	2.49 ± 0.13	98	12	12.24
HSN ³	240	69.80 ± 3.87	4.30 ± 0.50	246	46	18.70
HSR ⁴	240	76.01 ± 9.18	4.93 ± 0.40	165	29	17.58
TSN ⁵	48	62.18 ± 2.75	1.94 ± 0.42	193	40	20.73
TSR ⁶	48	56.17 ± 0.11	2.78 ± 0.01	243	57	23.46

¹PSN = Pedúnculo s suelo negro; ²PSR = Pedúnculo s suelo rojo; ³HSN = Hoja s suelo negro; ⁴HSR = Hoja s suelo rojo; ⁵TSN = Tallo s suelo negro; ⁶TSR = Tallo s suelo rojo. Nota: (muestras utilizadas en la curva de humedad).

En el presente estudio, de las 29 plantas de suelo negro y 27 plantas de suelo rojo, se obtuvieron 3 g de pedúnculos, 31 g de hojas y 139 g de tallos, promedio por planta. Estas plantas tenían 265 días post trasplante (DPT) y ya se habían realizado 12 cosechas; lo siguiente era su desecho, para poder establecer un siguiente cultivo (Tabla 8).

Tabla 8. Número de plantas procesadas y peso de subproductos de *C. chinense* J., var Jaguar

Tipo de suelo	No. de Plantas	Peso de Pedúnculos (g)	Peso de Hojas (g)	Peso de Tallos (g)
Negro	29	88 (864 pzas)	954	4238
Rojo	27	102 (1,059 pzas)	800	3581
Promedio por planta	--	3	31	139

Considerando el porcentaje de materia aprovechable de cada subproducto y considerando que se desechan 4.8 millones de plantas al año (SIAP, 2017; SAGARPA, 2015), se tendría un total de 195 t de material vegetal al año (30 t de hojas, 164 t de tallos y 1 t de pedúnculos), que podría ser aprovechado para su uso en las industrias farmacéutica y alimentaria.

3.2 Segunda fase. Análisis bromatológicos

Los resultados del análisis bromatológico realizado las harinas de pedúnculos, hojas, tallos y frutos de *C. chinense* J., var Jaguar, cultivado en suelos negro y rojo, se presentan en la Tabla 9 y la Figura 6. En la tabla 9, se observa que las hojas son las que presentan la mayor cantidad de proteínas, siendo de 18.42 y 17.51 g 100 g BS⁻¹, para suelos negro y rojo respectivamente, los frutos la mayor cantidad de grasas, siendo de 15.28 y 12.51 g 100 g BS⁻¹ (base seca), para suelos negro y rojo respectivamente, pero de entre los subproductos de chile habanero, las hojas de suelo negro son las que presentan mayor cantidad de grasa (9.75 g 100 g BS⁻¹) los tallos la mayor cantidad de fibra, siendo de 33.59 y 36.76 g/100 g BS, para suelos negro y rojo respectivamente, y los pedúnculos mayor cantidad de cenizas, siendo de 18.11 y 15.48 g/100 g BS, para suelos negro y rojo respectivamente.

Tabla 9. Resultados del Análisis proximal de pedúnculos, hojas, tallos y fruto de *C. Chinense* J., var Jaguar, cultivado en suelos negro y rojo del estado de Yucatán

Muestra	Resultados en g/100 g de BS					
	Humedad ¹⁰	Proteína	Grasa	Fibra	Cenizas	CHO ¹
PSN ²	2.49 ± 0.42 ^{cd}	12.88 ± 0.98 ^c	2.47 ± 0.02 ^e	21.64 ± 0.23 ^c	18.11 ± 0.00 ^a	42.41 ± 0.36 ^f
HSN ³	4.30 ± 0.50 ^b	18.42 ± 0.01 ^a	9.75 ± 0.29 ^c	8.43 ± 0.23 ^e	12.47 ± 0.02 ^c	46.63 ± 0.66 ^d
TSN ⁴	1.93 ± 0.42 ^d	8.49 ± 0.21 ^d	1.35 ± 0.12 ^g	33.59 ± 0.88 ^b	9.62 ± 0.03 ^e	45.02 ± 0.60 ^e
FSN ⁵	5.89 ± 0.06 ^a	12.19 ± 0.01 ^c	15.28 ± 0.06 ^a	12.62 ± 0.03 ^d	5.62 ± 0.06 ^g	48.40 ± 0.05 ^c
PSR ⁶	2.49 ± 0.13 ^{cd}	15.85 ± 0.25 ^b	2.07 ± 0.10 ^f	21.15 ± 0.24 ^c	15.48 ± 0.00 ^b	42.97 ± 0.05 ^f
HSR ⁷	4.45 ± 0.40 ^b	17.51 ± 0.12 ^a	7.01 ± 0.05 ^d	8.26 ± 0.24 ^e	10.55 ± 0.04 ^d	52.23 ± 0.53 ^a
TSR ⁸	2.78 ± 0.01 ^c	8.54 ± 0.25 ^d	1.34 ± 0.03 ^g	36.76 ± 0.12 ^a	8.42 ± 0.06 ^f	42.16 ± 0.29 ^f
FSR ⁹	5.91 ± 0.09 ^a	12.69 ± 0.74 ^c	12.51 ± 0.02 ^b	13.20 ± 0.06 ^d	5.49 ± 0.07 ^h	50.21 ± 0.50 ^b

¹CHO = Carbohidratos. ²PSN = Pedúnculos suelo negro; ³HSN = Hojas suelo negro; ⁴TSN = Tallos suelo negro. ⁵FSN = Frutos suelo negro. ⁶PSR = Pedúnculos suelo rojo; ⁷HSR = Hojas suelo rojo; ⁸TSR = Tallos suelo rojo; ⁹FSR = Frutos suelo rojo. ¹⁰Humedad = se determinó nuevamente el contenido de humedad de las muestras, posteriormente a cuando se realizó la curva de humedad. ^{a-h}Diferentes letras superscritas en la misma columna indican diferencia significativa ($P \leq 0.05$).

En la Figura 6, se presentan las gráficas de medias e interacciones del tipo de subproducto y tipo de suelo sobre los porcentajes de proteína, lípidos, carbohidratos, fibra y cenizas de las muestras analizadas. Como resultado del análisis de varianza se obtuvo que existe un efecto significativo de la interacción sobre cada uno de los porcentajes de los proximales, debido a los factores tipo de subproducto y tipo de suelo y tomando en consideración los efectos de los factores tipo de suelo y tipo de subproducto, así como la interacción de ambos factores conjuntamente, se tiene que la hoja de suelo negro tiene mayor cantidad de proteína (18.42 ± 0.01 g/100 g BS), el fruto de suelo negro, mayor cantidad de grasa (15.28 ± 0.06 g 100 g BS⁻¹), el tallo de suelo rojo mayor cantidad de fibra (36.76 ± 0.12 g/100 g BS), el fruto de suelo negro tiene mayor cantidad de carbohidratos (58.64 g/100 g BS) y el pedúnculo de suelo negro resultó el de mayor cantidad de cenizas (18.11 ± 0.00 g/100 g BS).

Los resultados obtenidos de carbohidratos y cenizas del fruto de chile habanero son similares a los obtenidos por Sharma *et al.* (2017), en frutos de *C. chinense* cultivados en Delhi, India, los cuales fueron de 7.33 ± 0.15 y 50 ± 0.01 %, respectivamente; sin embargo, los resultados obtenidos en este estudio, correspondientes a contenido de grasa y proteína, son mayores (3 % y 48 % más altos respectivamente), y los resultados de fibra son menores a los reportados por estos investigadores (43 % menos), quienes indican un contenido de grasa de 5.06 ± 0.05 , de proteína de 8.2 ± 0.15 y de fibra de 29.26 ± 0.03 %, esta diferencia, puede ser atribuida a múltiples factores, como son variedad de la planta, condiciones de suelo, clima, nutrición de la planta, entre otros.

Por otra parte, el contenido nutrimental de las hojas de *C. chinense*, de ambos tipos de suelo estudiados en la presente investigación, se encuentra dentro del rango del contenido nutrimental presentado por las hojas de *Moringa olifera* y *Azadirachta indica* (neem), cuyas hojas son comercializadas como suplementos alimenticios (hojas en polvo), las cuales presentan un contenido de 30.6 ± 0.8 y 1.58 ± 0.34 % de proteína, 5.6 ± 0.3 y 2.07 ± 0.35 % de grasa, no reportado y 78.12 ± 0.35 % de carbohidratos, 32.8 ± 0.2 y 5.92 ± 0.47 % de fibra y 15.1 ± 0.03 y 2.81 ± 0.21 % de cenizas, respectivamente) (Piping Rock Health Products, LLC., 2019; Leone *et al.*, 2018; Shanmugavel *et al.*, 2018; Dash *et al.*, 2017; Madaki *et al.*, 2016; Offor, 2015, Rabi-Abdulkadir *et al.*, 2015; Begum *et al.*, 2014; Venkatachalam *et al.*, 2012; Pérez-Gutierrez *et al.*, 2008). También, el contenido nutrimental de las hojas de *C.*

chinense es comparable al contenido nutrimental de *Psidium guajava*, que se comercializa como fitofármaco (QG-5®), con un contenido de 18.64 ± 0.05 g/100 g de proteínas, 1.37 ± 0.36 de grasa, 54.53 ± 0.25 de carbohidratos, 10.37 ± 0.05 de fibra y 4.35 ± 0.21 g/100 g de cenizas (PLM, 2016; Kamath *et al.*, 2008; Begum *et al.*, 2004; Lozoya, 2002). Lo anterior, es un indicativo de que el *C. chinense* J., variedad Jaguar, podría ser usado como suplemento en la industria alimentaria.

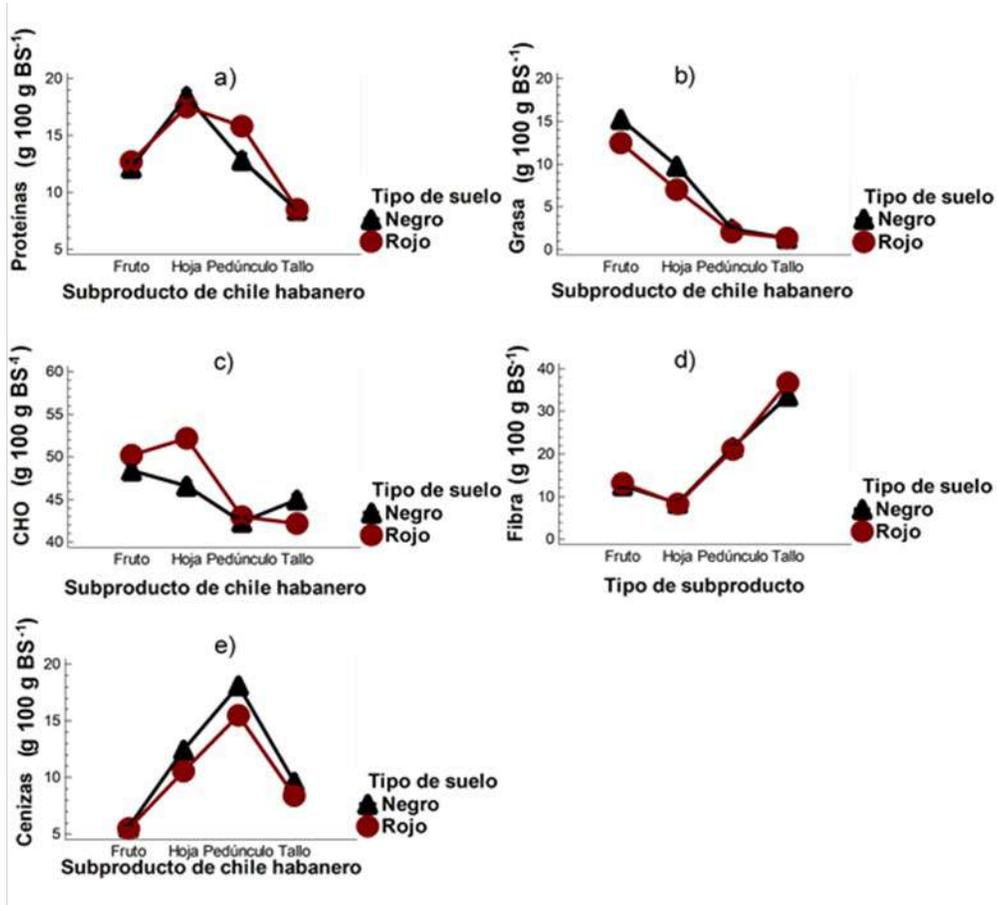


Figura 6. Estadísticos de interacciones de tipo de suelo-tipo de subpr oducto de los análisis bromatológicos de subproductos de chile habanero (a) Proteína, b) Grasa, c) Carbohidratos, d) Fibra y e) Cenizas.

Asimismo, el contenido nutrimental de las muestras de *C. chinense* J., var Jaguar, analizadas, son comparables con el contenido nutrimental de algunos de los alimentos generalmente incluidos en la dieta mixta latinoamericana, como son carne de pollo, leche entera, arroz, pan blanco y pera. Los pedúnculos, hojas, tallos y fruto de chile habanero cultivados en suelos negro y rojo, presentan un contenido de proteínas equivalentes al 40 %, 60 %, 30% y 40 %, de lo que aporta la carne de pollo ($29.5 \text{ g } 100 \text{ g}^{-1}$), respectivamente, y es superior a lo que aporta la leche entera ($3.2 \text{ g } 100 \text{ g}^{-1}$), arroz ($0.3 \text{ g } 100 \text{ g}^{-1}$), pan blanco ($7.6 \text{ g } 100 \text{ g}^{-1}$) y pera ($0.4 \text{ g } 100 \text{ g}^{-1}$); aportan grasas como la carne de pollo ($7.7 \text{ g } 100 \text{ g}^{-1}$), excepto en el caso del fruto el cual aporta el doble del contenido de grasas que la carne de pollo; carbohidratos como el pan ($50.6 \text{ g } 100 \text{ g}^{-1}$); aportan mayor contenido de fibra que dichos alimentos, los cuales están entre 0 y $3.1 \text{ g } 100 \text{ g}^{-1}$ de fibra, valores que corresponden a la carne de pollo y pera, respectivamente (Fatsecret, 2019; Olivares *et al.*, 2003). Esto refuerza que las matrices estudiadas deberían continuarse analizando para proponer potenciales usos dentro de la industria de alimentos. Por otro lado, los resultados de los

subproductos de chile habanero de suelos negro y rojo, pedúnculo, hojas y tallo, presentan menores cantidades de grasas y carbohidratos, que el propio fruto, y en el caso de la hoja y pedúnculo presentan mayor cantidad de proteínas, cumpliendo con lo recomendado por los nutricionistas, de reducir el consumo de grasas, controlar la ingesta de carbohidratos y considerar el consumo de proteínas en la dieta diaria. Según Olivares *et al.* (2003), las necesidades de nutrientes para un hombre y una mujer de 60 Kg de peso con actividad física ligera, son de 60 g día⁻¹ de proteínas, 281-230 g día⁻¹ de carbohidratos, 94 y 34 g día⁻¹ de grasas y 25 g día⁻¹ de fibra, de acuerdo a esto, los pedúnculos, hojas y frutos cumplen con la aportación recomendada de estos macronutrientes, lo que los convierte en fuentes potenciales de estos nutrientes, incluso en el caso del tallo, que está también dentro de esos rangos, excepto en el caso de la fibra que lo supera en un 30 %, pero que podría ser dosificado para poder considerarlo como fuente potencial de macronutrientes para el ser humano. Los subproductos y el fruto de *C. chinense* J., var Jaguar, tiene potencial para ser incluidos en alimentos.

3.3 Tercera Fase. Obtención de extractos

En la Tabla 10, se presentan los resultados de rendimiento de la extracción realizada mediante maceración con metanol, encontrando que el mayor rendimiento se obtuvo en el extracto de las hojas de suelo negro con un valor de 28.80 %, mientras que el extracto de los tallos de suelo rojo fue el que presentó el menor rendimiento con un valor de 9.90%. El rendimiento obtenido de los tallos es similar al obtenido en el secado de los frutos de *C. chinense*, del cual se ha reportado un rendimiento del 11.88 % (González-Estrada *et al.*, 2010), sin embargo, el rendimiento de los pedúnculos y de las hojas es superior a éste, lo cual implica que tienen un mayor porcentaje de materia aprovechable por peso de material vegetal fresco.

Tabla 10. Rendimiento de los extractos de subproductos de *C. chinense* J. var Jaguar, cultivado en suelos negro y rojo, obtenidos por maceración con metanol.

Tipo de suelo	Material biológico ¹	Peso de extracto (g)	Rendimiento (%)
Suelo negro	Pedúnculos	0.84	16.73
	Hojas	1.45	28.90
	Tallos	0.53	10.51
Suelo rojo	Pedúnculos	0.89	17.76
	Hojas	1.20	24.03
	Tallos	0.49	9.90

¹Subproductos de chile habanero con 265 de días post trasplante (DPT)

Resulta interesante continuar con el análisis de estas matrices biológicas, para conocer su contenido químico y su potencial uso en la industria alimentaria y/o farmacéutica.

3.4 Cuarta Fase. Estudio fitoquímico

Los resultados del tamizaje fitoquímico de los subproductos de chile habanero, pedúnculos, hojas, tallos y del fruto, de suelo negro y rojo, se presentan en la Tabla 11; se observó moderada presencia de cumarinas en todas las muestras, abundante presencia de flavonoides en los tallos de ambos tipos de suelo, moderada presencia en pedúnculos de

ambos tipos de suelo, escasa presencia en hojas de ambos tipos de suelo y no se detectó la presencia de flavonoides en el fruto de ambos tipos de suelo. Tanto las hojas como los frutos de suelos negro y rojo, presentaron abundante presencia de triterpenoides, en tanto que se observó moderada presencia de triterpenoides en tallos y escasa presencia en pedúnculos de ambos tipos de suelo. No se detectó presencia de taninos, antraquinonas y alcaloides en todas las muestras analizadas.

Tabla 11. Resultados de los análisis químicos de los subproductos de *C. chinense* estudiados.

Muestra	T	C	F	A	Tr	S	Al
Pedúnculos suelo negro	-	++	++	-	+	-	-
Hojas suelo negro	-	++	+	-	+++	+	-
Tallos suelo negro	-	++	+++	-	++	-	-
Frutos suelo negro	-	++	-	-	+++	+	-
Pedúnculos suelo rojo	-	++	++	-	+	-	-
Hojas suelo rojo	-	++	+	-	+++	+	-
Tallos suelo rojo	-	++	+++	-	++	-	-
Frutos suelo rojo	-	++	-	-	+++	+	-

T=Taninos; C=Cumarinas; F= Flavonoides; A= Antraquinonas; Tr=Triterpenoides; S=Saponinas; Al=Alcaloides. Parámetro cualitativo: - No detectado, + Escasa, ++ Moderada, +++ Abundante.

Los resultados obtenidos en los extractos metanólicos de subproductos de chile habanero estudiados, a diferencia de los reportados por Gayathri *et al.* (2016), quienes informan la presencia de polifenoles, alcaloides, taninos, flavonoides y terpenoides del extracto acetona:acetonitrilo de hojas de chile habanero cultivado en la India, no presentan taninos y alcaloides, que para el caso de un probable uso alimentario y/o farmacéutico, podría ser positivo debido a que los taninos son los responsables de un sabor astringente (Kumar-Ashok y Upadhyaya, 2012) y los alcaloides a altas concentraciones, pueden ser tóxicos para el ser humano por efectos no deseados que incluyen náuseas, bradicardia, hormigueo, nerviosismo y sistema inmunitario debilitado (Ghulam *et al.*, 2018); así como podría ser positivo, la ausencia de saponinas que otorgan un sabor amargo (Ahumada *et al.*, 2016) como en el caso de las hojas de *Moringa olifera* (Leone *et al.*, 2018).

3.5 Análisis cuantitativo. Contenido de fenoles totales (CFT)

Los resultados de los fenoles totales contenidos en los extractos metanólicos de los subproductos de chile habanero de los dos tipos de suelo estudiados y del fruto (Tabla 12), indican que los pedúnculos de suelo negro y suelo rojo, son los que presentan mayor cantidad de fenoles totales, siendo de 48.09 ± 0.65 y de 33.10 ± 0.27 mg EAG/100 g ES.

Tabla 12. Contenido de fenoles totales en subproductos y fruto de *C. chinense* J. var Jaguar, cultivados en suelos negro y rojo de Yucatán.

Muestra	Suelo negro	Suelo rojo
Pedúnculos	48.09 ± 0.65 ^a	33.10 ± 0.27 ^a
Hojas	9.02 ± 0.03 ^b	6.63 ± 0.12 ^b
Tallos	15.90 ± 0.08 ^c	8.37 ± 0.05 ^c
Frutos	10.92 ± 0.22 ^d	9.42 ± 0.10 ^d

^{a-d}Diferentes letras superscritas en la misma columna indican diferencia significativa ($P \leq 0.05$).

También el análisis Anova de una vía, indicó que existen diferencias significativas entre pedúnculos de tierra roja y tierra negra, entre hojas de tierra roja y tierra negra y entre los tallos de tierra roja y tierra negra. Por lo que el tipo de suelo si tiene efecto en cada tipo de subproducto.

En la Figura 7, se presentan las gráficas de medias e interacciones del CFT de las muestras analizadas, encontrando que, resultado del análisis de varianza se obtuvo que existe un efecto significativo de la interacción sobre el contenido de fenoles totales, debido a los factores tipo de subproducto y tipo de suelo y tomando en consideración los efectos de los factores tipo de suelo y tipo de subproducto, así como la interacción ($P \leq 0.05$), se tiene que el pedúnculo de suelo negro es el que presenta la mayor cantidad de fenoles totales. De los resultados de CFT, se observa que tanto los pedúnculos como los tallos tienen más contenido de fenoles totales que el fruto, en el caso de los pedúnculos tienen 4 veces más CFT y en el caso del tallo 1.5 veces más de CFT que del fruto (10.92 ± 0.08 y 9.42 ± 0.05 mg de EAG/100 g ES, para suelos negro y rojo, respectivamente) y debido a que generalmente existe una correlación positiva entre el contenido de fenoles totales y la capacidad antioxidante (Chel-Guerrero *et al.*, 2018), se podría esperar que estos subproductos exhiban mayor actividad que el fruto; sin embargo, Gómez-Rincón *et al.* (2019b), reportan que el extracto metanólico (al 80 %) del fruto de *C. chinense* J., var Jaguar con 160 DPT, secado en horno a las mismas condiciones de secado que el analizado en este estudio (extracto obtenido por EEAU), exhibió un CFT de 90.67 mg EAG/100 g ES, por lo que resultó de interés analizar las matrices de estudio a estas condiciones y comparar los resultados, lo cual se realizó en la determinación de capacidad antioxidante.



Figura 7. Gráfica de interacción para CFT con tipo de suelo y subproducto de chile habanero.

3.6 Quinta fase. Evaluación farmacológica

En la Tabla 13, se presentan los resultados de la capacidad antioxidante determinada por el método DPPH, de los extractos de los subproductos y del fruto del chile habanero de suelos negro y rojo, obtenidos por maceración con metanol (EMM) y obtenidos por extracción asistida por ultrasonido (EEAU con MeOH al 80 %), en donde se observa que para los EMM de suelo negro, el tallo presentó el mayor porcentaje de inhibición (41.15 ± 0.22 %), para los EMM de suelo rojo, el pedúnculo presentó el mayor porcentaje de inhibición (49.55 ± 0.16 %) y para los EEAU, el tallo de suelo negro presentó el porcentaje más alto de inhibición (90.58 ± 0.08) y en las muestras de suelo rojo, el pedúnculo y el tallo fueron los que presentaron el porcentaje más alto de inhibición (91.10 ± 0.24 y 91.01 ± 0.08 %, respectivamente), entre los cuáles no hay diferencia significativa ($P > 0.05$). En todos los casos los subproductos presentaron mayor porcentaje de inhibición que el fruto.

Tabla 13. Porcentaje de Inhibición de los subproductos y frutos de *C. chinense* J. var Jaguar, por tipo de suelo y tipo de extracción.

Material biológico	Porcentaje de inhibición (DPPH) ¹			
	EMM (MeOH) ²		EEAU (MeOH 80 %) ³	
	Suelo negro	Suelo rojo	Suelo negro	Suelo rojo
Pedúnculos	36.12 ± 0.41^b	49.55 ± 0.16^a	89.36 ± 0.08^b	91.10 ± 0.24^a
Hojas	22.83 ± 0.28^c	28.19 ± 0.30^c	89.50 ± 0.08^b	89.69 ± 0.14^b
Tallos	41.15 ± 0.22^a	48.6 ± 0.25^b	90.58 ± 0.08^a	91.01 ± 0.08^a
Frutos	17.04 ± 0.08^d	20.55 ± 0.14^d	56.12 ± 0.22^c	77.40 ± 0.14^c

¹Los experimentos se realizaron por triplicado. ²Extractos obtenidos por maceración con metanol.

³Extractos obtenidos por extracción asistida por ultrasonido (MeOH 80%). ^{a-d}Diferentes letras superscritas en la misma columna indican diferencia significativa ($P \leq 0.05$).

Asimismo, en la Figura 8, se presentan las gráficas de medias e interacciones de la capacidad antioxidante de las muestras analizadas. Como resultado del análisis de varianza se obtuvo que existe un efecto significativo de la interacción sobre la capacidad antioxidante, debido a los factores tipo de subproducto, tipo de suelo y tipo de extracción (EMM o EEAU) y tomando en consideración los efectos de los factores tipo de suelo y tipo de subproducto, así como la interacción, se tiene que los subproductos de chile habanero de suelo rojo son los que presentaron mayor porcentaje de inhibición y en particular, fueron los pedúnculos y los tallos de suelo rojo los que presentaron el mayor porcentaje de inhibición (91.10 % \pm 0.24 y 91.01 % \pm 0.08 , respectivamente).

Como se observó en los resultados los EEAU (MeOH 80%), son los que presentan mayor capacidad antioxidante, de cuando menos 80 % más altos que los valores presentados por los EMM, por lo que se sugiere este método de extracción para estas matrices de chile habanero. Por otra parte, los resultados presentados por los extractos EAU de los subproductos de suelo rojo son mayores que los porcentajes de inhibición de los extractos metanólicos de *Moringa olifera*, *Psidium guajava* y *Azadirachta indica* (58.62 ± 1.13 , 87 y 41.8 ± 4.0 %, respectivamente), especies que actualmente se comercializan como suplementos alimenticios y fitofármaco como en el caso de las hojas de *Psidium guajava* (QG-5®) (Piping Rock Health Products, LLC, 2019; Leone *et al.*, 2018; Shanmugavel *et al.*, 2018; Dash *et al.*, 2017; Madaki *et al.*, 2016; PLM, 2016; Offor, 2015; Rabi-Abdulkadir *et al.*,

2015; Begum *et al.*, 2014; Venkatachalam *et al.*, 2012; Kamath *et al.*, 2008; Pérez-Gutierrez *et al.*, 2008; Begum *et al.*, 2004; Lozoya, 2002)

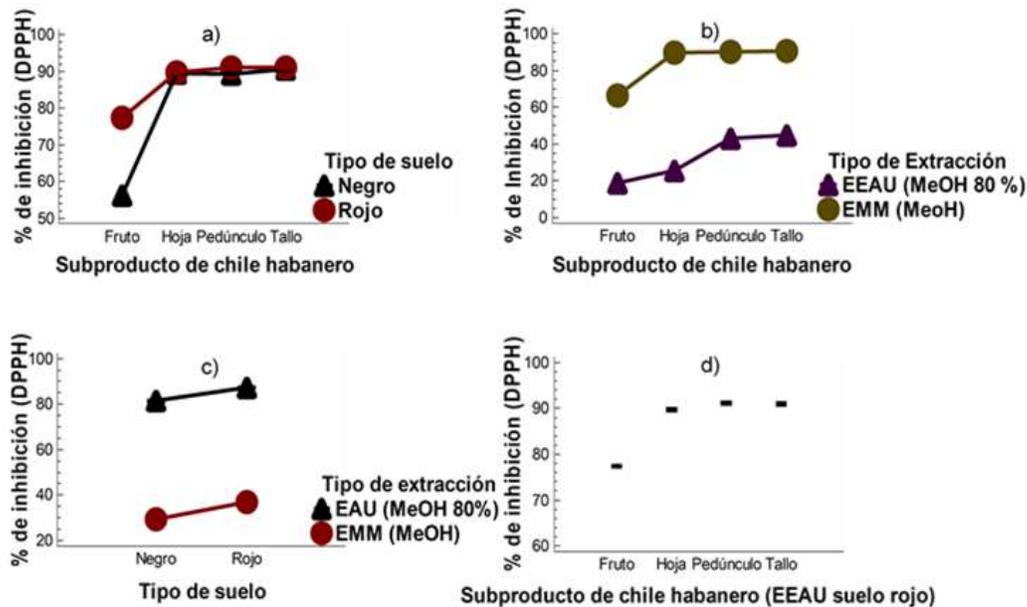


Figura 8. Estadísticos de subproductos de chile habanero, tipo de suelo y tipo de extracción (a) Interacción tipo de suelo-tipo de subproducto, b) Interacción tipo de extracción-tipo de subproducto, c) Interacción tipo de suelo-tipo de extracción y d) Anova simple de subproductos de chile habanero de suelo rojo por EEAU.

Por lo anterior, sería interesante determinar la capacidad antioxidante mediante otros métodos para confirmar su potencial antioxidante y en caso de confirmarse, también realizar ensayos específicos para determinar su bioactividad.

3.7 Identificación del potencial de los subproductos de *C. chinense* J., var. Jaguar

Los hallazgos sugieren que cada uno de los subproductos de chile habanero estudiados, tienen potencial nutricional y farmacológico, esto, debido al contenido de compuestos bioactivos, al contenido proximal y a la capacidad antioxidante que exhibieron, los cuales están presentes de manera diferenciada en cada uno de los materiales biológicos. A continuación, se presenta un análisis por material biológico estudiado:

Los resultados presentados en la tabla 14 indican que los subproductos de chile habanero cultivados en suelo negro tienen potencial alimentario, particularmente, los pedúnculos aportando minerales, las hojas aportando proteínas y grasas y los tallos aportando proteínas y fibra; en tanto que, los subproductos de chile habanero de suelo rojo tienen potencial farmacéutico, ya que presentan alto porcentaje de inhibición, específicamente los pedúnculos y los tallos. Es la primera vez que se reporta el contenido proximal, contenido de fenoles totales y capacidad antioxidante de pedúnculos, hojas y tallos de *Capsicum chinense* Jacq., var. Jaguar.

Tabla 14. Resumen de resultados de los subproductos de *C. chinense* J., variedad Jaguar, analizados que exhibieron mayor cantidad en las evaluaciones realizadas.

TS ¹	Material biológico	Compuestos bioactivos				Composición proximal (g/100 g ES) ⁴	CFT (mg EAG/100 g ES) ⁵	Capacidad Antioxidante (% de inhibición) ⁶
		C	F	T	S			
SN ²	Pedúnculos	++	++	+		Cenizas 18.11 ± 0.00	48.09 ± 0.65	
	Hojas	++	+	+++	+	Proteínas 18.42 ± 0.01 Grasa 9.75 ± 0.29		
	Tallos	++	+++	++		Carbohidratos 52.15		
SR ³	Pedúnculos	++	++	+			91.10 ± 0.24	
	Hojas	++	+	+++	+	Carbohidratos 52.23		
	Tallos	++	+++	++		Fibra 36.76 ± 0.12		

¹TS= Tipo de suelo; SN= Suelo negro; SR= Suelo rojo Composición proximal de los subproductos que presentaron la mayor cantidad por tipo de nutriente. CFT= Contenido de fenoles totales de la muestra que exhibió la mayor cantidad de fenoles. Capacidad antioxidante del material biológico que mostró el mayor porcentaje de inhibición.

IV. Conclusiones

Los pedúnculos, hojas y tallos de *Capsicum chinense* J., var. Jaguar, cultivado en suelos negros y rojos, del estado de Yucatán, son fuente de compuestos bioactivos como son, cumarinas, flavonoides y triterpenoides y tienen potencial alimenticio y farmacéutico, pudiendo ser empleado como suplemento alimenticio para combatir la malnutrición y las enfermedades relacionadas con el estrés oxidativo; siendo materia prima disponible y de bajo costo y cuyo aprovechamiento traería beneficios ambientales, económicos y sociales en las zonas de producción. Los tipos de compuestos detectados en estas matrices vegetales, son interesantes, en virtud de que se han reportado con actividad biológica, como antioxidante, anticancerígena, antidiabética, antivirales, antiinflamatorios, entre otras (Baky *et al.*, 2016; Díaz y Rossini, 2012; Sualiman *et al.*, 2011), por lo que sería de relevancia llevar a cabo bioensayos específicos para determinar el potencial farmacológico de estos subproductos de chile habanero.

V. Referencias

- Aarland, R.C., Bañuelos-Hernández, A.E., Fragoso-Serrano, M., Sierra-Palacios, E. D., Díaz de León-Sánchez, F., Pérez-Flores, L. J., Rivera-Cabrera, F., y Mendoza-Espinoza, J.A. (2016). Studies on phytochemical, antioxidant, antiinflammatory, hypoglycaemic and antiproliferative activities of *Echinacea purpurea* and *Echinacea angustifolia* extracts. *Pharmaceutical Biology*, 649-656.

- Akhtar, N., Ihsan-ul-Haq, Mirza, B. (2018). Phytochemical analysis and comprehensive evaluation of antimicrobial and antioxidant properties of 61 medicinal plant species. *Arabian Journal of Chemistry*, 11, 1223-1235.
- Ahumada, A., Ortega, A., Chito, D., Benítez, R. (2016). Saponinas de quinua (*Chenopodium quinoa* Willd.): un subproducto con alto potencial biológico. *Revista Colombiana de Ciencias Químico-Farmacéutica*, 45(3), 438-469.
- Alonso-Castro, A.J., Domínguez, F., Maldonado-Miranda, J.J., Castillo-Pérez, L.J., Carranza-Álvarez, C., Solano, E., Isiordia-Espinoza, M.A., Juárez-Vázquez, M.C., Zapata-Morales, J.R., Argueta-Fuertes, M.A. Ruiz-Padilla, A.J., Solorio-Alvarado, C.R., Rangel-Velázquez, J.E., Ortiz-Andrade, R., González-Sánchez, I., Cruz-Jiménez, G., Orozco-Castellano, M. (2017). Use of medicinal plants by health professionals in México. *Journal of Ethnopharmacology*, 198, 81-86.
- Altemimi et al., 2017: Altemimi, A., Lakhssassi, N., Baharlouei, A., Watson, D.G., y Lightfoo, D.A. (2017). Phytochemicals: extraction, isolation, and identification of bioactive compounds. *Plants*, 6(42), 1-23. <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC5750618/pdf/plants-06-00042.pdf>
- Alves, A.S., Teixeira, E.M.B., Oliveira, G.C., Arantes-Pereira, L., Oliveira, L., y Costa, L.L. (2017). Physicochemical characterization and antioxidant activity of decolorized *Moringa oleifera* Lam leaf flour. *Nutrire*, 42(31),1-5. <https://doi.org/10.1186/s41110-017-0058-6>
- Anwar, F., Kalsoom, U., Sultana, B., Mushtaq, M., Mehmood, T., y Arshad, H.A. (2013). Effect of drying method and extraction solvent on the total phenolics and antioxidant activity of cauliflower (*Brassica oleracea* L.) extracts. *International Food Research Journal*, 20(2), 653-659.
- AOAC. 2000. Official Methods of Analysis. The Association of Official Analytical Chemists, Gaithersburg, MD; USA. 771 pp.
- Baky, M.H., Kamal, A.M., Elgindi, M.R., y Haggag, E.G. (2016). A Review on Phenolic Compounds from Family *Sapotaceae*. *Journal of Pharmacognosy and Phytochemistry*, 5(2), 280-287.
- Barbero, G.F., Liazid, A., Palma, M., y Barroso, C.G. (2008). Ultrasound-assisted extraction of capsaicinoids from peppers. *Talanta*, 75, 1332-1337.
- Begum, S., Syed-Imran, H., Syed-Nawazish, A., y Bina, S.S. (2004). Chemical constituents from the leaves of *Psidium guajava*. *Natural Product Research: Formerly Natural Product Letters*, 18(2), 135-140. DOI:10.1080/14786410310001608019.
- Bharat-Helkar, P., Sahoo, A.K., y Patil, N.J. (2016). Review: Food Industry By-Products used as a Functional Food Ingredients. *International Journal of Waste Resources*, 6(3), 1-6. DOI:10.4172/2252-5211.1000248
- Borges-Gómez, L., Cervantes-Cárdenas, L., Ruiz-Novelo, J., Soria-Fregoso, M., Reyes-Oregel, V., y Villanueva-Couoh, E. (2010). Capsaicinoides en Chile Habanero (*Capsicum Chinense* Jacq.) bajo Diferentes Condiciones de Humedad y Nutrición. *Terra Latinoamericana*, 28(1), 35-41.
- Borges-Gómez, L., Moo-Kauil, C., Ruíz-Novelo, J., Osalde-Balam, M., González-Valencia, C., Yam-Chimal, C., y Can-Puc, F. (2014). Suelos destinados a la producción de chile habanero en Yucatán: características físicas y químicas predominantes. *Agrociencia*, 48, 347-359. <http://www.scielo.org.mx/pdf/agro/v48n4/v48n4a1.pdf>
- Chel-Guerrero *et al.*, 2018. Chel-Guerrero, L.D., Sauri-Duch, E., Fragoso-Serrano, M.C., Pérez-Flores, L.J., Gómez-Olivares, J.L. Salinas-Arreortua, N., Sierra-Palacios, E.C., y Mendoza-Espinoza, J.A. Phytochemical profile, toxicity, and pharmacological potential of peels from four species of tropical fruits. *Journal of Medicinal Food*, 21(7), 734-743. DOI: 10.1089/jmf.2017.0124.
- CODEX-STAN-152-1985. Norma del CODEX para la harina de trigo. (REV. 1 - 1995).
- CTNNPAP. 2007. NMX-FF-025-SCFI-2007. Productos alimenticios no industrializados para consumo humano-chile fresco (*Capsicum spp.*) - especificaciones. Comité Técnico de Normalización Nacional de Productos Agrícolas y Pecuarios. México, D.F. 25 pp.

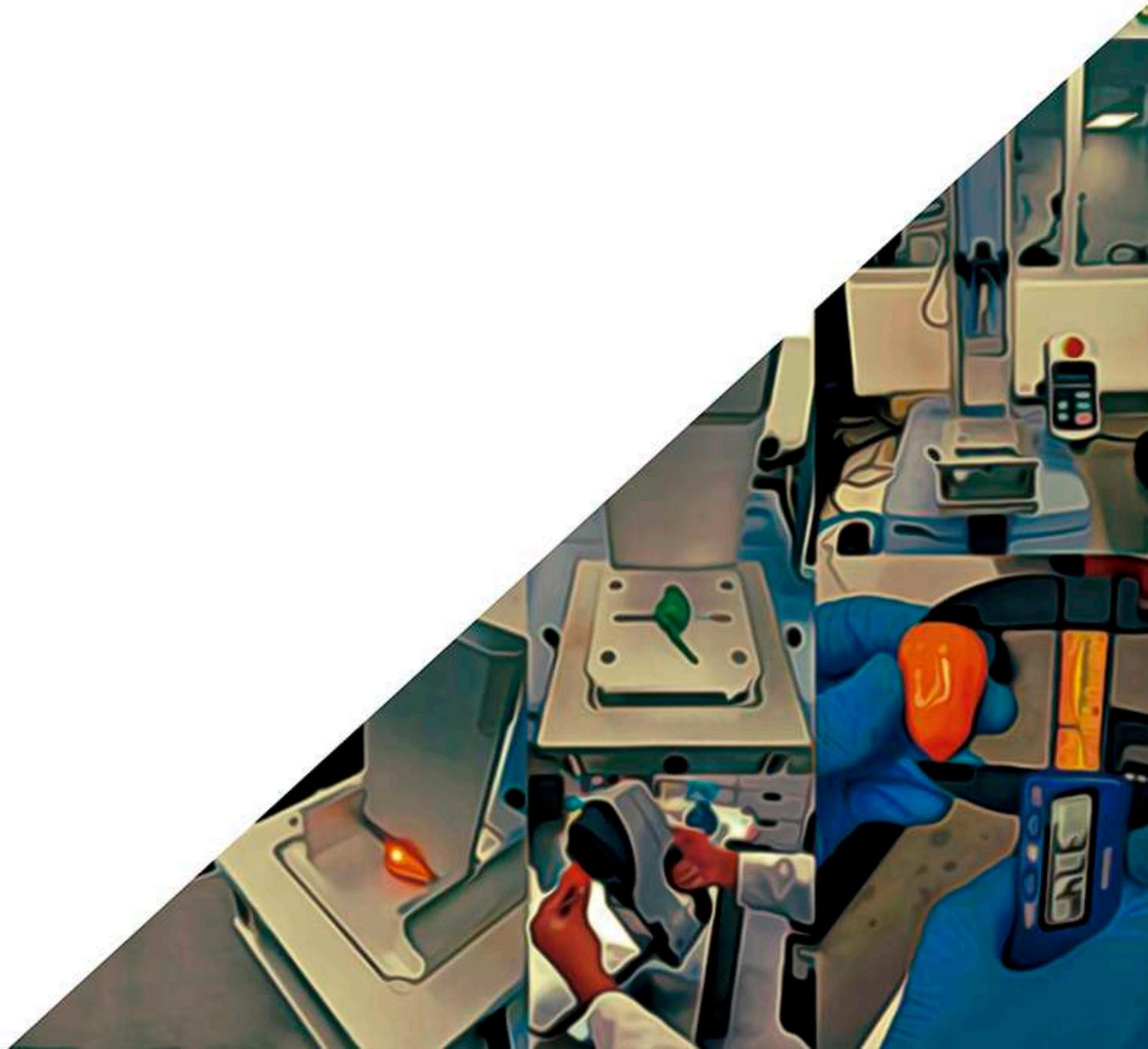
- Dash, S.P., Dixit, S., y Sahoo, S. (2017). Phytochemical and biochemical characterizations from leaf extracts from *Azadirachta indica*: An important medicinal plant. *Biochemistry and Analytical Biochemistry*, 6(2), DOI:10.4172/2161-1009.1000323.
- Díaz, M., y Rossini, C. 2012. Bioactive natural products from Sapindaceae deterrent and toxic metabolites against insects. In: *Insecticides - Pest Engineering*, (Perveen F, ed.), InTech, Zagreb; Croatia, pp 288-308. ISBN: 9789533078953. DOI:10.5772/29830.
- FAO. 2017. El futuro de la alimentación y la agricultura. Tendencias y desafíos. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. Roma; Italia. 52 pp. <http://www.fao.org/3/a-i6881s.pdf>
- Fat Secret. (2019). Calorías en pollo. mayo 30, 2019, de FatSecretMéxico Sitio web: <https://www.fatsecret.com.mx/calor%C3%ADas-nutrici%C3%B3n/alimentos/pollo>
- García de Alba-García, J.E. Ramírez-Hernández, B.C., Robles-Arellano, G., Zañudo- Hernández, J., Salcedo-Rocha, A.L., y García de Alba-Verduzco, J.E. (2012). Conocimiento y uso de las plantas medicinales en la zona metropolitana de Guadalajara. *Desacatos*, 39, 29-44.
- García-Salas, P., Morales-Soto, A., Segura-Carretero, A., y Fernández-Gutierrez, A. (2010). Phenolic compound extraction systems for fruit and vegetable samples. *Molecules*, 15, 8813-8826.
- Gayathri, N., Gopalakrishnan, M., Sekar, T. (2016). Phytochemical screening and antimicrobial activity of *Capsicum chinense* Jacq. *International Journal of Advances in Pharmaceutical Sciences*, 5(1), 12-20.
- González-Estrada, T., Casanova-Chávez, C., Gutiérrez-Pacheco, L., Torres-Tapia, L., Contreras-Martín, F., y Peraza-Sánchez, S. (2010). *Chiles cultivados en Yucatán*. En *Biodiversidad y Desarrollo Humano en Yucatán* (496). Mérida, Yucatán: CONABIO, SEDUMA.
- Gómez-Rincón, E., Reyes-Vazquez, N., Ramírez-Sucre, M. y Rodríguez-Buenfil, I. (2018). Actividad antioxidante y su correlación con parámetros colorimétricos de *Capsicum chinense* Jacq secado por dos métodos. *Revista del Centro de Graduados e Investigación del Instituto Tecnológico de Mérida*, 33(73), 38-42.
- Ghulam, H., Azhar, R., Haseeb, A., Nimra, A., Aroona, R., Wei, W., Muhammad, A., Jiang, L., y Xiaomeng, L. (2018). Role of plant derived alkaloids and their mechanism in neurodegenerative disorders. *International Journal of Biological Sciences*, 14, 341-357. DOI:10.7150/ijbs.23247.
- Herrera-Pool, E., Patrón-Vázquez, J., Ramos-Díaz, A., Ayora-Talavera, T., Pacheco, N. (2019). Extraction and identification of phenolic compounds in roots and leaves of *Capsicum chinense* by UPLC–PDA/MS. *Journal of Bioengineering and Biomedicine Research*, 3(2), 17-27.
- Jaafar, R.A., Rahman, A.R.B.A., Mahmood, N.Z.CH., y Vasudevan, R. (2009). Proximate Analysis of Dragon Fruit (*Hylecereus polyhizus*). *American Journal of Applied Sciences*, 6(7), 1341-1346, ISSN 1546-9239.
- Kamath, V., Nair, R., Ashok-Kumar, C. K., y Mohana-Lakshmi, S. (2008). *Psidium guajava* L: A review. *International Journal of Green Pharmacy*, 2(1), 9-12. <https://greenpharmacy.info/index.php/ijgp/article/view/386>
- Kattappagari, K.K., Ravi-Teja, C.S., Kommalapati, R.K., Poosarla, C., Gontu, S.R., y Reddy, B.V. (2015). Role of antioxidants in facilitating the body functions: A review. *Journal of Orofacial Orthopedics*, 7, 71-75. <http://www.jofs.in/text.asp?2015/7/2/71/169745>
- Kumar-Ashok, P., y Upadhyaya, K. (2012). Tannins are Astringent. *Journal of Pharmacognosy and Phytochemistry*, 1(3), 45-50. <https://pdfs.semanticscholar.org/a0f8/81d7a1ddf265dd83d981fb62c7b8c3280e16.pdf>
- Leone, A., Bertoli, S., Di-Lello, S., Bassoli, A., Ravasenghi, S., Borgonovo, G., Forlani, F., y Battezzati, A. (2018). Effect of *Moringa oleifera* leaf powder on postprandial blood glucose response: *in vivo* study on saharawi people living in refugee camps. *Nutrients*, 10, 1494.
- Londoño, L.J. 2011. Antioxidantes: Importancia biológica y métodos para medir su actividad. En: *Desarrollo y Transversalidad*, Garcés-Giraldo L.F., (ed.). Artes y Letras S.A.S., Antioquía; Colombia. pp. 129-162. ISBN:9789588406145.

- Lozoya, X., Reyes-Morales, H., Chavez-Soto, M.A., Martínez-García, M.C., Soto-González, Y., y Doubova, S.V. (2002). Intestinal anti-spasmodic effect of a phytodrug of *Psidium guajava* folia in the treatment of acute diarrheic disease. *Journal of Ethnopharmacology*, 83, 19-24.
- Madaki, F.M., Kabiru, A.Y., Bakare-Odunola, M.T., Mailafiya, S.C., Hamzah, R.U., y Edward, J. (2016). Phytochemical and Proximate Analyses of Methanol Leaf Extract of Neem *Azadirachta indica*. *European Journal of Medical Physics*, 15(2), 1-6.
- Moharram, H.A., y Youssef, M.M. (2014). Methods for determining the antioxidant activity: A Review. *Journal of Analytical Science and Technology*, 11(1), 31-42.
- Morozova, K., Rodríguez-Buenfil, I., López-Domínguez, C., Ramírez-Sucre, M., Ballabio, D., and Scampicchio, M. (2019). Capsaicinoids in Chili Habanero by Flow Injection with Coulometric Array Detection. *Electroanalysis*. 31, 1-8.
- Müller, J., and Heindl, A. (2006). *Drying of medicinal plants*. En *Medicinal and Aromatic Plants*(237-252). Netherlands: Springer.
- Nimse y Pal, 2015: Nimse, S.B., y Pal, D. Free radicals, natural antioxidants, and their reaction mechanisms. *RSC Advances*, 5, 27986-28006. DOI:10.1039/c4ra13315c.
- Norma Mexicana NMX-F-089-S-1978. Determinación de extracto etéreo (método soxhlet) en alimentos. Ciudad de México, 03 de noviembre de 1978.
- Norma Mexicana NMX-F-428-1982. ALIMENTOS. Determinación de humedad (método rápido de la termobalanza). Ciudad de México, 07 de octubre de 1982.
- Norma Oficial Mexicana NOM-247-SSA1-2008, Productos y servicios. Cereales y sus productos. Cereales, harinas de cereales, sémolas o semolinas. Alimentos a base de: cereales, semillas comestibles, de harinas, sémolas o semolinas o sus mezclas. Productos de panificación. Disposiciones y especificaciones sanitarias y nutrimentales. Métodos de prueba. Diario Oficial de la Federación, México, 2 de junio de 2008.
- Ntila, S., Ndhkala, A.R., Kolanisi, U., Abdelgadir, H., y Siwela, M. (2019). Acceptability of a moringa-added complementary soft porridge to caregivers in Hammanskraal, Gauteng province and Lebowakgomo, Limpopo province, South Africa. *South African Journal of Clinical Nutrition*, 32(3), 51-57.
<https://www.tandfonline.com/doi/pdf/10.1080/16070658.2018.1449377?needAccess=true>
- Offor, C.E. (2015): Phytochemical and Proximate Analyses of *Psidium Guajava* Leaves *Journal of Research in Pharmaceutical Science*, 2(6), 5-7. ISSN(Online): 2347-2995.
- Olguín-Rojas, J.A., Vázquez-León, L.A., Salgado-Cervantes, M.A., Fernández-Barbero, G., Díaz-Pacheco A., García-Alvarado, M.A., y Rodríguez-Jimenes, G.C. (2019). Water and phytochemicals dynamic during drying of red habanero chili pepper (*Capsicum chinense*) slices. *Revista Mexicana de Ingeniería Química*, 18 (3), 851 - 864.
- Oney-Montalvo, J., López-Domínguez, C., Zamacona-Ruiz, M., Gómez-Rincón, E., Ramírez-Sucre, M y Rodríguez-Buenfil, I. (2018). Metabolitos presentes en *Capsicum chinense* en dos estados de maduración cultivados en diferentes tipos de suelos de Yucatán, México. En *Revista Bionatura* 2018 Vol 1. No 1. 2018. ISSN: 1390-9355 <http://revistabionatura.com/cs-2018.01.01.9.html>
- Orphanides, A., Goulas, V., and Gekas, V. (2013). Effect of Drying Method on the Phenolic Content and Antioxidant Capacity of Spearmint. *Czech Journal of Food Sciences*, 31(5), 509 - 513.
- Pavlić, B., Bera, O., Teslić, N., Vidović, S., Parpinello, G., y Zerković, Z. (2018). Chemical profile and antioxidant activity of sage dust extracts obtained by supercritical fluids extraction. *Industrial Crops and Products*, 120, 305-312.
- Pérez-Gutiérrez, R.M., Mitchell, S., y Vargas-Solis, R. (2008). *Psidium guajava*: A review of its traditional uses, phytochemistry and pharmacology. *Journal of Ethnopharmacology*, 117, 1-27.
- Piping Rock Health Products, LLC. (2019). Hoja de neem , 475 mg, 100 Cápsulas. mayo 29, 2019, de PipingRock Sitio web: https://mx.pipingrock.com/neem/neem-leaf-475-mg-100-capsules40125?prd=2610de64&qclid=EAlaIqObChMl3IqN8MGv4wIVq8DlCh1JCgmYEAQYASABEgLLP_D_BwE

- PLM. (2016). Marca QG5. junio 5, 2019, de PLM Sitio web: http://www.medicamentosplm.com/home/productos/qg5_tabletas/63/101/46583/210
- Quintanilla-Medina, J.J., Garay-Martínez, J.R., Alvarado-Ramírez, E.R., Hernández-Meléndez, J., Mendoza-Pedroza, S.I., Rojas-García, A.R., Joaquín-Cancino, S., y Hernández-Garay, A. (2018). Tiempo y temperatura sobre la pérdida de humedad y contenido de proteína en hojas de *Moringa oleifera* lam. *Agroproductividad*, 11(5), 88 - 92.
- Rabiu-Abdulkadir, A., Zawawi, D.D., y Sarwar-Jahan, M.D. (2015). DPPH antioxidant activity, total phenolic and total flavonoid content of different part of Drumstic tree (*Moringa oleifera* Lam.). *Journal of Chemical and Pharmaceutical Research*, 7(4),1423-1428. <http://www.questjournals.org/jrps/papers/vol2-issue6/B260507.pdf>
- Ramírez-Meraz, M., Arcos-Cavazos, G., y Méndez-Aguilar, R. (2018). Jaguar: cultivar de chile habanero para México. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 9(2), 487-492.
- Rodríguez-Buenfil, I.M., Ramírez-Sucre, M.O., y Echevarría-Machado, I. (2017). Soils of Yucatan: Effect on the Growth of the Habanero Chili Plant (*Capsicum chinense*) Mini Review. *Agricultural Research & Technology: Open Access Journal*, 8(1), 1-2. <https://juniperpublishers.com/artoaj/pdf/ARTOAJ.MS.ID.555730.pdf>
- Roy, A. (2016). Bhut Jolokia (*Capsicum Chinense* Jacq): A Review. *International Journal of Pharmaceutical Sciences and Research*, 7(3), 882-889.
- Ruiz-Lau, N., Medina-Lara, F., y Minero-García, Y. (2010). Capsaicinoids are absent in habanero pepper vegetative organs (*Capsicum chinense* Jacq.). *HortScience*, 45(2), 323-326. <https://cicy.repositorioinstitucional.mx/jspui/bitstream/1003/110/1/13408.pdf>
- Sagar, N.A., Pareek, S., Sharma, S., Yahia, E.M. y Lobo M.G. (2018). Fruit and Vegetable Waste: Bioactive Compounds, Their Extraction, and Possible Utilization. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 17, 512-531. doi: 10.1111/1541-4337.12330.
- SAGARPA. 2015. Agenda Técnica Agrícola Yucatán. Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación. México, D.F., 170 pp. https://issuu.com/senasica/docs/30_veracruz_2015_sin
- Santagapita, P.R. 2016. Aprovechamiento de subproductos y valorización de recursos autóctonos: interrelación investigación-producción-desarrollo y sociedad. CYTED. Buenos Aires; Argentina. 112 pp. ISBN/ISSN: 978-987-42-1627-4.
- Segura-Campos, M.R., Ramírez-Gómez, K., Moguel-Ordoñez, Y., y Betancur-Ancona, D. (2013). Ascorbic acid and carotenoids contents and antioxidant properties of habanero pepper (*Capsicum chinense*) Fruit. *Food and Nutrition Sciences*, 4, 47-54.
- Sengev, A.I., Abu, J.O., y Gernah, D.I. (2013). Effect of *Moringa oleifera* Leaf Powder supplementation on some quality characteristics of wheat bread. *Food and Nutrition Sciences*, 4, 270-275.
- Shaimaa, G.A., Mahmoud, M.S., Mohamed, M.R., y Emam, A.A. (2016). Phytochemical screening, antioxidant activities and *in vitro* anticancer potential of egyptian *Capsicum spp*. *Biochemistry and Pharmacology*, 5(2), 1-8. DOI: 10.4172/2167-0501.1000205
- Amruthraj, N.J., Preetam-Raj, J.P., Saravanan, S., Antoine-Lebel, L. (2014). *In vitro* studies on anticancer activity of capsaicinoids from *Capsicum chinense* against human hepatocellular carcinoma cells. *International Journal of Pharmacy and Pharmaceutical Sciences*, 6(4), 254-258. <https://innovareacademics.in/journal/ijpps/Vol6Issue4/8998.pdf>
- Shanmugavel, G., Prabakaran, K., y George, B. (2018). Evaluation of phytochemical constituents Of *Moringa Oleifera* (Lam.) leaves collected from puducherry region, south india. *International Journal of Zoology and Applied Biosciences*, 3(1), 1-8. <https://doi.org/10.5281/zenodo.1312977>
- Sharma, J., Sharma, P., Sharma, B., y Chaudhary, P. (2017). Estimation of Proximate composition of selected species of *Capsicum* (*Capsicum annuum* and *Capsicum chinense*) grown in India. *International Journal of Pure Applied Bioscience*, 5, 369-372.
- Shivanand, B., y Rajanna, J. (2017). *Capsicum annuum* var. glabriusculum (Dunal) Heiser & Pickersgill. *Journal of Pharmaceutical Sciences and Research*, 9(8), 1283-1287.

- SIAP. (2017). Anuario Estadístico de la Producción Agrícola. mayo 24, 2019, de Gobierno de México
Sitio web: <https://nube.siap.gob.mx/cierreagricola/>
- Sulaiman, S.F., Yusoff, N.A.M., Eldeen, I.M., Seow, E.M., Sajak, A.A., Supriatno y Ooi, K.L. (2011). Correlation between total phenolic and mineral contents with antioxidant activity of eight Malaysian bananas (*Musa sp.*). *Journal of Food Composition and Analysis*, 24, 1-10. DOI:<https://doi.org/10.1016/j.jfca.2010.04.005>.
- Tut, P.F.J., Santamaría, B.F., Zavala, L.M.J., y Berny, M.T.J.C. (2013). Características de materiales mejorados de chile habanero para la Península de Yucatán. Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias. Campo Experimental Mocochoá. Yucatán, México. 48 pp.
- Van-Breemen, R.B. (2015). Development of safe and effective botanical dietary supplements miniperspective. *Journal of Medicinal Chemistry*, 58, 8360 – 8372.
- Vélez-Terranova, M., Campos-Gaona, R., y Sánchez-Guerrero, H. (2014). Uso de metabolitos secundarios de las plantas para reducir la metanogénesis ruminal. *Tropical and Subtropical Agroecosystems*, 17 (2014): 489-499.
- Venkatachalam, R.N., Singh, K., y Marar, T. (2012). Phytochemical screening and *in vitro* antioxidant activity of *Psidium guajava*. *Free Radicals and Antioxidants*, 2(1), 31-36. http://www.phcogfirst.com/sites/default/files/AX_2_1_7.pdf
- Vílchez, J.B., Díaz-García, R., López-Vivar, J., Gajardo-Solari, S., Kush-Fuschlocher, F., y Rojas-Arredondo, M. (2011). Actividad antioxidante y antibacteriana de seis cáscaras de frutos del oasis de Pica. *Biofarbo*, 19(1), 1-7.

III. CONTROL DE CALIDAD



CAPÍTULO 12

Estudio transcosecha y poscosecha del desarrollo de textura como característica de calidad de chile habanero de la península de yucatán

Transharvest and post-harvest study of the development of texture as a quality characteristic of habanero chili of the Yucatán Peninsula

Ramírez-Sucre, Manuel O.^{1*}, Vélez-Ruiz, Jorge F.², Ramírez-Rivera, Emmanuel J.¹, y Rodríguez-Buenfil, Ingrid M.¹

¹Centro de Investigación y Asistencia en Tecnología y Diseño del Estado de Jalisco. Subsele Sureste. Tablaje Catastral 31264 Km 5.5 Carr, Sierra Papacal-Chuburná puerto. Parque Científico Tecnológico de Yucatán. CP 97302. Mérida, Yucatán. México. *autor para correspondencia: oramirez@ciatej.mx

²FN Consultores, S. A. de C. V. Instituto de Diseño e Innovación Tecnológica. Boulevard del Niño Poblano 2901. Unidad Territorial Atlixcayotl. Puebla, Puebla, México. CP. 72197.

Resumen

El chile habanero (*Capsicum chinense* jacq) es el chile más picante de México que además tiene la denominación de origen en la Península de Yucatán. En Yucatán se cultiva en tres tipos de suelo: a) *K'áankablu'um* (KA), b) *Boxlu'um* (BO) o c) *Ch'ich'lu'um* (CH), lo que provoca una gran variabilidad en su productividad y en la calidad del chile. Recientemente, se han observado cambios en los atributos de textura de chiles debido a la cosecha. Por lo cual, el objetivo del presente trabajo fue estudiar las características texturales durante el desarrollo de chile habanero en estudios transcosecha y poscosecha. Se comparó la textura de chiles mediante la metodología de análisis de perfil de textura (cuchilla de corte en V45°, velocidad 10mm/s) en 1) un estudio transcosecha a chiles recién cortados, con los factores tipo de suelo utilizado en la cosecha (KA, CH, BO), número de cosecha (1-7), y grado de maduración chiles (verdes, naranjas o verdes-naranjas), y en 2) un estudio poscosecha, comparando el número de cultivo (1 y 3) y el tipo de suelo (KA, CH, BO); todos analizados mediante un análisis ANOVA multifactor.

Los chiles recién cosechados que presentaron la mayor dureza (36.81N) fueron los naranjas (cosecha 1-4); los chiles de mayor fracturabilidad fueron los de las cosechas 2, 3 y 7 [15.26-17.39N]. En el estudio poscosecha, sólo presentaron diferencias significativas en la dureza debido a la interacción del tipo de suelo y número de cultivo. El estudio de textura fue importante para definir el estado de maduración idóneo para la cosecha del chile habanero.

Palabras clave: Análisis de perfil de textura (TPA), chile habanero, *Capsicum chinense*

Abstract

Habanero pepper (*Capsicum chinense* jacq) is the hottest chili in Mexico that also has the designation of origin in the Yucatan Peninsula. In Yucatan it is cultivated in three types of soil: a) *K'áankablu'um* (KA), b) *Boxlu'um* (BO) or c) *Ch'ich'lu'um* (CH), which causes great variability in its productivity and quality of the chili. Recently, changes in chilli texture attributes have been observed due to harvesting. Therefore, the objective of this work was to study the textural characteristics during the development of habanero chili in transharvest and

postharvest studies. The texture of chili peppers was compared using the texture profile analysis methodology (cutting blade at V45 °, speed 10mm / s) in 1) a trans-harvest study of freshly cut chili peppers, with the next factors: soil type used in the harvest (KA, CH, BO), harvest number (1-7), and degree of maturation (green, orange or green-orange chili peppers), and in 2) a post-harvest study, comparing the crop number (1 and 3) and the soil type (KA, CH, BO); all analyzed using a multifactor ANOVA analysis.

The oranges freshly harvested chilies were the hardest (36.81N) (harvests 1-4); the chili peppers with the highest fracturability were of the harvest 2, 3 and 7 (15.26-17.39 N). The post-harvest study, showed significative differences in hardness, due to the interaction between the type of soil and the number of crops. The texture study was important to define the ideal ripening state for the habanero harvest.

Keywords: Texture profile analysis (TPA), Habanero chili, *Capsicum chinense*

I. Introducción

1.1 Chile habanero en contexto nacional

El chile es el quinto producto hortícola más importante por superficie cultivada a nivel mundial. México representa uno de los principales productores de chiles, alrededor del 90% del chile que se consume en el mundo es de origen mexicano (Fideicomiso de Riesgo Compartido 2017).

El chile habanero (*Capsicum chinense* jacq) es el chile más picante de México (350,000 unidades Scoville aprox.) y de gran importancia económica ya que es uno de los cultivos con mayor demanda (consumo per capita de chile de 15 kg anuales) debido a su amplio uso como alimento, condimento, medicinal, entre otros (Villa *et al.*, 2010); además se comercializa como fruto fresco (alrededor del 80%) o procesado como salsas. La Península de Yucatán, es la principal región productora de chile habanero del país y abarca los Estados de Yucatán, Campeche y Quintana Roo. El chile habanero de la península de Yucatán tiene su denominación de origen desde el año 2010 (NOM 189-SCFI-2017).

Existen distintas variedades de este fruto, las cuales se diferencian por el color del chile al respecto del estado de maduración, pudiendo tornarse de color naranja, amarillo, rojo o café. Algunas de las variedades más conocidas de chile habanero a nivel mundial son West Indian Red, Caribbean Red y Orange Habanero; sin embargo, existen otras variedades nacionales como la Kulkán, Chichen Itzá (Marcial-Salvador, 2016), Calakmul, Mayapán y Jaguar (Tut *et al.*, 2013). La variedad jaguar, es una de las dos que poseen la denominación de origen como Chile Habanero de la Península de Yucatán y se caracteriza por la producción de frutos de forma triangular-acampanulada, su tamaño es de 3.8 a 5.5 cm de largo y de 2.5 a 3 cm de ancho, con un peso de 6.5 a 12 g (Ramírez *et al.*, 2009) con un grosor de pericarpio de 1.6 a 2.4 mm. Por otro lado, en la Península de Yucatán el 80% del suelo está representado por leptosoles, que son suelos cuyo potencial agrícola está limitado por su poca profundidad (<1.5m), alta pedregosidad, y su alto contenido de calcio (>18,000 mg kg⁻¹) (Bautista-Zúñiga *et al.*, 2018). En el Estado de Yucatán, el chile habanero es cultivado en tres tipos de suelos leptosoles denominados en maya como: a) *K'áankab-lu'um* (KA), b) *Box-lu'um* (BO) o c) *Ch'ich-lu'um* (CH), los cuales se refieren a la coloración roja, negra y café, respectivamente. La siembra del chile habanero en estos tipos de suelo produce una gran variabilidad en los

aspectos de producción y calidad. En este sentido, diversas investigaciones se han realizado para determinar el impacto del tipo de suelo en los aspectos de metabolitos (capsaicinoides, polifenoles, carotenoides, vitaminas, etc.) (Morozova *et al.*, 2019; Zamacona-Ruiz *et al.*, 2018; Oney-Montalo *et al.*, 2019), desarrollo de nutrientes (Medina-Lara *et al.*, 2019); morfometría, color y textura (Ramírez-Sucre *et al.*, 2018; Gómez-Rincón, *et al.*, 2018).

Asimismo, el manejo del suelo ha servido para optimizar la productividad y el rendimiento de los cultivos (Morrissa *et al.*, 2010.), más aún, el tipo de suelo interviene en la calidad de los frutos recién cosechados, e impacta en la evolución de este durante su vida útil poscosecha. El manejo poscosecha se refiere a la preparación, manipulación y almacenamiento posterior a la cosecha, que afectan las cualidades del fruto; por lo cual, un manejo adecuado derivará en la conservación de los productos agropecuarios, así como de sus propiedades nutritivas, para finalmente determinar su calidad y evaluar su comercialización-consumo (SAGARPA, 2017).

El manejo poscosecha adecuado en los productos perecederos como el chile habanero, permite agregar valor a la producción e incrementar sus márgenes de ganancia (PRODAR, 2012). Actualmente, los estudios de calidad son utilizados en la industria de los alimentos frescos para conferir valor, sin embargo, existen diferentes factores que pueden afectar la calidad en posterior a la cosecha (Figura 1). Entonces, la vida útil poscosecha se realiza tomando en cuenta como insumo el modo en que se almacenan los frutos: identificando la variedad, momento y forma de cosecha, y estudiando las condiciones controladas de conservación como los tiempos de almacenamiento y las condiciones de temperatura y humedad. Todas estas variables derivan en la modificación de la estructura química (minerales pigmentos, aminoácidos y grasas, entre otras), nutrimental (vitaminas y antioxidantes, entre otras), sensorial (sabor, color, aroma) o física (color, forma, humedad y textura, entre otras).

Con referencia a la calidad sensorial y física, existen diferentes parámetros para evaluar la aceptabilidad y la calidad de un alimento; una de las principales dentro de los parámetros de textura, es la dureza, que es especialmente importante en frutas, ya que indica la integridad estructural del tejido y es con ella con la cual se estima la frescura (Torres, 2015). Adicionalmente, después de la cosecha, la textura es importante para retener las propiedades físicas que crean las sensaciones texturales, como la firmeza, la adhesividad, importantes parámetros de textura (Olivera, 2004).

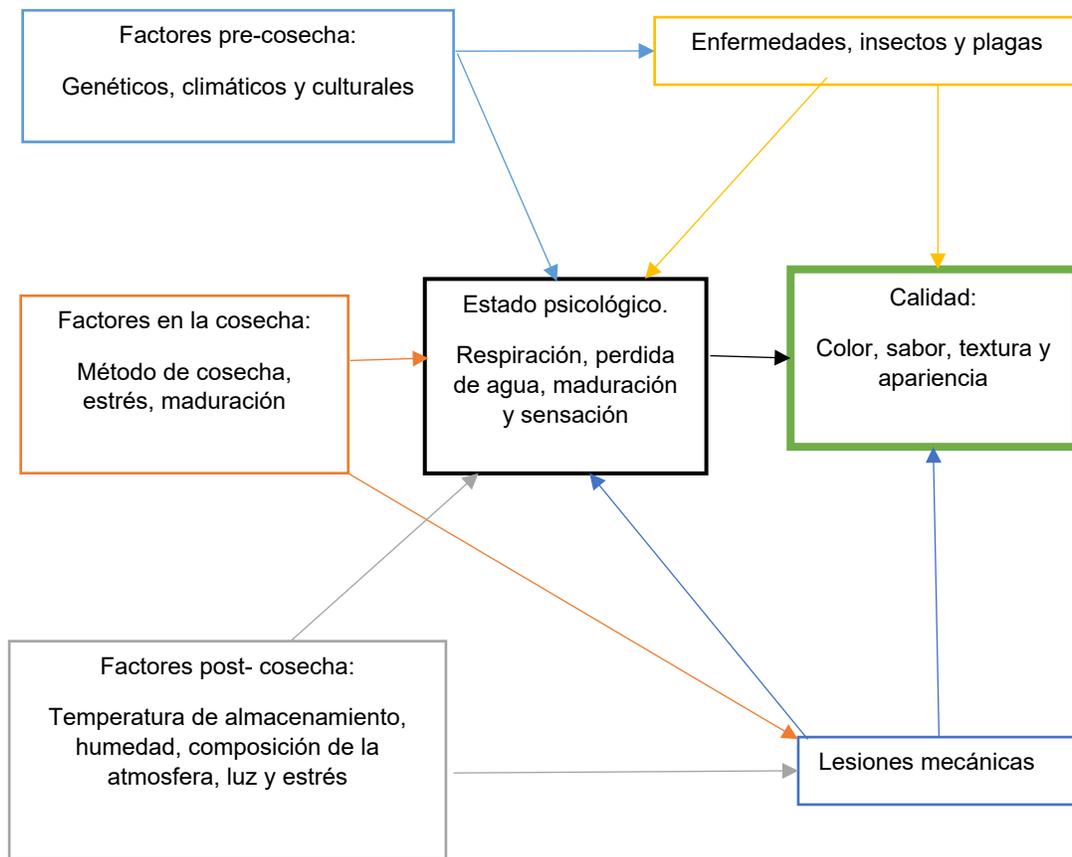


Figura 1. Representación esquemática de factores que afectan la calidad poscosecha de frutas y hortalizas (Rahman, 2007)

1.2 Textura en el control de calidad

La textura es uno de los atributos más críticos cuando se refiere a la aceptabilidad de un producto por el cliente. A medida que los hábitos alimenticios de los consumidores se han vuelto más sofisticados, la importancia de la textura como un atributo de calidad ha adquirido mayor importancia. Es por ello que la textura es un parámetro relevante y de gran importancia para determinar el estado de maduración del fruto (Ramírez-Sucre *et al.*, 2018) y para conocer el tiempo exacto de la cosecha, en conjunto con otras propiedades como el color.

La textura en los vegetales se debe a la organización de los tejidos, la composición subyacente, la integridad estructural de la pared celular y de la lámina central, así como a la presión de turgencia generada dentro de las células debido a procesos de ósmosis. Asimismo, la maduración de los frutos se relaciona directamente con la arquitectura de la célula vegetal y se puede atribuir a la integridad estructural de la pared celular (Pérez-Almeida y Carpita, 2006).

La textura como propiedad física y atributo de calidad en la industria de los alimentos determina la aceptabilidad del fruto por parte de los consumidores; entre las características principales de la textura se encuentra la dureza, que estima su grado de frescura (Konopacka y Plochanski, 2004), la cual es crítica para la adquisición del chile habanero como fruto fresco. Un análisis más detallado de la textura de cualquier producto se realiza mediante la prueba

de perfil de textura (*Texture profile analysis* o TPA) la cual representa una metodología utilizada para el conocimiento de la estructura que permite evaluar características como la adhesividad, fracturabilidad o la cohesividad del material.

1.3 Análisis de perfil de textura (TPA)

En la actualidad se han realizado análisis de perfil de textura (*Texture profile analysis* o TPA) para detallar las principales propiedades texturales y posibilitar la elección del estado de maduración más propicio para la cosecha de frutos. El análisis del perfil de textura simula la mecánica de masticación de la mandíbula al morder mediante dos ciclos de compresión con lo que se obtienen curvas de fuerza-deformación dando a conocer el comportamiento del alimento con respecto a la fuerza aplicada para la obtención de algunos parámetros mecánicos (Chen y Opara. 2013) tales como: dureza, gomosidad, masticabilidad, elasticidad y cohesividad, entre otros. En otras palabras, el TPA realiza una medición objetiva de una sensación subjetiva (Chen y Opara. 2013) que relaciona la deformación observada y la composición del producto. Los parámetros básicos que se determinan del análisis del TPA se pueden observar en la Figura 2.

Las definiciones de estos parámetros fueron establecidas de acuerdo con Szczesniak (1963) y Bourne (1978) y se observan en la Tabla 1. El presente capítulo aborda, en el estudio transcosecha perfiles de textura de chiles habaneros en función de su desarrollo (número de cosecha) en tres tipos de suelos: pedregosos (*Ch'ich-lu'um*), negro (*Box-lu'um*) y rojo (*K'áankab-lu'um*) y en el estudio poscosecha los factores de número de cultivo, tipo de suelo y tiempo de almacén. Es importante señalar que los datos de la textura como atributos de calidad de los chiles habaneros, obtenidos por medio del TPA, provee datos que se pueden correlacionar con otros rasgos de propiedades físicas o químicas, por ejemplo, la concentración de los metabolitos de interés en el chile habanero, el color o con atributos sensoriales.

Por lo que el objetivo del presente trabajo fue estudiar las características texturales (como característica de calidad) durante el desarrollo de chile habanero de la Península de Yucatán en estudios transcosecha y poscosecha.

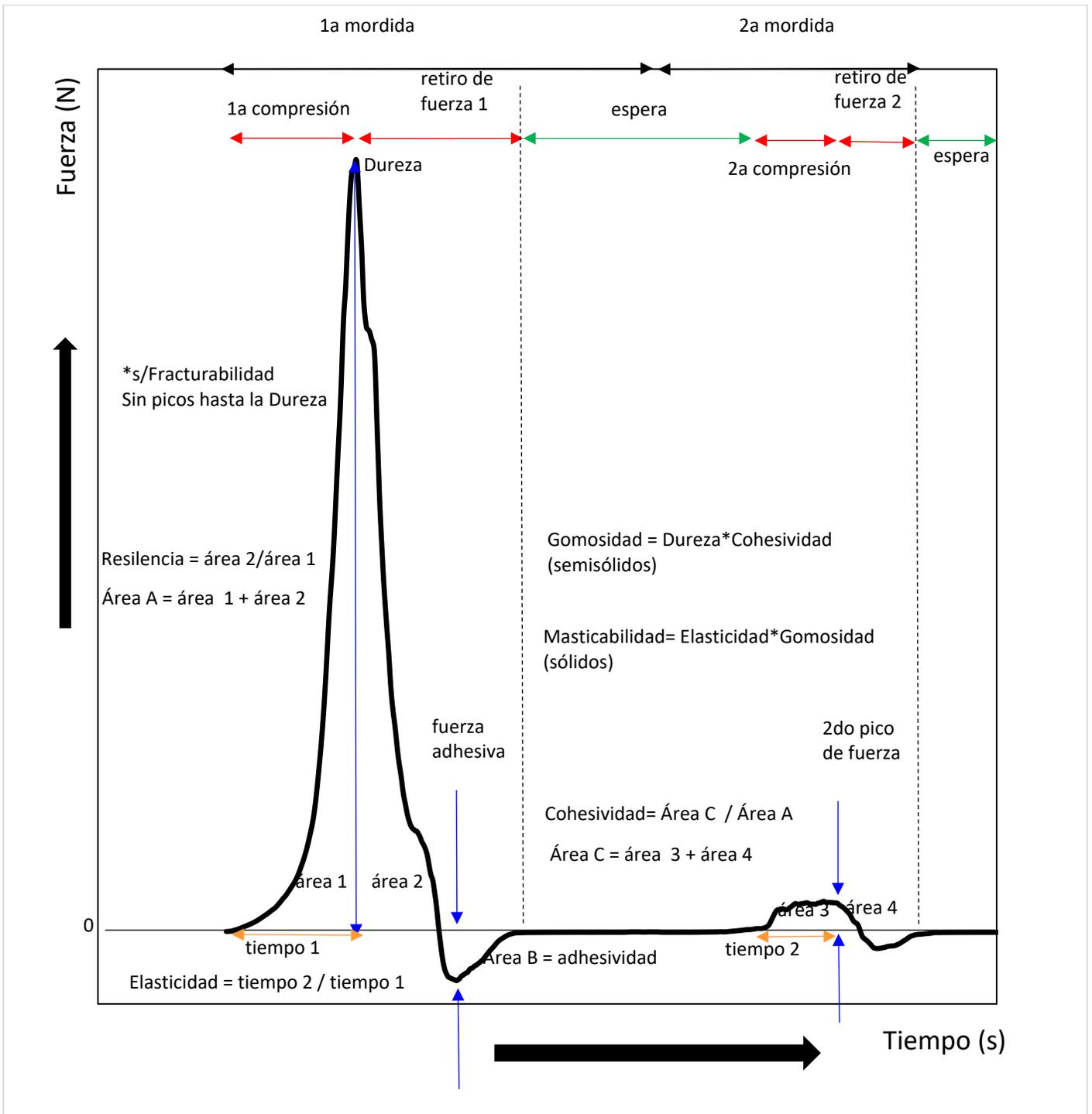


Figura 2. Análisis de perfil de textura (fuerza-tiempo) típico de chile habanero evaluado en una máquina universal de textura (elaborado con curva de chile habanero).

Tabla 1. Parámetros del análisis del perfil de Textura

Parámetro	Definición	Determinación	Unidad
Fracturabilidad	Fuerza necesaria para fracturar la muestra.	Fuerza en la primera ruptura significativa de la muestra.	Newton (N)
Dureza	Fuerza necesaria para lograr una deformación determinada.	Máxima fuerza durante el primer ciclo de compresión.	Newton (N)
Adhesividad	Trabajo necesario para vencer la fuerza de atracción entre la muestra y una superficie.	Área negativa después del primer ciclo de compresión. Representa el trabajo necesario para separar la superficie del equipo y la muestra.	Joule (J)
Fuerza adhesiva	La máxima fuerza medida (produce un pico de fuerza)	Máxima fuerza (negativa) después al primer ciclo de compresión	Newton (N)
Cohesividad	Fuerza de los enlaces internos que mantiene la estructura de una muestra. Representa la resistencia de un material a una segunda deformación con relación a como este se comportó en un primer ciclo de deformación, Mide el trabajo realizado en la segunda compresión dividido entre el trabajo durante la primera compresión	Relación entre el área positiva del segundo ciclo de compresión (A_C) y el área positiva del primer ciclo (A_A). Excluyendo la porción de áreas durante la descompresión de la muestra	Relación de áreas (A_C/A_A).
Elasticidad	Capacidad que tiene una muestra deformada para recuperar su forma o longitud inicial después de que la fuerza ha impactado en ella.	El cociente L_2/L_1	Adimensional
Gomosidad	Fuerza necesaria para desintegrar una muestra de alimento semisólido a un estado tal que facilite su ingesta.	Producto de la dureza y la cohesividad	Newton (N)
Masticabilidad	Fuerza necesaria para masticar un alimento solido hasta un estado tal que permita su ingesta.	Producto de la dureza, cohesividad y elasticidad	Newton (N)

II. Materiales y métodos

2.1 Material Vegetal

Cien plántulas de *Capsicum chinense* jacq variedad jaguar fueron adquiridas con un proveedor local para su siembra en distintos tipos de suelo: *Ch'ich-lu'um* (CH), *K'áankab-lu'um* (KA) o *Box-lu'um* (BO), de coloraciones café, roja o negra, respectivamente.

2.2 Fertilizantes

Ultrasol (triple 18 y NKS46), bayfolan y adherex comerciales, fueron adquiridos con un proveedor de agroquímicos local. Ultrasol triple-18 aporta un balance de nitrógeno, fósforo y potasio (composición: nitrógeno 18 %; fósforo 18 %; potasio 18%; azufre 0.8 % [S]; magnesio 0.5 %; boro 100 ppm; cobre 100 ppm; hierro 400 ppm; manganeso 200 ppm; molibdeno 100 ppm; zinc 200 ppm) con una conductividad de 1.2 dS/m (1 g/l 20°C) y un pH de 5.15 (1 g/L a 20°C); mientras que el Ultrasol NKS46 permite una absorción inmediata de nitrógeno nítrico (NO_3^-) y aporta potasio libre de cloro (composición: nitrógeno [N] 12.0 %; potasio [K₂O] 46.0 %; azufre [S] 1.2 %; pH 7.0 [1g / 120° C]; Solubilidad -315 g/L) además optimiza la producción, adelanta la floración y aumenta la vida de anaquel. Bayfolan es un líquido foliar que aporta nutrientes y estimula el crecimiento de raíz y mejora el estado sanitario de la planta (composición: nitrógeno 11.47 %; fósforo 8 %; potasio 6 %; ácido indo acético 0.003 %; clorhidrato de tiamina 0.004 %; azufre 0.23 %; calcio 0.025 %; magnesio 0.025 %; boro 0.036 %; cobre 0.04 %; hierro 0.05 %; manganeso 0.036 %; molibdeno 0.005 %; zinc 0.08 %). Por otra parte, Adherex es un coadyuvante que ayuda a retener la humedad de las hojas y es un absorbente del Bayfolan, lo que lo hace más eficaz.

2.3 Establecimiento del cultivo

El cultivo se estableció en marzo de 2018 (representó el cuarto cultivo establecido en el invernadero) en un invernadero tipo gótico blanco con 2 arcos ojivales de malla de polietileno (medidas: 26*12*7 m [L*a*h]) con 5 camas (1*24 m) con una HR > 91%, temperaturas que oscilaron entre 24 y 47° C y distancia entre plántulas de 35 cm. Las plántulas de *Capsicum chinense* jacq variedad jaguar fueron trasplantadas en bolsas plásticas con fuelle con 12 kg de cada tipo de suelo: *Ch'ich-lu'um* (CH), *K'áankab-lu'um* (KA) o *Box-lu'um* (BO) con 11 agujeros de 1.5 cm² distribuidos 8 entre la parte media y 3 en la parte baja para permitir el flujo de agua. Se realizó una distribución aleatoria por cuadrantes usando un diseño para 3 bloques y cuatro repeticiones (Figura 3). El esquema de riego se llevó a cabo tres veces por semana (lun [500 mL], mie [500 mL] y vie [1000 mL]) y fue incremental, modificándose de acuerdo a la etapa de madurez del cultivo (botones/floración [+50%] y fructificación [+100%]). El esquema de fertilización (inicio a los 14 días post trasplante) se llevó a cabo de forma radicular dos veces por semana utilizando 2, 4 o 6 g/L de Ultrasol triple 18 y 0, 2 o 4 g/L de Ultrasol NKS46 durante las etapas después de trasplante, botones/floración y fructificación, respectivamente; asimismo se llevó a cabo una fertilización foliar semanal igualmente de manera incremental: 24, 48 o 72 mL de Bayfolan/Lagua y 0, 24, 36 mL de Adherex/Lagua durante las etapas después de trasplante, botones/floración y fructificación, respectivamente, aplicados mediante bombas de aspersión.

B3R1S3	B3R3S2	B3R3S1	B3R4S3
B2R2S2	B3R2S1	B3R3S3	B3R4S2
B1R1S1	B3R2S3	B1R1S2	B3R4S1

Figura 3. Esquema de plantación de chile habanero con una distribución aleatoria por cuadrantes con diseño de 3 bloques (B1-B3) y cuatro repeticiones (R1-R4) para los suelos *Boox-lu'um* (S1), *K'áankab-lu'um* (S2), y *Ch'ich-lu'um* (S3).

2.4 Determinación de perfiles de textura (TPA)

El análisis de perfil de textura (TPA) fue realizado con un texturómetro EZ-SX (Shimadzu Corporation, Japón). Se realizó una prueba de penetración con una cuchilla de corte en V (45° V-CUT FLAT *end face*) y su base (*blade shear jig*). Las pruebas se realizaron en la parte central del fruto (corte transversal), utilizando una polaridad de compresión hacia abajo de una velocidad de 10 mm/s con un límite de desplazamiento de 20 mm/s, para los dos ciclos de compresión (Ramírez-Sucre *et al.*, 2018). Se elaboraron gráficos de fuerza frente al desplazamiento de la aguja utilizando un software de análisis de textura (Trapezium X, V. 1.4.0, 2013). Se realizaron pruebas de TPA a un máximo de 10 chiles/lote (Figura 4) cuantificándose los parámetros de dureza, fracturabilidad, adhesividad, cohesividad, fuerza adhesiva y gomosidad (respuestas) como función del desplazamiento de la cuchilla.



(A) (B) (C) (D)

Figura 4. Texturómetro: A) equipo principal para la medición de textura, B) programa Trapezium®, C) accesorio blade jig (EZ-SX Shimadzu Corporation, Japón), D) prueba aplicada a muestras de chile habanero verde y naranja.

2.4.1 Estudio transcosecha

Los análisis de los parámetros texturales se realizaron con respecto al tipo de suelo utilizado en la cosecha (KA, CH o BO) y al número de cosecha (cosechas 1 a 7) a chiles inmaduros (verdes), maduros (naranjas) y semimaduros (verdes-naranjas) (Figura 5).



Figura 5. Chile habanero: A. verde; B. verde-naranja; C. naranja, cosechados el mismo día provenientes del invernadero (cultivo 1)

2.4.2 Estudio poscosecha

Se cosecharon 15 chiles naranjas de dos tipos de suelo (*K'áankab-lu'um* o *Boox-lu'um*) para el estudio pos-cosecha con duración de una semana para la elaboración de TPA para la obtención de los parámetros texturales de chile. Estos chiles se obtuvieron previamente de cosechas y cultivos similares (a. septiembre de 2017, primer cultivo, cosecha número 8, 206 días postrasplante; y b. octubre de 2017, tercer cultivo, cosecha número 1, 105 días postrasplante). Los análisis se llevaron a cabo semanalmente por duplicado a los chiles almacenados a temperatura ambiente.

2.5 Análisis estadístico

Se realizaron análisis de las variables de respuesta de dureza y fracturabilidad obtenidas de chiles habaneros, mediante el uso de software estadístico (Statgraphics Centurion XVI). Los datos fueron analizados para un 95% de confianza mediante un análisis ANOVA multifactor.

III. Análisis y discusión de resultados

3.1 Chile habanero recién cosechado

De acuerdo con los datos obtenidos del análisis de perfiles de textura de chiles habaneros (Figura 6A) del cultivo se presentó una mayor dureza (D) en los chiles de la primera cosecha ($D_{\text{promedio}} = 36.63 \text{ N} \pm 1.95$) sin diferencias significativas con las cosechas 2-4, y presentándose disminuciones con respecto al número de cosechas hasta la sexta ($D_{\text{promedio}} = 27.81 \text{ N} \pm 2.11$) con un ligero incremento en la séptima cosecha ($D_{\text{promedio}} = 29.98\text{N}$) sin presentarse diferencias estadísticamente significativas entre estas dos últimas. Una mayor

dureza indica que tanto el pericarpio como las paredes internas del fruto presentan mayor solidez lo que confiere al fruto de chile habanero resistencia en la transportación y una buena vida de anaquel (Ramírez *et al.*, 2015). Sin embargo, la producción de chiles fue baja (n=89) durante la primera cosecha; en contraste, el mayor número de chiles cosechados (ligeramente menos duros [33.69 N]) se obtuvo en la segunda cosecha (n=187), duplicando su número inicial y hasta triplicando la cantidad de chiles de las cosechas posteriores.

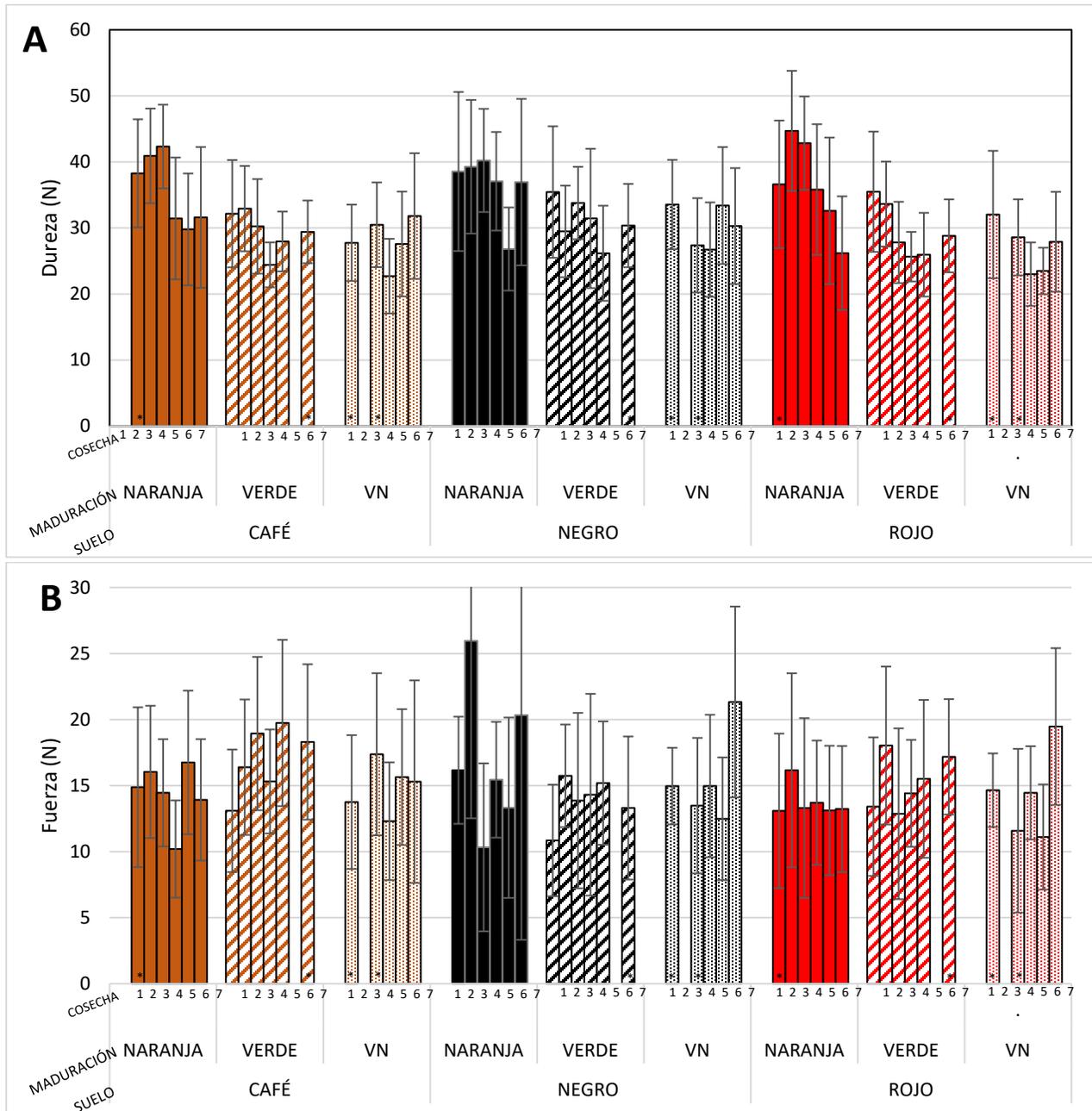


Figura 6. Frutos de chile habanero recién cosechados en tres estados de maduración (naranja, verde o verde-naranja [VN]) y en tres tipos de suelo: *Ch'ich-lu'um* (café, ●), *Boox-lu'um* (negro, ●) o *K'áankab-lu'um* (rojo, ●) (* = sin chiles de esta maduración/cosecha) durante 7 cosechas. Evolución de A) la dureza (N) y B) la fracturabilidad (N).

Por otro lado, con respecto al tipo de suelo, se obtuvo una dureza ligeramente mayor en suelo BO ($D = 32.86$ N) sin encontrarse diferencias significativas con KA y CH, sin embargo, el suelo BO presentó el menor número de chiles ($n=180$) con respecto a los cosechados en suelo KA y CH (234 chiles para ambos tipos de suelo), en estudios previos ya se había observado la mayor producción de chiles en suelo rojo (*K'áankab-lu'um*) (Ramírez-Sucre *et al.*, 2018).

La dureza más alta se obtuvo en los chiles naranjas (36.81N) sobre los verdes y de maduración intermedia ($D_{\text{naranja}} > D_{\text{verde}} > D_{\text{intermedio}}$) (Tabla 2), lo que representa un mayor estado de madurez. En frutos como el chile, hablar de madurez según López-Camelo (2003), representa el tiempo cuando se alcanza el punto adecuado de consumo, luego de ciertos cambios en el color, textura y sabor y siendo el estado de madurez, el índice más usado para la cosecha de frutos.

Tabla 2. Promedios de la dureza y fracturabilidad de chiles habaneros en función de las variables de número de cosecha, tipo de suelo y grado de madurez (n =número de chiles)

Variables	Dureza (N)			Fracturabilidad (N)		
	n	Promedio	Desviación estándar	n	Promedio	Desviación estándar
Numero de cosecha						
1	89	36.63a	1.954	70	11.81a	1.562
2	187	33.69a	1.210	168	15.26ab	0.926
3	57	34.81a	2.172	56	17.39b	1.587
4	90	32.60ab	1.677	85	13.87a	1.250
5	90	28.54b	1.677	88	14.60a	1.228
6	60	27.81b	2.113	59	14.14a	1.544
7	75	29.98b	1.841	69	16.52b	1.391
Tipo de suelo						
<i>Ch'ich-lu'um</i> ¹	234	31.39a	1.096	215	15.13a	0.820
<i>Boox-lu'um</i> ¹	180	32.86a	1.212	159	14.86a	0.932
<i>K'áankab-lu'um</i> ¹	234	31.78a	1.098	221	14.39a	0.819
Grado de madurez						
Semimaduro	154	29.48b	1.374	150	14.61a	1.012
Maduro	206	36.81a	1.163	183	14.19a	0.895
Inmaduro	288	29.74b	1.071	262	15.60a	0.793

Letras diferentes entre columnas de ua misma variable representan diferencias significativas

¹ *Ch'ich-lu'um* = tierra café; *Boox-lu'um* = tierra negra; *K'áankab-lu'um* = tierra roja

Previamente Ramírez-Sucre *et al.* (2018) obtuvieron una dureza significativamente mayor con la maduración mas alta de chiles recién cortados, es decir, mayor en chiles naranjas que en semi-maduros y verdes, alcanzando valores promedio de 50.0, 30.7 y 33.7 N,

respectivamente, pero sin diferencias significativas entre los suelos rojo, café o negro. Los chiles del presente estudio presentaron diferencias menores (tierras: roja=31.78 N, café=31.39 N, negra=32.86 N) atribuibles a las condiciones climáticas como temperatura y humedad.

Ramírez-Meraz *et al.* (2018) encontraron que en la variedad jaguar los chiles presentan muy buena firmeza (58.3 N/cm²); sin embargo, no presentan la metodología utilizada para la medición de la firmeza. No obstante, otros autores reportan que la variedad jaguar presenta una dureza del fruto que va de 8.6 a 9.7 N cuando los frutos están verdes y de 5.1 a 6.6 N cuando los frutos están maduros (Tut *et al.*, 2013), mientras que para las variedades Mayapan y Calakmul los frutos presentan, en el primer caso, de 11 a 13 N cuando están verdes y de 5.7 a 6.4 N cuando están maduros (Santamaría y Zavala, 2012) y en el segundo, cerca de 11 N en los frutos verdes y de cerca de 5 N en los frutos maduros (Tut *et al.*, 2013). Todos estos representan valores mucho más pequeños de dureza quizá debido al exhaustivo esquema de fertirrigación aplicado al cultivo de chile habanero, condiciones ambientales como temperatura, clima, humedad, o a condiciones de cultivo como el número de la cosecha, tiempo de maduración o suelo.

Durante la maduración, el fruto cambia la coloración del pericarpio, disminuye el contenido de almidón, aumenta la concentración de azúcares, se reduce el contenido de ácidos; por otro lado, con el tiempo existe una pérdida en la firmeza, aumenta su sensibilidad a las condiciones del medio, pierde el control metabólico e inicia su senescencia (Agustí, 2004). De acuerdo con lo mencionado, luego de la maduración naranja los chiles comienzan perdiendo dureza y cambiando su coloración a café-rojizo, sin embargo, es importante mencionar que en un estudio realizado por Ramírez-Sucre *et al.* (2018) los chiles sobremadurados, es decir, aquellos que ya han iniciado su estado de senescencia, durante un estudio poscosecha (almacenamiento por 3 semanas a temperatura ambiente) presentaron una dureza superior (>98N), lo que representó un valor más alto que en los chiles maduros, desarrollado por una piel elástica y difícil de penetrar y de coloración café-negruzca.

En el presente trabajo, se llevó a cabo el análisis de un diseño experimental (3x3x4), elaborado con los factores: tipo de suelo (3 niveles), estado de maduración (3 niveles) y cosecha (4 niveles) sobre la dureza de las muestras, incluyéndose las cosechas 2, 4, 5 y 7 debido a que éstas presentaron las tres maduraciones. Como se puede observar en la Tabla 3, sólo se presentaron efectos significativos sobre la dureza de los chiles habaneros del número de cosecha y del estado de madurez, pero no del tipo de suelo. Lo anterior implica una dureza estadísticamente similar de chiles cosechados en los tres tipos de suelo. Asimismo, se halló una interacción doble significativa del número de cosecha*estado de madurez (Figura 7A), al igual que la interacción triple.

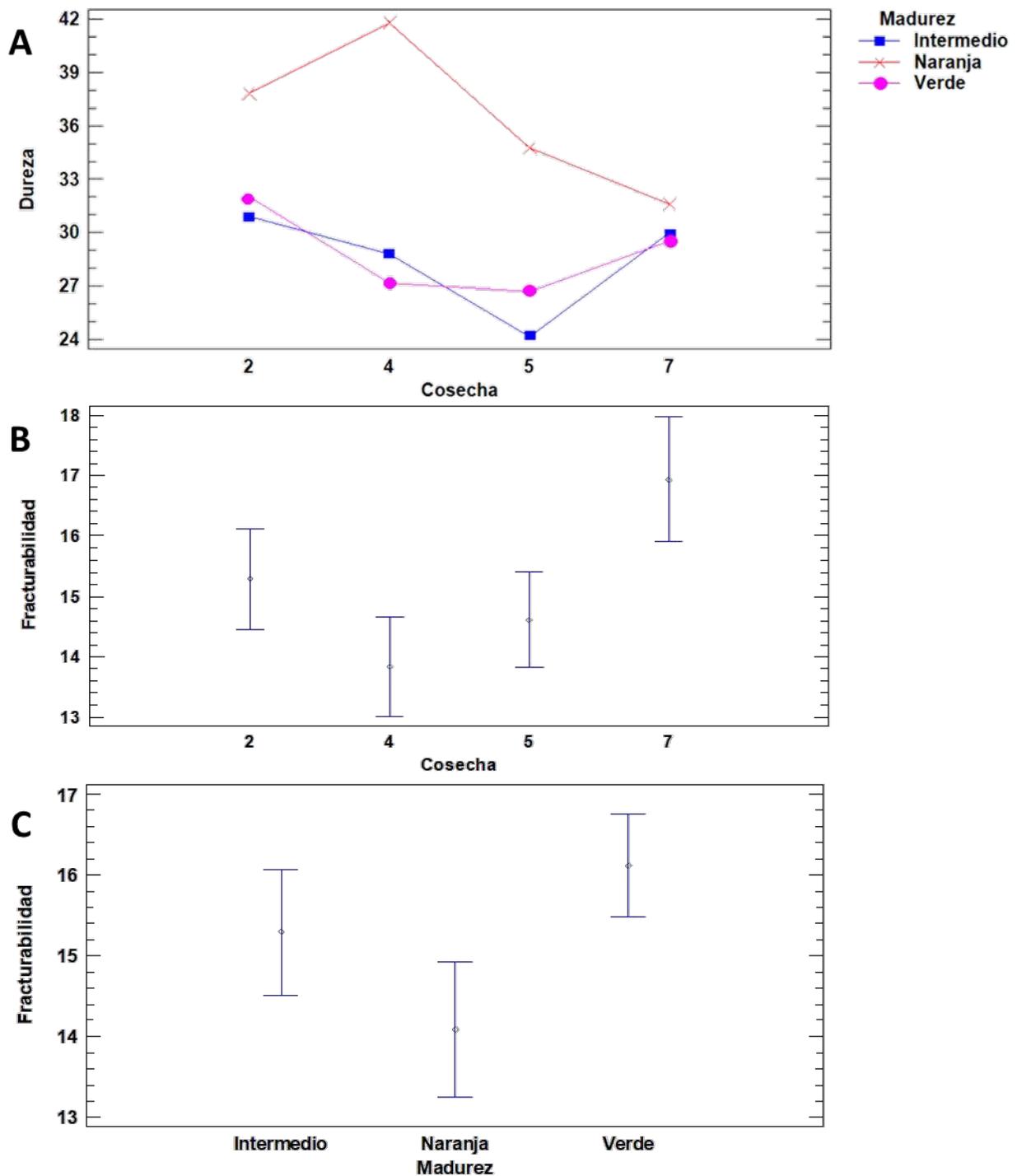


Figura 7. Gráficos dureza y fracturabilidad de chiles habaneros: medidas de la dureza en función de A) la interacción de la madurez-cosecha de chile habanero en tres estados de maduración (naranja, verde e intermedio [verde-naranja]) y medias de la fracturabilidad en función de B) el número de cosecha y C) de su grado de madurez.

También se analizó el parámetro de fracturabilidad (F), los resultados obtenidos de observan en al Figura 6B. Con respecto al número de cosecha, la fracturabilidad de los chiles se

incrementó hasta la tercera cosecha, cuyas fracturabilidades fueron las mayores ($F_{\text{promedio}} = 17.39N$), con un mínimo registrado durante la primera cosecha ($F_{\text{promedio}} = 11.81N$) sin registrarse diferencias significativas. Durante las cosechas 4, 5 y 6 se mantuvo un comportamiento estadísticamente similar (13.87, 14.60, y 14.14N, respectivamente), que se incrementó en la séptima cosecha, registrando 16.52N de fraturabilidad, siendo ésta similar a la hallada de las primeras cosechas, de manera análoga al parámetro de dureza. Con respecto al tipo de suelo, la fracturabilidad se cuantificó con valores desde 14.39 y 14.86N en suelo rojo y negro y hasta de 15.13N en suelo café; sin embargo, no se presentaron diferencias significativas entre estos valores. Asimismo, debido al grado de madurez, se presentaron fracturabilidades de 14.19N en chiles naranjas, y de 15.60N en los chiles verdes, pasando por su nivel intermedio de maduración (verde-naranja, 14.61N) (Tabla 2). Cabe mencionar que el número de chiles (n) disminuyó en los análisis ya que se eliminaron aquellos que no presentaron un valor de fracurabilidad en las determinaciones.

De igual manera que en la dureza, en el análisis estadístico de la fracturabilidad se evaluaron cuatro cosechas, la 2, 4, 5 y 7 ya que sólo en éstas se presentaron lecturas de todas las maduraciones de los chiles. Después de realizar el análisis experimental, se obtuvieron los gráficos de medias (Figura 7B y 7C), en los que se aprecia que sólo los factores de número de cosecha y grado de madurez presentaron efectos significativos sobre la dureza de los chiles. Además, se obtuvo un efecto significativo de la interacción triple del número de cosecha*estado de madurez*tipo de suelo, lo que implica una contribución importante del tipo de suelo sobre esta respuesta; no obstante ninguna interacción doble presentó efectos significativos (Tabla 3).

Tabla 3. Valores de probabilidad de las varialbes de dureza y fracturabilidad de chiles habaneros después del análisis estadístico (ANOVA)

	Dureza Valor P	Fracturabilidad Valor P
Efectos principales		
A: Número de cosecha	<0.0001*	0.0106*
B: Tipo de suelo	0.2143	0.7633
C: Estado de madurez	<0.0001*	0.0281*
Interacciones dobles		
AxB	0.6322	0.2686
AxC	0.0003*	0.2536
BxC	0.9548	0.0581
Interacción triple		
AxBxC	0.1081	0.0409*

*valores de probabilidad significativos ($P < 0.05$)

Para una evaluación más precisa del estado de madurez fisiológica (previa a la madurez comercial) se realizó el análisis correspondiente de dureza para la maduración verde. El este estado de madurez donde se realiza el corte del fruto es la madurez fisiológica, que en chiles se presenta, una vez que se ha completado el desarrollo del fruto (López-Camelo, 2003). Se evaluaron chiles de maduración verde durante seis cosechas (cosechas 1, 2, 3, 4, 5, y 7, en la fecha de la cosecha 6 no se presentaron chiles verdes para todos los tipos de suelo), para los chiles cosechados de los tres tipos de suelo (Figura 8A). La dureza disminuyó en función del número de la cosecha (con un ligero repunte en la cosecha 7). Se presentó un efecto significativo del número de cosecha ($P < 0.0001$) pero no del tipo de suelo ($P = 0.3524$) ni de su interacción (Tabla 4).

Igualmente que para los datos de dureza, para los datos de la fracturabilidad se evaluaron estadísticamente las seis cosechas (1, 2, 3, 4, 5, y 7) de los chiles verdes cosechados de los tres tipos de tierras. Los gráficos de medias se observan en la Figura 8 (B y C). En la Figura 8B se observa que la fracturabilidad se incrementó con el tiempo de la cosecha, desde valores de 12N en la primera cosecha (significativamente menor), hasta valores de 15.5N aproximadamente, en la quinta y séptima cosechas, éstas últimas sin diferencias significativas con las cosechas 2, 3 y 4. Por otro lado, la fracturabilidad se presentó mayor en los chiles cosechados de suelo *Ch'ich-lu'um* (17N aprox.) sobre el *K'áankab-lu'um* y el *Boox-lu'um* ($F_{Ch'ich} > F_{K'áankab} > F_{Boox}$), presentando un efecto significativo del número de cosecha (Tabla 4) así como de la interacción doble del número de cosecha*tipo de suelo ($P = 0.27$).

Tabla 4. Probabilidad de los efectos de cada una de las variables, número de cosecha y tipo de suelo sobre la dureza y fracturabilidad de chiles habaneros después del análisis estadístico (ANOVA)

	Dureza	Fracturabilidad
Efectos principales		
A: Cosecha	0.0001*	0.0001*
B: Suelo	0.3524	0.0027*
Interacciones dobles		
AxB	0.0874	0.2704

*valores de probabilidad significativos ($P < 0.05$)

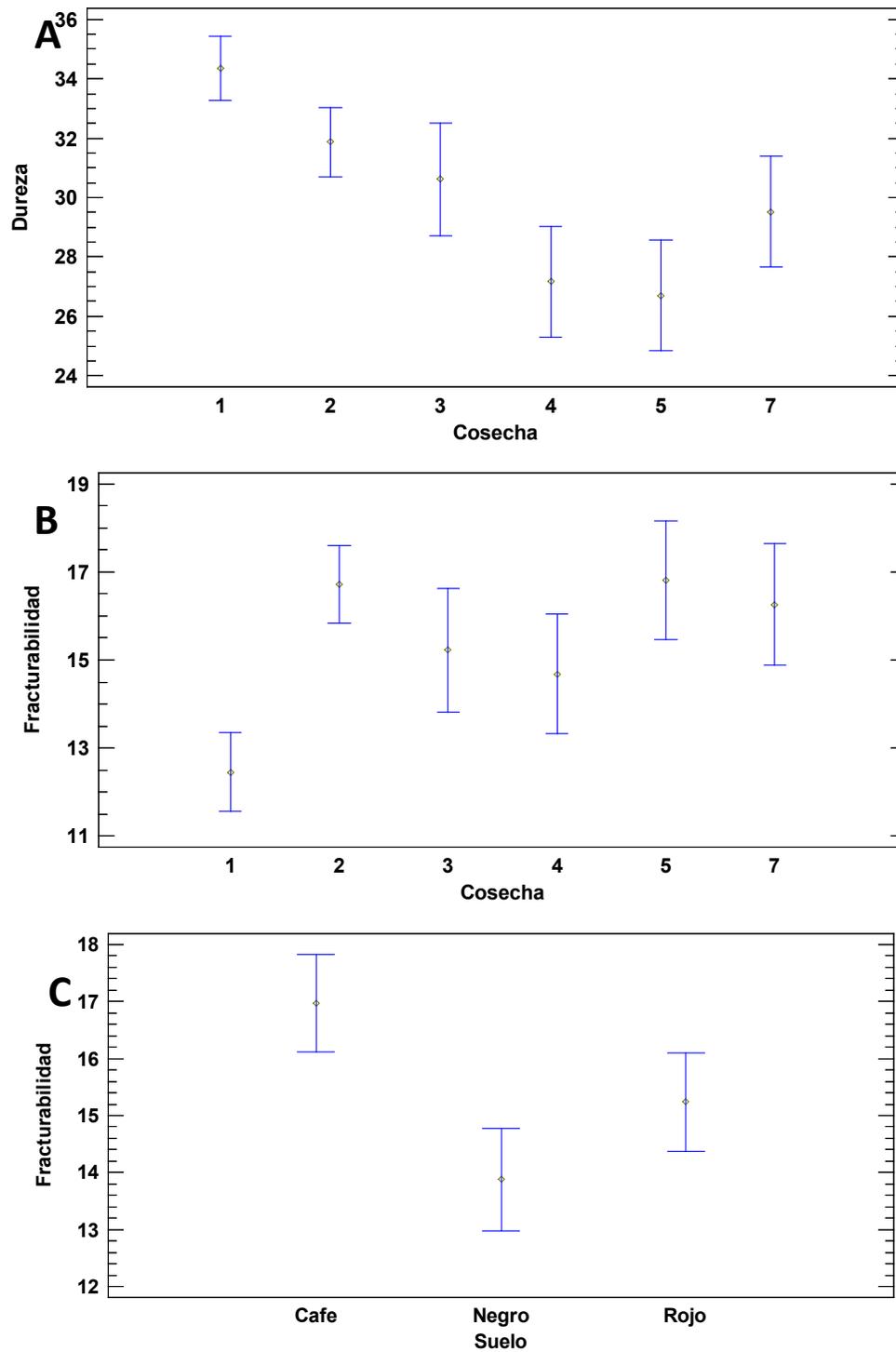


Figura 8. Gráficos de dureza y fracturabilidad medias de chile habanero en estado de maduración verde: A) dureza en función de la cosecha; y de la fracturabilidad en función de B) el número de cosecha y C) del tipo de suelo donde fueron cosechados los chiles (café o *Ch'ich-lu'um*; negro o *Boox-lu'um*; y rojo o *K'áankab-lu'um*).

3.2 Estudio pos-cosecha

Los análisis de perfil de textura de los dos cultivos evaluados se pueden observar en la Figura 9. Para el primer cultivo, el suelo *K'áankab-lu'um* desarrolló los chiles de mayor dureza. En suelo *K'áankab-lu'um* se obtuvo un máximo de dureza en el día 4 (81.58N) mientras que en el suelo *Boox-lu'um* se obtuvo en el fruto recién cosechado (día 0, 53.91N) (Tabla 5). Sin embargo, en ambos casos, la dureza se incrementó en el día 9, mismo en el cual el chile habanero presentó una piel arrugada, elástica y dura debido al inicio de la etapa de senescencia. En el día 10 en ambos tipos de suelo se presentó una caída en la dureza de chiles que representó el día en que los chiles ya presentaban un estado de podredumbre. La transpiración, deshidratación o pérdida de agua de los frutos en almacenamiento poscosecha constituye el principal problema que demerita la calidad de consumo. Se ha observado que cuando los frutos pierden entre 6 – 7% de su peso, la firmeza y la textura disminuye y por consecuencia la calidad y vida de anaquel (Coop *et al.*, 2011). En contraste, en suelo *K'áankab-lu'um* la fracturabilidad (F) presentó un incremento durante el tiempo de vida de anaquel hasta un máximo en el día 9 (F=17.05N) (Tabla 5) coincidente con los chiles de menor frescura y antes de la podredumbre; por otro lado, el suelo Boox presentó un máximo en el día 4 de almacenamiento (F=15.74N) correspondiente con chiles habaneros de la máxima dureza y frescura, los cuales no han iniciado su senescencia.

Por otro lado, la fuerza adhesiva (FAd), a pesar de tener valores bajos ($-1.545\text{N} < \text{FAd} < -0.004$), indica con mayor precisión el momento en que los chiles comienzan con su etapa de senescencia, ya que en ambos casos tanto en suelo *K'áankab-lu'um* como en suelo *Boox-lu'um* las menores fuerzas adhesivas ($< -1.3\text{N}$) correspondieron con las etapas de decaimiento de los chiles, es decir, cuando la piel se tornó elástica y arrugada. La fuerza adhesiva es la máxima fuerza medida que sensorialmente simula la fuerza para retirar con la lengua el alimento que se queda adherido a la boca.

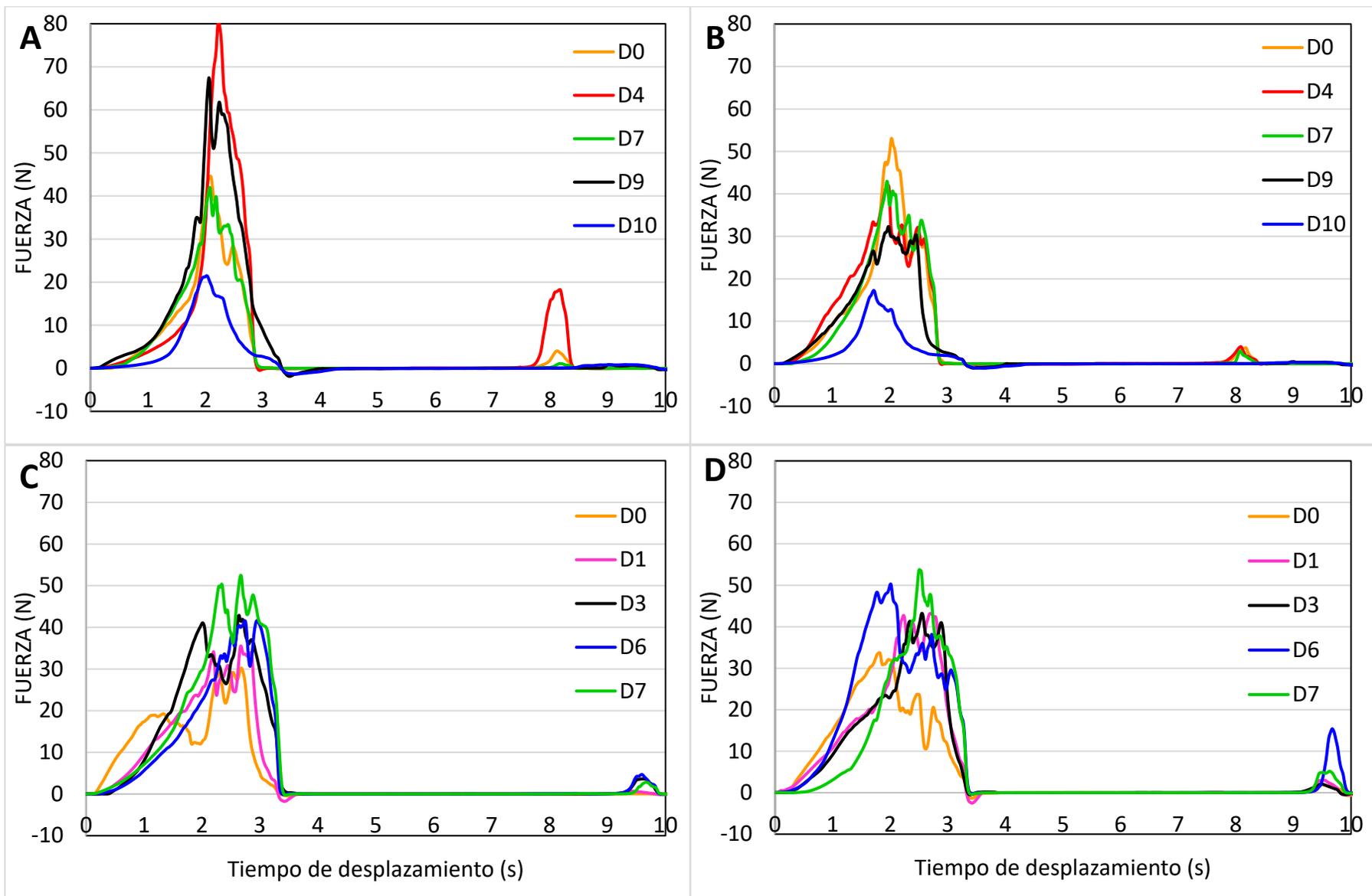


Figura 9. Análisis de perfiles de textura realizados en el primer cultivo a la octava cosecha (A, B), y del tercer cultivo (C, D) de la primera cosecha en chiles de estado de maduración naranjas cosechados de suelos: A) C) *K'áankab-lu'um* y B) D) *Boox-lu'um* en distintos días de almacenamiento (D= día; 0, 1, 3, 6, 7, son los días posteriores a la cosecha en donde se realizó el análisis)

Tabla 5. Parámetros de dureza (D), fragilidad (F) y fuerza adhesiva (FAd) de chiles habaneros recién cortados en estado de maduración naranja y cultivados en dos tipos de suelo en función del tiempo de almacenamiento (TA) en estudio poscosecha (valor \pm desviación estándar).

Tipo de suelo	Apariencia	TA (d)	Cultivo 1				Cultivo 3			
			D (N)	F (N)	FAd (N)	TA(d)	D (N)	F (N)	FAd (N)	
<i>K'áankab-lu'um</i>	Chile naranja	0	45.06 \pm 3.95	4.02 \pm 5.68	-0.028 \pm 0.008	0	32.97 \pm 2.40	14.89 \pm 8.98	-0.277 \pm 0.407	
	Chile naranja	2	43.31 \pm 21.88	6.66 \pm 0.82	-0.017 \pm 0.001	1	38.55 \pm 6.12	12.00 \pm 3.45	-1.792 \pm 1.202	
	Chile naranja	4	81.58 \pm 2.74	8.74 \pm 3.86	-0.519 \pm 0.035	2	52.07 \pm 14.09	8.82 \pm 2.12	-0.019 \pm 0.010	
	Piel comienza a arrugarse	7	44.68 \pm 2.40	8.28 \pm 11.70	-0.004 \pm 0.000	3	57.12 \pm 1.64	5.49 \pm 7.77	-0.093 \pm 0.116	
	Piel elástica y dura, inicia coloración negra	9	55.74 \pm 27.61	17.05 \pm 2.78	-1.322 \pm 0.895	6	47.21 \pm 7.79	15.71 \pm 1.29	-0.278 \pm 0.361	
	Podrido, grandes áreas color negro	10	25.97 \pm 15.81	7.39 \pm 2.71	-1.545 \pm 1.767	7	60.95 \pm 2.27	14.14 \pm 8.69	-0.443 \pm 0.359	
<i>Boox-lu'um</i>	Chile naranja	0	53.91 \pm 6.30	5.65 \pm 0.63	-0.170 \pm 0.234	0	42.72 \pm 2.15	10.08 \pm 14.25	-1.350 \pm 1.925	
	Chile naranja	2	37.76 \pm 1.07	0 \pm 0.000	-0.007 \pm 0.003	1	51.18 \pm 11.68	7.99 \pm 0.50	-2.541 \pm 0.770	
	Chile naranja	4	43.45 \pm 4.19	15.74 \pm 0.34	-0.347 \pm 0.004	2	55.93 \pm 3.31	9.76 \pm 13.80	-0.042 \pm 0.035	
	Piel comienza a arrugarse	7	45.77 \pm 2.14	9.42 \pm 13.32	-0.010 \pm 0.004	3	47.61 \pm 15.96	11.78 \pm 7.04	-0.761 \pm 1.056	
	Piel elástica y dura e inicia coloración negra	9	51.02 \pm 15.33	9.06 \pm 1.81	-1.589 \pm 0.298	6	53.82 \pm 8.29	20.43 \pm 1.33	-0.184 \pm 0.217	
	Podrido, grandes áreas color negro	10	21.79 \pm 21.97	6.27 \pm 1.24	-1.397 \pm 2.455	7	60.93 \pm 18.86	6.55 \pm 9.27	-0.381 \pm 0.088	

En el caso del tercer cultivo, la dureza más alta se presentó en el suelo *K'áankab-lu'um* y el suelo *Boox-lu'um*, en los chiles después de 7 días de almacenamiento ($D= 60.95$ y 60.93 N, respectivamente), estos chiles alcanzaron una dureza mayor que los chiles más duros recién cosechados (sección anterior). Por otro lado, una mayor fracturabilidad se encontró en chiles cosechados en el sexto día ($F_{BO}=20.43$; $F_{KA}=15.71$ N) para ambos tipos de suelo. Para el caso de los chiles de la tercera cosecha, la menor fuerza adhesiva se observó en chiles con alta frescura de 2 días de almacenamiento. Sin embargo, las mayores fuerzas adhesivas se encontraron en chiles también con alta frescura y de 4 días de almacenamiento, por lo que no es posible concluir al respecto de su posible correlación con la frescura del chile habanero.

Estadísticamente, sólo la interacción Número de cultivo x Tipo de suelo fue significativa ($P<0.05$) (Tabla 6). La fracturabilidad y la fuerza adhesiva de chiles habaneros no presentaron efectos significativos de alguna de las variables estudiadas. No obstante, como se ha mencionado, la dureza representa el principal parámetro de textura para frutos, ya que muestra la frescura de éstos.

Tabla 6. Probabilidad de los efectos de cada una de las variables de número de cosecha, tipo de suelo y grado de madurez sobre la fracturabilidad y fuerza adhesiva de chiles habaneros después del análisis estadístico (ANOVA)

Factor	Dureza	Fracturabilidad	Fuerza Adhesiva
Efectos principales			
A: Número de cultivo	0.034	0.855	0.508
B: Tipo de suelo	0.597	0.385	0.155
C: Tiempo de almacén	0.220	0.642	0.439
Interacciones binarias			
AxB	0.006*	0.554	0.675
AxC	0.270	0.874	0.398
BxC	0.989	0.468	0.561
Interacción ternaria			
AxBxC	0.895	0.911	0.504

*valores de probabilidad significativos ($P<0.05$)

IV. Conclusiones

Para el estudio transcosecha, se concluye que la dureza se vió afectada por el número de cosecha (mayor en etapas iniciales) y por el estado de maduración (mayor en chiles naranjas), sin un efecto del tipo de suelo; y con una interacción significativa (madurez x cosecha). En donde la mayor dureza se presentó en chiles naranjas y en la cosecha 4. Por lo que este factor es crítico para la medición de frescura de chiles habaneros.

Durante el estudio poscosecha se alcanzó una dureza de hasta de 80N en chiles almacenados a temperatura ambiente mucho mayor (40N) a la alcanzada por chiles habaneros en estado de maduración naranja recién cosechados.

El número de cultivo fue significativo como parte de una interacción con el tipo de suelo en la dureza pero no presentó diferencias en la fracturabilidad o fuerza adhesiva de chiles habaneros en estudio poscosecha.

Los análisis mediante diagramas de perfiles de textura presentaron información importante acerca del comportamiento del alimento. En el caso de los chiles se observó la fuerza adhesiva como posible parámetro para cuantificar la frescura de chiles, debido a que la dureza se ve incrementada en etapas de senescencia del chile debido a la piel deshidratada, elástica y dura.

Es conveniente continuar con estudios instrumentales y sensoriales para definir el estado de maduración idóneo para la cosecha y para la venta del chile habanero.

V. Referencias

- Agustí, M. (2004). Fruticultura. Ediciones Mundi-Prensa, Madrid. 493 p.
- Bautista-Zúñiga, F., Jiménez-Osornio, J., Navarro-Alberto, J., Manu, A., y Lozano, R. (2003). Microrelieve y color del suelo como propiedades de diagnóstico en Leptosoles cársticos. *Terra* 21, 1-11.
- Bourne, M.C. (1978). Texture Profile Analysis. *Food Technology*, 32(1), 62-66.
- Chen, L. & Opara, U.L. (2013). Approaches to analysis and modeling texture in fresh and processed foods- A review. *Journal of Food Engineering*, 119(3), 497-507.
- Coop, F.Y., Corona, A.I., Rodríguez, R., y Herrera, F.J. (2011). Conservación de la calidad poscosecha en chile habanero (*Capsicum chinense* J.) mediante atmosferas modificadas. *Revista Iberoamericana de tecnología poscosecha*, 12(1), 80-86.
- Fátima Medina-Lara, Ramón Souza-Perera, and Manuel Martínez-Estévez. (2019). Red and Brown Soils Increase the Development and Content of Nutrients in Habanero Pepper Subjected to Irrigation Water with High Electrical Conductivity. *Hortscience*, 54(11), 2039–2049.
- Fideicomiso de Riesgo Compartido. (2017). Chile Habanero, con Denominación de Origen. Consulta: 24 de Marzo, 2019, Disponible: <https://www.gob.mx/firco/articulos/chile-habanero-con-denominacion-de-origen?idiom=es>
- Gómez-Rincón, E., Reyes-Vazquez, N.C., Ramírez-Sucre, M.O., Rodríguez-Buenfil, I.M. (2018). Actividad antioxidante y su correlación con parámetros colorimétricos de *Capsicum chinense* jacq secado por dos métodos. *Revista del Centro de Graduados del Instituto Tecnológico de Mérida*, 33(73), 38-42.
- Konopacka, D. y Plochanski, W.J. (2004). Effect of storage conditions on the relationship between apple firmness and texture acceptability. *Postharvest Biology and Technology*, 32(2), 205-211.
- López-Camelo, A.F. (2003). Manual Para la Preparación y Venta de Frutas y Hortalizas. Del campo al mercado. Boletín de servicios agrícolas de la FAO 151. Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación. Roma, 2003. Disponible en: <http://www.fao.org/3/Y4893S/y4893s04.htm>
- Marcial-Salvador, L. (2016). Crecimiento y producción de chile habanero (*Capsicum chinense* jacq.) bajo tres fechas de siembra en la Comarca Lagunera. *Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro*. Subdirección de Posgrado, Torreón Coahuila, México. Disponible en: <http://repositorio.uaaan.mx:8080/xmlui/bitstream/handle/123456789/42383/TESIS-CHILE%20HABANERO-LUCIA%20MARCIAL%20SALVADOR%20.pdf?sequence=1&isAllowed=y> Consultado: Febrero 2019

- Morozova, K., Rodríguez-Buenfil, I., López-Domínguez, C., Ramírez-Sucre, M., Ballabio, D., & Scampicchio M. (2019). Capsaicinoids in Chili Habanero by Flow Injection with Coulometric Array Detection. *Electroanalysis*, 31, 1 –8
- Morrison N.L. Millera P.C.H., Orsona J.H & Froud-Williams R.J. (2010). The adoption of non-inversion tillage systems in the United Kingdom and the agronomic impact on soil, crops and the environment—A review. *Soil and Tillage Research*, 108(1-2), 1-15.
- Norma Oficial Mexicana (NOM) 189-SCFI-2017. (2017). Chile Habanero de la Península de Yucatán (*Capsicum chinense* Jacq.) Especificaciones y Métodos de Prueba.
- Olivera, I. M. (2004). Efecto del tratamiento térmico sobre la textura de la Murta (*Ugni molinae* Turcz) definida como resistencia a la ruptura. Universidad Austral de Chile, Valdivia, Chile.
- Oney-Montalvo J., López-Domínguez C., Zamacona-Ruiz M., Gómez-Rincón E., Ramírez-Sucre M., & Rodríguez-Buenfil I. (2019). Metabolites present in *Capsicum chinense* of two ripening stages cultivated in different soil types in Yucatan, Mexico. *Bionatura*, CS(01), 09.
- Pérez-Almeida, I, y Carpita N.C. (2006). Las β -galactosidasas y la dinámica de la pared celular. *Interciencia*, 31(7), 476-483.
- PRODAR. (2012). Poscosecha y servicios de apoyo a la comercialización. Obtenido de (programa de desarrollo de la agricultura rural en América Latina y el Caribe).
- Rahman, S.M. (2007). *Handbook of Food Preservation* (2ª ed.). New York, USA: CRC PRESS.
- Ramírez, M.M., Vázquez, G.E., Arcos, C.G., y Mata, V.H. (2009). Jaguar, Una nueva opción para los productores de Chile Habanero. Sexta Convención Mundial del Chile. Memorias. 25 al 27 de octubre de 2009 Mérida, Yucatán, México, 23-28.
- Ramírez-Meraz, M., Arcos-Cavazos, G., Mata-Vázquez, H., y Vázquez-García, E. (2012). Jaguar, variedad de Chile Habanero para México. Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias, Tamaulipas, México, 5–12.
- Ramírez, M. M.; Arcos C. G.; Mata V. H.; Vázquez G. E y Méndez, A. R. (2015). Variedades e híbridos de Chile y su manejo para el sur de Tamaulipas. *Campo Experimental Las Huastecas*. CIRNE-INIFAP. Folleto Técnico Núm. MX-0-310701-11-03-14-09-40. 47 p.
- Ramírez-Sucre MO, Baeza-Melchor T, Echevarría I & Rodríguez-Buenfil IM. (2018). Quality of habanero chili by texture measurements: Fresh-cut and post-harvest study. *Journal of Food, Nutrition and Population Health*. 2:49-50. Proceedings of 2nd Euroscicon Conference on Food Technology, 14-16 de mayo, Rome, Italy. ISSN 2577-0586. <https://doi.org/10.21767/2577-0586-C1-00>.
- SAGARPA. (2017). ¿Qué es la poscosecha y por qué es importante? Consultado: Marzo 2018 <https://www.gob.mx/sagarpa>
- Santamaría, B.F. y Zavala, L.M. J. (2012). Índices de madurez objetivos y no destructivos de Chile Habanero 'Mayapán' (*Capsicum chinense* Jacq.). En: Martínez-Solís, J.; García-Mateos, M.R.; Magaña-Lira, N. (eds.). Memoria del XIV Congreso Nacional de Ciencias Agronómicas. 25 al 27 de abril de 2012. Chapingo, Estado de México, México. pp: 567-568
- Szczesniak, A.S. (1963). Classification of Textural Characteristics. *Journal of Food Science*, 60(6), 1-7.
- Torres, G. (2015). Análisis del Perfil de Textura en Frutas, Productos Cárnicos y Quesos. *Revista ReCiTeIA*, 14(2), 63-75.
- Tut, F.J., Santamaría, F., Zavala, M.J., y Berny Mier, J.C. (2013). Características de materiales mejorados de Chile Habanero para la Península de Yucatán. Centro de Investigación Regional Sureste, Campo Experimental Mocochoá. Folleto Técnico No. 13.
- Villa, C. M., Catalán, V. E., Inzunza, I. M., Román L. A., y Macías R. H. (2010). Población de plantas y manejo de la solución nutritiva del Chile Habanero (*Capsicum chinense* Jacq.) en invernadero. En: J. J. Martínez, M. Vázquez, R. Santana y A. Martínez (Eds). XXII Semana Internacional de Agronomía FAZUJED (pp. 569-573). Talleres de Carmona Impresores S. A. de C. V

Zamacona-Ruiz, M., Ramírez-Sucre, M-O., Rodríguez-Buenfil, I.M. (2018). Comparación de dos métodos de extracción y secado para la cuantificación de carotenoides en chile habanero. Revista del Centro de Graduados del Instituto Tecnológico de Mérida, 33, 65-68.

CAPÍTULO 13

Análisis integrativo del color y metabolómica dirigida de metabolitos asociados al chile habanero (*Capsicum chinense* Jacq.)

Integrative Color analysis and directed metabolomics of pigments associated with habanero pepper (*Capsicum chinense* JACQ.)

Reyes-Vázquez, Nohemí C.,¹ Esquivel-Hernández, Diego A.,² Ramírez-Sucre, Manuel O.,³ Morales-Landa, Juan L.¹ y Rodríguez-Buenfil, Ingrid M.^{3*}

¹ Centro de Investigación y Asistencia en Tecnología y Diseño del Estado de Jalisco. Subsede Noreste. Vía de la Innovación 404. Autopista Mty-Aeropuerto Km 10, Parque PIIT. C.P. 66629. Apodaca, Nuevo León, México.

² Departamento de Microbiología Molecular, Instituto de Biotecnología, Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), Ave. Universidad 2001, Cuernavaca, Morelos, 62210, México.

³ Centro de Investigación y Asistencia en Tecnología y Diseño del Estado de Jalisco. Subsede Sureste. Tablaje Catastral 31264 Km 5.5 Carr, Sierra Papacal-Chuburná puerto. Parque Científico Tecnológico de Yucatán. CP 97302 Mérida, Yucatán, México *autor de correspondencia: irodriguez@ciatej.mx

Resumen

El chile habanero se caracteriza por su picor, sabor, aroma y color; siendo este último un atributo de calidad importante en el posicionamiento del mercado y preferencia del consumidor. Adicionalmente, los cambios de color característicos en las distintas fases de maduración del chile se han asociado a su composición nutricional, íntimamente relacionada con diversos compuestos y pigmentos con actividad antioxidante. Por lo que en este capítulo se planteó evaluar las diferencias de los metabolitos como carotenoides, (β -caroteno y luteína), polifenoles (ácido gálico, ácido clorogénico, catequina, rutina, quercetina, luteolina y kampferol), capsaicinoides (ácido cumárico, ácido cinámico capsaicina y dihidrocapsaicina) y vitamina C presentes en el chile habanero acorde a tres diferentes grados de madurez definido por su color, (verde, verde-anaranjado, o anaranjado) cultivado en tres suelos distintos de la península de Yucatán. Este análisis se realizó mediante metabolómica dirigida utilizando análisis estadístico de correlación multivariable con el software MetaboAnalyst 2.0. Los resultados indicaron que el parámetro Hue fue el que mejor describió el color con la mayoría de los metabolitos evaluados, especialmente para β -caroteno y luteína en frutos naranjas de chile habanero variedad Jaguar; sin correlación significativa ($P < 0.05$) con los tres tipos de suelo: Ch'ich-'lu'um (TC- tierra café), K'áankab-lu'um (TR-tierra roja) o Box-lu'um (TN-tierra negra).

Palabras clave: color, metabolómica dirigida, luteína, β caroteno, vitamina C, capsaicina

Abstract

Habanero peppers are characterized by its spiciness, flavor, aroma and color; the latter being an important quality attribute in market positioning and consumer preference. Additionally, the characteristic color changes in the different maturation phases of chili have been associated with its nutritional composition, closely related to various compounds and

pigments with antioxidant activity. So in this chapter it was proposed to evaluate the differences in metabolites such as carotenoids (β -carotene and lutein), polyphenols (gallic acid, chlorogenic acid, catechin, rutin, quercetin, luteolin and kampferol), capsaicinoids (cumaric acid, acid cinnamic capsaicin and dihydrocapsaicin) and vitamin C present in habanero chili according to three different degrees of maturity defined by its color, (green, orange-green, or orange) grown in three different soils of the Yucatan Peninsula. This analysis was performed by directed metabolomics using multivariable statistical analysis of correlation with MetaboAnalyst 2.0 software. The results indicated that the Hue parameter was the one that best described the color with the majority of the metabolites evaluated, especially for β -carotene and lutein in orange fruits of Jaguar Habanero chili; without significant correlation ($P < 0.05$) with the three types of soil: Ch'ich-'lu'um (TC-brown earth), K'áankab-lu'um (TR-red earth) or Box-lu'um (TN-black earth).

Keywords: color, targeted metabolomics, lutein, β carotene, vitamin C, capsaicin

I. Introducción

1.1 Importancia económica del chile habanero

En México el consumo de chile en todas sus variedades y en especial *Capsicum chinense*, se consume desde tiempos inmemorables como condimento en la cocina tradicional maya, y hasta nuestros días forma parte de la dieta diaria por sus inigualables atributos sensoriales como la forma, tamaño, sabor, pungencia e inigualable olor que es conferido por algunos de compuestos volátiles (Sosa-Moguel et al., 2018); así como a exquisitos colores naturales que van desde el verde por la presencia de clorofila en su estado inmaduro hasta los colores amarillo, naranja intenso y rojo debido a la presencia de pigmentos como los carotenoides y antocianinas en su estado maduro; sin embargo, existen variedades mejoradas de color blanco y morado (Santana-Buzzy et al., 2018). En Yucatán *Capsicum chinense* es conocido comúnmente como “Chile Habanero”, y se encuentra ampliamente distribuido en toda la Península, donde se producen frutos de diversas variedades, formas, colores y tamaños. Como cultivo, tiene gran importancia económica para los productores de hortalizas; por citar un ejemplo, en el año agrícola 2012, la superficie cosechada a nivel nacional fue de 913.84 hectáreas con una producción de 9,073 toneladas. El 93% de la superficie cosechada y 92.3% de la producción nacional se concentró en el Sureste principalmente en los estados de Veracruz, Chiapas, Tabasco, Yucatán, Quintana Roo y Campeche, donde Yucatán ocupó el primer lugar de producción durante el periodo 2000-2012 (SIAP 2019)

El cultivo, producción y comercialización de chile en México tiene gran importancia social y económica debido a que es un producto preferente de exportación. De acuerdo con el Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera (SIAP), en el año 2016 se produjeron alrededor de 2,737,028 toneladas de chile fresco, de las cuales 949,662 toneladas fueron exportadas como chile verde, con una ganancia superior de US\$ 1,106,094,000 (figura 1). Año con año aumenta la tendencia productiva y comercial para consumo nacional y de exportación, sin mencionar la producción de chile que se comercializa en seco y/o transformado (FAOSTAT, 2019). Por otra parte, el cultivo de chile habanero en nuestro país se produce principalmente en los estados de Yucatán, Campeche y Quintana Roo, mismos que ya cuentan con denominación de origen o indicación geográfica otorgado por la (NOM-189-SCFI-2017), cuyas cualidades y/o características se dan esencialmente en este lugar. Sin

embargo, estados como Tabasco, Chiapas, Oaxaca, Veracruz, Puebla, Tamaulipas, Nuevo León, Coahuila, San Luis Potosí, Aguascalientes, Guanajuato, Jalisco Michoacán, Zacatecas, Nayarit, Sinaloa, Sonora y Baja California también lo cultivan, sin considerar las características sensoriales y contenido de capsaicina que lo describe la norma oficial en México; aun así, con esta producción no abastece las necesidades de los mercados internacionales. Por tanto, se sugiere contar con una estrategia que permita fortalecer la cadena de valor del chile habanero en la Península de Yucatán, a través del establecimiento de su sistema intensivo de cultivo a cielo abierto y/o cultivo protegido con inocuidad y trazabilidad agrícola. Con ello, la producción de chile habanero en México estará íntimamente relacionada con la demanda comercial de consumo local, regional, nacional y de exportación; gracias a su alta popularidad en consumo de salsas y otros productos que contienen chile como ingrediente principal, así como al crecimiento de la población mexicana y comunidad latina en países como Estados Unidos y Canadá, y a la diversificación de usos potenciales en función de sus contenidos de capsaicina (Spicer y Almirall, 2005).

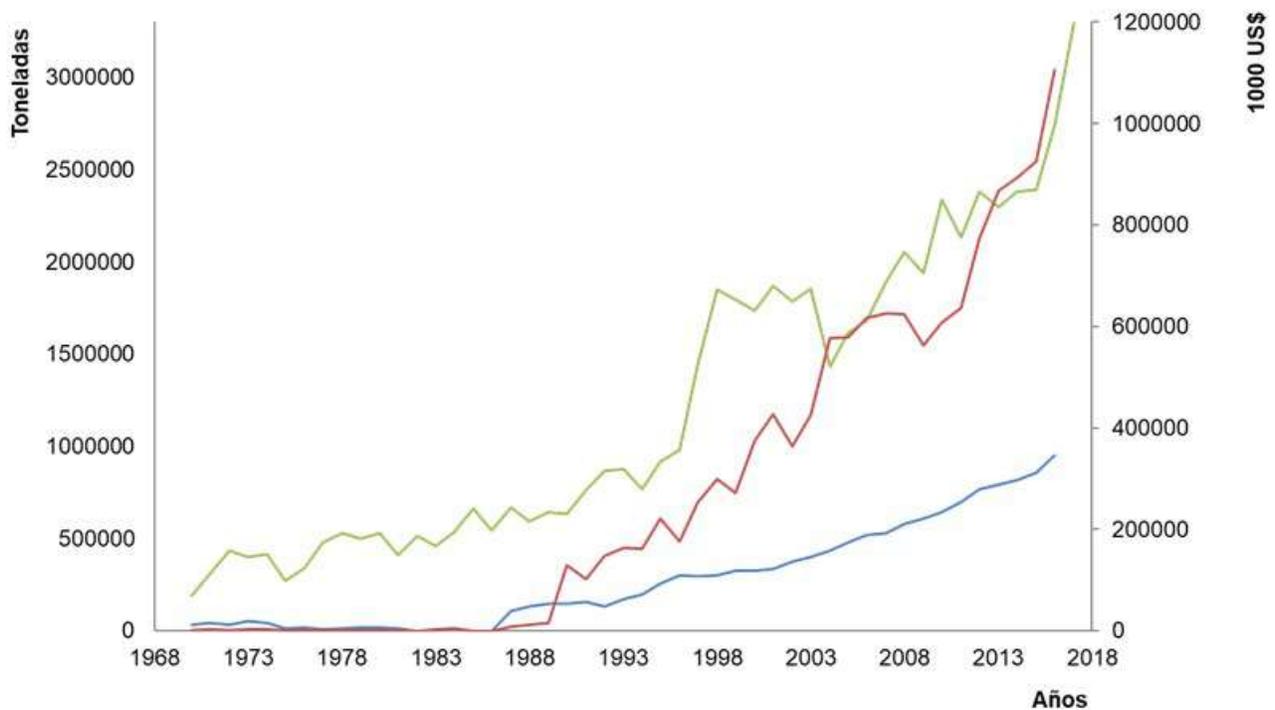


Figura 1. Producción nacional de chile verde entre los años 1970-2016. Cantidad de toneladas producidas a nivel nacional; Cantidad de toneladas exportadas; Miles de dólares generados (FAOSTAT, 2019).

La Península de Yucatán cuentan con excelente ubicación geográfica, terrenos propicios, clima favorable, agua disponible; mano de obra calificada, y una infraestructura logística propicia para producir, cosechar y comercializar en los mercados internacionales, principalmente USA, Canadá, así como con las 46 naciones con las que se tienen acuerdos comerciales, por lo que posicionan a México como uno de los países más abiertos al comercio internacional y a la Península de Yucatán un destino atractivo para la inversión en el sector agroalimentario (Tucuch-Haas et al. 2012). Dado que el mercado del habanero crece en los próximos años en la Península de Yucatán, diversas

empresas con inversión nacional y extranjera han puesto en marcha decenas de hectáreas destinadas a la producción de esta variedad de chile, colocando a México como una potencia en términos de producción y exportación de chiles para el mercado global; desafortunadamente su cultivo y exportación son relativamente insignificantes, sólo representan el 1% de la producción de chile, en comparación con otros chiles como el jalapeño, serrano, poblano y pimientos; que, por lo que se considera una oportunidad de inversión en el sector agroalimentario.

En el modelo de la ventaja comparativa del comercio internacional, indica que los países tienden a especializarse en la producción y exportación de bienes que producen con un costo relativamente más bajo respecto al resto del mundo (Ibarra-Zavala, 2016). En el caso del chile habanero esto no ha sido posible, aunque la denominación de origen ha permitido estandarizar los atributos de calidad y tecnificación de las zonas de cultivo, aun no es competitivo en términos de precio. Una estrategia para incrementar la producción de chile habanero, es promover fuentes de financiamiento especializado con los intereses de la política pública gubernamental y/o privadas a los productores del sector rural que incluyan el acompañamiento técnico y transferencia tecnológica de las universidades y centros de investigación nacionales para producir en cantidad, calidad, inocuidad y trazabilidad.

1.2 Importancia del color como factor de calidad y compra del chile habanero

En la actualidad la industria alimentaria utiliza una amplia gama de aditivos alimentarios que confieren atributos sensoriales y de conservación en los alimentos (Badui-Dergal, 2006), mismos que son permitidos y/o regulados por organismos internacionales como la Organización de las Naciones Unidas para la alimentación y la Agricultura (FAO), la Administración de Drogas y Alimentos de los Estados Unidos (FDA) y la Comunidad Económica Europea (CEE); sin embargo, existe una marcada tendencia hacia el consumo de productos más naturales en relación con los aditivos artificiales (Carocho et al., 2015). Por su parte, los colorantes naturales son considerados como sustancias o mezclas de ellas capaces de conferir o intensificar una cualidad en la apariencia de color en los alimentos. La tendencia actual para el desarrollo de colores o ingredientes naturales se sustenta en las demandas de un consumidor más informado, exigente y preocupado por su salud, manifestado en la etiqueta nutrimental en cada producto. Es por ello que los procesadores buscan la sustitución de los colorantes sintéticos por colorantes naturales para llegar a mercados como alternativa de alimentos más sanos y más atractivos para el consumidor de hoy (Spence 2019; Carocho et al., 2015).

La industria de alimentos incluye colorantes naturales, con la finalidad de intensificar el color, olor, sabor y en ocasiones el incremento en la pungencia, pues se ha demostrado con análisis sensoriales, que un color adecuado sugiere frescura y un factor decisivo para aceptar o rechazar un alimento (Spence, 2019). Una alternativa sencilla para implementar es con el uso de materias primas naturales a base de vegetales con excelentes potenciales para dar color que se desee a los alimentos (Duangmal et al., 2008). El sector de bebidas es el más demandado seguidos de salsas, sazonzadores productos horneados y snacks. Dentro de los colorantes naturales más usados en la industria de alimentos se encuentra la cúrcuma, riboflavina, amarillo de quinoleína, amarillo naranja, cochinilla, carmín de índigo, clorofila, caramelo, carbón vegetal, carotenoides, rojo de remolacha, pimentón, xantofilas, antocianinas, entre otros (Spence 2019; Carocho et al., 2015).

Hoy por hoy, una de las características innatas del chile habanero criollo, así como la generación de variedades mejoradas y variedades híbridas (cuadro 1), brindan colores interesantes como el amarillo, naranja, rojo e incluso el morado (Ramírez et al., 2018; Santana-Buzzy et al., 2018). Este es un ejemplo de algunas de las principales variedades que presentan derechos de obtentor otorgado por el Servicio Nacional de Inspección y Certificación de Semillas y están disponibles por los productores según sea la demanda de sus compromisos comerciales. Con este fin, la interesante gama de colores producto de la generación de nuevas variedades confiere interesantes atributos sensoriales que pueden ser aprovechados en la industria alimentaria para la elaboración, creación y desarrollo de nuevos productos a base de purés y salsas que representan una gran oportunidad de negocio de la industria alimentaria como insumo importante en sus formulaciones.

Cuadro 1. Registro de variedades mejoradas e híbridas más comercializadas a nivel nacional por sus atributos de calidad sensorial.

Variedad	Característica	Registro/Referencia
<p>Mayapán</p> 	<p>Variedad que produce frutos de color verde esmeralda y de color naranja cuando madura. Para consumo en fresco y para la industria, con un rendimiento de 30 ton Ha⁻¹ a campo abierto.</p>	<p>CHL-009-170908 (Tut-Pech et al., 2013)</p>
<p>Jaguar</p> 	<p>Es la variedad comercial más distribuida y cultivada a nivel nacional (Ramírez et al., 2012). Da frutos de color verde en estado inmaduro y naranja intenso cuando madura, con rendimientos de 18.3 a 36.0 ton Ha⁻¹ a campo abierto.</p>	<p>CHL-008-101109 (Tut-Pech et al., 2013)</p>
<p>Calakmul</p> 	<p>Variedad mejorada de chile habanero rojo. Con un rendimiento de 5 ton Ha⁻¹ campo abierto y de 25 a 29 ton Ha⁻¹ en casa sombra.</p>	<p>CHL-022-220313 (Tut-Pech et al., 2013)</p>
<p>H-CHYUC-HN05</p> 	<p>Híbrido de chile habanero naranja con elevada vida de anaquel, adecuados tanto para el mercado de consumo fresco como para procesado. El rendimiento supera las 33 ton Ha⁻¹ a campo abierto.</p>	<p>(Tut-Pech et al., 2013)</p>
<p>H-CHYUC-HR11</p> 	<p>Híbrido de chile habanero con frutos de color verde esmeralda los cuales maduran en color rojo, con un rendimiento promedio de 29 ton Ha⁻¹ a campo abierto con sistema de riego por goteo y fertirrigación.</p>	<p>(Tut-Pech et al., 2013)</p>

Mayan Ba'alché



Variedad de habanero que produce frutos en color naranja en estado maduro, con 554,000 SHU de pungencia, con un rendimiento de 4.4 Kilos por planta

CHL-012-291110
(Santana-Buzzy et al., 2018)

Mayan Kauil



Variedad de color verde en estado inmaduro y naranja cuando está maduro, con una pungencia de 603,000 SHU y un rendimiento de 5.1 kilos producidos por planta.

CHL-017-291110
(Santana-Buzzy et al., 2018)

Mayan Ixchel



Chiles habaneros de color naranja en estado maduro con 528,000 SHU de pungencia y rendimiento de 5.2 kilos por planta.

CHL-016-291110
(Santana-Buzzy et al., 2018)

Mayan Ek



Variedad que en estado inmaduro presenta un color verde y en estado maduro un color naranja, con una pungencia de 627,000 SHU y una producción de 4.8 kilos por planta.

CHL-015-291110
(Santana-Buzzy et al., 2018)

Mayan Kisin



Variedad de chile habanero que en estado inmaduro es verde tenue y en estado de maduración presenta una coloración de rojo con una considerable pungencia de 670,000 SHU y un rendimiento de 3.7 kilos por planta

CHL-019-291110
(Santana-Buzzy et al., 2018)

Mayan Chac



Variedad de chile habanero rojo en estado maduro y verde tenue en estado inmaduro, con una pungencia de 405,000 SHU con un rendimiento de 4.9 kilos por planta.

CHL-013-291110
(Santana-Buzzy et al., 2018)

Mayan Chan



Variedad que en estado inmaduro presenta un color verde y en estado maduro un color rojo, una pungencia de 580,000 SHU y un rendimiento de 5.7 kilos por planta.

CHL-014-291110
(Santana-Buzzy et al., 2018)

Mayan K'iin



Variedad de chile habanero que en estado inmaduro presenta un color verde y cuando el fruto está maduro un color amarillo. Su principal potencial es el industrial por su elevada pungencia, superior a 946,000 SHU y rendimiento de 5.7 kilos por planta.

CHL-018-291110 CE
(Santana-Buzzy et al., 2018)

Con base al sistema de información comercial (<http://www.economia-snci.gob.mx/>) emitido por la secretaría de economía en México, las salsas a base de chile, salsas preparadas; condimentos y sazonzadores, para el año 2018 ascendieron los 383,319,663 de dólares, con una producción de 176,977,896 kilos de salsa, siendo Estados Unidos de Norteamérica el principal consumidor con un 71 % de exportaciones en este año. Se estima que el mercado de salsas incrementa año con año por la presencia de la comunidad latina en los hogares norteamericanos.

En la actualidad se han implementado grandes plantas de alimentos y agroindustriales con procesos automatizados, que producen el volumen necesario para satisfacer la demanda interna del país y la introducción de nuevos productos a nivel internacional; la industria de salsas y guisos preparados no es la excepción, aun cuando tienen un origen relativamente reciente, en virtud de que en sus inicios la salsa sólo se producía a nivel casero/artesanal, hoy en día esta industria se ha incrementado considerablemente desde formulaciones básicas a base de chile molido, sal común, vinagre y conservadores, hasta mezclas complejas en donde se incluye mezclas de chiles, condimentos, especias, frutas, espesantes, productos fermentados, vinagres y conservadores, que atienden diversos mercados, desde insumos para la elaboración de otras formulaciones, restaurantes, centros comerciales hasta el consumidor más exigentes en el mercado gourmet. Por lo que el chile habanero por sus cualidades de color, presenta un potencial productivo como estrategia para el fortalecimiento de la cadena de valor del Habanero en la Península de Yucatán, al establecer su sistema de transformación alimentario.

1.3 Métodos de medición de color

Los principales atributos de calidad en vegetales son de carácter extrínseco e intrínseco, entre los primeros destacan el método de producción, país de origen y precio; mientras los segundos se enfocan principalmente a forma, textura y color (Jiménez-Guerrero et al. 2012). En el caso de los chiles frescos, entre las principales características de calidad intrínseca destacan contenido de sólidos solubles, pH, acidez y color, en donde este último afecta directamente la preferencia del consumidor (Simonne et al. 2019). Por lo anterior, cobra especial relevancia la medición del color de chile, el cual puede ser llevado a cabo instrumentalmente (objetivamente) o sensorialmente (subjetivamente).

Instrumentalmente, las escalas de color desarrolladas han tratado de simular la respuesta del ojo humano a los tres colores básicos rojo, verde y azul; de aquí que se nombren como métodos triestímulos, siendo las más utilizadas en alimentos la Lovibond-Scofield YR, CIE XYZ, CIE $L^* a^* b^*$ y Judd-Hunter Lab (Setser 1984). De estas tres escalas la Hunter $L^* a^* b^*$ y la (Commission Internationale de l'Eclairage) CIE $L^* a^* b^*$ proporcionan mediciones de color más uniformes con relación a las diferencias en la percepción del color por el ojo humano (Pathare and Opara 2013). La escala CIE $L^* a^* b^*$ se basa en un espacio de color que comprende tres coordenadas en donde L^* indica luminosidad, y toma valores de blanco con 100 hasta negro con cero; mientras a^* toma valores positivos para rojo y negativos para verde, mientras b^* toma valores positivos para amarillo y negativos para azul. Existen algunas mediciones utilizadas ampliamente para cuantificar el color, entre ellas se mencionan el parámetro Chroma (1) y Hue (2) los cuales definen la intensidad, y la tonalidad

del color respectivamente percibidos por el humano, y se definen en las siguientes ecuaciones:

$$C = \sqrt{a^{*2} + b^{*2}} \quad \text{_____} \quad (1)$$

$$H = \tan^{-1} \frac{b^*}{a^*} \quad \text{_____} \quad (2)$$

Donde a^* y b^* son las coordenadas de color en cada caso respectivamente.

La medición del color instrumental, tiene la ventaja de ser una prueba no destructiva que puede ser determinada mediante el uso de espectrofotómetros y colorímetros. Los primeros proporcionan a diferentes longitudes de onda un espectro de análisis de la reflectancia y/o transmitancia en alimentos, y son usados comúnmente en las áreas de investigación y desarrollo; mientras los segundos proporcionan mediciones directas triestímulos como L^* a^* b^* que correlacionan con el ojo humano, y son utilizados frecuentemente tanto para investigación como en análisis de rutina (Barrett et al., 2010).

Por otra parte, sensorialmente la evaluación del color de un alimento implica la estimación de sus características por medio de los sentidos. En este tipo de pruebas el color del alimento es comparado bajo condiciones controladas de humedad, temperatura e iluminación con referencias o estándares. En estas pruebas es necesario contar con un panel seleccionado y entrenado en el producto a evaluar, espacios físicos para el desarrollo de pruebas y la selección de la prueba adecuada (Pathare y Opara, 2013). Además, las evaluaciones sensoriales requieren el desarrollo de escalas de color que contienen estándares comparativos de acuerdo al producto a evaluar, de tal manera que además de laboriosas son costosas. Sin embargo, es recomendable realizarlas con el fin de correlacionar los atributos sensoriales especialmente aquellos relacionados con los de aceptabilidad del consumidor, con los instrumentales, con el fin de predecir una mejor calidad de los productos (Abbott, 1999). Adicionalmente, el desarrollo de pruebas instrumentales y sensoriales en la medición de color del chile son importantes para predecir su contenido de fitocompuestos y por tanto calidad nutrimental.

1.4 Los principales pigmentos del chile y su relación con el color: clorofila, carotenoides y antocianinas

En general, las distintas variedades del género *Capsicum* aportan un importante número de fitocompuestos a la dieta que incluyen capsaicinoides, compuestos fenólicos, flavonoides, carotenoides, vitamina C, clorofila entre los principales, así como capacidad antioxidante (Ornelas-Paz et al. 2013) produciendo un efecto biológico importante, generando así un impacto en la salud humana, en la prevención de enfermedades degenerativas, cáncer y enfermedades cardiovasculares (Srinivasan, 2016). Entre éstos destacan principalmente aquellos que le dan una gama importante de colores al chile como rojo, amarillo, naranja, morado y café, entre los que se encuentran carotenoides, clorofilas y antocianinas (Guzman et al., 2011). Adicionalmente se mencionan que durante el periodo de maduración los polifenoles pueden influir en el color de algunas variedades de chile (Nadeem et al. 2011).

El color verde en el chile se relaciona con el fruto inmaduro, e indica la presencia de clorofila y luteína; posteriormente, durante su maduración, la coloración amarilla, naranja y roja son el resultado de la ruta de biosíntesis de carotenoides que incluye β -caroteno, luteína, violaxantina, capsorubina y capsantina. Estas dos últimas son las responsables de la coloración roja del chile mientras el β -caroteno se relacionan con el naranja (Guzman et al., 2011). En chile habanero se ha reportado los efectos de la maduración en la fluctuación de estos fitocompuestos, por ejemplo, se menciona en función de su estado de madurez niveles de 782 y 759 mg/100 g de fruto fresco para fenoles, y 62.7 y 362 mg 100 g⁻¹ de fruto fresco para carotenoides en cada caso para chile inmaduro (verde) y maduro (rojo) respectivamente (Menichini et al., 2009). Otros estudios indican resultados distintos, en donde el chile habanero amarillo, rojo y café presentaron un contenido de polifenoles de 20.54, 20.75 y 20.67 mg 100 g⁻¹ de muestra respectivamente, y de carotenoides de 1.26, 1.02 y 1.21 mg 100 g⁻¹ de muestra respectivamente (Segura et al., 2013). Algunos reportes han indicado que el proceso de maduración no afecta el contenido de polifenoles ni en el pericarpio ni placenta del fruto, sugiriendo que los elevados niveles de polifenoles presentes podrían estar asociados a los ácidos fenólicos intermediarios de la ruta biosintética de los capsaicinoides tales como ácido cumárico, cafeíco y ferúlico (Vázquez-Flota et al., 2007).

Otros antioxidantes presentes en el chile habanero en elevada cantidad durante el proceso de maduración es la vitamina C, en donde los chiles amarillos presentaban un menor nivel de 237 mg 100 g⁻¹ de muestra, mientras los naranjas y rojos exhibieron 281 y 262 mg 100 g⁻¹ respectivamente (Segura et al., 2013) .

Además, el chile habanero se caracteriza por su sabor y elevado picor, el cual es proporcionado por el contenido de capsaicinoides, siendo uno de los más picante del mundo con alrededor de 892000 Unidades Scoville de Picor (USP) en el fruto entero, acumulándose principalmente en la placenta de accesiones de chile habanero naranja (Canto-Flick et al., 2008).

Adicional a la variación de los fitocompuestos y contenido de capsaicinoides totales por efecto de la maduración y el color inherente del fruto, éstos también pueden ser afectados por condiciones agronómicas del cultivo tales como nutrientes y tipo de suelo (Iqbal et al., 2017; Das et al., 2016). Así por ejemplo se ha reportado que en suelos de cultivo en India el chile habanero sembrado en estiércol y vermicomposteo contenía 6 X10⁶ USP de picor, y sus contenidos de β -caroteno eran de 170 mg g⁻¹ de fruto fresco en comparación con el control con 2X10⁶ USP y 100 mg g⁻¹ respectivamente (Das et al., 2016). En otro reporte la variedad de chile picante Cayene cultivado en invernadero en su fase de maduración roja produjo más β -caroteno que el inmaduro verde con 321 y 93 μ g 100 g⁻¹ de fruto fresco respectivamente, sin presentar luteína en la fase madura, pero con una elevada cantidad en la fase inmadura de 3294 μ g 100 g⁻¹ de fruto fresco (Russo and Howard 2002). También se menciona que la fertilización con nitrógeno en cultivos de chile habanero no afectó los polifenoles totales registrándose 750 mg /100g GAE en un rango de dosificación de 30 a 320 Kg N ha⁻¹ (Núñez-Ramírez et al., 2011).

Recientes estudios realizados con chile habanero por (Oney-Montalvo *et al.*, 2018) en donde se evaluó el efecto del estado de madurez del chile crecido en tres diferentes tipo de suelo de la Península de Yucatán sobre el contenido de los principales metabolitos presentes como capsaicina, dihidrocapsaicina, ácido ascórbico, actividad antioxidante y polifenoles totales indica que el grado de madurez fue el factor que afectó los metabolitos analizados; mientras que el tipo de suelo tuvo un efecto en todos excepto en la actividad antioxidante, siendo el chile maduro (naranja) crecido en suelo rojo (K'áankab-lu'um) fue el que exhibió el mayor

contenido de vitamina C, capsaicinoides totales y polifenoles totales con 113 mg 100 g⁻¹, 702 mg 100 g⁻¹ y 90 mg GAE 100 g⁻¹ de fruto fresco respectivamente.

La metabolómica se ha convertido en una importante herramienta de investigación en las ciencias biológicas debido a que permite elucidar perturbaciones biológicas en respuesta a estímulos internos y externos (Ribbenstedt et al., 2018). Las estrategias para desarrollar experimentos de metabolómica, pueden ser clasificados como “dirigidas” y “no-dirigidas”. En los enfoques de metabolómica dirigida se involucran diferentes análisis estadísticos de metabolitos conocidos que se han reportado poseen una respuesta en el organismo de estudio. En contraste, los enfoques no-dirigidos buscan detectar la mayor cantidad de metabolitos en un único análisis y combinado con estadística multivariable identificar biomarcadores que permitan entender el metabolismo asociado a dicho organismo (Vrhovsek et al., 2012; Ribbenstedt et al., 2018). Más aún, recientes estudios de metabolómica dirigida hechos en papa dulce con distintos colores en su fracción comestible (Wang et al., 2018), y en aceites cítricos esenciales con distintos perfiles antioxidantes (Lamine et al. 2019) han sugerido la hipótesis que los cambios de color en la maduración de frutos, y en sus actividades biológicas respectivamente, pueden ser atribuidos a cambios sinérgicos, acumulativos o antagonistas de metabolitos (pigmentos y antioxidantes) y no necesariamente a los mayoritarios.

Debido a lo anterior, la metabolómica dirigida representa una estrategia atractiva para el análisis de alimentos y por lo tanto, el objetivo de este capítulo consiste en contribuir a la elucidación de las diferencias en sus principales metabolitos como carotenoides, (β -caroteno y luteína), polifenoles (ácido gálico, ácido clorogénico, catequina, rutina, quercetina, luteolina y kampferol), capsaicinoides (ácido cumárico, ácido cinámico capsaicina y dihidrocapsaicina) y vitamina C presentes en el chile habanero con tres diferentes grados de madurez definido por su color, ya sea verde, verde-anaranjado (apericado) o anaranjado cultivado en tres suelos distintos de la península de Yucatán. Este análisis permitirá obtener información útil sobre la calidad nutritiva del fruto, y servirá también para proponer estrategias futuras de cultivo.

Finalmente, con base en la información obtenida del contenido de metabolitos y los parámetros de color, se realizará un análisis de metabolómica dirigida a metabolitos antioxidantes y su correlación con los parámetros de color.

II. Materiales y métodos

2.1 Estrategia experimental

Con la finalidad en dar respuesta a los procesos metabolómicos de expresión biológica del color en chile habanero, en diferentes etapas del estado maduración cuando son cultivados en diversos tipos de suelo. Para este fin, se estableció un cultivo de *Capsicum chinense* durante el mes de marzo de 2018 en un invernadero tipo gótico con arcos ojivales de malla de polietileno (medidas: 26*12*7m [L*a*h]) con 5 camas (1*24m) con una HR > 91%, la temperatura interior osciló entre 24 y 47° C dependiendo la hora del día. Se adquirieron cerca de 300 plántulas chile habanero variedad jaguar, las cuales fueron trasplantadas en contenedores de 12 kg con tres tipos de suelo diferente: Ch'ich-lu'um (TC- tierra café), K'áankab-lu'um (TR-tierra roja) o Box-lu'um (TN-tierra negra). Se realizó una

distribución aleatoria por cuadrantes usando un diseño para 3 bloques y cuatro repeticiones. El esquema de riego se llevó a cabo tres veces por semana (lun [500mL], mie [500mL] y vie [1000mL]) y fue incremental, modificándose de acuerdo a la etapa de madurez del cultivo (botones/floración [+50%] y fructificación [+100%]). El esquema de fertilización (inicio a los 14 días post trasplante) se llevó a cabo de forma radicular dos veces por semana utilizando 2, 4 o 6 g L⁻¹ de Ultrasol triple 18 y 0, 2 o 4 g L⁻¹ de Ultrasol NKS46 durante las etapas después de trasplante, botones/floración y fructificación, respectivamente; asimismo se llevó a cabo una fertilización foliar semanal igualmente de manera incremental: 24, 48 o 72 mL de Bayfolan/Lagua y 0, 24, 36mL de Adherex/Lagua durante las etapas después de trasplante, botones/floración y fructificación, respectivamente, aplicados mediante bombas de aspersión. Finalmente, se diseñó un esquema semanal de cosechas, recolectando frutos en tres estados de maduración: V-Verde; VN-semimaduro (verde-naranja) y N-Naranja. La parte experimental de la investigación se llevó a cabo en las instalaciones del Centro de Investigación y Asistencia en Tecnología y Diseño del Estado de Jalisco (CIATEJ) Subsede Sureste, ubicado en el Parque Científico Tecnológico de Yucatán, 5.5 Carr. Sierra Papacal - Chuburna Pto. Tablaje 31257 Sierra Papacal, Mérida, Yucatán. De manera inicial el cultivo.

2.2 Determinación de color

Se tomaron 10 chiles recién cortados de cada bloque/repeticón para realizar el análisis de color con distinto estado de maduración: maduro, madurez intermedia e inmaduro (NA, VN o VE, respectivamente) de 12 cosechas de plantas cultivadas en cada tipo de suelo (TC- tierra café; TR-tierra roja y TN-tierra negra. La adquisición de datos para los parámetros de color L* (luminosidad), a* (color rojo-verde), b* (color amarillo-azul) se realizó mediante el uso de un colorímetro (Hunter Lab, MiniScane-Z) por triplicado.

2.3 Secado de chile habanero

Posterior a la cosecha, se llevó a cabo el proceso de secado en el horno con recirculación de aire marca Felisa (FE-292) a 60 °C hasta lograr una humedad uniforme < de 15%. Posterior el chile deshidratado se pulverizó y almacenados en bolsas a temperatura ambiente protegidos de la luz.

2.4 Extracción de extracto crudo

Con los deshidratados se pesaron 0.5 g de cada muestra de chile y se colocaron en tubos cónicos de 15 mL, posteriormente se agregaron 2.5 mL de una mezcla metanol: agua (80:20) y se sonicaron a 42 KHz durante 30 minutos, posteriormente el extracto fue centrifugado a 4700 rpm y 4 °C durante 30 minutos, para finalmente filtrar el sobrenadante con un filtro de membrana de nylon de 0.45 µm de poro. Estos extractos fueron empleados tanto para la determinación de polifenoles totales como para la determinación de la actividad antioxidante.

2.5 Extracción de capsaicinoides y ácido ascórbico (Vitamina C)

Se pesaron 50 mg de cada muestra de chile y se colocaron en tubos cónicos de 15 mL, posteriormente se agregaron 4 mL de una mezcla Agua:Acetonitrilo (80:20) y se agitó con ayuda de un vortex, para su homogenización. Se sonicaron los tubos por 20 minutos a 42 KHz, para finalmente filtrar la muestra con un filtro de membrana de nylon con un tamaño de poro de 0.45 µm. Estos extractos fueron empleados tanto para la determinación de capsaicinoides como para la determinación de la vitamina C como ácido ascórbico.

2.6 Determinación de polifenoles totales

El método que se usó para cuantificar los polifenoles totales fue el de Folin Ciocalteu. Las cuantificaciones de algunos de los metabolitos se realizaron por cromatografía de ultrapresión (UPLC) usando estándares de capsaicina, dihidrocapsaicina y ácido ascórbico mientras que para la actividad antioxidante y polifenoles totales fue por espectrofotometría.

2.7 Determinación de metabolitos por UPLC

Se utilizó un equipo UPLC Acquity H Class (Waters, USA) con un detector de arreglo de diodos. Y una columna Acquity UPLC HSS C18 (100 Å, 1.8 µm, 2.1 x 50 mm) (Waters, USA). Las condiciones para la determinación para capsaicinoides y ácido ascórbico se describen a continuación.

2.8 Capsaicina y Dihidrocapsaicina

Las condiciones cromatográficas para el análisis de la Capsaicina e Dihidrocapsaicina, consistieron en una fase móvil isocrática conformada por Acetonitrilo (fase móvil A) y Agua con ácido fórmico al 0.1% (fase móvil B) en una proporción de 60:40, la velocidad de flujo fue de 0.2 mL/min, la temperatura de la columna de 27 °C, el volumen de inyección 2 µL y la longitud de onda fue de 280 nm. Los capsaicinoides totales fueron reportados como la suma de la capsaicina y la dihidrocapsaicina.

2.9 Ácido ascórbico

Las condiciones cromatográficas para el análisis consistieron en una fase móvil isocrática conformada por agua con ácido fórmico al 0.1%, con una velocidad de flujo de 0.25 mL/min, la temperatura de la columna fue de 27 °C, el volumen de inyección 2 µL y la longitud de onda fue de 244 nm.

2.10 Análisis de estadística multivariable

Todos los análisis se realizaron en triplicado y los datos se reportaron como promedio \pm desviación estándar (SD) del triplicado. Para generar las figuras se utilizó el software MetaboAnalyst 2.0 software (<http://www.metaboanalyst.ca/MetaboAnalyst/>). Las muestras no estuvieron pareadas, dicho archivo con la información relativa a los parámetros del análisis se sometió a una revisión de integridad de los datos y posteriormente se realizó una normalización por filas para permitir el desarrollo de las pruebas estadísticas entre las muestras. Se analizaron estudios de correlación de Pearson y estudios de análisis de componentes principales (ACP). Los resultados de los análisis estadísticos se evaluaron con un criterio de significancia ($p < 0.05$).

III. Análisis y discusión de resultados

3.1 Análisis de correlación y estadística multivariable para identificar metabolitos relacionados con los parámetros del color

Para identificar metabolitos potencialmente relacionados con los cambios en el color del chile habanero, se realizó un análisis de correlación entre los parámetros relacionados al color y el contenido de los metabolitos identificados. (pigmentos, antioxidantes, y vitamina C; Figuras 1 y 2). Debido a que los cambios de color en la maduración de frutos pueden ser atribuidos

a cambios sinérgicos, acumulativos o antagonistas (Russo y Howard, 2002), por lo que, consideramos retener todos los metabolitos identificados en este estudio para el análisis de correlación y no solamente limitarnos a los relacionados con el color. La matriz de correlación de la Figura 1, muestra que los metabolitos β -caroteno y luteína (B-Car, LUT), tienen una correlación positiva con el parámetro HUE, y respecto a los parámetros como Cromo, a, L y b, estos pigmentos tienen una correlación negativa. Por otro lado, HUE tiene la mayor cantidad de correlaciones negativas con los metabolitos de tipo fenólicos: ácido cinámico, catequina, ácido cumárico, rutina, ácido clorogénico, polifenoles totales y quercetina (ACI, CAT, ACU, RUT, ACL, PTH, Q_L), respectivamente. Mientras que para los parámetros Cromo, a, L y b este mismo grupo de metabolitos tiene una correlación positiva.

En lo relacionado a la capsaicina y dihidrocapsaicina, a, L, b y croma reportan valores negativos, mientras que para HUE son cercanos a 0, es decir sin correlación.

El caso de la vitamina C (ViC), resulta destacado debido a que en todos los parámetros no reportan ningún tipo de correlación. Con base a estos resultados, se puede apreciar que el parámetro Hue fue el que mejor describió el color con la mayoría de los metabolitos evaluados, especialmente para β -caroteno y luteína (B-Car, LUT).

Sin embargo, para tener una idea más precisa del efecto de la maduración del fruto en el color, es recomendable considerar otros metabolitos de la ruta metabólica tales como: β -criptoxantina, zeaxantina, violaxantina, capsantina y capsorubina además de clorofila como lo han evidenciado estudios hechos en el género *Capsicum* (Guzman et al., 2011).

Algunos estudios han indicado que el proceso de maduración en la planta es clave en la manifestación de los metabolitos asociados al color en Chile (Barbero et al., 2016; Russo and Howard 2002). Por citar un ejemplo, se menciona que durante la etapa inicial la presencia de metabolitos como la clorofila y luteína en el cultivar Read Beauty son elevados, mientras en etapas posteriores de la planta en frutos rojos, es evidente la disminución de ésta y la aparición de otros como β -caroteno, zeaxantina, criptoxantina, etc. Por tanto, en la Figura 3, a lo largo de 12 cosechas que representan un ciclo agronómico del cultivo de Chile habanero en invernadero, durante tres meses de desarrollo de la planta, se muestra un mapa de calor que indica las correlaciones de metabolitos/parámetros de color a lo largo de ese periodo, analizadas en el presente estudio.

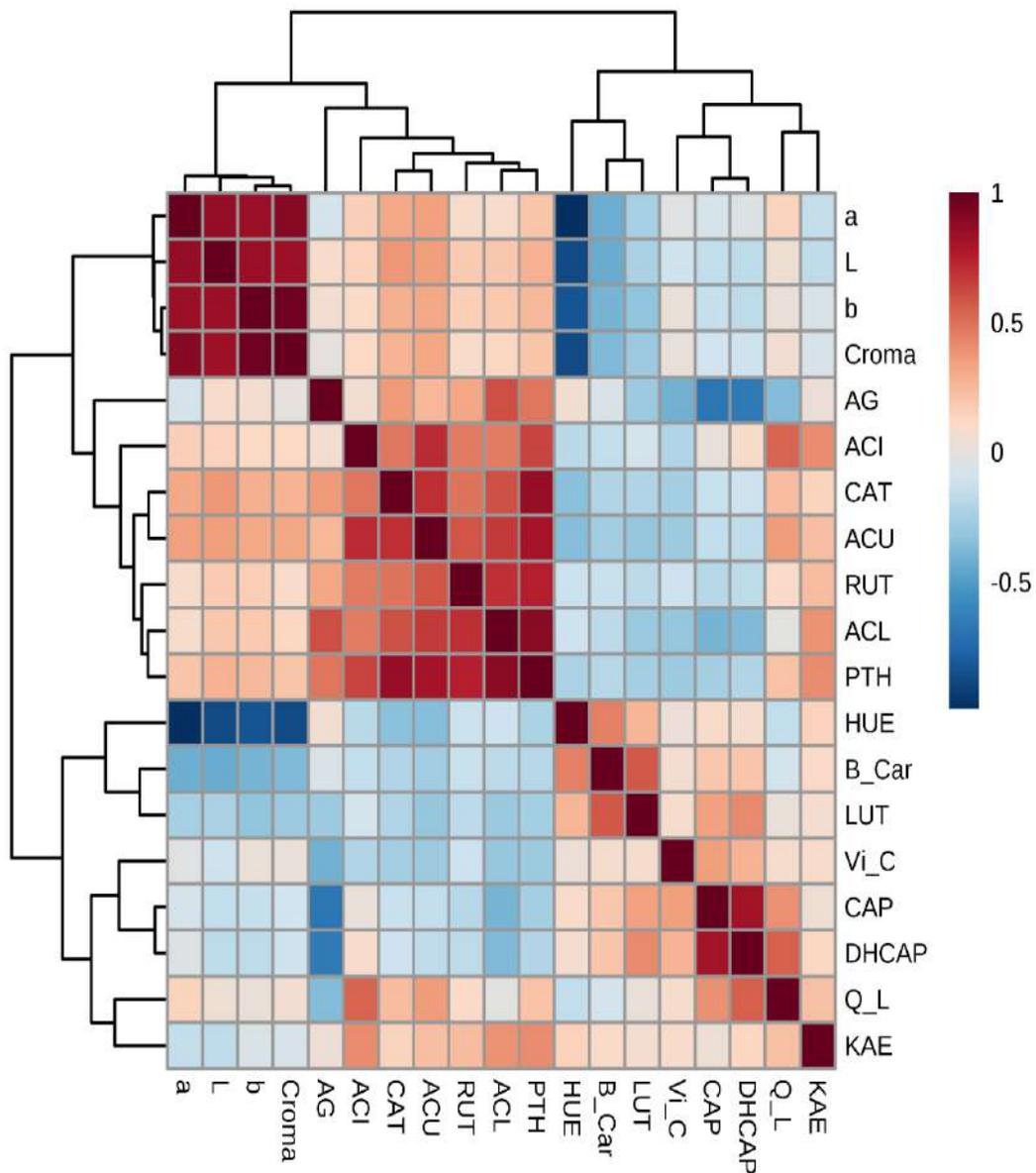


Figura 1. Matriz de correlación de metabolitos y parámetros de color ($p < 0.05$) en Chile Habanero. En cada recuadro aparecen los valores de correlación (Coeficientes de correlación de Pearson). Los valores están representados en una escala de intensidad de color (1 rojo y -1 azul). (KAE = Kaempferol, Q_L = Quercetina, DHCAP = Dihidrocapsaicina, CAP = Capsaicina, Vi_C = Vitamina C, LUT = Luteína, B_Car = Beta-caroteno, PTH = Polifenoles totales, ACL = Ácido clorogénico, RUT = Rutina, ACU = Ácido cumárico, CAT = Catequina, ACI = Ácido cinámico, AG = Ácido gálico, HUE, cromia, a, b y L).

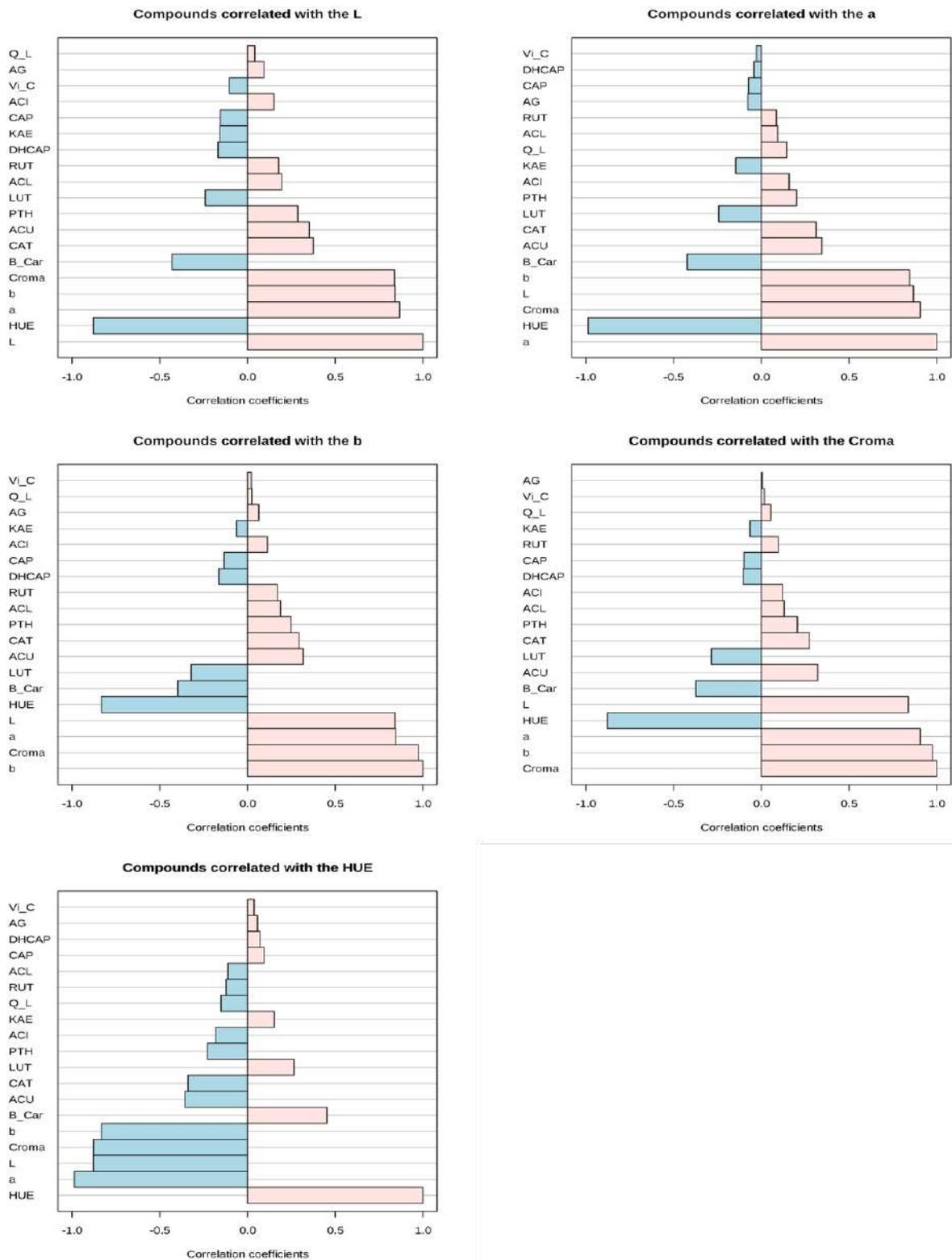


Figura 2. Patrones de correlación de metabolitos y parámetros de color ($p < 0.05$) en chile habanero. En cada recuadro aparecen los valores de correlación (Coeficientes de correlación de Pearson) para cada uno de los parámetros de color (a,b, L, cromas, HUE). Los valores están representados en una escala de intensidad de color (1 crema y -1 azul). (KAE = Kaempferol, Q_L = Quercetina, DHCAP

=Dihidrocapsaicina, CAP = Capsaicina, Vi_C = Vitamina C, LUT = Luteína, B_Car = Beta-caroteno, PTH = Polifenoles totales, ACL = Ácido clorogénico, RUT = Rutina, ACU = Ácido cumárico, CAT = Catequina, ACI = Ácido cinámico, AG = Ácido gálico, HUE, croma, a, b y L).

En el caso de los parámetros de color a, L, b y croma reportan una correlación fuertemente positiva (2) en la cosecha 6, mientras que estos mismos parámetros reportan una correlación negativa en las cosechas 1 y 7. De manera general la cosecha 1 reporta una correlación negativa (-1) con la mayoría de los metabolitos y parámetros de color, excepto con la vitamina C y el parámetro HUE. Los valores más altos de correlaciones positivas (2) están en la cosecha 5 para los compuestos fenólicos AG, CAT, ACL, PTH, ACU, RUT, mientras que en la cosecha 7 los valores más altos de correlación positiva (1.5) se encuentran en ACI, KAE y Q_L. Respecto a los carotenoides, LUT reporta la mayor correlación positiva en la cosecha 8 (2) y B-Car en la cosecha 9 (1.5).

Con base a los resultados de este estudio, se sugiere que las fases tempranas del desarrollo de la planta se manifiesta sólo la concentración de vitamina C, mientras que en las fases intermedias, cosecha 5, 6 y 7 se evidencia la mayor actividad metabólica de la planta reflejada en la cuantificación principalmente de polifenoles y flavonoides, para posteriormente al final del periodo evaluado, la mayor de correlación en la ruta biosintética de los capsaicinoides y carotenoides principalmente capsaicina, dihidrocapsaicina, y fundamentalmente B-caroteno y luteína relacionados íntimamente con el color como lo demuestran en otros chile picantes (Barbero et al., 2016; Russo and Howard 2002).

Estos descubrimientos sustentan el hecho que los parámetros de color, están ampliamente relacionados a un importante espectro de metabolitos y dichos metabolitos pudieran tener un rol relevante en las actividades biológicas inherentes a la maduración del chile habanero, por lo que resulta importante analizar todos los metabolitos y no restringirnos a los más representativos (Menichini et al. 2009).

En la Figura 4 se muestra un análisis de componentes principales (ACP) para encontrar las variables que mejor explican la varianza del grupo de datos. En ambos casos (4A y 4B), los primeros dos componentes (PC1 y PC2) explican el 89.2 % del total de la varianza. En la figura 4A el gráfico de ACP basado en las cosechas permite discriminar la cosecha 7 del resto de las cosechas, mientras que en la figura 4B, el gráfico de ACP no permite discriminar las muestras entre tipo de suelo (TC, TN y TR). Esto proporciona evidencia para suponer que de acuerdo a las mediciones de metabolitos y parámetros de color, estos reportan diferencias en cuanto al tiempo de cosecha, pero no en cuanto a tipo de suelo. En este sentido diversos trabajos han manifestado el posible efecto del sustrato en la síntesis de componentes químicos de interés como la capsaicina que dan el picor, y compuestos aromáticos como lo reportan (Sosa-Moguel et al., 2018). Sin embargo, al no existir una correlación aparente con los metabolitos relacionados con el color y tipo de suelo, esto permite plantear que la alternativa de cultivos protegidos con sustratos inertes, puedan servir para potenciar la producción de frutos sin afectar las características de color de los mismos.

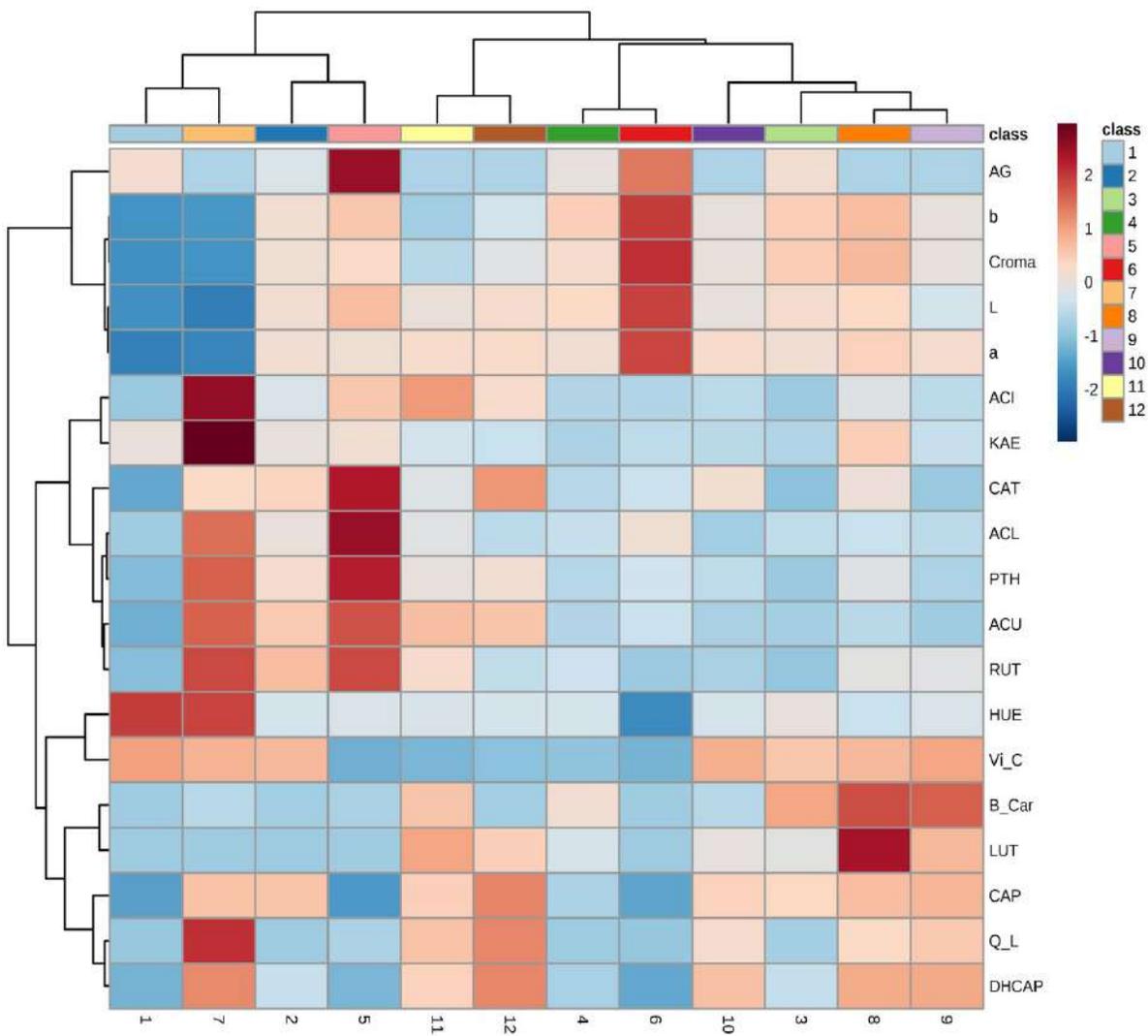


Figura 3. Matriz de mapa de calor de la correlación entre metabolitos, parámetros de color y cosechas de Chile habanero. Cada cuadro indica el coeficiente de correlación de Pearson de un metabolito/parámetro vs una cosecha. El valor del coeficiente de correlación está representado por la intensidad de color (Rojo (+), Azul (-)). Las cosechas aparecen numeradas (1-12). (KAE = Kaempferol, Q_L = Quercetina, DHCAP = Dihidrocapsaicina, CAP = Capsaicina, Vi_C = Vitamina C, LUT = Luteína, B_Car = Beta-caroteno, PTH = Polifenoles totales, ACL = Ácido clorogénico, RUT = Rutina, ACU = Ácido cumárico, CAT = Catequina, ACI = Ácido cinámico, AG = Ácido gálico, HUE, cromas, a, b y L).

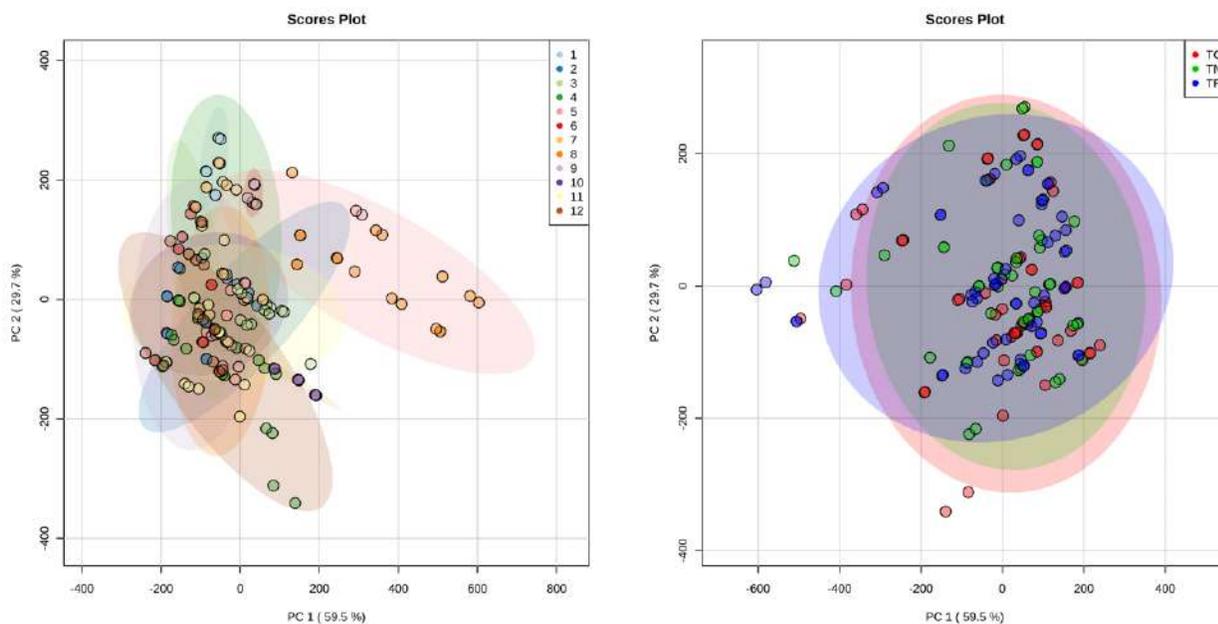


Figura 4. Análisis de componentes principales (PCA) de los metabolitos y parámetros asociados al color basados en A) Tipo de maduración y B) Tipo de suelo.

IV. Conclusiones

Se concluye que la diferente acumulación de metabolitos entre las diferentes cosechas donde cada una tiene un tipo específico de huella química y un rango único de metabolitos que contribuye a una diferenciación que se puede apreciar mediante los parámetros de color. Los análisis desarrollados permitieron identificar grupos de metabolitos potencialmente activos los cuales pudieran estar involucrados en la respuesta a la maduración reflejada en los cambios de color de los frutos de chile habanero. Como estudios a futuro se propone realizar un análisis de metabolómica dirigida a metabolitos antioxidantes y su correlación con parámetros de color. Además, dada la información presentada podemos soportar la hipótesis que sugiere que los cambios de color asociados al proceso de maduración de frutos de chile habanero representan un proceso sinérgico, acumulativo o antagonista de metabolitos (pigmentos y antioxidantes) y no necesariamente se encuentran restringidos a los metabolitos mayoritarios.

V. Referencias

- Abbott, Judith A. (1999). Quality Measurement of Fruits and Vegetables. *Postharvest Biology and Technology*, 15 (3), 207–25. [https://doi.org/10.1016/S0925-5214\(98\)00086-6](https://doi.org/10.1016/S0925-5214(98)00086-6).
- Badui-Dergal, S. (2006). Química de Alimentos. In *Química de Alimentos*, edited by Gutiérrez-Hernández, Cuarta, 507–43. México: Pearson.
- Barbero, F, Ana C De Aguiar, Ceferino Carrera, Julian Mart, Miguel Palma, and Carmelo G Barroso. (2016). Evolution of Capsaicinoids in Peter Pepper (*Capsicum annum* Var . Annum) During Fruit Ripening. *Chemistry & Biodiversity*, 13(8), 1068–1075. <https://doi.org/10.1002/cbdv.201500503>.
- Barrett, Diane M, John C Beaulieu, Rob Shewfelt, Diane M Barrett, John C Beaulieu, Rob Shewfelt

- Color, Diane M Barrett, John C Beaulieu, and R O B Shewfelt. (2010). Color, Flavor, Texture, and Nutritional Quality of Fresh-Cut Fruits and Vegetables: Desirable Levels, Instrumental and Sensory Measurement, and the Effects of Processing Nutritional Quality of Fresh-Cut Fruits and Vegetables : Desirable Levels , Ins, 8398. <https://doi.org/10.1080/10408391003626322>.
- Canto-flick, Adriana, Eduardo Balam-uc, Daniela Soli, and Carlos Lecona-guzma. (2008). Capsaicinoids Content in Habanero Pepper (*Capsicum chinense* Jacq .): Hottest Known Cultivars. HortScience, 43 (5), 1344–1349. <https://doi.org/10.21273/HORTSCI.43.5.1344>.
- Carocho, Márcio, Patricia Morales, and Isabel C.F.R. Ferreira. (2015). Natural Food Additives: Quo Vadis?. Trends in Food Science and Technology, 45 (2), 284–95. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2015.06.007>.
- Das, Subhasish, K Charan Teja, Buddhadeb Duary, Pawan Kumar, and Satya Sundar. (2016). Scientia Horticulturae Impact of Nutrient Management , Soil Type and Location on the Accumulation of Capsaicin in *Capsicum chinense* (Jacq .): One of the Hottest Chili in the World. Scientia Horticulturae, 213, 354–66. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2016.10.041>.
- Duangmal, Kiattisak, Busararat Saicheua, and Suchitra Sueeprasan. (2008). Colour Evaluation of Freeze-Dried Roselle Extract as a Natural Food Colorant in a Model System of a Drink. LWT - Food Science and Technology, 41 (8), 1437–45. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2007.08.014>.
- FAOSTAT. (2019). “Cultivos.” <http://www.fao.org/faostat/es/#data/QC>.
- Guzman, Ivette, Paul W Bosland, and Mary A O Connell. (2011). Heat , Color , and Flavor Compounds in *Capsicum* Fruit. In: Gang D., R. (ed). The Biological Activity of Phytochemicals, Recent Advances in Phytochemistry 41. Springer Science+Business Media, LLC. pp.109-126. <https://doi.org/10.1007/978-1-4419-7299-6>.
- Ibarra-Zavala, Darío. (2016). Crítica a La Teoría Clásica Del Comercio Internacional, Un Enfoque de Equilibrio General Entre País Grande y País Pequeño. Economía Informa, 397, 61–79. <https://doi.org/10.1016/j.ecin.2016.03.004>.
- Iqbal, Saba, Arif Inam, Akhtar Inam, Farha Ashfaque, and Seema Sahay. (2017). Potassium and Waste Water Interaction in the Regulation of Photosynthetic Capacity , Ascorbic Acid and Capsaicin in Chilli (*Capsicum annum* L .) Plant &. Agricultural Water Management, 184, 201–10. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2016.05.037>.
- Jiménez-Guerrero, J. F., J. C. Gázquez-Abad, R. Huertas-García, and J. A. Mondéjar-Jiménez. (2012). Estimating Consumer Preferences for Extrinsic and Intrinsic Attributes of Vegetables. A Study of German Consumers. Spanish Journal of Agricultural Research, 10 (3), 539. <https://doi.org/10.5424/sjar/2012103-342-11>.
- Lamine, Myriam, Fatma Zohra Rahali, Majdi Hammami, and Ahmed Mliki. (2019). Correlative Metabolite Profiling Approach to Understand Antioxidant and Antimicrobial Activities from Citrus Essential Oils. International Journal of Food Science and Technology, 2615–23. <https://doi.org/10.1111/ijfs.14173>.
- Menichini, Federica, Rosa Tundis, Marco Bonesi, Monica R. Loizzo, Filomena Conforti, Giancarlo Statti, Bruno De Cindio, Peter J. Houghton, and Francesco Menichini. (2009). The Influence of Fruit Ripening on the Phytochemical Content and Biological Activity of *Capsicum chinense* Jacq. Cv Habanero. Food Chemistry, 114 (2), 553–60. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2008.09.086>.
- Nadeem, Muhammad, Faqir Muhammad Anjum, Moazzam Rafiq Khan, Muhammad Saeed, and Asad Riaz. (2011). Antioxidant Potential of Bell Pepper (*Capsicum annum* L .) -A Review. Pakistan Journal of Food Sciences. 21 (1), 45–51. <https://www.researchgate.net/publication/255969817>
- NOM-189-SCFI-2017. (2018). NORMA Oficial Mexicana NOM-189-SCFI-2017, Chile Habanero de La Península de Yucatán (*Capsicum chinense* Jacq.)—Especificaciones y Métodos de Prueba.

- Nom-189-Scfi-2017. <https://www.inforural.com.mx/norma-oficial-mexicana-nom-189-scfi-2017-chile-habanero-de-la-peninsula-de-yucatan-capsicum-chinense-jacq-especificaciones-y-metodos-de-prueba/>.
- Núñez-Ramírez, Fidel, Daniel Gonzalez-Mendoza, Onésimo and Grimaldo-Juárez, and Lourdes Cervantes-Díaz. (2011). Nitrogen Fertilization Effect on Antioxidants Compounds in Fruits of Habanero Chili Pepper (*Capsicum chinense*) The Effect View Project Macrofauna and Microfauna View Project. International Journal of Agriculture & Biology, 13 (5), 827–30. <http://www.fspublishers.org>.
- Oney-Montalvo J., López-Domínguez C., Zamacona-Ruiz M., Gómez-Rincón E., Ramirez-Sucre, M and Rodríguez-Buenfil I. (2018). Metabolites present in *Capsicum chinense* of two ripening stages cultivated in different soil types in Yucatan, Mexico. Bionatura Conference Series. 1 (1), s/p. <http://dx.doi.org/10.21931/RB/CS/2018.01.01.9>.
- Ornelas-Paz, José de Jesús, Luis A. Cira-Chávez, Alfonso A. Gardea-Béjar, Juan C. Guevara-Arauz, David R. Sepúlveda, Jaime Reyes-Hernández, and Saul Ruiz-Cruz. (2013). Effect of Heat Treatment on the Content of Some Bioactive Compounds and Free Radical-Scavenging Activity in Pungent and Non-Pungent Peppers. Food Research International, 50 (2), 519–25. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2011.01.006>.
- Pathare, P.B., Opara, U.L. & Al-Said, F.A. (2013). Colour Measurement and Analysis in Fresh and Processed Foods: A Review. Food and Bioprocess Technology, 6, 36–60. <https://doi.org/10.1007/s11947-012-0867-9>.
- Ramírez Meraz, Moisés, Gerardo Arcos Cavazos, and Reinaldo Méndez Aguilar. (2018). Jaguar: Cultivar de Chile Habanero Para México. Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas, 9 (2), 487–92. <https://doi.org/10.29312/remexca.v9i2.1089>.
- Ribbenstedt, Anton, Haizea Ziarrusta, and Jonathan P. Benskin. (2018). Development, Characterization and Comparisons of Targeted and Non-Targeted Metabolomics Methods. PLoS ONE, 13 (11), 1–18. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0207082>.
- Ruiz-Lau, Nancy, Fatima Medina-Lara, and Manuel Martínez-Estévez. (2011). El Chile Habanero Su Origen y Usos. Ciencia, 70–77. https://www.amc.edu.mx/revistaciencia/images/revista/62_3/PDF/Habanero.pdf.
- Russo, V M, and L R Howard. (2002). Carotenoids in Pungent and Non-Pungent Peppers at Various Developmental Stages Grown in the Field and Glasshouse. Journal of the Science of Food and Agriculture, 82 (6), 615–624. <https://doi.org/10.1002/jsfa.1099>.
- Santana-Buzzy N; Canto-Flick A; Balam-Uc E; Avilés-Viñas S; Muñoz-Ramírez S; Peña-Yam L.; Pérez-Pastrana J; Mijangos J; Guzmán-Antonio A; Montalvo-Peniche M del C; Herrera Díaz G; Pérez-Brito D; Tapia-Tussell R. & Zubieta-Sánchez K. (2018). El Chile Habanero En La Cultura Peninsular. In Mejoramiento Genético Del Chile Habanero de La Península de Yucatán, edited by Vázquez-Flota F . González-Estrada T., Zúñiga-Aguilar J.J., 188. Yucatán. <https://www.cicy.mx/Documentos/CICY/Ligas Interes/2018/Mejoramiento genetico del chile habanero de la peninsula de yucatan.2018.pdf>.
- Segura, Maira Rubi Campos, Karen Ramírez Gómez, Yolanda Moguel Ordoñez, and David Betancur Ancona. (2013). Polyphenols, Ascorbic Acid and Carotenoids Contents and Antioxidant Properties of Habanero Pepper (*Capsicum chinense*) Fruit. Food and Nutrition Sciences, 04 (08), 47–54. <https://doi.org/10.4236/fns.2013.48a006>
- Setser, Carole S. (1984). Color: Reflections and Transmissions. Journal of Food Quality, 6 (82), 183–197. <https://doi.org/10.1111/j.1745-4557.1984.tb00824.x>.
- SIAP, Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera. 2019. Producción Agrícola. México: Secretaría de Agricultura, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación.

- Simonne, Eric H., Amarat H. Simonne, Robert G. Nelson, Christopher A. Frank, and Bridget K. Behe. (2019). Consumer Preferences for Color, Price, and Vitamin C Content of Bell Peppers. *HortScience*, 36 (4), 795–800. <https://doi.org/10.21273/hortsci.36.4.795>.
- Sosa-Moguel, O Cuevas-Glory, L Pino, J y Sauri-Duch, E. (2018). Conocimientos Actuales Sobre El Aroma de Chile Habanero (*Capsicum chinense* Jacq.). *Ciencia y Tecnología de Alimentos*, 28 (3), 68–72.
- Spence, Charles. (2019). On the Changing Colour of Food & Drink. *International Journal of Gastronomy and Food Science*, 17 (March). <https://doi.org/10.1016/j.ijgfs.2019.100161>.
- Spicer, Oliver, and José R. Almirall. (2005). Extraction of Capsaicins in Aerosol Defense Sprays from Fabrics. *Talanta*, 67 (2), 377–82. <https://doi.org/10.1016/j.talanta.2005.05.031>.
- Srinivasan, Krishnapura. (2016). Biological Activities of Red Pepper (*Capsicum annum*) and Its Pungent Principle Capsaicin: A Review. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 56 (9), 1488–1500. <https://doi.org/10.1080/10408398.2013.772090>.
- Tucuch-Haas, C, G Alcántar-González, V Ordaz-Chaparro, J Santizo-Rincón, and A Larqué-Saavedra. (2012). Producción y Calidad de Chile Habanero (*Capsicum chinense* Jacq.) Con Diferentes Relaciones NH₄ + /NO₃ - y Tamaño de Partícula de Sustratos. *Terra Latinoamericana*, 30 (3), 9–14. <http://www.scielo.org.mx/pdf/tl/v30n1/2395-8030-tl-30-01-00009.pdf>.
- Tut-Pech, F. de J., F. Santamaría-Basulto, M. J. Zavala-León, and C. Mier y Terán. (2013). Características de Materiales Mejorados de Chile Habanero Para Península de Yucatán. INIFAP. Centro de Investigaciones Regional Sureste. Campo Experimental Mocochoá. Mérida, Yuc. México. Folleto Técnico No. 13. 33p.
- Vázquez-Flota, Felipe, María de Lourdes Miranda-Ham, Miriam Monforte-González, Guadalupe Gutiérrez-Carbajal, Cinthya Velázquez-García y Yuriana Nieto-Pelayo. (2007). La Biosíntesis de Capsaicinoides, El Principio Picante Del Chile Biosynthesis of Capsaicinoids, the Pungent Principle of Peppers Felipe Vázquez-Flota, María de Lourdes Miranda-Ham, Miriam Monforte-González, Guadalupe Gutiérrez-Carbajal, Cinthya Velázqu. Artículo de Revisión. *Revista Fitotecnia Mexicana*, 30 (4), 353–60. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=61030402>.
- Vrhovsek, Urska, Domenico Masuero, Mattia Gasperotti, Pietro Franceschi, Lorenzo Caputi, Roberto Viola, and Fulvio Mattivi. (2012). A Versatile Targeted Metabolomics Method for the Rapid Quantification of Multiple Classes of Phenolics in Fruits and Beverages. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 60 (36), 8831–40. <https://doi.org/10.1021/jf2051569>.
- Wang, Aimin, Rensai Li, Lei Ren, Xiali Gao, Yungang Zhang, Zhimin Ma, Daifu Ma, and Yonghai Luo. (2018). A Comparative Metabolomics Study of Flavonoids in Sweet Potato with Different Flesh Colors (*Ipomoea batatas* (L.) Lam). *Food Chemistry*, 260 (October 2017), 124–34. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2018.03.125>.

CAPÍTULO 14

Técnicas sensométricas y su correlación instrumental para la evaluación de chiles: una revisión

Sensometric techniques and their instrumental correlation for the evaluation of peppers: a review

Ramírez-Rivera, Emmanuel D.J.^{1,3}, **Sánchez-Valera, Oscar V.**¹, **Herrera-Corredor, José A.**², **Ramírez-Sucre, Manuel O.**³, **Rodríguez-Buenfil, Ingrid M.**³, y **Ramón-Canul, Lorena G.**^{4*}

¹ Tecnológico Superior de Zongolica, Km. 4 Carretera S/N Tepetitlanapa. 95005 Zongolica, Veracruz, México

² Colegio de Postgraduados, Campus Córdoba. Km. 348 Carretera Federal Córdoba-Veracruz. 94500 Córdoba, Veracruz, México. Tecnológico Nacional de México/Instituto.

³ Centro de Investigación y Asistencia en Tecnología y Diseño del Estado de Jalisco A.C. Subsele Sureste. Tablaje Catastral 31264 Km. 5.5 Carretera Sierra Papacal-Chuburna Puerto Parque Científico Tecnológico de Yucatán, 97302. Mérida, Yucatán, México

⁴ Universidad de la Sierra Sur. Calle Guillermo Rojas Mijangos s/n. Avenida Universidad.

*autor de correspondencia: l_g_r_c@hotmail.com

Resumen

El objetivo del presente capítulo fue realizar una revisión de las técnicas sensoriales aplicadas para la caracterización sensorial y su correlación con técnicas instrumentales para determinar la calidad de frutos pungentes. Se encontró que la prueba de Scoville ha sido frecuentemente aplicada para la evaluación de la pungencia de chiles y evidencia de la aplicación de las técnicas sensoriales Análisis Descriptivo y Check all the apply para la evaluación de chiles pungentes y no pungentes. Sin embargo, no hay especificaciones claras de método de preparación de las muestras de chile pungentes para su análisis sensorial. En la parte de la correlación de datos, se encontró que las investigaciones se focalizan en la asociación entre datos sensoriales y los resultados de cromatografía y nariz electrónica mientras que el análisis de color solamente se ha realizado a nivel instrumental. Respecto a la evaluación de la textura, esta se ha efectuado con texturómetros y con algunas alternativas como la Espectroscopia de Infrarrojo Cercano (NIR), Difracción de Rayos-X, microscopia y algoritmos matemáticos de Análisis de Imagen. De igual forma se han aplicado técnicas instrumentales como Emisión de Plasma de Acoplamiento Inductivo y Espectrofotometría de Absorción Atómica con la finalidad de diferenciar variedades de chiles de acuerdo con su contenido mineral. Se concluye que existe la necesidad de desarrollar métodos para la preparación y evaluación de chiles pungentes así como para su evaluación sensorial y su correlación con técnicas instrumentales como un medio de validación.

Palabras clave: Análisis de Imagen, Emisión de Plasma de Acoplamiento Inductivo, Espectroscopia de Infrarrojo Cercano NIR, microscopia, QDA, Scoville

Abstract

The objective of this chapter was to review the applied sensory techniques for sensory characterization and its correlation with instrumental techniques to determine the quality of pungent fruits. The Scoville test was found to have been frequently applied for the evaluation of pungency of chili peppers. Evidence of the application of the sensory techniques Descriptive Analysis and Check All the Apply was found for the evaluation of pungent and non-pungent chili peppers. However, there are no clear specifications for the method of preparing the pungent chili samples for sensory analysis. In the data correlation part, it was found that the investigations focus on the association between sensory data and the results of chromatography and electronic nose, while the color analysis has only been performed at the instrumental level. Regarding the evaluation of the texture, this has been carried out with texturometers and with some alternatives such as Near Infrared Spectroscopy, X-ray Diffraction, microscopy, and mathematical algorithms of Image Analysis. In the same way, instrumental techniques such as Inductively Coupled Plasma Emission and Atomic Absorption Spectrophotometry have been applied to differentiate chili varieties according to their mineral content. It is concluded that there is a need to develop methods for the preparation and evaluation of hot peppers for their sensory evaluation and its correlation with instrumental techniques as a means of validation.

Keywords: Image Analysis, Inductively Coupled Plasma Emission, NIR, Microscopy, QDA, Scoville

I. Introducción

El chile es uno de los alimentos tradicionales en la gastronomía mexicana y fue uno de los primeros cultivos domesticado en el hemisferio occidental. Su domesticación temprana se debe a su uso medicinal debido a que presenta una alta concentración de compuestos bio-funcionales y antioxidantes que son importantes en la prevención de enfermedades cardiovasculares, cáncer y trastornos neurológicos (Guzmán y Bosland, 2017). Sin embargo, el chile se consume en todo el mundo debido a sus propiedades sensoriales como color, sabor y aromas que contribuyen a la aceptación del fruto por parte de los consumidores (Pinedo-Guerrero, 2017). En México, los tipos de chile más sembrados son los serranos, de árbol, jalapeños, guajillos pasilla, anchos, piquines, habanero y manzano (Morán–Bañuelos et al. 2008). En el sureste mexicano, el chile habanero (*Capsicum chinense* Jacq.) es un fruto distintivo de la Península de Yucatán y está protegido por una Denominación de Origen cuyas especificaciones y métodos de prueba se detallan en la Norma Oficial Mexicana (NOM-189-SCFI-2017). Después del tomate, este fruto ocupa el segundo lugar de importancia en cuanto a la superficie de siembra de hortalizas, y presenta un consumo *per capita* de 15 kg anuales (Buenfil-Ocampo, 2014; Villa et al., 2014). En el año 2015, la producción nacional de chile habanero fue de aproximadamente 9 millones de ton, con un valor estimado de 166.9 millones de pesos, siendo los Estados de Yucatán, Tabasco y Campeche quienes contribuyeron a dicha producción (Solleiro-Rebolledo y Mejía-Chávez, 2018). El 80% de la producción de esta variedad de chile se consume en fresco y el restante es usado para la elaboración de productos como salsas, pastas y distintos platillos que forman parte de la cultura gastronómica de los lugares donde es producido (Castillejos-Alegría y Del Porte-

Morales, 2015; Solleiro-Rebolledo y Mejía-Chávez *et al.*, 2018). Una de las características de este fruto es el nivel de calor que genera en los consumidores como respuesta de la interacción entre las papilas gustativas con los compuestos químicos como capsaicina (8-metil-N-vanillil-6-nonenamida) y compuestos relacionados (Sweat *et al.*, 2016). La interacción antes mencionada, está relacionado con la resistencia de la matriz alimentaria que al romperse por el efecto de una fuerza ejercida ocasiona la liberación de diferentes compuestos volátiles y no volátiles que contribuyen a la aparición de la pungencia en el consumidor (Tournier *et al.*, 2009; Gierczynski *et al.*, 2011). Sin embargo, la gran variabilidad genética de *C. chinense* es particularmente evidente en los frutos que pueden tener diferentes formas, colores, tamaños y niveles de pungencia (Dos Santos-Gaarruti *et al.*, 2013). A nivel sensorial, el estudio de los cambios en la percepción de la irritación, generada por la capsaicina, es considerado como un modelo para el estudio de las interacciones de los cambios sensoriales con los cambios en las preferencias de los alimentos y al trastorno de la sensación oral que a menudo se describe como un "sabor ardiente persistente" (Lawless, 1984). En el Estado de Yucatán, México, el contenido de capsaicinoides en los morfotipos de chile nativos de las especies *C. chinense* y *C. annuum* varía de 1000 a más de 235 mil Unidades Scoville de Picor (USP), esta variación es influenciada por el genotipo, las condiciones climáticas y por las prácticas de cultivo (Morán-Bañuelos *et al.*, 2008). Por todo lo anterior, el objetivo de este capítulo fue realizar una revisión de las técnicas sensoriales aplicadas para la caracterización sensorial y correlación con técnicas instrumentales para determinar la calidad de frutos pungentes.

II. Revisión bibliográfica

2.1 Métodos sensoriales y caracterización sensorial de chiles: Alcances y limitaciones

El aroma característico del chile es de suma importancia debido a que es considerado un parámetro de calidad (Sosa-Moguel *et al.*, 2018). Las sustancias volátiles y no volátiles presentes en el chile contribuyen al sabor, el cual, es un elemento sensorial importante para el consumidor (Teixeira *et al.*, 2006). Los capsaicinoides son compuestos químicos de gran importancia en la cultura gastronómica (Zewdie y Bosland, 2001; Gúzman y Bosland, 2017). Este compuesto químico es el responsable de la pungencia, la cual, se obtiene mediante la estimulación de las terminaciones nerviosas libres del nervio trigémino. El receptor de la capsaicina es llamado VR1 (ubicado en los nervios sensoriales primarios) se activa por la presencia de los capsaicinoides dando como resultado esta sensación de picor. Actualmente, se han realizado algunas investigaciones con la finalidad desarrollar una metodología para evaluar la pungencia de los chiles, ejemplo de estas metodologías son las evaluaciones psicofísicas para el monitoreo de la sensibilidad (Cliff y Heimann, 1992; Ruíz-Lau, 2011). Sin embargo, las técnicas Scoville y la prueba Gillette han sido frecuentemente usadas para determinar la pungencia (Raju *et al.*, 2010). La prueba de Scoville fue desarrollada en 1912 y modificada por la American Spice Trade Association (ASTA, 1968) y por la International Organization for Standardization (ISO, 1983). La preparación de las muestras se realiza usando agua caliente y polisorbato 80 para posteriormente ser filtrado y diluido. Las referencias son preparadas acorde a la norma Standard Test Methods for sensory evaluation of Red Pepper Heat (E1088-00) usando 8-Methyl-N-vanillyl-trans-6-nonenamide y las muestras son evaluadas una sola vez por el panel. Sin embargo, esta técnica muestra algunas desventajas como saturación de umbral, falta de validez estadística, excesivo tiempo

de extracción, baja reproducibilidad y valores bajos de correlación con otras técnicas. Este último punto quedó demostrado en la investigación de Ku *et al.*, (2012) quienes evaluaron el nivel de calor del pimiento rojo en polvo de Corea usando la técnica de Scoville y reportaron una correlación baja ($r = 0.70$) entre datos de la prueba Scoville y los valores de la prueba de calor. Es por ello, que se desarrolló la técnica Gillette (Gillette *et al.*, 1984), en donde, la preparación de la muestra se realiza sumergiendo el fruto en agua 90°C durante 20 minutos posteriormente se filtra y diluye en agua a 20°C . La referencia a usar es una concentración conocida de capsaicina sintética. El proceso de evaluación de las muestras se realiza usando una escala de 1 a 9 puntos que indican desde sin calor hasta extremadamente caliente. La muestra de referencia es evaluada en boca durante 5 segundos y posteriormente se espera 30 segundos para ir evaluando las muestras contra la referencia. Algunas ventajas de esta técnica es que se reduce el tiempo de extracción de las muestras y los resultados son correlacionables ($r = 0.94$) con datos de cromatografía (Gillette *et al.*, 1984). Adicionalmente, los datos del panel pueden ser evaluados por técnicas estadísticas como Análisis de Varianza con la finalidad de verificar su desempeño con relación a los términos de discriminación, repetitividad y consenso (Tomic *et al.*, 2010).

Sin embargo, las pruebas Scoville y Gillette solo permiten evaluar el nivel de pungencia de los chiles y no definen otras características sensoriales como el color, textura, sabores y aromas. Aunque la sensación de calor que deja el chile es muy conocida, se necesita realizar un vocabulario sensorial completo, organizado y detallado para describir la naturaleza compleja del chile (McQuaid, 2015). Es por ello, que una primera aproximación a la descripción sensorial fue desarrollada por Cliff y Heymann, (1991), en la que generaron un vocabulario sensorial para chiles rojos conformado por atributos picantes (ardor, hormigueo, adormecimiento e intensidad general) y atributos temporales (retraso, duración), los cuales fueron calificados de corto a largo plazo y atributos de ubicación longitudinal y lateral. Patel *et al.*, (2016) aplicó la técnica Análisis Descriptivo Cuantitativo (QDA[®] por sus siglas en inglés) a 31 chiles cultivados en Perú, esta técnica sensorial generó atributos como ácido cítrico, dulce, afrutado, herbal, manzana, orégano y pimienta. Dos Santos-Gaarruti *et al.*, (2013) aplicaron la técnica de descripción rápida denominada Check-All-That-Apply (CATA) para caracterización sensorial de tres nuevas variedades de chile habanero no pungente (BRS Seriema, CNPH 4080 y Naranja Biquinho) procedente un banco de germoplasma de Brasil y reportaron que los atributos de olor dulce y olor a pimienta contribuyeron a diferenciar las variedades antes mencionadas. Gúzman y Bosland, (2017) desarrollaron un perfil de calor que incluye la definición de cada atributo, ejemplo de estos atributos son los siguientes: Desarrollo (sensación de calor que se puede sentir de inmediato), Duración (sensación de calor con poco tiempo de duración, desaparece rápidamente o puede durar desde varios minutos hasta horas), Ubicación (ubicación donde se siente el calor), Sensación (la sensación de calor se siente SHARP como pines pinchando el área o FLAT como si el calor se manchara o pintara con un cepillo) e Intensidad (Declarado como Unidades de Calor Scoville). Mediante esta terminología sensorial se generaron los perfiles de calor de diferentes variedades de chile como *Capsicum annum* (chile de árbol, Jalapeño y Poblano), *Capsicum chinense* (habanero) y *Capsicum frutescens* (Tabasco). En la Tabla 1 se resumen el uso de las técnicas usadas en la evaluación de diferentes chiles.

Tabla 1. Técnicas usadas para la caracterización sensorial de chiles.

Técnica	Objetivo	Desventajas	Chile	Autor
Scoville	Evaluación de calor	Prolongada tiempo de extracción y baja reproducibilidad	Pimiento rojo en polvo, Jalapeño, Habanero	Marshall y Doperalski, 1981; Wall y Bosland, 1998; Ku <i>et al.</i> , 2012; Sweat <i>et al.</i> , 2016
Gillette	Evaluación de calor	No hay evaluación de atributos sensoriales	Pimiento rojo	Gillette <i>et al.</i> , 1984; Wall y Bosland, 1998; Raju <i>et al.</i> , 2010
QDA [®]	Evaluación de atributos sensoriales	¹ Tiempos prolongados para el entrenamiento del panel	Pimiento rojo	Cliff y Heymann, 1991; Gúzman y Bosland, 2017
CATA	Evaluación de atributos sensoriales	¹ Se requiere de un tamaño de panel grande y la no existe un medio para la selección de atributos a evaluar	Habanero no pungente	Dos Santos-Gaarruti <i>et al.</i> , 2013

¹Valentin *et al.*, (2012)

Sin embargo, las investigaciones antes mencionadas muestran la necesidad de aplicar otras técnicas sensoriales, generar métodos de preparación de muestras de chile pungentes y vocabularios sensoriales que consideren las diferentes dimensiones sensoriales (vista, olfato, textura, gusto y resabios). En este sentido, la sensometría ha desarrollado diferentes tipos de pruebas sensoriales que pueden ser aplicadas para la caracterización de chiles en función de atributos sensoriales que cumplan con los requisitos de ser monodimensionales y que estén acorde al producto de acuerdo con lo indicado en la ISO 11035 (1994).

Los tipos de pruebas sensoriales se pueden clasificar en dos grupos; 1) estáticas o 2) dinámicas. Dentro de las estáticas se encuentran las técnicas de tipo verbal como Perfil de Sabor (Cairncross y Sjostrom, 1950), el Perfil de Textura (Brandt *et al.*, 1963), QDA[®], Perfil Flash y CATA (Stone y Sidel, 1975; Dairou y Sieffermann, 2002; Ares *et al.*, 2010), métodos de similitud como la prueba de Categorización y mantel (Perrin *et al.*, 2008; Perrin *et al.*, 2009; Cadoret *et al.*, 2013) y métodos de referencia como el Posicionamiento sensorial polarizado y Perfil Pivot[®] (Valentin *et al.*, 2012).

Las técnicas dinámicas son aquellas que se caracterizan por realizar la prueba en un intervalo de tiempo establecido generalmente en segundos. Las técnicas que están dentro de este grupo son Tiempo-Intensidad (T-I) y Dominio Temporal de Sensaciones (DTS) (Pineau *et al.*, 2009; Pineau *et al.*, 2012; Dinnella *et al.*, 2013; Lepage *et al.*, 2014). A diferencia de las técnicas estáticas, las técnicas dinámicas permiten medir la intensidad, el momento de aparición y el tiempo de duración de un sabor o textura en boca durante el

consumo en tiempo real del alimento, simulando un equipo de cromatografía cuando se liberan los compuestos volátiles durante el consumo en tiempo real (Taylor *et al.*, 2000; Del Pozo-Bayón, 2009).

Hoy en día el campo sensorial ha desarrollado y potencializado el uso de vocabularios de emociones con la finalidad de analizar las emociones que experimenta el consumidor en el momento de evaluar los alimentos. La determinación de las emociones es un complemento indispensable para la caracterización sensorial de los alimentos. De acuerdo con Nestrud *et al.*, (2016) la medición de las emociones ha recibido una atención creciente dentro de los últimos cinco años. Lo anterior se ve reflejado por el desarrollo de diferentes vocabularios de emociones generados, por ejemplo, el vocabulario EsSense Profile® que contiene 39 emociones (King y Meiselman, 2010; King *et al.*, 2013) y su versión corta con 25 emociones desarrollada por Nestrud *et al.*, (2016). Estos vocabularios han permitido generar el perfil de emociones de alimentos como café, chocolate, entre otros, pero no hay evidencia del análisis de emociones de chiles pungentes y no pungentes (Jager *et al.*, 2014; Kanjanakorn y Lee, 2017). Es por ello que existe la necesidad de generar información que contribuya no solo a descripción sensorial de los diferentes chiles, sino que también incluyan las diferentes emociones que generan en el consumidor, ya que la información sensorial de chiles es limitada (Patel *et al.*, 2016). La información que se genere mediante el uso de las diferentes sensoriales y determinación de emociones pueden ser de utilidad para los productores de chiles, los fabricantes de alimentos que contemplan el uso de chiles como un ingrediente en sus productos (Guzmán y Bosland, 2017).

Por último, es importante recalcar que una de las ventajas de las técnicas sensoriales estáticas, dinámicas y emociones es que los datos pueden ser validados por técnicas estadísticas univariadas (Análisis de Varianza) y multivariadas (Análisis Generalizado Procrusteno, Análisis de Componentes Principales, Análisis de Correspondencia, Análisis de Correspondencia Múltiple, Análisis Factorial Múltiple, entre otros) con la finalidad de evaluar el desempeño del panel y así obtener un perfil sensorial confiable y consistencia de los resultados (Dairou y Sieffermann, 2002; Tomic *et al.*, 2007; Perrin *et al.*, 2009; Cadoret *et al.*, 2013; Dinnella *et al.*, 2013; Ramírez-Rivera *et al.*, 2018)

2.2 Correlación sensométrico-instrumental y técnicas propuestas para la diferenciación de chiles

La calidad de un alimento está definida por sus características sensoriales que son percibidas por el consumidor debido a que juegan un papel importante en su aceptabilidad. Es por ello que el color, sabor, textura y aroma son de gran importancia para los productores e industriales dedicados a la producción de alimentos (Guzmán y Bosland, 2017; Chan *et al.*, 2011). Sin embargo, en los frutos pungentes, estos aspectos pueden estar influenciados por factores como las condiciones climáticas, el genotipo, las técnicas de cultivo y el tiempo de maduración. La etapa de madurez es un factor importante que influye en la calidad de este tipo de productos, ya que, durante la maduración ocurren varias modificaciones bioquímicas, fisiológicas y estructurales que van determinando los atributos de la calidad (Menichini *et al.*, 2009). Dentro de la etapa de madurez del chile, el sabor y el aroma de este alimento son factores claves para la determinación de su calidad, es por ello que dichos factores deben ser evaluados desde el punto de vista sensorial e instrumental (S-I) y su correlación juegan un papel importante en la huella de identificación de un alimento.

En este sentido, algunas investigaciones se han enfocado principalmente en el estudio de las relaciones S-I (cromatografía). Por ejemplo, Gillette *et al.*, (1984) reportaron un valor de correlación de 0.94 entre la intensidad de calor percibido y el porcentaje de capsoicinoides. Luning *et al.*, (1994) evaluaron S-I chiles frescos (*Capsicum annuum*) variedad Mazurka y Evident, encontraron una relación de los atributos dulzura y ácido con cantidades altas de fructuosa, glucosa, ácido cítrico y ácido ascórbico en los pimientos rojos. Dos Santos-Gaarruti *et al.*, (2013) efectuaron la comparación entre datos sensoriales y datos de cromatografía acoplado a espectrometría de masas aplicado a tres nuevas variedades de chile habanero no pungente (BRS Seriema, CNPH 4080 y Naranja Biquinho) de Brasil reportando que los compuestos químicos 3,3-dimetilciclohexanol, esta relacionados con atributos sensoriales dulce y aroma a frutas mientras que 3-metilbutanoato de hexilo se relaciona con notas a herbal.

A pesar de que se han hecho diferentes esfuerzos para ir correlacionando datos sensoriales e instrumentales, la mayoría de las investigaciones se centran en analizar características del chile de manera particular. Por ejemplo, el color también juega un papel importante en la selección de los chiles por parte de los consumidores. Es por ello, que el equipo de colorimetría es una de las herramientas que sirve para la definición del color del alimento en función al espacio de color CIE L* Luminosidad), a* (+a indica rojo, -a indica verde), b* (+b indica amarillo, -b indica azul). Por ejemplo, Gómez-Rincón *et al.*, (2018) analizaron el efecto de dos tipos de suelo café y rojo en los parámetros de color de chile habanero (L*, a*, b*, Cromo y ángulo Hue) y reportaron que los valores más altos fueron L*=57.67±0.06, a*=8.68±0.06, ángulo Hue=0.27±0 en el suelo café y b*=36.14±0.06, Cromo=36.75±0.06 en el suelo rojo. Sin embargo, falta ampliar los estudios de correlación entre el color sensorial y el color instrumental en chiles.

Por otro lado, la textura es otro de los parámetros de gran importancia para el consumidor de chile (Harker *et al.*, 2010; Contador *et al.*, 2016). Los cambios de textura del chile se deben a los procesos bioquímicos que generan el rompimiento hidrolítico de la pared celular del tejido vegetal efectuado por la acción de enzimas como poligalacturonasas, pectínmetilesterasas, entre otros. A nivel sensorial, la textura ha sido cuantificada en tacto y en boca. Sin embargo, la medición de la textura de este alimento se ha llevado a cabo mediante equipos que simulan el proceso de masticación generando lo que comúnmente se le conoce como Perfil de Textura (Hyldig y Nielsen, 2001; Baena *et al.*, 2018; Ramírez-Sucre *et al.*, 2018). En este sentido, Ramírez-Sucre *et al.*, (2018) determinaron la textura de chile habanero cultivado con tres diferentes suelos de la Península de Yucatán y reportaron valores de dureza superiores a los 50N.

Cabe mencionar que algunos investigadores han introducido técnicas alternativas para la evaluación de la textura, por ejemplo, se ha usado la técnica de espectroscopia de infrarrojo cercano (NIR por sus siglas en inglés) para la evaluación de la firmeza en los chiles. En este sentido, Penchaiya *et al.*, (2009) compararon los resultados de firmeza de pimientos de Bélgica entre un equipo de textura y la técnica NIR y reportaron un valor de correlación de 0.81 entre los valores generados por el equipo de textura y el NIR.

Otra de las alternativas de la medición de textura en chiles ha sido desarrollada desde el campo del Análisis de Imagen (AI), la cual, también ha contribuido en la determinación de la calidad de diferentes variedades de chiles en función a su textura, análisis morfométrico y

distribución de la concentración de la capsaicina en el chile mediante diferentes algoritmos matemáticos (Rajalakshmi y Subashini, 2014; Sánchez-Segura *et al.*, 2015; Jiang *et al.*, 2018). Por ejemplo, Rajalakshmi y Subashini, (2014) analizaron la textura de chile de la india aplicando algoritmos matemáticos para la segmentación de imágenes procedentes de la técnica de Difracción de Rayos X (Figura 1). Por su parte, Sánchez-Segura *et al.*, (2015) evaluaron la morfometría de los tejidos de chile y la formación de ampollas (estructuras relacionadas con la pungencia) mediante análisis de imagen digital de chiles habanero y jalapeño, estos autores reportaron que las características morfológicas de las imágenes están relacionadas con la alta pungencia de los chiles en las etapas de maduración (Figura 2). Jiang *et al.*, (2018) usaron imágenes hiperespectrales de infrarrojo cercano (Figura 3) para la determinación de la calidad de los chiles acorde con los mapas de distribución espacial de la concentración de capsaicina y dihidrocapsaicina para clasificar los niveles de pungencia (Figura 4) determinando que esta técnica contribuye a diferenciar chiles pungentes y no pungentes con una precisión del 98%.



Figura 1. Pre-procesamiento de imágenes de rayos X del chile. (Fuente: Rajalakshmi y Subashini, 2014).

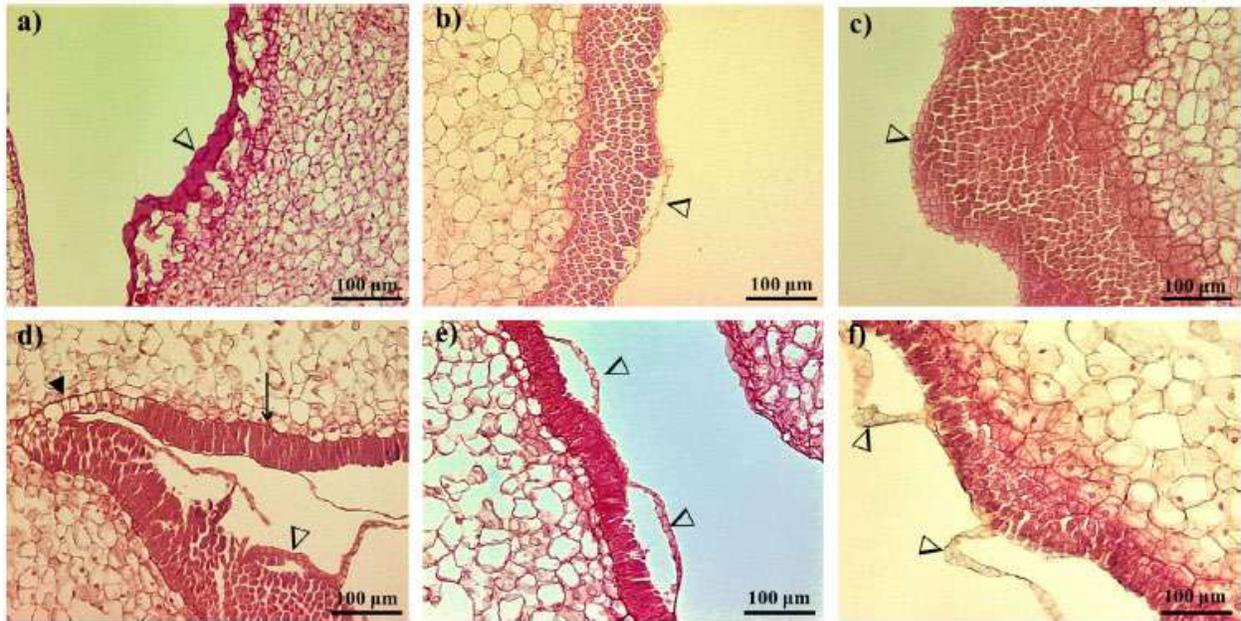


Figura 2. a) Tejido placentario a 8 dda (días después de la antesis) de *C. chinense* jacq. " Habanero ". El tabique interlocular creció en el tejido placentario (Δ). (b) Cambio en el tejido epidermis placentario y Formación de ampolla a los 15 dda (Δ). (c) Proliferación del tejido epidermis placentario a 20 dda (Δ). (d) Área de transición de la epidermis pluristratificada (Δ), monocapa epidérmica y monocapa de células glandulares (\rightarrow) a 29 dda. (e) Hinchazón de las ampollas a 39 dda (Δ). (f) Colapso de las ampollas (Δ) y senescencia a 44 dda. (Fuente: Sánchez-Segura *et al.*, 2015).

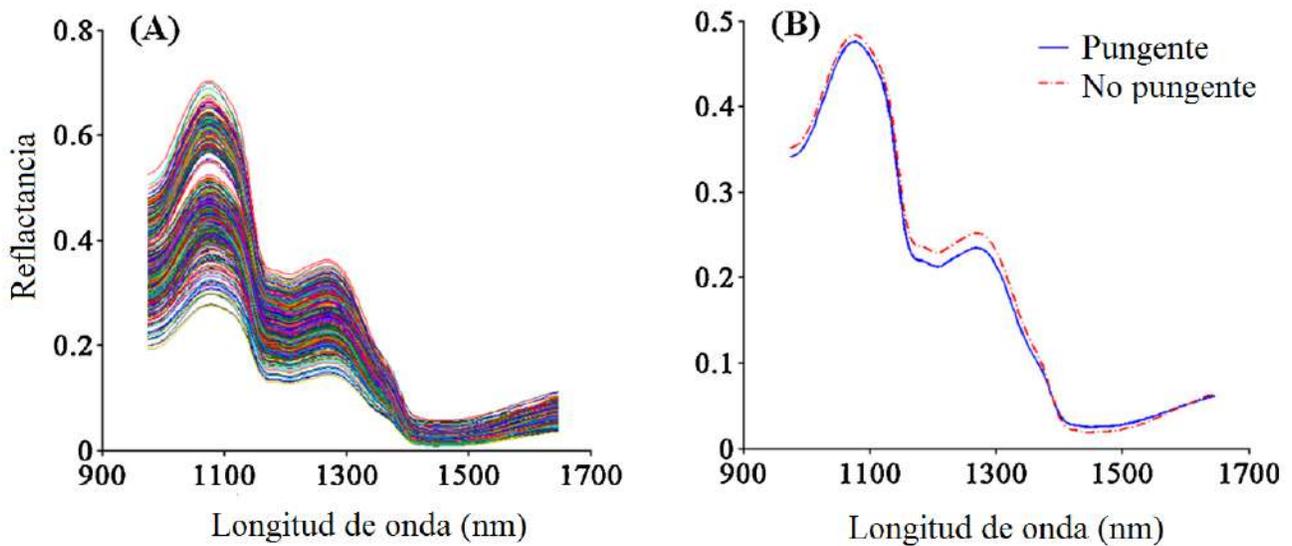


Figura 3. Promedio de espectros de chiles y B) promedio de espectros de chiles pungentes y no pungentes. (Fuente Jiang *et al.*, 2018).

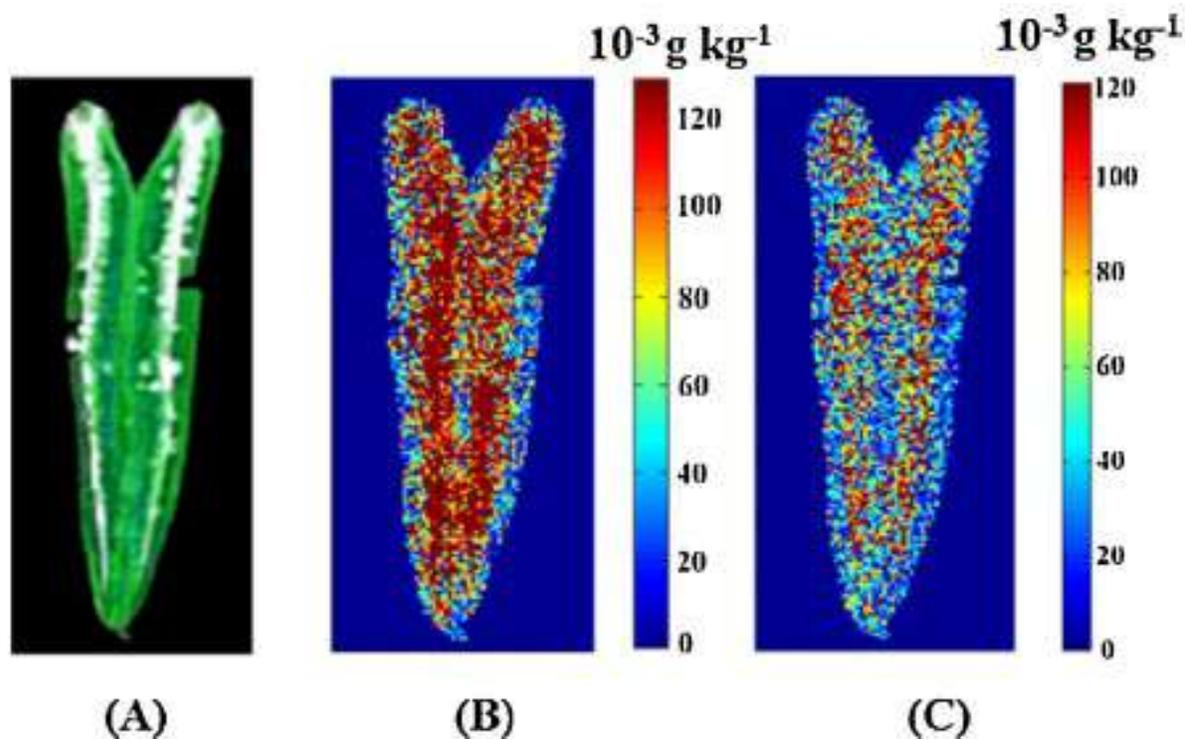


Figura 4. A) Imágenes RGB de chile cortado; B) Mapa de distribución de la capsaicina y C) mapa de distribución de dihidrocapsaicina. (Fuente Jiang *et al.*, 2018).

En el caso de la evaluación del contenido de capsaicinoides (nivel de pungencia) se ha efectuado por métodos cromatográficos y sensorialmente. Sin embargo, los procesos largos de extracción, dificultad en la preparación de la muestra, la fatiga y saturación del umbral de las personas representan las limitaciones de estas técnicas, pero al mismo tiempo han permitido el desarrollo de otras alternativas para su evaluación (Korel *et al.*, 2002). En este sentido, la aplicación de la nariz electrónica (EN por sus siglas en inglés) se vuelve una alternativa para la determinación del nivel de capsaicinoides. En la investigación de Korel *et al.*, (2002) usaron esta técnica en pimientos rojos de Turquía y reportaron que dicha técnica permite diferenciar los pimientos con un porcentaje correcto de clasificación del 91%.

Por último, una de las técnicas instrumentales que recientemente se han usado es la espectroscopia de Emisión de Plasma de Acoplamiento Inductivo (ICP) y la Espectrofotometría de Absorción Atómica (AA) con la finalidad de cuantificar el contenido mineral de diferentes variedades de chiles en estudios enfocados a nutrición, origen geográfico, entre otros (Sevgi-Kirdar *et al.*, 2015). De acuerdo a lo anterior, Zou *et al.* (2015) determinaron el contenido mineral de chiles de la región Noroeste de China mediante ICP y reportaron contenidos altos de K (654.12 ± 5.46), Mg (237.59 ± 3.63) y Ca (174.71 ± 2.93). Por su parte, Chavéz-Servia *et al.*, (2016) determinaron el contenido mineral de diferentes chiles nativos del Estado de Oaxaca conocidos como Tabiche, Piquín, Solterito y Nanche, estos autores reportaron que los minerales Ca, Cu, Mg y Fe, contribuyeron a diferenciar las distintas especies de chile (Ozbek *et al.*, 2016).

III. Conclusiones

Se concluye que las técnicas sensoriales QDA, Check-All-The-Apply y las técnicas dinámicas han sido frecuentemente aplicadas en la caracterización sensorial de algunos chiles, aunque la prueba de Scoville sigue siendo mayormente usada a comparación de las técnicas sensoriales antes mencionadas. También se han usados diferentes técnicas instrumentales para la evaluación de capsaicinoides, perfil de textura, parámetros de color y contenido mineral en chiles, aunque la correlación con datos sensoriales de Chile ha sido limitado. Es por ello que se recomienda realizar investigaciones que permitan el desarrollo de métodos de preparación de muestras de chiles para analizar las emociones que se generan al momento de consumir el Chile, así como para la generación de vocabularios sensoriales que permitan evaluar las muestras con la mayor cantidad de sentidos humanos. Lo antes mencionado representa una importante área de oportunidad para profundizar en las investigaciones donde se requiera hacer uso de las técnicas sensoriales e instrumentales para analizar el impacto de diferentes factores como el manejo agronómico, el clima entre otros, en la calidad de los chiles.

IV. Referencias

- Ares, G., Giménez, A., Barreiro, C. y Gámbaro, A. (2010a). Use of an open-ended question to identify drivers of liking of milk desserts: comparison with preference mapping techniques. *Food Quality and Preference*, 21, 286–294. <https://doi.org/10.1016/j.foodqual.2009.05.006>
- American Spice Trade Association (ASTM). (1968). "Official Analytical Methods" Method 21.0
- Baenas, N., Belović, M., Ilic, N., Moreno, D. A., y García-Viguera, C. (2018). Industrial use of pepper (*Capsicum annum* L.) derived products: technological benefits and biological advantages. *Food Chemistry* 274: 872-885. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2018.09.047>
- Brandt, M.A., Skinner, E. A., y Coleman, J.A. (1963). Texture profile method. *Journal of Food Science* 28, 404–409. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2621.1963.tb00218.x>
- Buenfil-Ocampo, A. (2014). Siembra y extracción de semilla de Chile habanero. Informe Técnico de Residencia Profesional. Instituto Tecnológico de la Zona Maya.
- Cadoret, M., y Husson, F. (2013). Construction and evaluation of confidence ellipse applied at sensory data. *Food Quality and Preference*. 28:106-115. <https://doi.org/10.1016/j.foodqual.2012.09.005>
- Cairncross, S., y I. Sjostrom. (1950). Flavor profile. A new approach to flavor problems. *Food Technology* 4: 308–311. <https://doi.org/10.1002/9780470385036.ch1b>
- Castillejos-Alegria, A, E., y Porte-Morales, M.J. (2015). Salsa tipo artesanal de Chile habanero adicionada con piña. Tesis de Licenciatura. Universidad de Ciencias y Artes de Chiapas.
- Contador, L., Díaz, M., Hernández, E., Shinya, P. y Infante R. (2016). The relationship between instrumental tests and sensory determinations of peach and nectarine texture. *European Journal of Horticultural Science* 81: 189-196. <http://dx.doi.org/10.17660/eJHS.2016/81.4.1>.
- Chan, N., Sauri, E., Olivera, L. y Rivas, J. (2011). Evaluación de la calidad en la industria del Chile habanero (*Capsicum chinense*). *Revista Iberoamericana de Tecnología Postcosecha* 12: 222-226. <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=81320900014>
- Chávez-Servia, J., Vera-Guzmán, A, M., Carrillo-Rodríguez, J, C., y Heredia-García, E. (2016). Variación del contenido de minerales en frutos de variedades autóctonas de Chile (*Capsicum annum* L.), cultivadas en invernadero. *Revista de la Facultad de Ciencias Farmacéuticas y Alimentarias*. 23: 48-57. <http://dx.doi.org/10.17533/udea.vitae.v23n1a02>
- Cliff, M., y Heymann, H. (1992), Descriptive analysis of oral pungency. *Journal of Sensory Studies*, 7: 279-290. . <http://doi:10.1111/j.1745-459X.1992.tb00195.x>

- Dairou, V., y Sieffermann J. M. 2002. A comparison of 14 jams characterized by conventional profile and a quick original method, the flash profile. *Journal of Food Science*. 67(2):826-834. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2621.2002.tb10685.x>
- Del Pozo-Bayón, M.A. (2009). Estrategias en el estudio del aroma de los alimentos y su relación con la percepción del aroma. *Perceptnet* 88: http://www.perceptnet.com/ciencia/aroma_alimentos_consumo_cien1009.htm
- Dinnella, C., Masi, C, Naes, T., y Monteleone, E. (2013). A new approach in TDS data analysis: A case study on sweetened coffee. *Food Quality and Preference*, 30: 33-46. <https://doi.org/10.1016/j.foodqual.2013.04.006>
- Dos Santos-Garruti, D., Frederico-Pinto, N, O., Castro-Alves, V, C., Azevedo-Da Penha, M, F., Castro-Tobaruela, E, C., y Silva-Araujo, I, M. (2013). Volatile profile and sensory quality of new varieties of *Capsicum chinense* pepper. *Ciência e Tecnologia de Alimentos*. 33: 102-108. <http://dx.doi.org/10.1590/S0101-20612013000500016>
- Gierczynski, I., Guichard, E., y Laboure, H. (2011). Aroma perception in dairy products: the roles of texture, aroma release and consumer physiology: A review. *Flavour and Fragrances Journal* 26: 141-152. <https://doi.org/10.1002/ffj.2036>
- Gillette, M. H., Appel, C. E., y Lego, M. C. (1984). A New Method for Sensory Evaluation of Red Pepper Heat. *Journal of Food Science*, 49(4), 1028–1033. <https://doi:10.1111/j.1365-2621.1984.tb10386.x>
- Gómez-Rincón, E., Reyes-Vazquez, N., Ramírez-Sucre, M., y Rodríguez-Buenfil, I. (2018). Actividad antioxidante y su correlación con parámetros colorimétricos de *Capsicum chinense* Jacq secado por dos métodos. *Revista del Centro de Graduados del Instituto Tecnológico de Mérida*. 33: 38-42 <http://www.revistadelcentrodegraduados.com/2019/05/actividad-antioxidante-y-su-correlacion.html?m=1>
- Guzmán, I., y Bosland, P.W. (2017). Sensory properties of chile pepper heat and its importance to food quality and cultural preference. *Appetite*, 117: 186-190. <http://dx.doi.org/10.1016/j.appet.2017.06.026>
- Harker, F.R., Redgwell, R.J., Hallett, I.C., Murray, S.H., y Carter, G. (2010). Texture of fresh fruit. In *Horticultural Reviews* (John Wiley & Sons, Inc.). <http://dx.doi.org/10.1002/9780470650646.ch2>
- Hyldig, G., y Nielsen, D. (2001). A review of sensory and instrumental methods used to evaluate the texture of fish muscle. *Journal of Texture Studies*, 32: 219–242. <https://doi.org/10.1111/j.1745-4603.2001.tb01045.x>
- Jager, G., Schlich, P., Tijssen, I., Yao, J., Visalli, M., Graaf, C., y Stieger, M. (2014). Temporal dominance of emotions: Measuring dynamics of food-related emotions during consumption. *Food Quality and Preference*, 37, 87-99. <https://doi.org/10.1016/j.foodqual.2014.04.010>
- Jiang, J., Cen, H., Zhang, C., Lyu, X., Weng, H., Xu, H., y He, Y. (2018). Nondestructive quality assessment of chili peppers using near-infrared hyperspectral imaging combined with multivariate analysis. *Postharvest Biology and Technology*, 146, 147–154. <https://doi:10.1016/j.postharvbio.2018.09.003>
- Kanjanakorn, A., y Lee, J. (2017). Examining emotions and comparing the essence profile® and the coffee drinking experience in coffee drinkers in the natural environment. *Food Quality and Preference*, 56(Part A), 69-79. <https://doi.org/10.1016/j.foodqual.2016.09.014>
- King, S. C., y Meiselman, H. L. (2010). Development of a method to measure consumer emotions associated with foods. *Food Quality and Preference*, 21(2), 168–177. <http://dx.doi.org/10.1016/j.foodqual.2009.02.005>
- King, S. C., Meiselman, H. L., y Carr, B. T. (2013). Measuring emotions associated with foods: Important elements of questionnaire and test design. *Food Quality and Preference*, 28(1), 8–16. <http://dx.doi.org/10.1016/j.foodqual.2012.08.007>

- Korel, F., Bağdatlıoğlu, N., Balaban, M. Ö., y Hişil, Y. (2002). Ground Red Peppers: Capsaicinoids Content, Scoville Scores, and Discrimination by an Electronic Nose. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 50(11), 3257–3261. <http://doi:10.1021/jf010537b>
- Ku, K. H., Lee, K. A., Park, J. B. (2012). Physicochemical Properties and Sensory Evaluation for the Heat Level (Hot Taste) of Korean Red Pepper Powder. *Preventive Nutrition and Food Science*, 17: 29-35. <http://dx.doi.org/10.3746/pnf.2012.17.1.029>
- Lawless, H. (1984). Oral chemical irritation: psychophysical properties. *Chemical Sense*, 9: 143-155. <https://doi.org/10.1093/chemse/9.2.143>
- Lepage, M., Neville, T., Rytz, A., Schlich, P., Martin, N. y Pineau, N. (2014). Panel performance for Temporal Dominance of Sensations. *Food Quality and Preference*, 38, 24-29. <https://doi.org/10.1016/j.foodqual.2014.05.002>
- Luning, P. A., van der Vuurst de Vries, R., Yuksel, D., Ebbenhorst-Seller, T., Wichers, H. J., y Roozen, J. P. (1994). Combined Instrumental and Sensory Evaluation of Flavor of Fresh Bell Peppers (*Capsicum annuum*) Harvested at Three Maturation Stages. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 42(12), 2855–2861. <https://doi:10.1021/jf00048a038>
- Marshall, J. T., y Doperalski, V. L. (1981). Jalapeno Pepper Pungency as a Quality Control Factor for Process Cheese. *Journal of Dairy Science*, 64(4), 627–633. [https://doi:10.3168/jds.s0022-0302\(81\)82622-7](https://doi:10.3168/jds.s0022-0302(81)82622-7)
- Menichini, F., Tundis, R., Bonesi, M., Loizzo, M., Conforti, F., Statti, G., De Cindio, B., Houghton P., y Menichini, F. (2009). The influence of fruit ripening on the phytochemical content and biological activity of *Capsicum chinense* Jacq. cv Habanero. *Food Chemistry*, 114: 553-560. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2008.09.086>
- Morán-Bañuelos, S., Hirán, Aguilar-Rincón, V., Corona-Torres, H., Castillo-González, T., Soto-Hernández, F., Marcos, R., y San Miguel-Chávez, Rubén. (2008). Capsaicinoides en chiles nativos de Puebla, México. *Agrociencia*, 42(7), 807-816. http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1405-31952008000700007&lng=es&tlng=es
- McQuaid, J. (2015). *Tasty: The Art and Science of What We Eat*. NY, NY: Scribner.
- Nestrud, M. A., Meiselman, H. L., King, S. C., Leshner, L. L., y Cardello, A. V. (2016). Development of EsSense25, a shorter version of the EsSense Profile®. *Food Quality and Preference*, 48, Part A, 107–117. <https://doi.org/10.1016/j.foodqual.2015.08.005>
- Ozbek, N., y Akman, S. (2016). Microwave plasma atomic emission spectrometric determination of Ca, K, and Mg in various cheese varieties. *Food Chemistry*. 192: 295-298. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2015.07.011>
- Penchaiya, P., Bobelyn, E., Verlinden, B. E., Nicolai, B. M., y Saeys, W. (2009). Non-destructive measurement of firmness and soluble solids content in bell pepper using NIR spectroscopy. *Journal of Food Engineering*, 94(3-4), 267–273. <http://doi:10.1016/j.jfoodeng.2009.03.018>
- Patel, K, Calderon, R., Ascencio E., Vilchez D., Marcelo M., y Rojas, R. (2016). Agro-morphological Characteristics and Sensory Evaluation of Native Peruvian Chili Peppers. *Journal of Agricultural Science and Technology*, 6:180-187. [10.17265/2161-6264/2016.03.005](http://doi:10.17265/2161-6264/2016.03.005)
- Perrin, L., y Pagès, J. (2009). Construction of a product space from the ultra-flash profiling method: application to 10 red wines from the Loire valley. *Journal of Sensory Studies*, 24:372-395. <https://doi.org/10.1111/j.1745-459X.2009.00216.x>
- Perrin, L., Symonneaux, R., Maître, I., Asselin, C., Jourjon, F., y Pagès, J. (2008). Comparison of three sensory methods for use with the Napping procedure: Case of ten wines from Loire valley. *Journal Food Quality and Preference*, 19:1-11. <https://doi.org/10.1016/j.foodqual.2007.06.005>
- Pineau, N., Schlich, P., Cordelle, S., Mathonnière, C., Issanchou, S., Imbert, A., Rogeaux, M., Etiévant, P., y Köster, E. (2009). Temporal Dominance of Sensations: Construction of the

- TDS curves and comparison with time–intensity. *Food Quality and Preference*, 20(6), 450-455. <https://doi.org/10.1016/j.foodqual.2009.04.005>
- Pineau, N., de Bouillé, A. G., Lepage, M., Lenfant, F., Schlich, P., Martin, N., y Rytz, A. (2012). Temporal Dominance of Sensations: What is a good attribute list?. *Food Quality and Preference*, 26(2), 159-16. <https://doi.org/10.1016/j.foodqual.2012.04.004>
- Pinedo-Guerrero, Z.H., Hernández-Fuentes, A.D., Ortega-Ortiz, H., Benavides-Mendoza, A., Cadenas-Pliego, G., Juárez-Maldonado, A.A. (2017). Cu Nanoparticles in Hydrogels of Chitosan-PVA Affects the Characteristics of Post-Harvest and Bioactive Compounds of Jalapeño Pepper. *Molecules*, 22, 926. <https://doi.org/10.3390/molecules22060926>
- Rajalakshmi, M., Subashini P. (2014). Texture Based Image Segmentation of Chili Pepper X-Ray Images Using Gabor Filter. *International Journal of Advanced Studies in Computer Science & Engineering*, 3: 44-51. <https://arxiv.org/ftp/arxiv/papers/1405/1405.1966.pdf>
- Ramírez-Rivera, E. J., Díaz-Rivera, P., Ramón-Canul, L. G., Juárez-Barrientos, J. M., Rodríguez-Miranda, J., Herman-Lara, E., Prinyawiwatkul, W., y Herrera-Corredor, J. A. (2018). Comparison of performance and quantitative descriptive analysis sensory profiling and its relationship to consumer liking between the artisanal cheese producers panel and the descriptive trained panel. *Journal of Dairy Science*. 101, 5851-5864. <https://doi.org/10.3168/jds.2017-14213>
- Ramírez-Sucre, M.O., Baeza-Melchor, T., Echevarria, I., y Rodríguez-Buenfil, I.M. (2018). Quality of habanero chili by texture measurements: Fresh-cut and post-harvest study. *Journal of Food, Nutrition and Population Health*. 2:49-50. Proceedings of 2nd Euroscicon Conference on Food Technology, 14-16 de mayo, Rome, Italy. ISSN 2577-0586. <https://doi.org/10.21767/2577-0586-C1-00>
- Raju, P.S., Chauhan, O.P., y Bawa, A.S. (2010). Chili Flavor. In: *Handbook of Fruit and Vegetable Flavor*, Hui, Y.H., F. Chen and L.M.L. Nollet (Eds.). Chapter 41, John Wiley and Sons, New Jersey, USA., ISBN-13: 9781118031858, pp: 775-802.
- Ruíz-Lau, N., Medina, F., y Martínez, M. (2011). El chile habanero: su origen y usos. *Ciencia* (Julio-septiembre): 70-78. https://www.amc.edu.mx/revistaciencia/images/revista/62_3/PDF/Habanero.pdf
- Sánchez-Segura, L., Téllez-Medina, D. I., Evangelista-Lozano, S., García-Armenta, E., Alamilla-Beltrán, L., Hernández-Sánchez, H., y Gutiérrez-López, G. F. (2015). Morpho-structural description of epidermal tissues related to pungency of *Capsicum* species. *Journal of Food Engineering*, 152, 95–104. <https://doi:10.1016/j.jfoodeng.2014.11.022>
- Sevgi-Kirdar, S., Kose, S., Gun, I., Ocak, E., y Kursun, O. (2015). Do consumption of Kargi Tulum cheese meet daily requirements for minerals and trace elements?. *Mljekarstvo :Journal for dairy production and processing improvement*. 65: 203-209. <https://doi.org/10.15567/mljekarstvo.2015.0307>
- Stone, H., Sidel, J.L., Oliver, S., Woolsey, A., y Singleton, R.C. (1974). Sensory evaluation by quantitative descriptive analysis. *Food Technology*. 28:24-34. <https://doi.org/10.1002/9780470385036.ch1c>
- Sweat, K. G., Broatch, J., Borrer, C., Hagan, K., y Cahill, T. M. (2016). Variability in capsaicinoid content and Scoville heat ratings of commercially grown Jalapeño, Habanero and Bhut Jolokia peppers. *Food Chemistry*, 210, 606–612. <https://doi:10.1016/j.foodchem.2016.04.135>
- Taylor, A.J., R.S.T. Linforth., B.A. Harvey., y Blake, A. (2000). Atmospheric pressure chemical ionisation mass spectrometry for in vivo analysis of volatile flavour release. *Food Chemistry* 71, 327-338. [https://doi.org/10.1016/S0308-8146\(00\)00182-5](https://doi.org/10.1016/S0308-8146(00)00182-5)
- Teixeira, E., Rodrigues, F., Martins, C., Santos de Oliveira, F., Pereira, A., y Andrade, J. (2006). Multivariate optimization and HS-SPME/ GC-MS analysis of VOCs in red, yellow and purple varieties of *Capsicum chinense* sp. Peppers. *Microchemical Journal*, 82:142–49. <https://doi.org/10.1016/j.microc.2006.01.017>

- Tomic, O., Luciano, G., Nilsen, A., Hyldig, G., Lorensen, K., y Naes, T. (2010). Analysing sensory panel performance in a proficiency test using the Panel CHECK software. *European Food Research and Technology*, 230:497-511. <https://doi.org/10.1007/s00217-009-1185-y>.
- Tournier, C., Sulmont-Rossé, C., Sermon, E., Vignon, A., Issanchou, S., y Guirchard, E. (2009). A study on texture-taste-aroma interaction: Physico-chemical and cognitive mechanisms. *International Dairy Journal* 19, 450-458. <https://doi.org/10.1016/j.idairyj.2009.01.003>
- Valentin, D., Chollet, S., Lelièvre, M., y Abdi, H. (2012). Quick and dirty still pretty good: a review of new descriptive methods in food science. *International Journal of Food Science and Technology*, 47(8):1-16. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2621.2012.03022.x>
- Wall, M.M., y Bosland, P.W. (1998). Analytical methods for color and pungency of chiles (capsicums). *Instrumental Methods in Food and Beverage Analysis*, 347-373. [https://doi.org/10.1016/S0167-4501\(98\)80014-9](https://doi.org/10.1016/S0167-4501(98)80014-9)
- Zewdie, Y., y Bosland, P. W. 2001. Capsaicinoid profiles are not good chemotaxonomic indicators for *Capsicum* species. *Biochemical Systematics and Ecology*, 29, 161e169. [https://doi.org/10.1016/S0305-1978\(00\)00041-7](https://doi.org/10.1016/S0305-1978(00)00041-7)
- Zou, Yu, MA, Kun, y Tian, Mixia. 2015. Chemical composition and nutritive value of hot pepper seed (*Capsicum annuum*) grown in Northeast Region of China. *Food Science and Technology*, 35(4), 659-663. Epub October 09, 2015. <https://dx.doi.org/10.1590/1678-457X.6803>

IV. POSTCOSECHA



CAPÍTULO 15

Fisiología y tecnología postcosecha del chile habanero (*Capsicum chinense* Jacq.)

Postharvest physiology and technology of habanero chili (*Capsicum chinense* Jacq.)

Maldonado-Astudillo, Yanik I.^{1,2}, Jiménez-Hernández, Javier^{1,2*}, y Salazar Ricardo³.

¹Facultad de Ciencias Químico Biológicas. Universidad Autónoma de Guerrero. Av. Lázaro Cárdenas s/n, Ciudad Universitaria sur. Col. La haciendita. Chilpancingo de los Bravo, Guerrero, México. C.P. 39090.

²Maestría en Competitividad y Sustentabilidad. Centro Unidad de estudios de Posgrado e Investigación. Universidad Autónoma de Guerrero. Calle Pino s/n. Col. El Roble. Acapulco de Juárez, Guerrero. C.P. 39640. *autor de correspondencia: yaixma@gmail.com

³CONACyT-Universidad Autónoma de Guerrero, Av. Javier Méndez Aponte núm. 1. Fracc. Servidor Agrario. Chilpancingo de los Bravo, Guerrero, México. C.P. 39070

Resumen

Capsicum chinense Jacq. pertenece a la familia Solanaceae y es ampliamente conocido en el mundo. En México se conoce como chile habanero y representa parte de la tradición e identidad cultural de México; sus cualidades y prestigio permitieron la otorgarle la denominación de origen 'chile habanero de la Península de Yucatán'. Los frutos del género *Capsicum* son no climatéricos. Las frutas de *C. chinense* muestran amplia variabilidad en sus características físicas como forma, tamaño, color, aroma y textura, las cuales cambian durante la maduración, siendo los cambios más drásticos en color y textura. El contenido de capsaicinoides también varía durante todas las etapas del desarrollo y, se observa una acumulación progresiva hasta los 45-50 días, donde puede alcanzar entre 120 y 200 $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$, para luego disminuir gradualmente. El momento de cosecha más frecuente en *C. chinense* es cuando el fruto ha alcanzado su tamaño máximo, se encuentra en etapa de madurez fisiológica con epicarpio color verde brillante y firmeza al tacto. En estas condiciones posee una vida de anaquel promedio de 2 semanas a 22 °C. La cosecha se hace manualmente conservando el pedúnculo. La calidad del fruto se basa en su apariencia externa (tamaño, forma, firmeza y color), nivel de pungencia e incluso, su peso y contenido de sólidos solubles. Se estiman pérdidas de producción de alrededor del 20 – 30 % anual, principalmente debido a infecciones microbianas y daños fisiológicos derivados del manejo poscosecha. Se han implementado diferentes tecnologías para incrementar su vida de anaquel, como el almacenamiento a bajas temperaturas, aplicación de radiaciones gamma y ultravioleta, control biológico, conservación por atmósferas controladas y modificadas, entre otras. La refrigeración a 10 °C es efectiva para almacenamiento en periodos prolongados (25 días).

Palabras clave: Climatérico, vida de anaquel, no climatérico, respiración.

Abstract

Capsicum chinense Jacq. it belongs to the Solanaceae family and is widely known in the world. In Mexico it is known as 'chile habanero' and represents part of the tradition and cultural identity of Mexico; its qualities and prestige allowed the granting of the denomination of origin 'chile habanero de la Península de Yucatán'. The fruits of the genus *Capsicum* are non-climacteric. The fruits of *C. chinense* show wide variability in their physical characteristics such as shape, size, color, aroma and texture, which change during ripening, being the main changes in color and texture. The capsaicinoids content also varies during all stages of development and a progressive accumulation is observed to 45-50 days, where it can reach between 120 and 200 $\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$, and then gradually decrease. The most frequent harvest time in *C. chinense* is when the fruit has reached its maximum size, is in the stage of physiological maturity with shiny green epicarp and firmness. Under these conditions it has an average shelf life of 2 weeks at 22 °C. The harvest is executed manually keeping the peduncle. The quality of the fruit is based on its external appearance (size, shape, firmness and color), level of pungency and even its weight and content of soluble solids. The losing production is around 20 - 30% per year are estimated, mainly due to microbial infections and physiological damages derived from postharvest handling. Different technologies have been implemented to increase shelf life, such as storage at low temperatures, application of gamma and ultraviolet radiation, biological control, conservation by controlled and modified atmospheres, among others. Refrigeration at 10 ° C is effective for storage over prolonged periods (25 days).

Keywords: Climateric, Shelf life, non climacteric, respiration.

I. Introducción

Capsicum chinense Jacq. pertenece a la familia Solanaceae y es conocido en diversas partes del mundo. En México se conoce como chile habanero y representa parte de la tradición e identidad cultural de México, ya que han caracterizado la cocina mexicana desde hace al menos 8 siglos (Contreras-Padilla y Yahia, 1998). Su amplia dispersión geográfica tiene su centro de origen en América del Sur, zona que se considera de mayor diversidad (Bharath *et al.*, 2013) que se ha extendido hasta nuestro país, principalmente en la península de Yucatán, donde se le ha otorgado la "denominación de origen" (Diario Oficial de la Federación, 2008). Esta distinción se debe principalmente a que las condiciones climáticas y el sistema de cultivo tradicional que prevalece aún en día, han permitido desarrollar su variabilidad genética y persistencia como especie local (Andueza-Noh *et al.*, 2017). Dicha variabilidad constituye una fuente importante de genes útiles para programas de mejoramiento encaminados a incrementar la productividad del cultivo, así como la calidad de la fruta.

De acuerdo con Chunab *et al.* (2011), la calidad de un alimento está definida, en gran medida, por la percepción que tenga el consumidor de él, principalmente basado en las características sensoriales, nutrimentales, funcionales y de inocuidad. Por ello, conocer la fisiología de las frutas y hortalizas es clave para el desarrollo de programas de manejo pre y poscosecha orientados al aseguramiento de la calidad de los productos desde su origen. No obstante, aún son pocos los trabajos relacionados con este tema en *C. chinense*, por lo que el objetivo del presente trabajo fue

recopilar información relacionada con los principales cambios fisiológicos que sufren los frutos de *C. chinense* durante la maduración, así como los tratamientos poscosecha utilizados para mantener la calidad y prolongar la vida útil de chile habanero.

II. Revisión bibliográfica

2.1 Fisiología de la maduración de *Capsicum*

De acuerdo con Martínez-González *et al.* (2017), en la vida de los frutos se pueden distinguir tres etapas secuenciales: crecimiento, maduración y senescencia. Una vez que la flor ha sido polinizada y fertilizada (cuaje) inicia el proceso de división y elongación celular, el fruto incrementa su tamaño hasta alcanzar la madurez fisiológica (en inglés 'mature'). Es en esta etapa donde se inicia una serie de cambios bioquímicos irreversibles de control genético y hormonal para alcanzar la madurez de consumo (en inglés 'ripe'), entre los que se pueden mencionar cambios de color, sabor, aroma, textura y pérdida de firmeza, que conduce al ablandamiento del fruto, el deterioro de la membrana y finalmente a la senescencia o muerte celular.

Asimismo, al inicio de la madurez de consumo pueden ocurrir cambios importantes en la actividad respiratoria de las frutas. Si las tasas respiratorias y de producción de etileno aumentan, las frutas pueden madurar después de la cosecha (siempre y cuando esta ocurra en la etapa de pre climaterio) y se conocen como frutos 'climatéricos'; mientras que los frutos 'no climatéricos' no son capaces de continuar su proceso de maduración una vez que se desprenden de la planta madre debido a que no muestran incrementos visibles en sus tasas de respiración y producción de etileno durante la maduración (Elibox *et al.*, 2015; Martínez-González *et al.*, 2017).

El chile habanero y otros frutos del género *Capsicum* son no climatéricos, y aun cuando en algunos pimientos se observan concentraciones de etileno capaces de inducir la maduración, el aumento respiratorio coincidente con el inicio de la maduración suele estar ausente (Villavicencio *et al.*, 1999). La respiración es un proceso complejo que involucra la oxidación de carbohidratos y lípidos a CO₂ y agua para producir energía, puede ser influenciado por factores intrínsecos tales como la variedad, tamaño de la fruta, grado de madurez y tipo de tejido, así como por factores extrínsecos como la temperatura, concentración de gases y daños mecánicos (Mattos *et al.*, 2007).

Las variedades de *C. chinense* presentan tasas respiratorias medias, en comparación con otras especies del género *Capsicum*. Mattos *et al.* (2007) registraron valores de CO₂ entre 118 y 158 mg·kg⁻¹·h⁻¹ en variedades coloridas de chile habanero de Brasil, los cuales incrementaron en el segundo día de almacenamiento hasta registrar picos de máxima producción de 213 y 272 mg·kg⁻¹·h⁻¹ en la variedad anaranjada y amarilla respectivamente. Villavicencio *et al.* (1999) reportaron valores menores de CO₂ (89.2 mg·kg⁻¹·h⁻¹) y etileno (0.367 μL·kg⁻¹·h⁻¹) en frutos de habanero maduros en comparación con los frutos en estado verde (CO₂ = 117.8 mg·kg⁻¹·h⁻¹, etileno = 0.611 μL·kg⁻¹·h⁻¹); no obstante este comportamiento difirió en otras variedades como 'Chiltepín', que incrementó en 26 % la producción de CO₂ en el estado maduro (291.7 mg·kg⁻¹·h⁻¹), pero disminuyó en 67 % la producción de etileno (0.11 μL·kg⁻¹·h⁻¹).

A pesar de las bajas tasas respiratorias que presentan los frutos no climatéricos, el etileno exógeno juega un papel importante en los cambios bioquímicos que experimentan estos frutos una vez cosechados, aunque su sensibilidad varía independientemente de la especie (Finger y Pereira, 2016). Por ejemplo, cuando los frutos de *Capsicum* se cosechan en estado verde y son tratados con etileno no maduran normalmente, no así cuando se cosechan durante o después de la etapa

de cambio de color, donde se observan cambios progresivos propios de la maduración, lo que sugiere que los reguladores de la maduración pueden estar presentes exclusivamente desde esta etapa hacia adelante, posiblemente en una ruta independiente del etileno (Aizat *et al.*, 2013). Adicionalmente, Aizat *et al.* (2014) observaron cambios significativos en el contenido de almidón, azúcares y otros derivados durante las diferentes etapas de maduración de *C. annuum* var. Aries, lo que puede afectar la abundancia de algunos productos intermedios de glucólisis y, en consecuencia, otras rutas metabólicas que involucran aminoácidos, precursores de color y pungencia y productos intermediarios del ciclo del ácido tricarboxílico (TCA). Además, los metabolitos estrechamente relacionados con la producción de etileno, como la cisteína y la metionina, aumentaron gradualmente entre las etapas de maduración, mientras que la putrescina disminuyó significativamente durante la maduración, lo que sugiere que algunas partes de la ruta del etileno aún pueden ser funcionales en esta fruta no climatérica.

Las frutas de *C. chinense* muestran amplia variabilidad en sus características físicas como forma, tamaño, color, aroma y textura, las cuales cambian durante la maduración. Entre las características que experimentan cambios más drásticos se encuentran el color y la textura. En una colección de 264 accesiones de germoplasma de *C. chinense* del Caribe, Bharath *et al.* (2013) reportaron cuatro colores principales de frutas inmaduras: blanco, amarillo, púrpura y, con mayor frecuencia, verde en distintas tonalidades; mientras que en estado maduro se observaron doce colores, entre los que predominaron las variantes rojas. Por su parte, Baba *et al.* (2016) identificaron 10 tonalidades diferentes en frutos inmaduros de accesiones de *C. chinense* de Brasil, mientras que el color predominante en los frutos maduros fue el rojo (55 %), anaranjado (10 %) y una accesión blanca, naranja-amarilla y negra.

En *Capsicum annum*, Noichinda *et al.* (2017) indican que la clorofila predomina en la etapa de madurez verde de la fruta ($0.42 \text{ g} \cdot \text{g}^{-1} \text{ pf}$, peso fresco) y disminuye ligeramente hasta $0.1 \text{ g} \cdot \text{g}^{-1}$ cuando madura completamente y se torna roja, debido al incremento de la clorofilasa, cuyo pico de máxima actividad fue de $0.61 \text{ unidad} \cdot \text{min}^{-1} \cdot \mu\text{g}^{-1}$ de proteína en la etapa roja. Durante la maduración de los frutos rojos de *Capsicum*, hay una síntesis intensa de pigmentos carotenoides (rojo-anaranjado), principalmente capsantina, capsorubina y criptocapsina (Lannes *et al.*, 2007); sin embargo, la antocianina (rojo-púrpura) también está presente desde la etapa verde, pero en menor proporción que la clorofila. El etileno está involucrado en la regulación de los genes de la biosíntesis de antocianinas, cuya acumulación depende del clima en el que se desarrollan las frutas (temperaturas bajas favorecen la biosíntesis); cantidad de nutrientes del suelo, donde el déficit de nitrógeno y fósforo inducen su acumulación; así como con la intensidad de luz del sol (Martínez-González *et al.*, 2017). Los pigmentos de las frutas son poderosos bioactivos de interés alimentario, cosmético y terapéutico, por lo que entender los procesos de su biosíntesis puede ser un aspecto importante para su aprovechamiento biotecnológico, tal como lo reportado por Pérez-Ambrocio *et al.* (2018), quienes lograron incrementar los bioactivos y la capacidad antioxidante del chile habanero al tratarlo con una combinación de 3 min de luz azul más 0.5 min de luz UV-C durante el almacenamiento.

El ablandamiento o pérdida de firmeza del fruto es un proceso complejo que involucra tres pasos subsecuentes que son la relajación de la pared celular, la despolimerización de hemicelulosas, y la despolimerización de poliuronidos por la poligalacturonasa u otras enzimas hidrolíticas. Dichas modificaciones involucran la acción coordinada e interdependiente de enzimas y proteínas modificadoras de la pared celular tales como la poligalacturonasa (EC 3.2.1.15), pectinmetilesterasa (EC 3.1.1.11), β -galactosidasa (EC 3.2.1.23) xiloglucano endotransglicosilasa (EC 2.4.1.207) y expansinas (Martínez-González *et al.*, 2017).

En cuanto a la composición química, el pH no muestra diferencia significativa entre el chile sazón y el maduro (Chunab *et al.*, 2011), no así el contenido de azúcares totales, los cuales disminuyen durante la maduración debido a que son utilizados como fuente de energía en el proceso respiratorio (Noichinda *et al.*, 2017). La acumulación de sólidos solubles en el pericarpio del fruto de *C. annum* se correlaciona positivamente con el contenido de materia seca de la fruta, por cada 1 % de aumento en el contenido de peso seco, los sólidos solubles aumentan aproximadamente 0.28 % (Lannes *et al.*, 2007).

La maduración también afecta el aroma de los frutos de *Capsicum*. Se han identificado más de 130 compuestos volátiles responsables del aroma en *C. chinense*, principalmente ésteres y terpenoides, entre los cuales el (E)-2-hexenal, 3-metilbutanoato de hexilo, 3-metilbutanoato de (Z)-3-hexenilo, pentanoato de hexilo, 3,3-dimetilciclohexano y el ácido hexadecanoico son los de mayor predominancia. El mayor rendimiento de compuestos volátiles se observó en accesiones de tonalidades naranja y marrón (6.68 a 11.84 mg·kg⁻¹), quienes además presentan mayor proporción de ésteres con notas florales que los cultivares rojos. Durante la maduración del chile Habanero la mayoría de los compuestos con notas de olor verde disminuyen o desaparecen, mientras, por el contrario, ésteres con notas de olor afrutado aumentan su contenido (Sosa-Moguel *et al.*, 2018).

El contenido de capsaicinoides también varía durante la maduración. La concentración de capsaicinoides es diferente en todas las etapas del desarrollo, pero se observa una acumulación progresiva durante un período relativamente corto del desarrollo de la fruta, donde puede alcanzar entre 120 y 200 µg·g⁻¹ después de 45-50 días desde el establecimiento de la fruta, para luego disminuir gradualmente. De esta forma, los frutos maduros de *C. chinense* contienen cantidades superiores de capsaicina, comparado con el estado verde. Existe una relación inversa entre el contenido de capsaicinoides y la actividad de la peroxidasa; esta enzima oxida la capsaicina y la dihidrocapsaicina por lo que está asociada directamente a la pérdida de la pungencia (Contreras-Padilla y Yahia, 1998).

2.2 Índice de cosecha

El índice de madurez o cosecha es un conjunto de variables que permiten estimar el momento idóneo para la cosecha o recolección de un producto hortofrutícola, en el cual se ha logrado la madurez y características físicas, químicas y bioquímicas necesarias para un determinado fin. Depende de la especie y su naturaleza genética, parte de la planta utilizada, el destino del producto (consumo en fresco o industrialización), las condiciones ambientales, entre otros factores. Según Noichinda *et al.* (2017), el índice de cosecha de *Capsicum* depende básicamente del propósito de su uso; no obstante, el momento de cosecha más frecuente en *C. chinense* es cuando el fruto ha alcanzado su tamaño máximo, se encuentra en etapa de madurez fisiológica con epicarpio color verde brillante y se siente firme al tacto, debido a que desarrollan mejores características de calidad y tienen una vida útil más larga, que puede prolongarse hasta 2 semanas a 22 °C (González *et al.*, 2004; Elibox *et al.*, 2015).

Para cosechar las semillas, el momento óptimo es el más cercano al punto fisiológico de madurez, ya que se favorece la preservación del potencial fisiológico de las semillas. El mejor tiempo de cosecha del chile habanero para la producción de semillas varía entre 60 y 67 días después de la antesis, los indicadores de madurez fisiológica son el vigor, el contenido de humedad, la masa y el tamaño del fruto; la madurez de las semillas generalmente coincide con el comienzo del cambio de coloración roja. Las semillas de chile habanero de frutas cosechadas y sometidas a reposo tienen

una alta calidad fisiológica y menor latencia. Las semillas de chile habanero, cuando se cosechan cerca del punto de madurez y se secan en condiciones controladas (35 °C) en un flujo de aire constante, inducen la síntesis de proteínas resistentes al calor (dos Santos *et al.*, 2016). Finalmente, Andueza-Noh *et al.* (2017) sugieren almacenar las semillas de *C. chinense* a 26 °C, lo cual garantiza una vida útil hasta por seis meses, además de mayor porcentaje de germinación estándar total y permite obtener mayor número de plántulas normales.

La cosecha de chile habanero se hace manualmente conservando el pedúnculo. No se debe permitir que el fruto se sobremadure en la planta porque acelera su senescencia, acorta su vida de anaquel y el ciclo productivo de la planta. Se pueden realizar entre uno o dos cortes por semana, de acuerdo con el manejo que se le dé al cultivo, y si su sistema radical está sano, pueden incluso podarse las ramas viejas para promover brotes nuevos y tener mayor cosecha. La selección de la cosecha puede ser en función del color (verde, anaranjado o rojo) o por calidad en tres categorías: primera, segunda y calidad industrial (Corrales-García *et al.*, 2002).

Después de la recolección, si el producto va a ser preparado para la comercialización, es fundamental enfriarlo. El enfriado (también conocido como "preenfriado") elimina el calor de campo acumulado por el producto después de la cosecha, y ha de realizarse previamente a cualquier otra manipulación posterior. Cualquier retraso en el enfriado reducirá la vida poscosecha y disminuirá la calidad del producto. Incluso los productos que han sido sometidos a sucesivos calentamientos y enfriamientos se deterioran más lentamente que aquellos que no han sido enfriados (Coop Gamas *et al.*, 2011).

Adicionalmente, Elibox *et al.* (2015) recomiendan que los chiles habaneros se recolecten durante los periodos más frescos del día (temprano en la mañana o al final de la tarde) y que se almacenen o transporten a baja temperatura y alta humedad relativa de manera inmediata para asegurar una vida útil más larga. Las altas temperaturas aumentan la diferencia de presión de vapor entre la fruta y el entorno, que es el potencial de conducción para una transferencia más rápida de la humedad de la fruta al aire circundante. Además, las altas temperaturas hacen que los pericarpios y los pedicelos pierdan turgencia o firmeza, lo que dificulta el desprendimiento de los frutos de las plantas.

2.3 Atributos de calidad del chile habanero

La calidad de las frutas de *Capsicum* se basa en su apariencia externa (tamaño, forma, firmeza y color), nivel de pungencia e incluso, para la industria alimentaria, en su peso y contenido de sólidos solubles. En *C. chinense* se han descrito diferentes morfologías de la fruta, entre las que destacan las formas alargadas, campanuladas, cuadradas, triangular y redondeada; el tamaño oscila entre 1.14 y 9.88 cm, el diámetro de fruto entre 0.84 y 3.86 cm, su peso varía entre 0.46 y 24.2 g y el color del epicarpio va del verde, amarillo, naranja y diversas tonalidades de rojo al madurar, lo cual es un rasgo de calidad importante para la industria de colorantes y oleosinas (Lannes *et al.*, 2007; Baba *et al.*, 2016).

El peso de la fruta puede variar entre 5 y 19 g. Lannes *et al.* (2007) encontraron una correlación positiva entre el peso de la fruta y el grosor del pericarpio de *C. chinense*, donde las accesiones que produjeron frutos más grandes tuvieron pericarpios más gruesos. Esta correlación puede ser útil en la selección de las variedades más apropiadas para la venta en el mercado fresco, ya que las frutas con pericarpios más gruesos, además de tener mejor aspecto para el consumidor, son más resistentes a las heridas durante el manejo poscosecha. Lo anterior es similar a lo reportado por

Finger y Pereira (2016), quienes añaden que las frutas con pericarpio más grueso son menos susceptibles a la contracción debida a la pérdida intensa de agua durante la desecación. La pérdida de agua es la principal causa de detrimento de calidad de vida de los chiles, en parte se debe a la limitada capacidad de retención de agua que tiene el fruto por su naturaleza hueca, pero difiere entre especies, e incluso, entre variedades y etapas de madurez. El epicarpio permite que la fruta mantenga el agua a pesar de la baja humedad relativa en el aire circundante, particularmente después de la cosecha, además de ser útil también para el intercambio de gases entre el producto y su entorno (Díaz-Pérez *et al.*, 2007).

La pérdida de peso del chile habanero en poscosecha está supeditada también por la relación superficie/volumen y la composición de la epidermis cerosa (Finger y Pereira, 2016). La pérdida de agua ocurre inicialmente por difusión a través de la cutícula, debido a que la epidermis de los frutos maduros carece de estomas. La cutícula de *C. annum* var. 'poblano' posee casi tres veces más ceras que *C. chinense* ($634 \mu\text{g}\cdot\text{dm}^{-2}$ y $215 \mu\text{g}\cdot\text{dm}^{-2}$ respectivamente) y difieren en su composición química. La cera de la cutícula del chile poblano está compuesta por 4.6 % de ácidos grasos libres (principalmente C_{26}), 0.8 % de aldehídos, 14.5 % de alcanos (n-alcanos, alquenos, isoandanteisoalcanos) y 73.3 % de compuestos triterpenoides y esteroides, con predominancia de α y δ -amirinas; mientras que la cera de *C. chinense* contiene cantidades similares de alcoholes primarios (7-8 %) que el chile poblano, pero más ácidos grasos libres (14.5 %), aldehídos (5.4 %) y alcanos totales (57.3 %), principalmente C_{29} y C_{31} , así como menor cantidad de triterpenoides y esteroides (14.6 %), entre los que predominó el β -amirina. La tasa de pérdida de agua se correlaciona positivamente con la cantidad total de triterpenos y esteroides, así como con los monómeros C_{16} y el ácido 16-dihidroxihexadecanoico; pero se correlacionan de manera negativa con el contenido de alcanos y la cantidad de cera superficial total. Lo anterior sugiere que los constituyentes simples de la cutícula alifática de cadena recta forman barreras cuticulares más impermeables que los compuestos basados en isoprenoides más complejos. Por lo anterior, *C. chinense* presenta hasta 60 % menor tasa de pérdida de agua, en comparación con *C. annum* (Parsons *et al.*, 2012).

El grosor del pericarpio de las frutas del género *Capsicum* también se correlaciona con el contenido de sólidos solubles, donde los chiles con pericarpios más finos presentan mayor contenido de sólidos solubles, lo que los hace más adecuados para el procesamiento, particularmente en procesos de deshidratación, debido a que requieren menor cantidad de energía para la remoción del agua. Del mismo modo, el peso del fruto fresco se correlaciona de manera inversa con el contenido de materia seca acumulada; así los frutos grandes (~19 g) registran aproximadamente 16 % de materia seca comparados con los frutos pequeños (~0.99 g) que acumulan menor proporción (4.6 %) (Lannes *et al.*, 2007).

Además de la humedad, la temperatura es otro factor ambiental que mayor influencia ejerce sobre la calidad poscosecha de los frutos (Díaz Pérez *et al.*, 2007), la cual puede ser mermada por la presencia de lesiones causadas durante la cosecha o el manejo, tales como heridas, cortes, laceraciones de artefactos cortantes o punzantes que generan pérdida de la integridad de los tejidos (Coop Gamas *et al.*, 2011); la senescencia bioquímica natural que conduce a la pérdida de color y peso; así como síntomas de infección por plagas o enfermedades. La necrosis es un síntoma de deterioro del chile habanero, inicia en el pedicelo y progresa gradualmente hasta el cáliz hasta el pericarpio. No obstante, según el destino comercial de la fruta, ciertos rangos de necrosis son permitidos. Así, frutas sin defectos de color, tamaño o forma, pero con un máximo de 20 % de necrosis del pedicelo pueden ser comercializadas para consumo en fresco; mientras que aquellas

que presentan pedicelos y cálices necróticos pero que no muestran necrosis de pericarpio se pueden utilizar solo para la industrialización (Elibox *et al.*, 2015).

2.4 Tecnología poscosecha

La cosecha es una etapa crucial para el mantenimiento de la calidad de las hortalizas. De acuerdo con Coop Gamas *et al.* (2011), entre las causas de pérdidas más comunes durante la cosecha se encuentra el personal no calificado, material de cosecha inapropiado, índice de cosecha inadecuado, selección deficiente del producto, daño mecánico, malas prácticas de higiene y manejo, entre otras.

A pesar de sus bajas tasas respiratorias, las frutas del género *Capsicum* son altamente perecederas. Aunque cuantificar las pérdidas poscosecha de frutas y verduras no es fácil, se estima que las pérdidas oscilan alrededor del 20 – 30 % anual, principalmente debido a infecciones microbianas; daños fisiológicos derivados del proceso de cultivo, maduración o al manejo poscosecha; prácticas tecnológicas inadecuadas en la cosecha, el transporte, almacenamiento y empaque (Olayemi *et al.*, 2010). Por lo anterior, un adecuado manejo poscosecha es crucial para la mantener la calidad de los productos frescos.

En poscosecha, la pérdida de agua es el principal problema que demerita la calidad de las frutas. Cuando la pérdida de agua de un fruto alcanza 6 - 7 % de su peso, la firmeza y la apariencia disminuyen y en consecuencia su calidad y vida de anaquel, por lo que es importante mantener la humedad relativa óptima (90-95 %) para prevenir la desecación (Olayemi *et al.*, 2010; Coop Gamas *et al.*, 2011). Otro factor importante que se debe tener en cuenta al diseñar un programa de manejo poscosecha son las tasas de respiración de las variedades de fruta, así como la acumulación de etileno en el ambiente que rodea al fruto durante su almacenamiento (Villavicencio *et al.*, 1999).

Para evitar o minimizar dichas pérdidas, y prolongar la vida poscosecha de los productos hortofrutícolas, se han implementado diferentes tecnologías, como son el almacenamiento a bajas temperaturas, aplicación de radiaciones gamma y ultravioleta, control biológico, conservación por atmósferas controladas y modificadas, entre otras (Fernández Valdés *et al.*, 2015). Las principales ventajas de las atmósferas modificadas son retardar la maduración y senescencia, prevenir y controlar algunos desordenes fisiológicos (fisiopatías) como son el daño por frío y el escaldado, controlar o prevenir enfermedades y pudriciones ocasionadas por microorganismos, controlar las infestaciones ocasionadas por insectos, mantienen la calidad nutritiva de las frutas y hortalizas (Coop Gamas *et al.*, 2011). La aplicación de ceras y otros recubrimientos naturales o sintéticos son ejemplos de atmósferas modificadas que han mostrado ser útiles para contrarrestar las pérdidas de agua de muchos tipos de fruta, además de que sus propiedades de barrera permiten en algunos casos la difusión selectiva de gases como el etileno, oxígeno y dióxido de carbono, sin afectar sus propiedades organolépticas y sensoriales.

La refrigeración es un método viable para la conservación del chile habanero. González *et al.* (2004) utilizaron refrigeración a 7 °C en combinación con atmósferas modificadas a través de bolsas de polietileno perforadas en frutos en etapa de madurez verde, con lo cual lograron incrementar hasta en 20 días el almacenamiento, seguido de un periodo de maduración de 5 días a 22 °C. Las bajas temperaturas o el uso de atmósferas modificadas no modifican el color de las frutas de *C. chinense* (Coop Gamas *et al.*, 2011; Pérez-Ambrocio *et al.*, 2018).

Por otro lado, al igual que otras frutas frescas, *C. chinense* es susceptible a desarrollar síntomas de daño por frío. Aunque la refrigeración a 10 °C es efectiva para almacenamiento en periodos prolongados (25 días), temperaturas inferiores a esta genera daño por frío. La fruta sometida a estrés por frío sufre cambios fisiológicos y bioquímicos antes de que los síntomas sean visibles y su severidad depende de la variedad, etapa de maduración (Finger y Pereira, 2016) y tiempo de exposición. Los síntomas de daño por frío pueden ser picaduras (debidas al colapso de células epidérmicas), translucidez del mesocarpio, oscurecimiento de las semillas e infecciones secundarias; pero a medida que se extiende el período de enfriamiento, las picaduras se agrandan y la tasa de decoloración de los pedicelos, cálices y semillas aumenta. Para mantener la calidad y aliviar las lesiones por frío del chile habanero se pueden utilizar tratamientos combinados que incluyen inmersión en hipoclorito de sodio, atmósfera modificada y almacenamiento a baja temperatura. Por ejemplo, el chile habanero se puede almacenar en empaques de polietileno de alta densidad (HDPE) microperforados por períodos cortos (15 días) a 5 °C sin daños graves. La ventaja de usar HDPE es su permeabilidad, que permite el intercambio gaseoso restringido pero equilibrado, además de posibilitar una acción prolongada y más eficiente del hipoclorito de sodio, lo que resulta en una mayor retención de sustancias volátiles activas en la superficie de la fruta (Mohammed *et al.*, 2015).

Aunque la principal forma de consumo de *C. chinense* es en fresco, una parte importante del cultivo se destina a la industrialización. Entre los fines alimenticios más conocidos es el de servir como aditivo colorante (paprika) para la elaboración de embutidos como chorizo y salami u hojuelas de maíz; saborizante en el ron o en la bebida de ginger ale; en la fabricación de salsas picantes y aderezos tipo cátsup y mayonesa; pureses y pastas, entre otros. Por otro lado, en la industria avícola se mezcla con los alimentos balanceados para producir huevos con yema de color más rojizo; como aditivo de la industria tabacalera, en la fabricación de cigarros y tabaco; como complemento de productos químicos repelentes de animales como coyotes, mapaches o incluso elefantes; como ingrediente en la elaboración de cables y alambres conductores de fluidos, para evitar el daño por roedores; pintura para barcos, por su alta capacidad anticorrosiva; además de extraer la capsaicina para fines farmacéuticos, como pomadas calientes; cosméticos y en la industria de la defensa para elaborar gas lacrimógeno (Corrales-García *et al.*, 2002; Olayemi *et al.*, 2010; Coop Gamas *et al.*, 2011; Elibox *et al.*, 2015).

III. Conclusiones

El chile habanero (*Capsicum chinense* Jacq.) forma parte de la identidad cultural y gastronómica de México; sus cualidades y prestigio permitieron otorgarle la denominación de origen 'chile habanero de la Península de Yucatán'. Es un fruto no climatérico de importancia económica. Se conoce ampliamente la fisiología pre y poscosecha de algunas variedades; sin embargo, es necesario ampliar el estudio a otras variedades ya que existe una gran diversidad morfológica de este recurso. Definir la tecnología poscosecha más adecuada para el manejo de los frutos en fresco o procesados es determinante para ampliar su vida de anaquel, mercado internacional; así como para diversificar los productos desarrollados a partir de los frutos. Sin duda, el chile habanero representa un recurso emblemático de México, el cual requiere de mayores estudios que apoyen el desarrollo y fortalecimiento de su cadena de producción e impacten en la economía nacional.

IV. Referencias

- Aizat, W. M., Able, J. A., Stangoulis, J. C.R. y Able, A. J. (2013). Characterisation of ethylene pathway components in non-climacteric *capsicum*. BMC Plant Biology, 13(1), 1–14. <http://www.biomedcentral.com/1471-2229/13/191>
- Aizat, W. M., Dias, D. A., Stangoulis, J. CR., Able, J. A., Roessne, U. y Able, M. J. (2014). Metabolomics of *capsicum* ripening reveals modification of the ethylene related-pathway and carbon metabolism. Postharvest Biology and Technology, 89, 19-31. <https://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2013.11.004>
- Andueza-Noh, R. H., Latournerie-Moreno, L., Moran-Vázquez, N., Cervantes-Ortiz, F., Mendoza-Elos, M. y Rangel-Lucio, J. A. (2017). Respuesta fisiológica de la semilla de chile habanero (*Capsicum chinense* Jacq.) al almacenamiento. Acta Universitaria, 27(6), 22–29. doi: 10.15174/au.2017.1395.
- Baba, V. Y., Rocha, K. R., Gomes, G. P., Ruas, C. F., Ruas, P. M., Rodríguez, R. y Gonçalves, L. S. A. (2016). Genetic diversity of *Capsicum chinense* accessions based on fruit morphological characterization and AFLP markers. Genetic Resources and Crop Evolution, 63(8), 1371-1381. doi: 10.1007/s10722-015-0325-4.
- Bharath, S. M., Cilas, C. y Umaharan, P. (2013). Fruit Trait Variation in a Caribbean Germplasm Collection of Aromatic Hot Peppers (*Capsicum chinense* Jacq.). Hortscience, 48(5), 531-538.
- Chunab, C., Duch, E. S., Castillo, L. O. y Burgos, J. I. R. (2011). Evaluación de la calidad en la industrialización del chile habanero. Revista Iberoamericana de Tecnología Postcosecha, 12(2), 222-226. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=81320900014>
- Contreras-padilla, M. y Yahia, E. M. (1998). Changes in capsaicinoids during development, maturation, and senescence of chile peppers and relation with peroxidase activity. Journal of Agriculture and Food Chemistry, 46(6), 2075-2079. doi: 10.1021/jf970972z.
- Coop Gamas, Y. F., Corona Cruz, A. I., Rodríguez Rivera, R. y Herrera Rodríguez, F. J. (2011). Conservación de la calidad poscosecha en chile habanero (*Capsicum chinense* J.) mediante atmósferas modificadas. Revista Iberoamericana de Tecnología Postcosecha, 12(1), 80-86.
- Corrales-García, J., Alonso Carrillo, M. G., Anzúres Santos, G., Gallardo Sandoval, A., Hernández Trejo, M. M., Justo Gómez, M. R., Lara Ruiz, G. y López Navarrete, M. C. (2002). El sistema agroindustrial " chile habanero " en Yucatán. In: Gómez Cruz, M. Á., Schwentesius Rindermann, R., and Covarrubias, I. (eds) *Frutas y Hortalizas, Estado actual y nuevas alternativas en México*. PIAI-CIEST. PIAI-CIESTAAM, Universidad Autónoma Chapingo y RISHORT, pp. 81–96.
- Diario Oficial de la Federación, (DOF) (2008). Declaratoria General de Protección de la Denominación de Origen Chile Habanero de Yucatán. In: Instituto Mexicano de la Propiedad Industrial.
- Díaz-Pérez, J. C., Muy-rangel, M. D. y Mascorro, A. G. (2007). Fruit size and stage of ripeness affect postharvest water loss in bell pepper fruit (*Capsicum annuum* L.). Journal of Science Food and Agriculture, 87(1), 68-73. doi: 10.1002/jsfa.
- Elibox, W., Meynard, C. P. y Umaharan, P. (2015). Morphological changes associated with postharvest fruit deterioration and physical parameters for early determination of shelf life in *Capsicum chinense* Jacq. Hortscience, 50(10), 1537-1541.
- Fernández-Valdés, D., Bautista Baños, S., Fernández Valdés, D., Ocampo-Ramírez, O., García-Pereira, A. y Falcón Rodríguez, A. (2015). Películas y recubrimientos comestibles: una alternativa favorable en la conservación poscosecha de frutas y hortalizas. Revista Ciencias

- Técnicas Agropecuarias, 24(3), 52-57. <http://scielo.sld.cu/pdf/rcta/v24n3/rcta08315.pdf>
- Finger, F. L. y Pereira, G. M. (2016). Physiology and Postharvest of Pepper Fruits', In: Ramalho do Rêgo, E., Monteiro de Rêgo, M., Finger, M., Luiz, F. (Eds). *Production and Breeding of Chilli Peppers (Capsicum spp.)*. Springer, pp. 27-40. doi: https://doi.org/10.1007/978-3-319-06532-8_2.
- González, M. Centurión, A., Sauri, E. y Latournerie, L. (2004). Influence of refrigerated storage on the quality and shelf life of 'Habanero' chili peppers (*Capsicum chinense* Jacq.). *ISHS Acta Horticulturae*, 682, 1297-1302. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2005.682.174>
- Lannes, S. D., Finger, F. L., Schuelter, A. R. y Casali, V. W. D. (2007). Growth and quality of Brazilian accessions of *Capsicum chinense* fruits. *Scientia Horticulturae*, 112, 266-270. doi: 10.1016/j.scienta.2006.12.029.
- Martínez-González, M. E., Balois-Morales, R., Alia-Tejacal, I., Cortes-Cruz, M. A., Palomino-Hermosillo, Y. A. y López-Gúzman, G.G. (2017). Postharvest fruits: maturation and biochemical changes. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 8(19), 4075-4087. DOI: 10.17660 / ActaHortic.2005.682.174
- Mattos, L. M., Henz, G. P., Moretti, C. L. y Sousa, R. M. D. (2007) *Atividade respiratória de pimentas (Capsicum chinense L.) durante o armazenamento*. Brasília: Horticultura Brasileira. Embrapa, Brasil. 12 pp.
- Mohammed, M., Wilson, L. y Gomes, P. (2015). Occurrence, Manifestation and Alleviation of Chilling Injury of Hot Peppers (*Capsicum chinense* L.) *Acta Horticulturae*, 1016, 89-94. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2014.1016.10>
- Noichinda, S., Bodhipadma, K., Mounjongprang, D., Thongnuring, N. y Kasiolarn, H. (2016). Harvesting indices of Chi-fah Yai pepper (*Capsicum annuum* L.) fruit. *Journal of Applied Science*, 15(2), 20-23. doi: 10.14416/j.appsci.2016.11.001.
- Olayemi, F. F., Adegbola J. A., Bamishaiye E. I. y Daura A. M. (2010). Assessment of post-harvest challenges of small scale farm holders of tomatoes, bell and hot pepper in some local government areas of kano state, Nigeria. *Bayero Journal of Pure and Applied Sciences*, 3(2), 39-42.
- Parsons, E. P. Popopvskyb, S., Lohreya, G. T., Lu", S., Alkalai-Tuviab, S. y Perzelanb, Y., Paranb, I., Fallikb, E. and Jenksd, M. A. (2012). Fruit cuticle lipid composition and fruit post-harvest water loss in an advanced backcross generation of pepper (*Capsicum* sp.). *Physiologia Plantarum*, 146, 15–25. doi: 10.1111/j.1399-3054.2012.01592.x.
- Pérez-Ambrocio, A., Guerrero-Beltrán, J. A., Aparicio-Fernández. X., Ávila-Sosad, R., Hernández-Carranza, P., Cid-Pérez, S. y Ochoa-Velasco, C. E. (2018). Effect of blue and ultraviolet-C light irradiation on bioactive compounds and antioxidant capacity of habanero pepper (*Capsicum chinense*) during refrigeration storage. *Postharvest Biology and Technology*, 135, 19–26. <http://dx.doi.org/10.1016/j.postharvbio.2017.08.023>
- Dos Santos, H. O. Dutra, S. M. F., Pereira, R. W., Pires, R. M. O., Pinho, E. V. R. R., Da Rosa, S. D. V. F and De Carvalho M. L. M. (2016). Physiological quality of habanero pepper (*Capisicum chinense*) seeds based on development and drying process. *African Journal of Agricultural Research*, 11(12), 1102–1109. doi: 10.5897/AJAR2015.10462.
- Sosa-Moguel, O. Cuevas-Glory, L., Pino. J. A., y Sauri-Duch, E. (2018). Conocimiento actuales sobre el aroma de chile Habanero (*Capsicum chinense* Jacq.). *Ciencia y Tecnología de Alimentos*, 28(3), 68-72.
- Villavicencio, L., Blankenship, S. M., Douglas, C. S., Swallow, W. H. (1999). Ethylene and Carbon Dioxide Production in Detached Fruit of Selected Pepper Cultivars. *Journal of American Society Horticulture Science*, 124(4), 402-406.

V. BIOLOGÍA MOLECULAR



CAPÍTULO 16

Genes relacionados a la biosíntesis de capsaicinoides en el género *Capsicum*: un enfoque transcriptómico

Genes related to capsaicinoid biosynthesis in the *Capsicum* genus: a transcriptomic approach

Burgos- Valencia, Eduardo¹, Echevarría- Machado, Ileana¹, Narváez- Zapata, José A.², Martínez- Estévez, Manuel^{1*}

¹Unidad de Bioquímica y Biología Molecular de Plantas. Centro de Investigación Científica de Yucatán, Calle 43 # 130, Chuburna de Hidalgo, CP 97205, Mérida, Yucatán, México.

²Centro de Biotecnología Genómica. Blvd. del Maestro S/N Esq. Elías Piña. Col. Narciso Mendoza. C.P. 88710, Reynosa, Tamaulipas. México. *autor de la correspondencia. luismanh@cicy.mx

Resumen

Se hace una revisión de los análisis transcriptómicos aplicados a diferentes especies y variedades dentro del género *Capsicum*. Considerando diferentes tecnologías de análisis transcriptómico en las especies *C. frutescens*, *C. chinense* y *C. annuum*. El análisis de los resultados obtenidos por diferentes grupos de investigación indican que el desarrollo fisiológico de las plantas puede tener un importante efecto sobre el contenido de capsaicinoides en los frutos, principalmente durante la floración y en la placenta de los mismos, y que otros factores como la variedad de la planta también puede influenciar el perfil transcriptómico obtenido. En algunos estudios se obtuvo una relación entre estos cambios genéticos y la producción de capsaicinoides, con genes involucrados no únicamente en la ruta tradicional de biosíntesis de capsaicinoides, sino también en otras rutas como las de síntesis de fenilpropanoides y otras relacionadas como las biosíntesis de los aminoácidos precursores. Sin embargo, otros factores ampliamente estudiados en otras plantas, tales como los ambientales (tipo de suelo o estrés biótico o abiótico) han sido poco estudiados en *Capsicum* con este enfoque por lo que representan nuevos tópicos de estudio necesarios para ahondar entre la relación entre el perfil de expresión genética con la acumulación de capsaicinoides y finalmente con la pungencia de los frutos en el género *Capsicum*.

Palabras claves: genoma, capsaicina, chile habanero, transcriptómica

Abstract

A review of the transcriptomic analyzes applied to different species and varieties within the *Capsicum* genus is carried out. Transcriptomic analysis technologies in the species *C. frutescens*, *C. chinense* and *C. annuum*. The analysis of the results translates into different research groups indicating that the physiological development of the plants can have an important effect on the content of capsaicinoids in the fruits, mainly during flowering and in

the placenta of the same fruits, and that other factors such as the plant variety can also influence the transcriptomic profile obtained. In some studies, a relationship between these genetic changes and the production of capsaicinoids was obtained, with genes involved, no, not in the traditional route of capsaicinoid biosynthesis, but also in other routes such as the synthesis of phenylpropanoids and related ones such as biosynthesis. of the precursor amino acids. However, other factors widely studied in other plants, stories such as the environment or biotic or abiotic stress) have been little studied in this book. genetic expression profile with the accumulation of capsaicinoids and finally with the pungency of the fruits in the genus *Capsicum*.

Keywords: genome, capsaicin, habanero pepper, transcriptomic

I. Introducción

Los capsaicinoides acumulados en la mayoría de las especies del género *Capsicum* son de gran interés ya que dan a los frutos su picor característico (Ruiz-Lau *et al.*, 2011). Los capsaicinoides tienen interés para aplicación en la industria de los alimentos, como analgésico, antiinflamatorio, antioxidante, anticancerígeno y antitumoral debido a sus propiedades bioactivas (Caterina *et al.*, 1997; Srinivasan, 2016; Clark y Lee, 2016; Lin *et al.*, 2018; Ghiasi *et al.*, 2019).

Entre las especies pertenecientes al género *Capsicum* se encuentran varias domesticadas como, *Capsicum annuum*, *Capsicum baccatum*, *Capsicum frutescens*, *Capsicum pubescens* y *Capsicum chinense* Jacq. (Ruiz-Lau *et al.*, 2011; Bosland y Votava, 2012). Este último es un cultivo tradicional en el sureste de México y, en particular, de la península de Yucatán donde es conocido como chile habanero. Este cultivo tiene una gran importancia económica y cultural y produce una gran variedad de metabolitos secundarios como los carotenoides, los flavonoides, compuestos volátiles, provitamina A, vitamina E, ácido ascórbico y los capsaicinoides (Fanzo *et al.*, 2013; Tripodi y Kumar, 2019). Por sus características de sabor, color, aroma, vida de anaquel y picor, el chile habanero producido en la península de Yucatán se considera uno de los de mejor calidad y de los más picantes del mundo (Martin *et al.*, 2013; Gould, 2017). Dadas su importancia económica, cultural, y por sus características organolépticas, este cultivo obtuvo la denominación de origen como “Chile habanero de la Península de Yucatán” publicado en el Diario Oficial de la Federación en junio de 2010 (DOF, 2010). Las características particulares del chile habanero de Yucatán se deben en parte importante a las condiciones medioambientales en las que crecen las plantas. El genotipo, el ambiente y la interacción de estos factores influyen en el desarrollo del fruto y en su contenido químico, incluyendo a los capsaicinoides (Ruiz-Lau *et al.*, 2011).

El proceso de desarrollo de las plantas y sus frutos está dictado por el genoma e influenciado por el ambiente que les rodea. La regulación inicia y termina las distintas etapas del desarrollo de los frutos y la expresión de los genes permite que ocurran los diferentes procesos biológicos y se sinteticen los compuestos que son parte de estas distintas etapas (Aza-Gonzalez *et al.*, 2011; Arce-Rodríguez y Ochoa-Alejo, 2019).

Además, por la interacción genotipo-ambiente, diferentes especies de Chile (*C. annum*, *C. baccatum*, *C. chinense*) o diferentes variedades de la misma especie tendrán diferente desarrollo, como, por ejemplo, en el número de frutos y rendimiento del fruto (Jeeatid *et al.*, 2018), y diferente contenido químico, como, por ejemplo, en el contenido de capsaicinoides (Canto-Flick *et al.*, 2008; Antonious *et al.*, 2009; Jeeatid *et al.*, 2018). Esto quiere decir que junto a la influencia del genotipo se debe considerar la del medio ambiente, que es el medio en el cuál se desarrollan estas plantas y que interactúan de manera directa con ellas, teniendo así que la misma variedad presentará diferentes fenotipos cuando crece y se desarrolla en distintas localidades o incluso en diferentes épocas del año. Se han observado diferencias en el contenido de capsaicinoides entre distintas accesiones y poblaciones de *Capsicum chinense* cultivadas en las mismas condiciones o en distintas localidades (Canto-Flick *et al.*, 2008; Latournerie-Moreno *et al.*, 2015; Olguín-Rojas *et al.*, 2019), diferencias por el efecto de la interacción genotipo-ambiente entre distintas variedades de *Capsicum chinense* en distintos ambientes con variación en la época del año del cultivo, la temperatura del aire, la humedad relativa y la intensidad luminosa (Jeeatid *et al.*, 2018), por el efecto del manejo de fertilizantes como potasio y nitrógeno (Medina-Lara *et al.*, 2008), por la aplicación de fertilizantes orgánicos o inorgánicos junto al efecto de los factores ambientales como el clima y el suelo de los lugares donde se desarrollen los cultivos de *Capsicum chinense* (Das *et al.*, 2016) y debido a la aplicación de diferentes regímenes de agua (Zamudio-Moreno *et al.*, 2014).

Los capsaicinoides inician su síntesis mientras el fruto se va desarrollando, alcanzando su pico poco antes de que el fruto alcance su edad madura o en las primeras etapas de madurez del fruto, para después disminuir. El tiempo en que se da esta acumulación de capsaicinoides depende de la variedad de la planta, generalmente entre 10 a 40 días postantesis (Stewart *et al.*, 2005; Arce-Rodríguez y Ochoa-Alejo, 2015; Castro-Concha *et al.*, 2016), aunque algunas veces el contenido sigue en aumento durante más tiempo (Olguín-Rojas *et al.*, 2019).

Las rutas metabólicas de los capsaicinoides incluyen la vía de los fenilpropanoides, la de síntesis de ácidos grasos de cadena ramificada, la de síntesis de aminoácidos de cadena ramificada y la ruta del shikimato y síntesis de la fenilalanina (Zhang *et al.*, 2016, Naves *et al.*, 2019). El modelo de esta vía se muestra en la Figura 1.

La expresión de los genes de estas rutas relacionados con la producción de capsaicinoides se puede investigar mediante la transcriptómica, que se encarga de estudiar el transcriptoma, es decir, el conjunto de transcritos que expresa una célula en cierto período y bajo ciertas condiciones. Comprender el transcriptoma es esencial para interpretar los elementos funcionales del genoma y como se da la expresión de los genes (Liu *et al.*, 2012; 2013).

El transcriptoma se puede estudiar de manera experimental *in vivo* y de manera computacional *in silico*. Las técnicas modernas de secuenciación han permitido el análisis masivo y en paralelo de genomas y transcriptomas, con rendimiento alto de múltiples muestras y pudiendo detectar aún genes que se expresan a niveles bajos (Stephens *et al.*, 2015; Solís-Lemus y Ané, 2016).

Sin embargo, estas secuenciaciones ocurren en fragmentos pequeños, por lo que para realizar estos análisis es necesario fragmentar el transcriptoma y volver a unir las secuencias una vez obtenidas. Para los análisis de genomas y transcriptomas se requieren herramientas bioinformáticas que permitan reensamblar las secuencias originales y analizar la gran cantidad de datos que lleven finalmente a responder las preguntas de investigación (Scornavacca y Galtier, 2017; Sanderson *et al.*, 2017, Spalink *et al.*, 2018).

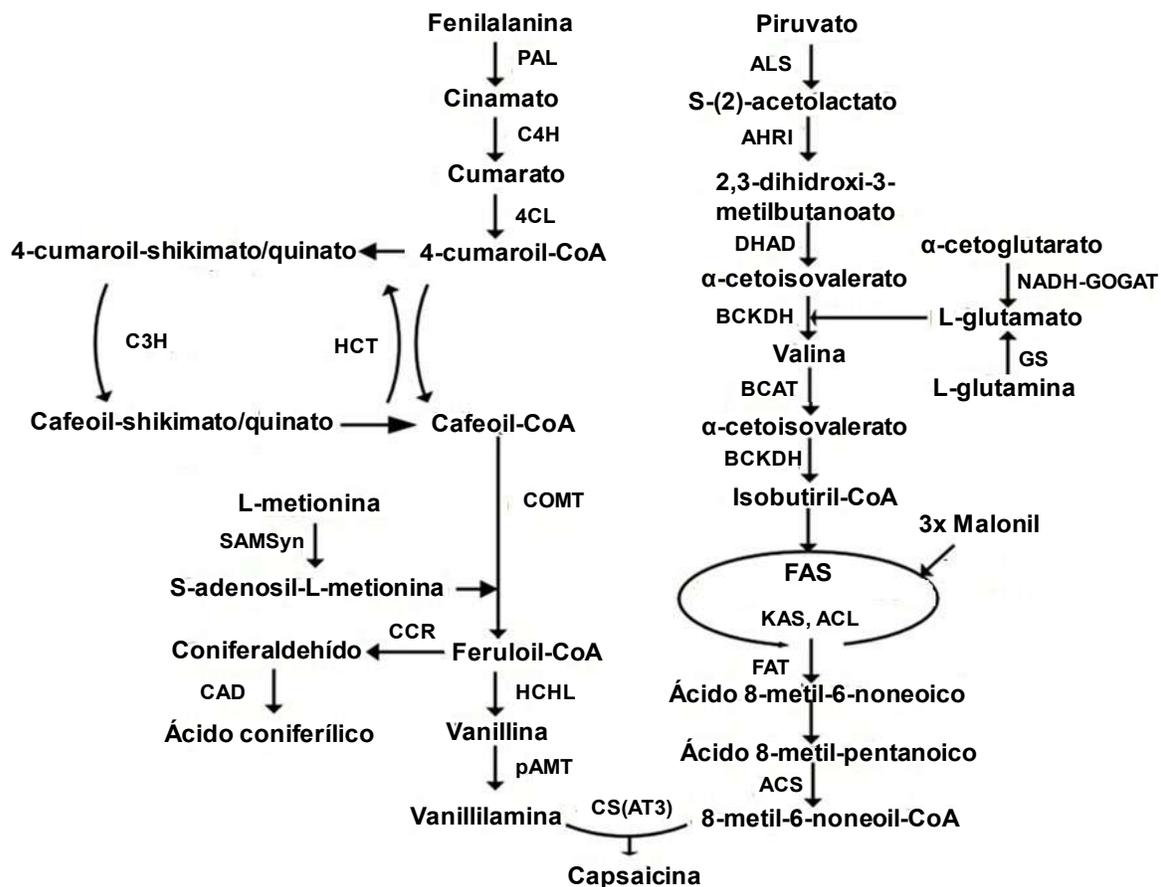


Figura 1. Modelo de biosíntesis de capsaicinoides. PAL: fenilalanina amonio liasa; C4H: cinamato-4-hidroxilasa; 4CL: 4-cumaroil-CoA ligasa; CoA: coenzima A; HCT: hidroxicinamoil transferasa; C3H: cumaroil shikimato/quinato 3-hidroxilasa; COMT: ácido cafeico O-metiltransferasa; SAMSyn: S-adenosilmetionina sintetasa; HCHL: hidroxicinamoil-CoA hidratasa/liasa; CCR: cinamoil-CoA reductasa; CAD: cinamil alcohol deshidrogenasa; pAMT: aminotransferasa putativa; ALS: acetolactato α sintasa; AHRI: acetohidroxiácido reductoisomerasa; DHAD: dihidroxiácido deshidratasa; GS: glutamina sintetasa; NADH-GOGAT: glutamato sintasa dependiente de nicotinamida adenina dinucleótido; BCAT: transferasa de aminoácidos de cadena ramificada; BCKDH: deshidrogenasa/descarboxilasa de α -cetoácidos de cadena ramificada; FAS: ácido graso sintetasa; KAS: cetoacil-ACP sintetasa; ACP: transportadora de grupos acilo; ACL: proteína transportadora de grupos acilo; FAT: acil-ACP tioesterasa; ACS: acil-CoA sintetasa; CS: capsaicinoide sintetasa; AT3: aciltransferasa. Adaptado de Arce-Rodríguez y Ochoa-Alejo, 2019.

Este trabajo tiene como objetivo analizar de manera general el enfoque transcriptómico de los genes relacionados con la síntesis de capsaicinoides aplicados en diferentes especies y variedades del género *Capsicum* con el fin de determinar los factores fisiológicos más importantes en la acumulación de estos metabolitos y así regular la pungencia en las diferentes variedades comerciales de estas plantas.

II. Revisión bibliográfica

2.1 Expresión de genes y análisis del transcriptoma

La transcripción es un proceso que produce una cadena de RNA idéntica en secuencia con una cadena de DNA (gene). Es el primer paso en el proceso de expresión de genes y el paso en el cual ésta es frecuentemente regulada. En algunos casos el RNA es usado para la producción directa de un polipéptido (RNA mensajero o mRNA). En otros casos, como en los genes de RNA ribosomal (rRNA) o el RNA de transferencia (tRNA), el RNA transcrito es el producto funcional final (Krebs *et al.*, 2018). El transcriptoma es el conjunto de transcritos que expresa una célula, un tejido, un órgano, etc. en cierto tiempo y bajo ciertas circunstancias.

La identificación del juego completo de transcritos, incluyendo las moléculas de RNA pequeñas y grandes, transcritos nuevos de genes no anotados, isoformas, y transcritos de fusión de genes, sirve como fundamento para el estudio comprensivo del transcriptoma. Las tecnologías de secuenciación de la siguiente generación (Next-generation sequencing, NSG) permitieron secuenciar transcriptomas enteros o RNA-Seq. Estas se pueden definir como un conjunto de metodologías que hacen uso de las tecnologías de secuenciación para obtener información de un conjunto de moléculas de RNA de una muestra biológica para determinar así la secuencia primaria y la relativa abundancia de cada RNA (Liu *et al.*, 2013)

La profundidad de estas tecnologías permite detectar y secuenciar incluso transcritos con una baja expresión. En contraste con otras tecnologías como los microarreglos, el RNA-Seq logra una alta resolución y un rango dinámico más grande para los niveles de expresión, y también permite la anotación *de novo* (Martin y Wang, 2011).

Las NGS proporcionan análisis masivos paralelos, a un rendimiento alto de múltiples muestras y son más baratos que otras tecnologías anteriores como la Sanger. Estas tecnologías requieren el corte de las moléculas de DNA, cDNA o RNA en fragmentos pequeños, que se secuencian posteriormente. Se crea una biblioteca ligando adaptadores, tags, primers en los extremos de los fragmentos. Se hace la amplificación de la biblioteca en superficies sólidas o cuentas donde existen gotitas o emulsiones en donde ocurre la secuenciación. La incorporación del nucleótido se realiza directamente por luminiscencia o por cambios en una carga eléctrica durante el procedimiento de secuenciación (Kulski, 2016).

Los pequeños fragmentos de secuencias, denominados “reads”, deben ser unidos para reconstruir el transcriptoma original, proceso que se denomina ensamblaje. Las estrategias

de ensamblaje del transcriptoma pueden ser ensamblaje por comparación, en el que se utiliza un transcriptoma o genoma de referencia; y ensamblaje de *novο*, donde no se utiliza una secuencia de referencia, aprovecha la redundancia de la secuenciación de fragmentos cortos para encontrar superposiciones entre “reads” que los ensamble en transcritos (Martin y Wang, 2011).

2.2 Estudios transcriptómicos en el género *Capsicum*.

En *Capsicum* se han hecho diversos estudios de expresión de genes relacionados principalmente con la biosíntesis de capsaicinoides, involucrando genes de la vía de síntesis de los fenilpropanoides y otras relacionadas como las de biosíntesis de los aminoácidos precursores (Liu *et al.*, 2013; Kim *et al.*, 2014; Martínez-López *et al.*, 2014; Zhang *et al.*, 2016; Arce-Rodríguez y Ochoa-Alejo, 2017; Tanaka *et al.*, 2017; Han *et al.*, 2019; Park *et al.*, 2019).

El tejido de la placenta es altamente pungente y es donde se sintetizan los capsaicinoides en muchas variedades. Estudios en cultivo de tejidos de placenta en *Capsicum chinense* Jacq. ‘Umorok’ mostraron que su contenido disminuye en explantes de placenta cultivados para la formación de callo (Kabita *et al.*, 2019). Además, en el subcultivo de estos tejidos en ciclos de 32 días, en cada ciclo el contenido de capsaicina y dihidrocapsaicina disminuía, presentando la mayor parte de la reducción en los primeros tres ciclos y estabilizándose al cuarto mes. Para determinar la dinámica de biosíntesis de capsaicinoides durante la formación del callo, se hizo un análisis de expresión comparativo de los genes involucrados en la síntesis de estos, resultando que la expresión de los dos genes putativos (*pAMT* y *PUN1*) está regulada negativamente lo cual provoco que la acumulación de capsaicinoides en callos es menor que en tejido placentario y teniendo un comportamiento consistente con la evolución del contenido de capsaicina y dihidrocapsaicina. Durante los tres primeros meses la expresión de estos genes tuvo una reducción considerable y del tercer mes en adelante la expresión fue prácticamente despreciable (Kabita *et al.*, 2019). También se ha encontrado que los cultivos producidos de explantes de placenta, en presencia de quitosano como elicitador hubo un aumento en el contenido de capsaicinoides y un aumento en la expresión de genes relacionados con la síntesis de capsaicinoides, entre éstos, *PAL*, *NADH-GOGAT*, *HCT*, *COMT*, *pAMT* y *PUN1*, con respecto a cultivos sin elicitores (Kabita *et al.*, 2020).

En un estudio realizado por Arce-Rodríguez y Ochoa-Alejo (2015) se observó un aumento en el nivel de expresión del gene *AT3/PUN1* (que codifica la enzima capsaicina sintasa que cataliza el último paso en la síntesis de capsaicinoides) en el mismo período de tiempo en el que aumentó el contenido de capsaicina y dihidrocapsaicina en placentas de frutos de *Capsicum annum* L. ‘Tampiqueño’. El patrón de expresión fue un aumento desde los 10 hasta los 40 días postantesis, para luego disminuir en las siguientes etapas. Además, en plantas en las cuales se silenció este gene se observó también un efecto negativo sobre otros genes de la ruta de biosíntesis de capsaicinoides, específicamente una disminución significativa en la expresión de *pAMT*, *BCAT*, *KAS* y *ACL* en comparación con plantas no silenciadas (Arce-Rodríguez y Ochoa-Alejo, 2015).

En un estudio realizado por Egan *et al.* (2019) se ha observado que en ciertas especies no pungentes como *Capsicum rhomboidium* posiblemente haya existido en el pasado recombinaciones en el gene *AT3-1* con su parólogo, un pseudogene denominado *AT3-2* que llevó a la modificación de la región codificante en del gene en el sitio activo y, junto a eventos de mutación en el marco de lectura también detectados, a la consiguiente pérdida de su funcionalidad. En este mismo trabajo se observó una conservación *AT3-1* y *AT3-2* en varias especies del género *Capsicum* y de otros miembros de las solanáceas y una separación de los parálogos en dos clados (Egan *et al.*, 2019).

Tanaka *et al.* (2017) realizaron un estudio de determinación del contenido de capsaicinoides en diferentes partes del fruto (semillas, pericarpio y placenta) en *Capsicum chinense* “Trinidad Moruga Scorpion Yellow” (MY) y “Red Habanero” (HB), así como en *Capsicum annuum* “Takanotsume” (TK) y la variedad no pungente “Fushimi-amanaga” (FA). Este análisis encontró que la variedad MY y HB tuvieron los mayores contenidos de capsaicinoides, y específicamente los mayores niveles se detectaron en el septum placentario en las variedades HB y MY, pero también en el pericarpio de MY. Con la variedad FA no se detectaron capsaicinoides. La placenta en HB contribuyó al 84.3% de capsaicinoides y el pericarpio al 11.3%, mientras que en MY el pericarpio aportó al 84.3% del contenido de capsaicinoides y la placenta al 14.7%. Mediante qPCR se determinó la expresión de 14 genes estructurales de relacionados con la ruta de síntesis de capsaicinoides en chiles verdes maduros: genes *PUN1*, *pAMT*, *PAL*, *C4H*, *4CL*, *HCT*, *C3H*, *COMT*, *BCAT*, *BCKDH*, *ACL*, *KAS*, *FAT* y *ACS*. De estos, *PUN1*, *pAMT*, *KAS* y *BCAT* mostraron una expresión positivamente asociada con la producción de capsaicinoides (Stewart *et al.*, 2007; Arce- Rodriguez y Ochoa- Alejo, 2015; Tanaka *et al.*, 2017).

Además, esta asociación ocurrió especialmente en las placentas de las variedades pungentes y en el pericarpio de la variedad MY y no se observó expresión o esta fue muy baja en la variedad FA. Mediante el análisis de la expresión de dichos genes en distintas etapas del desarrollo de frutos de las variedades MY y HB en tejido placentario y pericarpio encontraron comportamientos de expresión similares: niveles bajos de expresión al inicio del desarrollo del fruto y un aumento marcado a los 30 días después de la floración, etapa de fruto verde maduro. Los niveles de expresión fueron superiores en tejidos placentarios en comparación con el encontrado en pericarpio. Es en esta etapa cuando el contenido de capsaicinoides también aumentó. Sin embargo, en la etapa de fruto completamente maduro, a los 40 días después de la floración, la expresión de *PUN1*, *pAMT* y *KAS* disminuyó rápidamente en placentas de ambas variedades y en el pericarpio de MY. En contraste, en este estadio *BCAT* sólo mostró disminución de expresión en placentas y tuvo aumentó de expresión en el pericarpio tanto en HB como en MY (Tanaka *et al.*, 2017).

Tanto, *pAMT* como *PUN1* son genes que codifican las enzimas de las últimas etapas de la síntesis de capsaicinoides y se consideran específicos hacia la síntesis de estos metabolitos dentro de la ruta de los fenilpropanoides. Su expresión fue muy fuerte en la etapa de los frutos verdes maduros en placentas de las variedades pungentes y en el pericarpio de MY, consistentemente con la producción de los capsaicinoides. Los genes de *KAS* y *BCAT* aportan las cadenas de ácidos grasos ramificados precursores de la formación de capsaicinoides. Este último es además un gene esencial en el catabolismo de

aminoácidos de cadena ramificada. Estos dos papeles pueden explicar su distinto comportamiento de expresión (Curry *et al.* 1999; Tanaka *et al.*, 2017).

Arce-Rodríguez y Ochoa-Alejo (2017) estudiaron por qRT-PCR la participación de un factor de transcripción de la familia R2R3-MYB, cuyo gene fue denominado *CaMYB31*. Se encontró que éste tuvo una expresión positivamente asociada con la síntesis de capsaicinoides (capsaicina e dihidrocapsaicina) en frutos de plantas de las variedades “Tampiqueño 74” (pungente) y “California Wonder” (no pungente) de *Capsicum annuum*. El contenido de capsaicina y dihidrocapsaicina fue aumentando progresivamente durante el desarrollo del fruto y tuvo un pico a los 40 días postantesis en la variedad “Tampiqueño 74”, pero no se detectaron en “California Wonder”. La expresión del gene *CaMYB31* aumentó junto con la expresión de los genes estructurales *CA4H*, *COMT*, *KAS*, *pAMT* y *AT3* en los tejidos placentarios de la variedad “Tampiqueño 74”. La expresión de estos genes fue aumentando progresivamente durante el desarrollo del fruto, con un máximo a los 40 días postantesis para luego disminuir y prácticamente no se observó en “California Wonder”, con excepción de la expresión de *COMT* y de *CA4H*. Además, el silenciamiento genético de *CaMYB31* redujo significativamente la expresión de los genes estructurales de la de la ruta de síntesis de los capsaicinoides, así como la producción de capsaicina y dihidrocapsaicina (Arce-Rodríguez y Ochoa-Alejo, 2017). La expresión de *CaMYB31*, *KAS* y *pAMT* también fue afectada en ensayos a los frutos con hormonas como ácido indolacético, ácido jasmónico, ácido salicílico, ácido giberélico o por el efecto de heridas en los frutos, la luz y la temperatura de incubación de los frutos, que a su vez tuvo efecto en la síntesis de capsaicinoides. Con la aplicación de ácido salicílico en general observaron un aumento en la expresión, mientras que con el ácido jasmónico observaron una disminución en la expresión, excepto a las 3 h de la aplicación. El estrés por heridas mostró un efecto en la disminución de la expresión de los genes. También evaluaron tres temperaturas: 4° C, 25° C y 37° C, observándose mayor expresión generalmente a la temperatura más baja. En el tratamiento con luz, hubo mayor contenido de capsaicinoides en los frutos expuestos a luz fluorescente en comparación a los expuestos a oscuridad (Arce-Rodríguez y Ochoa-Alejo, 2017). Respecto a lo anterior, se ha encontrado que el ácido salicílico y el metil-jasmonato inducen la producción de capsaicinoides, intermediarios o la actividad de enzimas de la ruta de biosíntesis, pero la acumulación de los metabolitos también depende de la concentración aplicada y el tiempo de exposición (Gutiérrez-Carbajal *et al.*, 2010; Altúzar-Molina *et al.*, 2011; Rodas-Junco *et al.*, 2013). En plantas heridas se han observado aumentos del contenido de ácido jasmónico endógeno junto a una disminución del contenido de ácido salicílico endógeno (Lee *et al.*, 2004), consistente con el comportamiento observado para las plantas heridas y las tratadas con ácido jasmónico en el trabajo de Arce-Rodríguez y Ochoa-Alejo (2017). También se ha observado que el estrés mecánico puede inducir la síntesis de capsaicinoides y aumentar los transcritos de la capsaicina sintasa mediante regulación de su promotor (Kim *et al.*, 2009). La temperatura también tiene un efecto sobre el contenido de capsaicinoides en frutos, pudiendo aumentar o disminuir según la temperatura en la que crezca y se desarrolle la planta y es diferente entre variedades (González-Zamora *et al.*, 2013). También la temperatura es un factor que regula promotores como el de la capsaicina sintasa (Kim *et al.*, 2009). Por otro lado, el contenido de capsaicinoides es diferente en los frutos de plantas expuestas a luz de diferentes longitudes de onda o luces fluorescentes (Gangadhar *et al.*, 2012). La luz también puede aumentar la

expresión de genes como la capsaicina sintasa por la regulación de su promotor. La exposición de plantas a la oscuridad puede disminuir esta expresión (Kim *et al.*, 2009).

También se ha observado que la fuente de nitrógeno tiene un efecto sobre la expresión de genes de la ruta de biosíntesis de capsaicinoides (Zhang *et al.*, 2020). En *Capsicum annuum* L. 'Longjiao No. 5' se realizaron tres aplicaciones de nitrógeno (amonio:nitrato en relación 0:100, 25:75 y 50:50). Con el tratamiento 25:75 de amonio:nitrato se encontraron altos niveles de aminoácidos, capsaicina y dihidrocapsaicina en la placenta de los frutos. Así mismo, se encontró que las actividades de las enzimas CS, PAL, GOGAT y GS, y de los genes *NADH-GOGAT*, *GS*, *AT3*, *FAT*, *BCAT*, *C4H*, *COMT* y *PAL* fueron afectadas por el tratamiento de nitrógeno, siendo más altas en placentas que en pericarpio. Para las actividades de CS, GOGAT y GS, y la expresión de los genes *NADH-GOGAT* y *AT3* el tratamiento con el cual se alcanzaron los niveles más altos fue el de 25:75 de amonio:nitrato, mientras que para la expresión de *GS* los mejores tratamientos fueron 25:75 y 50:50 de amonio:nitrato. Las actividades de GOGAT y GS y la concentración de CS estuvieron positivamente correlacionadas con el contenido de capsaicina (coeficientes de correlación de Pearson de 0.942 y 0.958 y 0.975, respectivamente) y dihidrocapsaicina (0.942, 0.945 y 0.959, respectivamente). La expresión de los genes *NADH-GOGAT*, *GS* y *AT3* también tuvieron una correlación positiva alta con el contenido de capsaicina (coeficientes de correlación de Pearson de 0.985, 0.958 y 0.986, respectivamente) y dihidrocapsaicina (0.981, 0.971 y 0.999, respectivamente). (Zhang *et al.*, 2020).

Otro grupo de investigación detectó mediante RNA-Seq y ensamblaje *de novo* en varios tejidos de *Capsicum frutescens* Linn "Xiaomila" transcritos para genes de las rutas de biosíntesis relacionadas con la síntesis de capsaicinoides (Mazourek *et al.*, 2009) expresados entre 20 y 30 días después de la floración. Las secuencias identificadas tuvieron funciones predichas para las rutas metabólicas de los fenilpropanoides y bencenoides, las de biosíntesis de aminoácidos de cadena ramificada, del metabolismo de fenilalanina y de la biosíntesis de aminoácidos de cadena ramificada, encontrando 197 transcritos para secuencias putativas de estas rutas, incluyendo 35 conocidas y 162 nuevos candidatos de las rutas metabólicas anteriores. Además, encontraron 3 nuevas secuencias, no reportadas previamente en la ruta, para la dihidroxiácido deshidratasa (DHAD), pterinato aminotransferasa (PAT) y treonina desaminasa (TD), las dos primeras pertenecientes a las rutas de biosíntesis de aminoácidos de cadena ramificada y la última a las transaminasas (Liu *et al.* 2013).

Zhang *et al.* (2016) analizaron la expresión de genes de la ruta biosintética de los capsaicinoides en tejidos placentarios de *Capsicum frutescens* L. "Guijiangwang" mediante RNA-Seq durante cinco estadios de desarrollo de los frutos: 10, 20, 30, 40 y 50 días después de la floración. El cambio en la expresión de genes en diversos puntos fue analizado, encontrándose 2340 genes diferencialmente expresados en etapas consecutivas. Mediante una búsqueda por BLAST en la base de datos de genes del NCBI, se anotaron 131 genes relacionados con la ruta de síntesis de capsaicinoides. De éstos, 79 fueron predichos que codifican enzimas de la ruta. Entre los genes que siguieron un patrón de expresión consistente con la acumulación de capsaicinoides, que fue aumentando gradualmente durante el desarrollo del fruto, llegando a su máximo a 40 días después de

la floración para disminuir a los 50 días. se incluyeron *PAL*, *C4H*, *ACS*, *NADH-GOGAT*, *AT*, *KAS*, *COMT* y *BCKDH* (Zhang *et al.*, 2016).

Kim *et al.* (2014) realizaron un análisis comparativo de la expresión de genes relacionados con la síntesis de capsaicinoides en tejido placentario de una variedad pungente (CM334) y una no pungente (ECW) de *Capsicum annuum* en diferentes etapas de desarrollo de frutos. La expresión del gen de la capsaicina sintasa (CS) fue detectado en la placenta de la variedad pungente CM334, pero apenas fue expresada en la placenta de la variedad no pungente ECW. Los genes *BCAT*, *COMT* y *FAT* fueron expresados fuertemente a los 6 días postantesis en la variedad no pungente, y apenas expresados en la variedad pungente en dicha etapa, para luego aumentar a los 16 y 25 días postantesis y en frutos verdes maduros. Éstos resultados sugieren la importancia de la regulación de dichos genes durante el desarrollo del fruto para la síntesis de capsaicinoides en las plantas con frutos pungentes (Kim *et al.*, 2014).

Han *et al.* (2019) realizaron otro trabajo comparativo de tejidos placentarios entre una variedad pungente y una no pungente. Los frutos de la variedad pungente de *Capsicum annuum* Tean tuvo una expresión más alta de los genes *PUN1*, *KAS*, *BCAT* y *FAT* a los 26 y 36 días postantesis en comparación con la variedad no pungente YCM334 (Han *et al.*, 2019).

En cuanto al análisis de locus de carácter cuantitativo (QTL, en inglés “quantitative trait locus”) para el contenido de capsaicinoides en *Capsicum*, Ben-Chaim *et al.* (2006) analizaron la segregación de tres capsaicinoides, capsaicina, dihidrocapsaicina y nordihidrocapsaicina en un cruce interespecífico entre una variedad poco pungente de *Capsicum annuum* y una variedad muy pungente de *Capsicum frutescens*. El cruce tuvo un contenido de capsaicinoides ligeramente inferior a la variedad altamente pungente. Seis QTL que controlaban el contenido de capsaicinoides fueron detectados en los cromosomas 3, 4 y 7. Cinco fueron para la capsaicina, cuatro para la dihidrocapsaicina y uno para la nordihidrocapsaicina. En éstos, los alelos de la variedad pungente de *Capsicum frutescens* contribuyeron a elevar el contenido de los tres capsaicinoides. La mayoría de los QTL se encontraron superpuestos, con excepción de uno de la capsaicina y el único QTL encontrado para la nordihidrocapsaicina (Ben-Chaim *et al.*, 2006).

Park *et al.* (2019) realizaron un análisis de QTL en el pericarpio de frutos de *Capsicum* que estuvieran relacionados con la biosíntesis de capsaicinoides en el pericarpio. Mediante QTL-seq en cruces de las variedades *Capsicum chinense* ‘Habanero’ (con placenta con pungencia y pericarpio sin pungencia) y ‘Jolokia’ (pungente en pericarpio y placenta) encontraron un QTL (*HJ16-qtlseq*) en el cromosoma 6 que parecía estar relacionado con el control del contenido de capsaicinoides en el pericarpio. Al mismo tiempo, en un análisis de mapeo de QTL en cruces de ‘Habanero’ y ‘Jolokia’ y de ‘Jolokia’ con *Capsicum chinense* ‘SNU11-001’ encontraron varios QTL asociados con capsaicina, dihidrocapsaicina y capsaicinoides totales en el cromosoma 6. Algunos de éstos se localizaron en regiones superpuestas en los cromosomas de los dos tipos de cruces y además estuvieron cercanos a la región *HJ16-qtlseq*. Un análisis por RNA-seq realizado en este mismo trabajo en las variedades ‘Habanero’ y ‘Scorpion’ (que al igual que ‘Jolokia’ presenta pericarpio y placenta pungentes) reveló que varios genes del metabolismo de biosíntesis de capsaicinoides

fueron altamente expresados en el pericarpio de 'Scorpion' en comparación al pericarpio de 'Habano'. Entre estos genes estuvieron *PUN1*, *BCAT*, *PAL*, *KAS*, *KR*, *C4H* y *FATA*. Los últimos tres genes se localizaron en los QTL del cromosoma 6 asociados a capsaicinoides, o bien, muy cercanos a ellos (Park *et al.*, 2019).

Martínez-López *et al.* (2014) estudiaron mediante RNA-Seq la dinámica del transcriptoma de frutos completos de *Capsicum annuum* L. 'Tampiqueño' a los 10, 20, 40 y 60 días postantesis. Mediante ensamblaje *de novo* obtuvieron 34066 genes que clasificaron de acuerdo a sus patrones de expresión entre períodos consecutivos en las categorías de genes individuales, ontología de procesos biológicos y rutas metabólicas. Aproximadamente 83.34% de los genes exhibieron un patrón de expresión sin cambios entre estadios. El 16.66% de los genes mostraron patrones de expresión con al menos un cambio entre etapas de desarrollo del fruto, 6.38% de los genes experimentaron cambios de nivel de expresión en el período de transición de 40 a 60 días después de la antesis y 2.48% de los genes tuvieron un cambio de nivel de expresión entre los 10 y 20 días postantesis. En la agrupación de los genes en categorías de procesos biológicos, el patrón de expresión más común fue en el cual no hubo cambios (37.49%) y 21.94% experimentaron cambios entre 40 y 60 días postantesis. Al agrupar los genes en procesos metabólicos, nuevamente el patrón más común fue el de niveles de expresión estacionarios (20.39%), seguido de aquellos en los cuales sólo hubo cambios en el último período de transición, ya sea un aumento o un decremento en los niveles de expresión (en total 27.64% de categorías). El período más activo de cambios de expresión fue el de 40 a 60 días postantesis, caracterizado por una disminución general del nivel de expresión de genes (Martínez-López *et al.* 2014). En cuanto a la ruta de biosíntesis de capsaicinoides, el patrón de expresión promedio de los genes de esta vía fue incremento-decremento-decremento (IDD), indicando un pico a los 20 días postantesis. Varios genes individuales de la ruta como los correspondientes a *PUN1*, *COMT*, *PAL*, *FAT*, *ACL*, *pAMT* y *KAS* tuvieron este comportamiento, mientras que otros como *ACS* tuvieron un patrón de incremento continuo de expresión a lo largo del desarrollo del fruto, a diferencia de otros trabajos, como en Zhang *et al.* (2016), donde tuvo un comportamiento similar a otros genes de la ruta (Martínez-López *et al.*, 2014).

También muy recientemente se realizó un análisis integrativo del transcriptoma y el proteoma de las principales vías metabólicas involucradas en el desarrollo del fruto en *C. annuum*, el número de transcritos y proteínas identificadas fue disminuyendo gradualmente a través del desarrollo de los frutos en diferentes estados de maduración (Liu *et al.* 2019).

III. Conclusiones

En conclusión, los diferentes enfoques transcriptómicos aplicados a diferentes especies y variedades dentro del género *Capsicum* muestran que los factores fisiológicos como las diferentes fases del desarrollo del fruto o la flor pueden cambiar drásticamente el perfil transcriptómico de las plantas, y en algunos casos estos cambios genéticos pueden estar relacionados con la producción de capsaicinoides. Los análisis transcriptómicos aplicados hasta ahora indican que además de la ruta tradicional de biosíntesis de capsaicinoides, se involucran otras vías como la de síntesis de fenilpropanoides y otras relacionadas como las

biosíntesis de los aminoácidos precursores. Finalmente, la variedad de las plantas y el tejido específico de análisis son factores que también deben ser considerados al evaluar el perfil transcriptómico de estas plantas, su relación con la acumulación de capsaicinoides y la característica de pungencia muy apreciada de estos frutos.

IV. Referencias

- Altúzar-Molina, A. R., Muñoz-Sánchez, J. A., Vázquez-Flota, F., Monforte-González, M., Racagni di Palma, G., y Hernández-Sotomayor, S. M. T. (2011). Plant Physiology and Biochemistry Phospholipidic signaling and vanillin production in response to salicylic acid and methyl jasmonate in *Capsicum chinense* J. cells. *Plant Physiology and Biochemistry*, 49(2), 151–158. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S098194281000241X>
- Antonious, G. F., Berke, T., y Jarret, R. L. (2009). Pungency in *Capsicum chinense*: variations among countries. *Journal of Environmental Science and Health Part B*, 44(2), 179-184. <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/19130376/>
- Arce-Rodríguez, M. L., y Ochoa-Alejo, N. (2015). Silencing *AT3* gene reduces the expression of *pAmt*, *BCAT*, *Kas*, and *Acl* genes involved in capsaicinoid biosynthesis in chili pepper fruits. *Biologia Plantarum*, 59, 477–484. <https://link.springer.com/article/10.1007/s10535-015-0525-y>
- Arce-Rodríguez, M. L., Ochoa-Alejo, N. (2017). An R2R3-MYB transcription factor regulates capsaicinoid biosynthesis. *Plant Physiology*, 174, 1359–1370. <http://www.plantphysiol.org/content/174/3/1359>
- Arce-Rodríguez, M.L. y Ochoa-Alejo, N. (2019). Biochemistry and molecular biology of capsaicinoid biosynthesis: recent advances and perspectives. *Plant Cell Reports*, 38(9), 1017-1030. <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/30941502/>
- Aza-Gonzalez, C., Nuñez-Palenius, H.G., y Ochoa-Alejo, N. (2011). Molecular biology of capsaicinoid biosynthesis in chili pepper (*Capsicum* spp.) *Plant Cell Reports*, 30, 695–706. <https://link.springer.com/article/10.1007/s00299-010-0968-8>
- Ben-Chaim, A., Borovsky, Y., Falise, M., Mazourek, M., Kang, B. C., Paran, I., y Jahn, M. (2006). QTL analysis for capsaicinoid content in *Capsicum*. *Theoretical and Applied Genetics*, 113, 1481-1490 <https://link.springer.com/article/10.1007/s00122-006-0395-y>
- Bosland, P. W. and Votava, E. J. (2012). Peppers: Vegetable and Spices *Capsicums*. 2nd edn. Edited by J. Atherton. United Kingdom: CABI, pp. 18-23.
- Canto-Flick, A., Balam-Uc, E., Bello-Bello, J. J., Lecona-Guzmán, C., Solís-Marroquín, D., Avilés-Viñas, S., Gómez-Uc, E., López-Puc, G., Santana-Buzzy, N., Iglesias-Andreu, L. G. (2008). Capsaicinoids content in Habanero pepper (*Capsicum chinense* Jacq.): Hottest known cultivars. *HortScience*, 43(5), 1344-1349. <https://journals.ashs.org/hortsci/view/journals/hortsci/43/5/article-p1344.xml>
- Castro-Concha, L. A., Baas-Espinola, F. M., Ancona-Escalante, W. R., Vázquez-Flota, F. A., Miranda-Ham, M. L. (2016). Phenylalanine biosynthesis and its relationship to accumulation of capsaicinoids during *Capsicum chinense* fruit development. *Biologia Plantarum*, 60(3), 579-584. <https://link.springer.com/article/10.1007/s10535-016-0608-4>
- Caterina, M. J., Schumacher, M. A., Tominaga, M., Rosen, T. A., Levine, J. D., y Julius, D. (1997). The capsaicin receptor: a heat-activated ion channel in the pain pathway. *Nature*, 389, 816-824. <https://www.nature.com/articles/39807>
- Clark, R., y Lee, S. H. (2016). Anticancer properties of capsaicin against human cancer. *Anticancer research*, 36(3), 837-843. <http://ar.iiarjournals.org/content/36/3/837.short>
- Curry, J., Aluru, M., Mendoza, M., Nevarez, J., Melendrez, M., y O'Connell, M.A. (1999). Transcripts for possible capsaicinoids biosynthetic genes are differentially accumulated in pungent and

- non-pungent *Capsicum* spp. Plant Science., 148, 47–57. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0168945299001181>
- Das, S., Teja, K. C., Duary, B., Agrawal, P. K., y Bhattacharya, S. S. (2016). Impact of nutrient management, soil type and location on the accumulation of capsaicin in *Capsicum chinense* (Jacq.): One of the hottest chili in the world. *Scientia Horticulturae*, 213, 354-366. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0304423816305544>
- DOF (2010). Declaratoria General de Protección de la Denominación de Origen Chile Habanero de la Península de Yucatán. Diario Oficial de la Federación. 4 de junio de 2010. http://dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5145315&fecha=04/06/2010
- Egan, A. N., Moore, S., Stellari, G. M., Kang, B. C., y Jahn, M. M. (2019). Tandem gene duplication and recombination at the AT3 locus in the Solanaceae, a gene essential for capsaicinoid biosynthesis in *Capsicum*. *PLoS One*, 14(1), e0210510. <https://journals.plos.org/plosone/article?id=10.1371/journal.pone.0210510>
- Fanzo, J., Hunter, D., Borelli, T., y Mattei, F. (2013). *Diversifying Food and Diets: Using Agricultural Biodiversity to Improve Nutrition and Health*, Routledge. https://www.bioversityinternational.org/fileadmin/migrated/uploads/tx_news/Diversifying_food_and_diets_1688_02.pdf
- Gangadhar, B. H., Mishra, R. K., Pandian, G., Park, S. W. (2012). Comparative study of color, pungency, and biochemical composition in chili pepper (*Capsicum annuum*) under different light-emitting diode treatments. *HortScience*, 47(12), 1729-1735. <https://journals.ashs.org/hortsci/view/journals/hortsci/47/12/article-p1729.xml>
- Ghiasi, Z., Esmaeli, F., Aghajani, M., Ghazi-Khansari, M., Faramarzi, M. A., y Amani, A. (2019). Enhancing analgesic and anti-inflammatory effects of capsaicin when loaded into olive oil nanoemulsion: An in vivo study. *International journal of pharmaceutics*, 559, 341-347. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S037851731930078X>
- González-Zamora, A., Sierra-Campos, E., Luna-Ortega, J. G., Pérez-Morales, R., Rodríguez-Ortiz, J. C., y 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(11), 13471–13486. <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/24184818/>
- Gould, J. (2017). Nutrition: a world of insecurity. *Nature*, 544, S6–S7. <https://www.nature.com/articles/544S6a>
- Gutiérrez-Carbajal, M. G., Monforte-González, M., Miranda-Ham, M. L., Godoy-Hernández, G., y Vázquez-Flota, F. (2010). Induction of capsaicinoid synthesis in *Capsicum chinense* cell cultures by salicylic acid or methyl jasmonate. *Biologia Plantarum*, 430–434. <https://link.springer.com/article/10.1007/s10535-010-0078-z>
- Han, K., Jang, S., Lee, J. H., Lee, D. G., Kwon, J. K., y Kang, B. C. (2019). A MYB transcription factor is a candidate to control pungency in *Capsicum annuum*. *Theoretical and Applied Genetics*, 132, 1235-1246. <https://link.springer.com/article/10.1007/s00122-018-03275-z>
- Jeeatid, N., Suriharn, B., Techawongstien, S., Chanthai, S., Bosland, P.W., y Techawongstien, S. (2018). Evaluation of the effect of genotype-by-environment interaction on capsaicinoid production in hot pepper hybrids (*Capsicum chinense* Jacq.) under controlled environment. *Scientia Horticulturae*, 235, 334-339. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0304423818301900>
- Kabita, K. C., Sanatombi, K., y Sharma, S. H. (2020). Efficient enhancement of capsaicinoids biosynthesis in cell suspension cultures of *Capsicum chinense* Jacq. cv. 'Umorok' by elicitors and differential gene expression analysis of elicited cultures. *Plant Cell, Tissue and Organ Culture*, 141, 145-154. <https://link.springer.com/article/10.1007/s11240-020-01775-9>
- Kabita, K. C., Sharma, S. K., y Sanatombi, K. (2019). Analysis of capsaicinoid biosynthesis pathway genes expression in callus cultures of *Capsicum chinense* Jacq. cv. 'Umorok'. *Plant Cell*,

Tissue and Organ Culture, 137, 565–573. <https://link.springer.com/article/10.1007/s11240-019-01591-w>

- Kim, J. S., Park, M., Lee, D. J., y Kim, B. D. (2009). Characterization of putative capsaicin synthase promoter activity. *Molecules and cells*, 28(4), 331-339. <https://link.springer.com/article/10.1007/s10059-009-0128-6>
- Kim, S., Park, M., Yeom, S.I., Kim, Y. M., Lee, J. M., Lee, H. A., Seo, E., Choi, J., Cheong, K., Kim, K. T., Jung, K., Lee, G. W., Oh, S. K., Bae, C., Kim, S. B., Lee, H. Y., Kim, S. Y., Kim, M. S., Kang, B. C., Jo, Y. D., Yang, H. B., Jeong, H. J., Kang, W. H., Kwon, J. K., Shin, C., Lim, J. Y., Park, J. H., Huh, J. H., Kim, J. S., Kim, B. D., Cohen, O., Paran, I., Suh, M. C., Lee, S. B., Kim, Y. K., Shin, Y., Noh, S. J., Park, J., Seo, Y. S., Kwon, S. Y., Kim, H. A., Park, J. M., Kim, H. J., Choi, S. B., Bosland, P. W., Reeves, G., Jo, S. H., Lee, B. W., Cho, H. T., Choi, H. S., Lee, M. S., Yu, Y., Choi, Y. D., Park, B. S., van Deynze, A., Ashrafi, H., Hill, T., Kim, W. T., Pai, H. S., Ahn, H. K., Yeam, I., Giovannoni, J. J., Rose, J. K. C., Sørensen, I., Lee, S. J., Kim, R. W., Choi, I. K., Choi, B. S., Lim, J. S., Lee, Y. H., y Choi, D. (2014). Genome sequence of the hot pepper provides insights into the evolution of pungency in *Capsicum* species. *Nature Genetics*, 46, 270-278. <https://www.nature.com/articles/ng.2877>
- Krebs, J. E., Goldstein, E. S. y Kilpatrick, S. T. (2018). *Lewin's Genes XII*. 12th edn. Estados Unidos de América: Jones & Bartlett Learning. *Journal of Food Science*, 82(12), 2885–2893.
- Kulski, J. K. (2016) 'Next-Generation Sequencing — An Overview of the History, Tools, and "Omic" Applications', in Next Generation Sequencing - Advances, Applications and Challenges. Croacia: Intech, 3–60. <https://www.intechopen.com/books/next-generation-sequencing-advances-applications-and-challenges/next-generation-sequencing-an-overview-of-the-history-tools-and-omic-applications>
- Latournerie-Moreno, L., López-Vázquez, J., Castañón-Nájera, G., Mijangos-Cortes, J. O., Espadas-Villamil, G., Pérez-Gutiérrez, A., y Ruiz-Sánchez, E. (2015). Evaluación agronómica de germoplasma de chile habanero (*Capsicum chinense* Jacq.). *Agroproductividad*, 8(1), 24–29. <https://biblat.unam.mx/es/revista/agroproductividad/articulo/evaluacion-agronomica-de-germoplasma-de-chile-habanero-capsicum-chinense-jacq>
- Lee, A., Cho, K., Jang, S., Rakwal, R., Iwahashi, H., Agrawal, G. K., Shim, J., Han, O. (2004). Inverse correlation between jasmonic acid and salicylic acid during early wound response in rice. *Biochemical and Biophysical Research Communications*, 318(3), 734–738. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0006291X04008460>
- Lin, R. J., Wu, I. J., Hong, J. Y., Liu, B. H., Liang, R. Y., Yuan, T. M., y Chuang, S. M. (2018). Capsaicin-induced TRiB3 upregulation promotes apoptosis in cancer cells. *Cancer management and research*, 10, 4237-4248. <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC6177521/>
- Liu, S., Chen, C., Chen, G., Cao B., Chen, Q. y Lei, J. (2012) RNA-sequencing tag profiling of the placenta and pericarp of pungent pepper provides robust candidates contributing to capsaicinoid biosynthesis. *Plant Cell, Tissue and Organ Culture*, 110, 111-121. <https://link.springer.com/article/10.1007/s11240-012-0135-8>
- Liu, S., Li, W., Wu, Y., Chen, C., y 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), e48156. <https://journals.plos.org/plosone/article?id=10.1371/journal.pone.0048156>
- Liu, Z., Lv, J., Zhang, Z., Li, H., Yang, B., Chen, W., Dai, X., Li, X., Yang, S., Liu, L., Ou, L., Ma, Y., Zou, X. (2019). Integrative Transcriptome and Proteome Analysis Identifies Major Metabolic Pathways Involved in Pepper Fruit Development. *Journal of Proteome Research*, 18(3), 982–994. <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/30650966/>
- Martin, C., Zhang, Y., Tonelli, C., y Petroni, K. (2013). Plants, diet, and health. *Annual Review of Plant Biology*. 64, 19–46. <https://www.annualreviews.org/doi/abs/10.1146/annurev-arplant-050312-120142>
- Martin, J. A., y Wang, Z. (2011). Next-generation transcriptome assembly. *Nature Reviews*

- Genetics, 12, 671–682. <https://www.nature.com/articles/nrg3068/>
- Mazourek, M., Pujar, A., Borovsky, Y., Paran, I., Mueller, L., Jahn, M. M. (2009). A dynamic interface for capsaicinoid systems biology. *Plant physiology*, 150(4), 1806–1821. <http://www.plantphysiol.org/content/150/4/1806>
- Martínez-López, L. A., Ochoa-Alejo, N., y Martínez, O. (2014). Dynamics of chili pepper transcriptome during fruit development. *BMC Genomics* 15, 143. <https://link.springer.com/article/10.1186/1471-2164-15-143>
- Medina-Lara, F., Echevarría-Machado, I., Pacheco-Arjona, R., Ruiz-Lau, N., Guzmán-Antonio, A., y Martínez-Estevez, M. (2008). Influence of nitrogen and potassium fertilization on fruiting and capsaicin content in habanero pepper (*Capsicum chinense* Jacq.). *HortScience*, 43(5), 1549–1554. <https://journals.ashs.org/hortsci/view/journals/hortsci/43/5/article-p1549.xml>
- Naves, E. R., de Ávila Silva, L., Sulpice, R., Araújo, W. L., Nunes-Nesi, A., Peres, L. E. P., y Zsögön, A. (2019) Capsaicinoids: Pungency beyond *Capsicum*. *Trends in Plant Science*, 24(2), 109–120. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1360138518302619>
- Olguín-Rojas, J. A., Fayos, O., Vázquez-León, L. A., Ferreiro-González, M., Rodríguez-Jimenes, G. del C., Palma, M., Garcés-Claver, A., y Barbero, G. E. (2019). Progression of the Total and Individual Capsaicinoids content in the fruits of three different cultivars of *Capsicum chinense* Jacq. *Agronomy* 9(3), 141. <https://www.mdpi.com/2073-4395/9/3/141>
- Park, M., Lee, J. H., Han, K., Jang, S., Han, J., Lim, J. H., Jung, J. W., Kang, B. C. (2019). A major QTL and candidate genes for capsaicinoid biosynthesis in the pericarp of *Capsicum chinense* revealed using QTL-seq and RNA-seq. *Theoretical and Applied Genetics*, 132(2), 515–529. <https://link.springer.com/article/10.1007%2Fs00122-018-3238-8>
- Rodas-Junco, B. A., Cab-Guillén, Y., Muñoz-Sánchez, J. A., Vázquez-Flota, F., Monforte-González, M., y Hernández-Sotomayor, S. M. T. (2013). Salicylic acid induces vanillin synthesis through the phospholipid signaling pathway in *Capsicum chinense* cell cultures. *Plant Signaling & Behavior*, 8(10), e26752. <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC4091082/>
- Ruiz-Lau, N., Medina-Lara, F., y Martínez-Estévez, M. (2011). El chile habanero: su origen y usos. *Revista Ciencia-Academia Mexicana de Ciencias*, 62(3), 70–78. <https://biblat.unam.mx/es/revista/ciencia-academia-mexicana-de-ciencias/articulo/el-chile-habanero-su-origen-y-usos>
- Sanderson, M. J., Nicolae, M., y McMahon, M. M. (2017). Homology-aware phylogenomics at gigabase scales. *Systematic Biology*, 66(4), 590–603. <https://academic.oup.com/sysbio/article/66/4/590/2957051>
- Scornavacca, C., y Galtier, N. (2017). Incomplete lineage sorting in mammalian phylogenomics. *Systematic Biology*, 66(1), 112–120. <https://academic.oup.com/sysbio/article/66/1/112/2449707>
- Solís-Lemus, C., y Ané, C. (2016). Inferring phylogenetic networks with maximum pseudo-likelihood under incomplete lineage sorting. *PLoS Genetics*, 12(3), e1005896. <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC4780787/>
- Spalink, D., Stoffel, K., Walden, G. K., Hulse-Kemp, A. M., Hill, T. A., Van Deynze, A., y Bohs, L. (2018). Comparative transcriptomics and genomic patterns of discordance in Capsiceae (Solanaceae). *Molecular Phylogenetics and Evolution*, 126, 293–302. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S105579031730814X>
- Srinivasan, K. (2016). Biological activities of red pepper (*Capsicum annum*) and its pungent principle capsaicin: a review. *Critical reviews in food science and nutrition*, 56(9), 1488–1500. <https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/10408398.2013.772090>
- Stephens, J. D., Rogers, W. L., Heyduk, K., Cruse-Sanders, J. M., Determann, R. O., Glenn, T. C., y Malmberg, R. L. (2015). Resolving phylogenetic relationships of the recently radiated carnivorous plant genus *Sarracenia* using target enrichment. *Molecular Phylogenetics and Evolution*, 85, 76–87.

- Stewart, C., Kang, B. C., Liu, K., Mazourek, M., Moore, S. L., Eun, Y. Y., Kim, B. D., Paran, I., y Jahn, M. M. (2005) The *Pun1* gene for pungency in pepper encodes a putative acyltransferase. *The Plant Journal* 42(5), 675–688. <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1111/j.1365-313X.2005.02410.x>
- Stewart, C., Mazourek, M., Stellari, G. M., O'Connell, M., y Jahn, M. (2007). Genetic control of pungency in *C. chinense* via the *Pun1* locus. *Journal of Experimental Botany*, 58(5), 979–991. <https://academic.oup.com/jxb/article/58/5/979/486285>
- Tanaka, Y., Nakashima, F., Kirii, E., Goto, T., Yoshida, Y., y Yasuba, K. (2017). Difference in capsaicinoid biosynthesis gene expression in the pericarp reveals elevation of capsaicinoid contents in chili peppers (*Capsicum chinense*). *Plant Cell Reports*, 36: 267–279. <https://link.springer.com/article/10.1007/s00299-016-2078-8>
- Tripodi, P., y Kumar, S. (2019). The *Capsicum* Crop: An introduction. N. Ramchiary and C. Kole (eds.), *The Capsicum Genome, Compendium of Plant Genomes*. Springer. https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-319-97217-6_1
- Zamudio-Moreno, E., Echevarría-Machado, I., Medina-Lara, M. de F., Calva-Calva, G., Miranda-Ham, M.L., Martínez-Estévez, M. de L. (2014). Role of peroxidases in capsaicinoids degradation in habanero pepper (*Capsicum chinense* Jacq.) plants grown under water deficit conditions. *Australian Journal of Crop Science*, 8(3), 448–454. <https://search.informit.com.au/documentSummary;dn=211419508501403;res=IELHSS>
- Zhang, J., Lv, J., Xie, J., Gan, Y., Coulter, J. A., Yu, J., Li, J., Wang, J., y Zhang, X. (2020). Nitrogen Source Affects the Composition of Metabolites in Pepper (*Capsicum annuum* L.) and Regulates the Synthesis of Capsaicinoids through the GOGAT–GS Pathway. *Foods*, 9(2), 150. <https://www.mdpi.com/2304-8158/9/2/150>
- Zhang, Z. X., Zhao, S. N., Liu, G. F., Huang, Z. M., Cao, Z. M., Cheng, S. H., y Lin, S. S. (2016). Discovery of putative capsaicin biosynthetic genes by RNA-Seq and digital gene expression analysis of pepper. *Scientific Reports*, 6, 3412. <https://www.nature.com/articles/srep34121>

VI. SOCIAL



CAPÍTULO 17

Entorno productivo del chile habanero en la península de Yucatán, México

Production environment of habanero pepper in the Yucatan Peninsula, Mexico

Flores-López, María L.¹ y Sánchez-Osorio, Ever²

¹: *Tecnología Alimentaria, Centro de Investigación y Asistencia en Tecnología y Diseño del Estado de Jalisco, A.C. Camino el Arenero 1227, El Bajío, 45019 Zapopan, Jal.*

²: *Catedrático CONACYT – CIATEJ. Tecnología Alimentaria, Centro de Investigación y Asistencia en Tecnología y Diseño del Estado de Jalisco, A.C. Camino el Arenero 1227, El Bajío, 45019 Zapopan, Jal.*

* autor de correspondencia: lflores@ciatej.mx

Resumen

El chile es un alimento con identidad en la cultura mexicana, existen diversas variedades que se asocian a regiones del país. El chile habanero tiene una particular relevancia en la península de Yucatán, se encuentra dotado de contenido histórico, social, cultural y económico, además de sus bondades nutricionales y terapéuticas, lo que ha permitido su diversificación en la industria química, alimentaria y farmacéutica. Este capítulo presenta una revisión teórica a partir de fuentes secundarias de información que permite describir y analizar el contexto histórico-social en el que se desenvuelve la producción del chile habanero e identificar las problemáticas, conflictos y posibilidades de desarrollo en la región. De menara general se indica la existencia de una incipiente organización entre productores primarios, dispersión de las parcelas productivas, bajo nivel tecnológico en los procesos productivos, así como problemas en la comercialización. Sin embargo, también se observan iniciativas como la organización del Consejo Regulador del chile habanero que puede impulsar y fortalecer los eslabones productivos en los estados que ostentan la Denominación de Origen (DO).

Palabras clave: Eslabones productivos, Organización Social, Chile Habanero, Denominación de Origen.

Abstract

The chili is a food with identity in the Mexican culture, there is such variety that some of them are associated to different regions of the country. The Habanero chili has a particular relevance in the Yucatan peninsula. It is endowed with historical, social, cultural and economic content, highlighted by its nutritional and therapeutic benefits, which has allowed its chemical, food and pharmaceutical industries diversification. This chapter presents a theoretical review based on secondary source of information that allow us to describe and analyze the socio-historical context in which Habanero chili production is developed, besides this, to identify in the region, problems, conflicts and possibilities of development. There is

an incipient organization among primary producers, dispersion of productive plots, low technological level in production processes as well as problems in marketing. In conclusion, there are initiatives such as the organization of the Regulatory Council of Habanero chili that can promote and strengthen the productive links in the states that hold it.

Keywords: Productive links, Social Organization, Habanero Chile, Denomination of Origin.

I. Introducción

El chile es una herbácea que pertenece al género *Capsicum*, su nombre científico proviene del griego *kapsakes* o cápsula, su nombre común deriva del náhuatl *Chili*. Se consideran cinco especies domesticadas entre las que se encuentra: chile rocoto, chile tabasco (*C. frutescens*), chile habanero (*C. chinense*), chile manzano (*C. pubescens*) y Ají amarillo (*C. baccatum*). Existen más de 40 variedades de chiles, entre los más relevantes para México se encuentra el chile Serrano, Jalapeño, Pasilla de la especie *C. annum*; el chile ancho, de árbol y manzano de la especie *C. pubescens* y el chile Habanero especie *C. chinense*, según la Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO, 2019). En este contexto la importancia de la producción del chile radica en su alto consumo y preferencia en el sector alimentario y, últimamente para el ámbito científico y tecnológico.

El consumo de chile es una práctica alimentaria que condensa aspectos nutricionales, culturales, históricos, sociales y económicos. Su alto consumo ha sido asociado a los estímulos que provoca tanto para la saciedad, salivación y mejor digestión al combinarse con otros alimentos, además se le confieren propiedades medicinales y antioxidantes. Se cuenta con información etnobotánicas que sugieren su uso en la época prehispánica y a la fecha por sus diversas bondades. El uso de este alimento cuenta con tal arraigo que es parte de la distinción en la cultura mexicana, en específico, puede observarse su alto consumo en el sur del país (Montes, 2010).

En este texto nos centraremos en el chile habanero (*Capsicum chinense*), este se cultiva principalmente en el sureste mexicano, denota importancia cultural en términos gastronómicos, cuenta con una gran tradición como ingrediente de la dieta yucateca. En 2010 se realizó la declaratoria general de protección de la denominación de origen del Chile Habanero en la península de Yucatán, incluyó los estados de Campeche y Quintana Roo. La posterior denominación de origen ha provocado un incremento en el valor comercial, en el uso de subproductos, así como en la exportación en sus diferentes presentaciones: seco, salsas, pastas y derivados para la industria química y farmacéutica (Diario Oficial, 2012)

Abordamos este tema a través de una revisión documental, a partir de fuentes secundarias: libros, capítulos de libro, artículos científicos y de divulgación, notas periodísticas y estadísticas de fuentes oficiales, con la intención de retratar cómo está estructurada la organización y producción de chile habanero en Yucatán mostrando sus tensiones, problemáticas, conflictos y posibilidades de desarrollo. Un apartado que aborda la

importancia del consumo del chile habanero incorporando los aspectos culturales e históricos. Se incorpora información sobre la llegada del chile habanero a la Península de Yucatán y su desarrollo como materia prima relevante en términos económicos. Posteriormente se abordan aquellos aspectos relativos a la producción del habanero y la organización social para terminar puntualizando los principales problemas y retos que implica la producción del chile habanero en la península de Yucatán.

II. Revisión bibliográfica

El documento parte de una revisión teórica y de experiencias de trabajo de campo con investigadores que han contribuido al desarrollo científico y tecnológico de esta cadena de producción. Sin embargo, su interés particular se orienta a la comprensión y entendimiento de lo social: situaciones específicas en la que los actores de la cadena se ven involucrados y que determinan el desarrollo o no del chile habanero en la Península de Yucatán. En este sentido consideramos que el campo social es atravesado por diferentes circunstancias que modifican e influyen en el modo de actuar y pensar de los actores: la cultura local, la política, la organización, el cambio climático, plagas y enfermedades, el mercado, etc., situaciones concretas que hacen compleja y dinámica la vida común en torno al cultivo de este sistema productivo.

Esta primera aproximación se realizó a través del análisis de documentos específicos (trabajo de gabinete que trató de una búsqueda de información teórica en revistas y libros particularmente, información bibliográfica que se presenta al final del texto), con el cual se brinda un panorama general de la situación en la que se encuentra este ecosistema productivo. También se ofrecen elementos generales que pueden contrastar la experiencia común en diferentes escalas. Se puntualiza la necesidad de una intervención comunitaria, cara a cara, con los productores y actores clave del ecosistema para conocer de primera mano las dimensiones sociales que atraviesan la dinámica de la producción

2.1 La importancia del consumo de chile: aspectos culturales e históricos

La alimentación es un proceso complejo donde se imbrican aspectos biológicos, psicológicos, culturales, sociales y económicos. En otras palabras, los alimentos no sólo cubren con la función nutricional sino también se insertan en matrices complejas donde las elecciones pueden estar condicionados por gustos, preferencias, disponibilidad, accesibilidad, además del reconocimiento del entorno cultural para su consumo. Diferencias importantes se aprecian en el uso de determinados alimentos dado condicione sociales particulares. Encontramos descripciones de la preferencia, gusto y consumo de determinados alimentos, así como categorías importantes que trascienden el mero hecho nutricional. Desde la perspectiva de la antropología alimentaria los alimentos están contenidos de sentidos, significados y simbolismos que se han desarrollado históricamente a través de pautas culturales. Mintz (2003) refiere cómo los alimentos que se comen tienen sus historias asociadas al pasado de quienes las comían.

En el caso de *Capsicum*, es considerado uno de los alimentos más populares en el mundo, pero que a su vez podría considerarse un alimento aversivo por la capsaicina, sustancia

que produce ardor en la boca al momento de su ingestión, Rozin (1995) señala que es un claro ejemplo de adaptación y gusto asociando su consumo a los efectos que a su vez produce: activa el sistema gastrointestinal, estimula la salivación, secreción gástrica y la movilidad intestinal, además de que es una fuente importante de vitamina A y C. Harris (1994) muestra como el picante es uno de estos alimentos que según su teoría son “Buenos para comer” en términos de costos y beneficios, tanto nutricionales como económicos. Refiere la importancia de su ingestión por los efectos de saciedad particularmente asociado a lugares donde el acceso a alimentos con alto valor nutricional era limitado.

Si se remonta a la prehistoria, se sabe el papel central de tuvo la domesticación de semillas para los asentamientos humanos. En el caso del *Capsicum*, se ha demostrado a través de hallazgos arqueológicos su presencia y consumo en Mesoamérica y cómo se incorporó a la cocina del viejo mundo después de su descubrimiento en el siglo XVI. (Long, 2009). En considerado una de las primeras plantas cultivadas en Mesoamérica, existe consenso de que al menos una de sus especies fue domesticada en la zona durante la época prehispánica, se configuró como un producto alimentario y de tributo en este periodo y durante la conquista europea. Se ha confirmado la continuidad de su uso y es considerado como una constante cultural en el caso de la historia mexicana (Long, 1986).

La relevancia del chile en la vida cultural de México se manifiesta en el uso de su nombre en albures, dichos y canciones. Además, ha sido usado para el tratamiento de enfermedades de filiación cultural como el “mal de ojo”, para otros procedimientos curativos como “limpias” o como medicamento (Long, 2009). Se evidencia “la continuidad del uso del chile en todas las épocas históricas donde se ha utilizado como condimento, producto tributario, medicamento, objeto ritual, arma defensiva, modificador de sabores y como pigmento” (Long, 2009). En términos culinarios la amplia diversidad del *capsicum* que se expresa en platillos típicos de la cocina en cada región del país.

2.2 El chile habanero y su llegada a la Península de Yucatán

Long (2009) hace un rastreo muy interesante que explicita en su texto “Los senderos prehispánicos del *Capsicum*”, traza la zona de origen en América del Sur y su trayecto hasta México, examinando cuatro especies que se cultivan y son relevantes en el país. Dado este libro se enfoca, concretamente, en una variedad de chile nos centraremos en describir y analizar los aspectos culturales, históricos y sociales que envuelven al *Capsicum chinense*, coloquialmente conocido como Habanero.

El chile habanero es conocido por su consumo y producción en la península de Yucatán. Se le considera el más picante de todas las especies de *capsicum*. No obstante, existe controversia respecto a su origen. Los registros arqueológicos y los datos registrados por los cronistas a principios del siglo XVI comprueban que el chile se extendió por casi todo el país antes de la llegada de los españoles. Sin embargo, no existe evidencia del consumo de la variedad *Chinense*. Se consideró originario de la isla de Cuba y se asociaba su nombre a la ciudad de la Habana. Otra teoría muy difundida refería que el chile habanero

llegó desde Indonesia y su nombre original era “javanero” asociándolo al apelativo común (Long, 2009).

Actualmente se sabe que esta variedad de chile se originó en América del sur, entre la parte alta de Bolivia y el sur de Brasil, por dispersión natural, difundido como planta silvestre donde las aves atraídas por su color jugaron un rol determinante, llegó a las tierras bajas de la cuenca Amazónica en el Brasil (Long, 2004). Esta zona es considerada el centro de diversificación por los botánicos. Al respecto se tienen indicios de la forma silvestre de *C. Chinense* en las tierras bajas de la Amazonía, en el Orinoco y en la parte este de Brasil, se le conoce a través de nombres locales como “ojo de pescado”, “ojo de perico” o “chile cerbatana” (Long, 2009).

Las descripciones de historiadores y botánicos refieren que el “habanero” fue domesticado y dispersado a través de inmigrantes “pasando por delta del Orinoco en Venezuela y de ahí a las islas del Caribe, a través de las islas de Trinidad y Tobago cerca de la costa de América del Sur [...] en el caribe las semillas se dispersaron entre las islas debido al comercio y migración de los caribeños” (Long, 2009).

La primera descripción del chile fue registrada por el Botánico Phillip Miller en 1768 en un diccionario Botánico, también existe registro en un libro publicado en 1776 por un médico holandés quien realizó una expedición al Caribe. (Miller, 1768 citado en Long, 2009). Según esta autora se atribuye a este médico la nomenclatura taxonómica de “*chinense* o *sinense*” considerado un enigma que ha derivado en la confusión en cuanto a la asociación que se ha hecho del origen asiático.

Esta descripción es relevante en términos históricos porque permite entender la presencia del chile habanero en la península de Yucatán. Existe información derivada del estudio del chile en Costa Rica y cómo llegó desde Jamaica por trabajadores negros para la construcción del ferrocarril en el siglo XIX según Heiser (1964).

Los estudios históricos, así como datos arqueológicos si bien sugieren el uso de chile en la dieta maya, no refieren la presencia de chile habanero, por lo que se concluye que la llegada del habanero no fue sino hasta después de la conquista. Esta conclusión se sostiene porque concuerda con narraciones históricas donde se describía la dieta de los mayas (Landa, 1978). Además, según Long (2009) no se identificó en la lengua maya la descripción del habanero, pero si para otros tipos de chiles de la zona como “*maax-ik, x-catik, ik, yaax-ik, chawa-ik y otros*”, no obstante, si encontró término en maya para una salsa que se prepara con el chile habanero, se le conoce como *Xni-pec*, que significa “la nariz mojada de perro” y refiere el hecho del picor de la salsa que hace fluir la nariz.

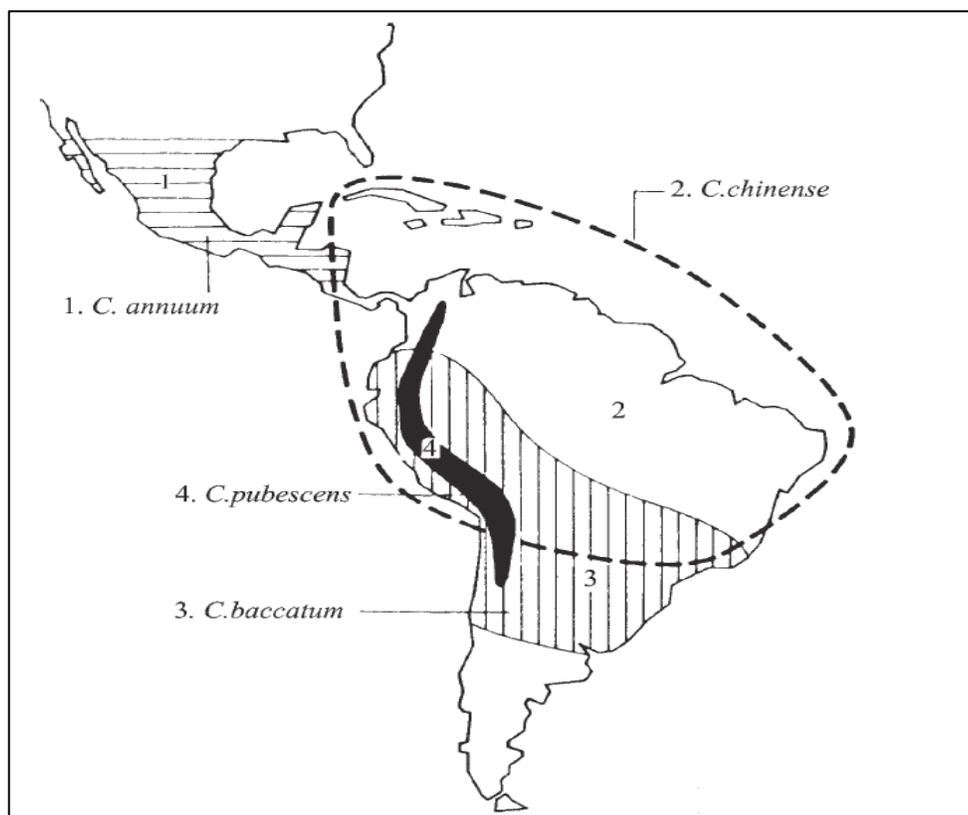


Figura 1. Distribución de especie *Capsicum*
Fuente: Heiser, 1979.

Valverde (2011) señala que la península de Yucatán se consideraba aislada del resto del país, es hasta el siglo XIX con la independencia de México que propiciaron en una serie de agitaciones sociales dando pie a una gran movilidad demográfica en la región. La más relevante fue la Guerra de Castas en 1847 con una duración de más de 50 años. Familias de elite se exiliaron en la ciudad de México, la Habana y Estados Unidos. Este mismo autor reseña que los rebeldes capturados en esta guerra fueron enviados a Cuba para trabajar como esclavos en la caña de azúcar, algunos de estos se les permitió el regreso años después. Esta dinámica dio un nuevo aire a la península que se había encontrado hasta cierto punto aislada.

Long señala que es en 1895 cuando se tiene la primera referencia de chiles habanero con esta denominación en inventarios de productos ofrecidos a jornaleros en una tienda de raya, también se encuentra otra referencia del uso del chile en un libro de cocina a finales del siglo XIX (Long, 2009). Esta autora señala que el nombre “habanero” es un indicativo de la introducción del *C. Chinense*, entre otros productos como el ron y los puros, dado por este intercambio forzoso. Se afirma la teoría de la introducción del chile por esta vía.

López- Alzina (2014) refiere sobre las condiciones ambientales que propiciaron el cultivo gestando un fuerte arraigo tanto en la producción como en el consumo dentro de la península: se cultiva en patios traseros y conformando parte relevante como ingrediente de

la cocina regional. El uso de chile habanero derivada de huertos traspatio es una práctica común de intercambio entre los mayas-yucatecos. Sin embargo, también han proliferado parcelas hortícolas dedicadas a la producción agrícola comercial de tres variedades de chiles habanero: yaax, verd y xkat. Este autor refiere que el impulso de la producción con fines comerciales más amplios derivó como parte de un programa de ayuda para la recuperación económica posterior a la devastación del huracán Isidoro en 2002.

La relevancia histórica y cultural que ha envuelto al habanero también ha repuntado la producción en términos económicos, particularmente asociados a las bondades del fruto lo que ha permitido su diversificación. Aguilar y Rodríguez (2018) puntualizan el papel protagónico del chile: en la comida, en eventos mágico-religiosos, como medicamento, como tributo, hasta formar parte del léxico popular reflejado en canciones, poemas, cuentos y doble sentido. Por otro lado, se ha estudiado por el aporte nutricional y otros componentes del fruto que tienen gran utilidad en la industria cosmética y farmacéutica, que actualmente se explota para estos fines (Rincón, *et al.*, 2010).

En 2009 se presentó la solicitud ante el Instituto Mexicano de Propiedad Industrial la Declaratoria de Protección de la Denominación de Origen, es en 2010 que se dictamina y se enuncia a favor en el Diario Oficial de la Federación la Denominación de Origen Chile Habanero de la Península de Yucatán, que comprende los estados de Campeche, Quintana Roo y Yucatán. Esta denominación incluye, como señala la norma, características, componentes, forma de extracción y procesos de producción o elaboración. Se encuentran protegidos el chile habanero de la península en fresco (estado inmaduro y maduro), curtido, en pasta, deshidratado (entero y en polvo) y en salsas (Diario Oficial, 2012).

2.3 La producción de chile habanero en la Península de Yucatán

Debido a las condiciones climatológicas, particularmente, las precipitaciones y la temperatura, la Península de Yucatán ha resultado ser sumamente favorable para la producción del chile habanero, tan así, que es el segundo alimento agrícola producido en la región (Ruiz-Lau *et al.*, 2011; Fideicomiso del Riesgo Compartido, 2017). Cabe mencionar que, para que la cosecha sea más exitosa, las precipitaciones y el nivel de humedad de los huertos o sembradíos es altamente importante. El chile habanero también se cultiva y produce en Baja California Sur, San Luis Potosí, Sonora y Tabasco, sin embargo, el cultivado en la península ha obtenido la Denominación de Origen (DO) desde el 2010. Además, “actualmente se cuenta con nueve variedades de chile habanero registradas en el Catálogo Nacional de Variedades Vegetales (CNVV) del SNICS (Servicio Nacional de Inspección y Certificación de Semillas). Estas variedades fueron seleccionadas no sólo por ser genuinas portadoras de los atributos que distinguen al chile habanero de la Península de Yucatán (sabor, aroma y picor) del cultivado en cualquier otra parte del mundo, sino también por la forma del fruto, su tamaño, su color, el peso del fruto, por su productividad y su adaptabilidad a las condiciones del ambiente” (Santana *et al.*, 2018).

Como se observa, puede ser que el chile habanero ha pasado históricamente a ser una planta domesticada, y resulta interesante citar extensamente a Long (2009), ya que explica

de manera clara lo que sucede con la planta y, por ende, clarifica los objetivos de la producción del *Capsicum chinense* Jacq:

Al pasar por el proceso de domesticación una planta sufre una serie de transformaciones genéticas durante las cuales el hombre modifica los rasgos de la misma, según el resultado que busca, en este caso el mejoramiento del fruto. Mediante el proceso de selección, voluntario o espontáneo, empieza a cambiar el color, la forma, el tamaño y el sabor del fruto. Lograr un fruto más grande y más pesado facilita que el chile se mantenga en una posición pendiente en la planta y, por lo mismo, ayuda a que quede oculto entre las hojas, protegido de las aves. El fruto de una planta domesticada no se separa con tanta facilidad del cáliz como el de las silvestres, lo cual evita que lo cosechen los pájaros. Mientras que el fruto de un chile silvestre sólo madura en tonos de rojo, los de las plantas domesticadas maduran en una gran variedad de tonos desde rojo hasta naranja, amarillo o café oscuro. El fruto, las hojas y las semillas son más grandes en las especies domesticadas. El proceso de domesticación se considera terminado cuando el hombre logra dominar por completo el cultivo y la producción de la planta (Long, 2009).

En la Península de Yucatán existe el cultivo domesticado bajo la producción de agricultura protegida por parte de grandes empresas (en el video titulado “Producción de chile habanero y capsaicina) explican de forma muy clara cómo es la producción del chile, los métodos que utilizan y el aporte que reciben desde la ciencia y la tecnología, así como también mencionan los principales mercados a nivel internacional (Panorama Agropecuario, 2016). Bajo esta forma de trabajo se garantiza un nivel alto de producción y cosecha, logrando obtener entre 180 y 200 toneladas por hectáreas (ton ha^{-1}), a partir de un aproximado de 53 cosechas al año. En este sentido, existe una diferencia marcada en cuanto a la producción a cielo abierto (producción tradicional), pues el ciclo de la planta en este tipo de cosecha es corto. La producción bajo términos de calidad en la agricultura protegida se obtiene a partir de avances científicos y tecnológicos que se han desarrollado para cuidar la genética de la planta, prevenirla de plagas y enfermedades, además de que la península es una zona fitozoosanitaria sana. Los niveles de producción de invernaderos se estiman con los siguientes datos: por cada invernadero de 5100 m^2 , se producen de 1600 a 1700 kg por semana (Panorama Agropecuario, 2016). Es importante anotar que en Yucatán existe entre 250 y 400 ha cultivadas con *Capsicum chinense* Jacq “y los rendimientos varían entre ocho y doce ton ha^{-1} , en suelos pedregosos al norte del estado, y de 10 a 15 ton ha^{-1} en suelos mecanizados al sur” (González *et al.*, 2018).

La producción del chile se basa específicamente en dos etapas: 1) el cultivo del chile habanero para usos culinarios y 2) la obtención de la capsaicina, que es la sustancia pungente utilizada para la elaboración de productos químicos, farmacéuticos y, además, del chile habanero se extraen oleorresinas “cuya aplicación, además de la industria alimentaria, se extiende a la industria química para la elaboración de pinturas y barnices, gases lacrimógenos, etcétera” (Ruiz-Lau *et al.*, 2011). La abstracción de la capsaicina es uno de los focos de interés a nivel internacional, como mencionan González *et al.*, (2018) “la agroindustria del chile habanero tiene una oportunidad única para posicionarse estratégicamente en el mercado demandante de capsaicina tanto nacional como internacional (Estados Unidos, España, Inglaterra y especialmente Japón)”.

Según Ramírez (2017), la producción principal se encuentra en cinco estados que concentran el 86% de la producción de todo el país. Yucatán tiene una producción nacional de 39%, seguido de Tabasco (30%), Campeche (8%), Quintana Roo (6%) y Chiapas (3%). Estos estados producen aproximadamente el 58, 448.00 t al año, convirtiéndose en un importante sistema de producción por su consumo local y demanda de mercados nacionales e internacionales.

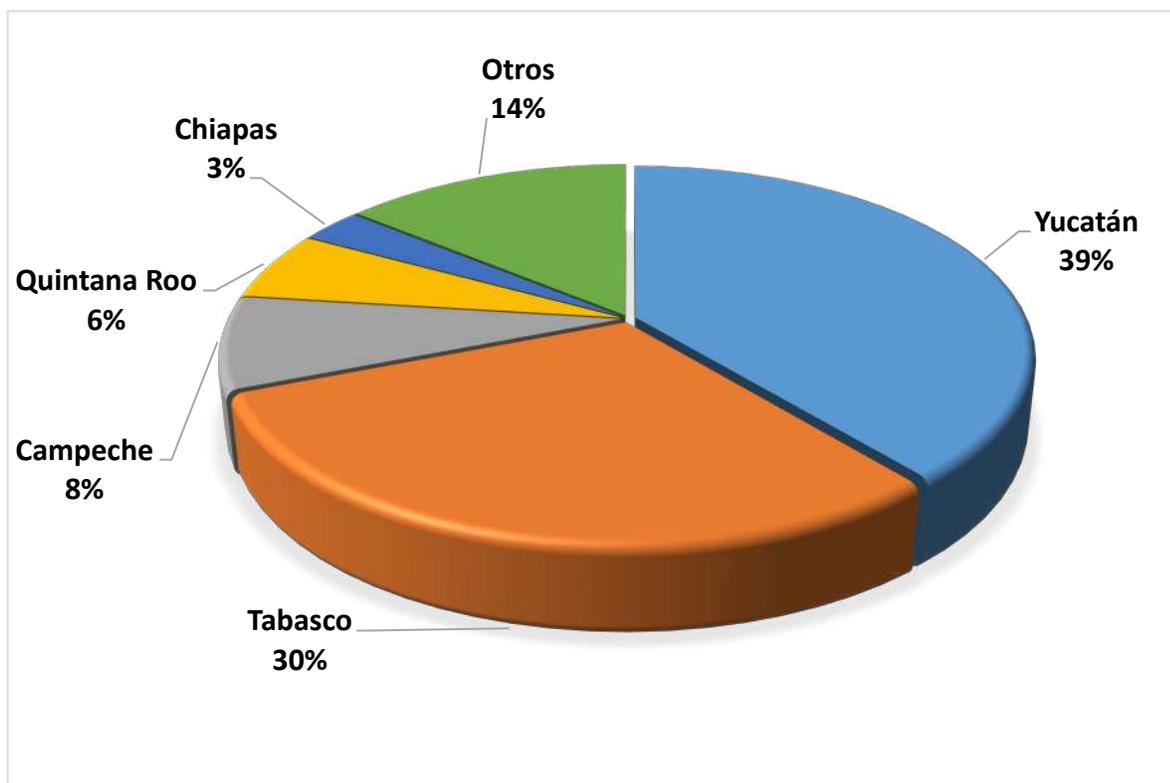


Figura 2. Participación porcentual estatal de la producción de chile Habanero 2006-2015.
Fuente: (Ramírez, 2017; SIAP, 2015).

Campeche, Quintana Roo y Yucatán tienen, aproximadamente, el 40% de la producción nacional. Campeche, el tercer estado más importante, obtuvo en el 2017 una producción de 1,243.73 t, siendo superado por los estados vecinos Tabasco y Yucatán. Quintana Roo ocupa la cuarta posición y el principal destino de la producción es el mercado local. Para el caso específico de Yucatán “la producción de chile [...] es de poco más de 1,700 productores, de los cuales 1,532 están agrupados en el Consejo Estatal de Productores de Chile (Ceproch) y se destinan 500 ha a la producción, pero en la práctica sólo se producen 200 ha de manera efectiva y constante, cuando la demanda internacional representa la cosecha de unas 1,500 ha (Martínez, 2019). Esta situación es muy recurrente cuando se dan datos oficiales, pero en la práctica la realidad resulta ser otra.

En la siguiente tabla se muestra el desarrollo de la producción para el año 2017, según datos de la Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación (SAGARPA - 2018), hoy Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural (SADER). Se observa

por estados los tipos de producción según acceso a sistemas tecnológicos de producción: como es el caso de la producción en invernadero y malla sombra.

Tabla 1. Producción de chile habanero en la península de Yucatán año 2017

Tipo de plantación	Superficie Sembrada (ha):	Superficie cosechada (ha):	Producción (t):	Rendimiento obtenido (ton ha ⁻¹):	Promedio rural (\$/t):	Valor de la producción (miles de pesos corrientes):
CAMPECHE						
Chile verde habanero:	94	94	1,243.73	13.23	16,576.49	20,616.67
QUINTANA ROO						
Chile verde habanero:	55.8	55.8	685.86	12.29	22305.89	15298.72
Chile verde habanero invernadero:	14.82	14.82	468.19	31.59	24122.28	11293.81
YUCATÁN						
Chile verde habanero:	156.99	156.64	1633.31	10.43	20171.42	32946.19
Chile verde habanero invernadero:	8.69	8.45	211.25	25	25281.72	5340.76
Chile verde habanero malla sombra:	5.4	5.4	118.73	21.99	20613.21	2447.41

Fuente: (SAGARPA, 2018).

2.4 Organización social

El chile habanero de la Península de Yucatán, conformado por los estados de Campeche, Yucatán y Quintana Roo, es un sistema de producción simbólico y emblemático en tres aristas principales: el gastronómico, el económico y el campo científico-tecnológico (Ruiz-Lau *et al.*, 2011; López-Puc *et al.*, 2009). Sin embargo, en el contexto de la organización, como en otros sistemas de producción, se observa poca colaboración entre los eslabones que inciden directamente en el impulso y desarrollo de la cadena, principalmente en las condiciones de comercialización. En este sentido, el impacto más perceptible de la cadena se encuentra en su aporte económico, siendo un soporte importante para la economía de sectores y poblaciones rurales que cuentan con la producción para mejorar sus condiciones de vida, ya que el chile habanero es considerado como actividad de subsistencia que puede mejorar los ingresos de las familias que la producen.

El 40% de la producción de chile habanero se distribuye a nivel local, el 20% de manera regional, el 10% a nivel nacional y el 30% se dirige a la exportación (Flores *et al.*, 2008).

Localmente su consumo se realiza en fresco, sin ningún tipo de tratamientos, también existe un sector industrial que aprovecha la materia prima, principalmente, para la elaboración de pastas y salsas que se convierten en elementos esenciales de la gastronomía regional. Cabe mencionar que en el campo científico y tecnológico el chile habanero cobra importancia en el sector farmacéutico, así como en otras áreas donde es útil para la elaboración de pinturas, repelentes y otros compuestos bioactivos: pasando del campo a importantes laboratorios de centros de investigación.

La extensión de siembra y producción es muy fluctuante, dependiendo del tipo de productor: existen pequeños productores que la utilizan como complemento de gastos familiares y la comercializan en muy pequeñas cantidades a nivel local, hasta aquellos con posibilidades de producción más amplias que concentran hasta 70 ha y producen hasta más de 500 t. Esta situación genera diferentes incongruencias en la cadena de producción, por ejemplo: hay mucha variación en los precios para su venta, pero, además, cuando se dan buenas cosechas la producción sobrepasa la demanda del mercado local. Cabe mencionar, según la Secretaría de Agricultura, Ganadería Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación (Sagarpa) – hoy Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural / SADER –, entre los cultivos de mayor tradición en la península el habanero es el que requiere un alto costo de inversión, pero también es el de más valía por su preferencia en los mercados. Sin embargo, su cultivo es aún rudimentario ya que presenta poca tecnificación, que se refleja en el volumen de cosecha, los cuales se aproximan a diez ton ha⁻¹ cultivadas (sin tecnificación) (Perea, 2007).

La lógica de la cadena de producción no es la organización, cada eslabón aprovecha las oportunidades que encuentra buscando los mejores rendimientos y ganancias posibles, por lo cual es perceptible una desvinculación entre los productores de la materia prima, los intermediarios (o coyotes), mercados específicos e industrias. En este sentido, el primer canal de comercialización de la producción se presenta entre los productores y los intermediarios (acopiadores transportistas). Según Flores *et al.*, (2008), los productores no tienen comunicación entre ellos mismos, su instrucción educativa es básica, presentan bajos recursos económicos y negocian con los intermediarios los precios del habanero, el cual puede ir de 4.00 pesos a 20.00 pesos el k. La falta de comunicación representa un problema no sólo para ponerse de acuerdo sobre el precio del producto, también en el intercambio de ideas para resolver problemas técnicos que afectan las plantas de chile o la búsqueda de capacitaciones que beneficien de manera directa a grupos de productores en diversas escalas (local, estatal y/o regional).

Por su parte, el intermediario (acopiadores transportistas) realiza el trato de manera directa, en los campos de producción. Por lo común ellos van a las áreas rurales, negocian directamente con el productor, generalmente bajo dos esquemas: el primero se relaciona con la agricultura de contrato, en el cual se renta la tierra para la siembra del cultivo o se pacta el pago del chile por ha sembradas; sin saber la cantidad de producción final ya que está condicionada por los cambios climatológicos, la aplicación de fertilizantes y uso de tecnologías (esta última es muy escasa, solo cuentan con ellas los productores con mayor capacidad adquisitiva).

El otro medio de negociación y quizá el más común se da cuando el acopiador, sabiendo la temporada de cosecha, se aventura a recorrer las comunidades para comprar el habanero ya sea por k o por plantaciones. Otro tipo de acopiador es el mayorista, estos compran el

producto de los acopiadores transportistas, no van a las comunidades, esperan a que los transportistas vayan por el producto, sin embargo, en esta negociación es cuando el producto puede tener uno de los mejores costos (hasta 20.00 pesos por k). Los acopiadores mayoristas pueden tener un esquema elaborado de comercialización y contar con sistemas específicos de control/calidad ya que llevan el producto a industriales y sectores de mercados especializados. Por tal razón dan tratamiento básico al producto, lo seleccionan, ponen en caja de cartón y entregan a mercados específicos.

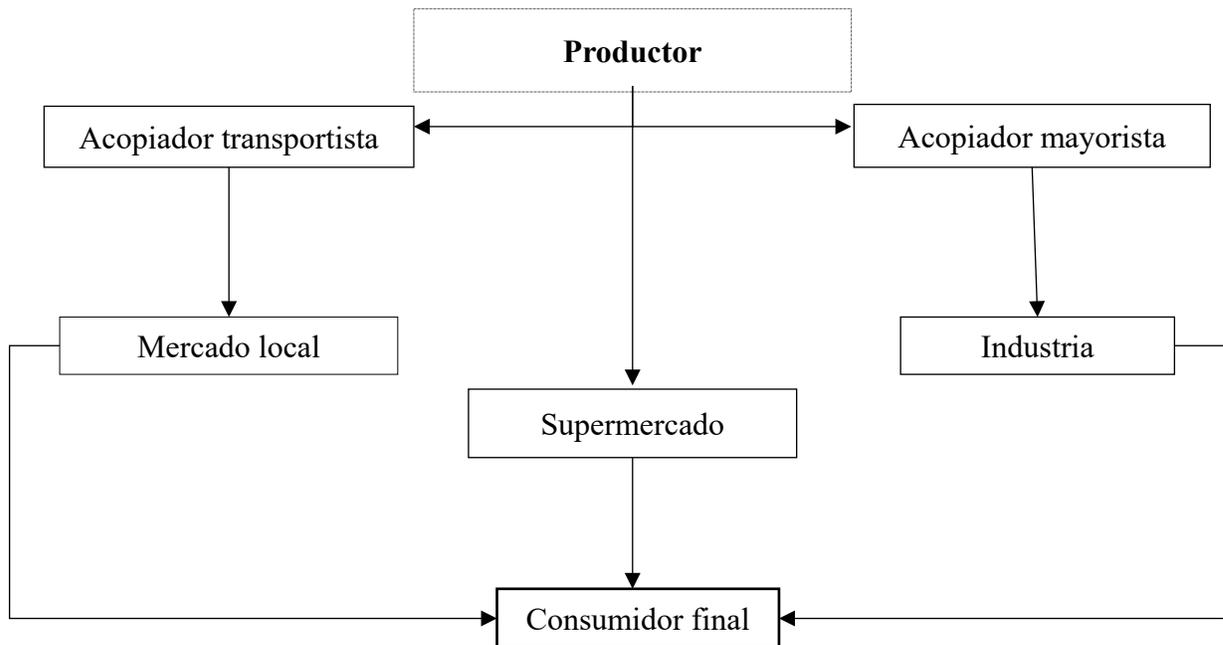


Figura 3. Canal de distribución del Chile habanero.
Fuente: (Flores, Jiménez y Eastmond, 2008).

Otro eslabón de la cadena es el industrial, el cual transforma y procesa la materia prima en productos básicos específicos (salsas, extractos, pastas y aprovechamientos tecnológicos a través de subproductos). La situación de la cadena productiva se observa muy diversa, tanto que la última cadena o eslabón, representada por los mercados locales y supermercados pueden adquirir el producto de los compradores mayoristas o productos transformados procesados directamente de las industrias. Hasta aquí, el precio del producto, según el valor agregado y el canal de obtención, puede percibirse con mucha variabilidad, como ecosistema cada eslabón ha sorteado y resuelto problemáticas específicas que tienen que ver con el modo de obtención del producto y el canal o venta de comercialización. El producto, no necesariamente llega del mercado o supermercado al consumidor final: hay quienes lo tienen a la mano y no necesitan comprarlo, los que la comercializan de manera informal en la comunidad, hasta aquellos que requieren algún tipo de tratamiento y consiguen el producto en el mercado.

La Figura 3 refleja el canal de distribución del Chile habanero en Mérida, podemos decir, es el común denominador que se materializa en estos estados donde se produce el picante. También muestra un reflejo de la organización productiva de la cadena, con algunos actores

de importancia y peso que están presente y definen el sector pero que no se ven participando de manera directa en el ecosistema productivo.

2.5 Principales problemáticas y retos en la producción

A pesar de la importancia productiva y económica que implica la producción de chile habanero en la Península, está aún no se encuentra consolidada. No existen estadísticas oficiales específicas que detallen información sobre la producción, rendimiento, valor de producción, los datos se engloban en la categoría de otros chiles. Identificamos algunos datos en instancias estatales, sin embargo, no permiten hacer un análisis pormenorizado de la situación.

Existe un bajo nivel tecnológico en la producción a pesar de la rentabilidad del cultivo. Los rendimientos promedio son de 10 t/ha. Esta situación se debe en gran parte a que la producción de chile habanero era una práctica de autoconsumo, párrafos arriba se señaló que el impulso de producción a nivel más amplio derivó de un programa social después del huracán Isidoro. Los productores poseen pequeñas superficies de cultivo, presentan limitaciones financieras y no cuentan con medios para la comercialización. (Corrales-García, *et al.*, 2014).

En 2003 iniciaron algunas iniciativas para conformar el Consejo Regular del Chile Habanero, derivando en conflicto sobre qué Estado debería llevar el liderazgo. En este año se ha firmado un acuerdo con el titular de la Secretaría de Desarrollo Rural (Sader) para conformar dicho consejo, el cuál fue acordado en la ciudad de Guadalajara con el aval del Consejo Regular del Tequila. Yucatán es el Estado que encabeza el consejo y se espera esta medida pueda conformar y fortalecer la cadena productiva del Chile Habanero en la península de Yucatán. (La Jornada, 2019; Milenio, 2015)

Según información de Corrales y *et al.*, (2014) no existe un padrón oficial de productores de habanero por estado, refiere que si bien existe apoyo gubernamental de programas como el Fondo Nacional de Apoya para las Empresas de Solidaridad (FONAES) órgano de la Secretaría de Economía a productores indígenas, campesinos y grupos populares-urbanos, quienes apoyaron a productores a través del impulso de invernaderos, plántulas, semillas y formación para la elaboración artesanal de salsas, así como para la comercialización a través de instancias como ASERCA (Agencia de Servicios a la Comercialización y Desarrollo de Mercados Agropecuarios). Sin embargo, los apoyos no han sido suficientes y han tenido una cobertura limitada.

Derivado de un análisis de Fortalezas, Oportunidades, Debilidades y Amenazas (FODA) elaborado por Corrales, *et. al.*, (2014) y complementado con información indirecta de otros autores (Sosa Alcaraz & Sarmiento Franco, 2015, Manrique, Martínez y Méndez, 2014, Aguilar, 2015 Loeza- Deloya y *et. al.*, 2016) que han estudiado la cadena productiva del Chile habanero concuerdan que las principales debilidades del sector se encuentran en todos los eslabones de la cadena productiva y son equiparables en los tres estados que ostentan la denominación de origen. Tabla 2.

También refieren una dispersión de las parcelas productivas, asociadas a la producción traspatio. Además de una incipiente organización e integración de los productores. Hay iniciativas de productores asociados en el caso de Quintana Roo, en los municipios de Felipe Carrillo Puerto y Jose María Morelos, Emilio Alamilla Mis, representante de Chileros de la zona Maya reporta la existencia de más de 30 invernaderos en estos municipios lo que garantiza la certeza en la producción y comercialización. En esta región se exporta producto a Europa y Estados Unidos, sin embargo, gran parte se queda en la región (Quintana Roo Hoy, 2018).

En el caso de Campeche, según refieren el titular de la Secretaria de Desarrollo Rural, no existe proyecto de comercialización. El producto se queda en el mercado regional y aporta una gran parte de la producción al estado de Yucatán. Los principales problemas de los productores tienen que ver con falta de organización, bajo nivel tecnológico, indermediarismo, así como deficiencias en la comercialización (Novedades Campeche, 2018).

En el caso de Yucatán quien actualmente ostenta el liderazgo en la integración del Consejo Regulador del Chile habanero, los eslabones productivos están más consolidados y están formalmente constituidos: productores, comercializadores, investigadores y prestadores de servicios, no están exentos de problemas, particularmente asociadas en el caso de productores primarios al abandono del cultivo, alta heterogeneidad en los suelos y dependiente de la fertilización (Borges-Gómez y *et al.*, 2014), incipiente integración de la cadena productiva, falta de consolidación en la organización tanto para la comercialización como industrialización, así como falta de desarrollo tecnológico (Milenio, 2015).

Tabla 2. Análisis de Fortalezas, Oportunidades, Debilidades y Amenazas de la cadena productiva del Chile Habanero

Fortalezas	<ol style="list-style-type: none"> 1. Mayor pungencia y atributos diferenciales asociados a las condiciones regionales. 2. Fuerte arraigo en el estado. 3. Subproductos de importancia biológica: extracción de capsaicina 4. Uso amplio en la industria farmacéutica, alimentaria y cosmética. 5. Diversificación del producto en la industria de alimentos: salsas, pastas, chiles deshidratados y en escabeche. 6. Gusto y preferencia del consumidor. 7. Incremento de las exportaciones en salsas.
Oportunidades	<ol style="list-style-type: none"> 1. Mercado exportación se ha registrado una creciente demanda, fresco o industrializado. 2. Nuevos y novedosos usos de la capsaicina. 3. No existen restricciones fitosanitarias para la exportación de este chile y favorece su distribución. 4. Programas de apoyo limitados.
Debilidades	<ol style="list-style-type: none"> 1. Dispersión de las parcelas productivas. 2. Escasa o incipiente organización e integración a la comercialización e industrialización de productos. 3. Bajo nivel tecnológico en los diferentes eslabones. 4. Desfavorables condiciones edáficas, alta heterogeneidad en los suelos y dependiente de la fertilización. 5. Nulo desarrollo de tecnología postcosecha. 6. Incremento del intermediario. 7. Deficiencias en la comercialización. 8. No hay integración de cadena productiva.
Amenazas	<ol style="list-style-type: none"> 1. Otras competidores: Belice y estados del interior del país. 2. Productores absorbidos por la maquila. 3. Abandono de tierra. 4. Pocos jóvenes integrados a la producción. 5. Pocos incentivos para la comercialización.

III. Conclusiones

El chile es uno de esos alimentos, que según la teoría de Marvin Harris (1994) *es bueno para comer*, no en vano se consume desde tiempos remotos, es una especie domesticada y preservada, sus bondades gastronómicas, nutricionales, terapéuticas y hasta culturales han permitido que se configure como un elemento vital de identidad mexicana. En el caso del chile habanero, introducido gracias a los movimientos sociales generados en el siglo XIX e introducido a la península, dado las características de la región, entre ellas, clima, suelo y ubicación logró un arraigo importante, actualmente goza de prestigio internacional,

su gran variedad de tamaños, formas y colores le confieren ciertas particularidades asociadas a la pungencia, entre otras características.

En 2010 se consigue la DO de Chile Habanero de la península de Yucatán, incluyendo los estados de Campeche y Quintana Roo. En este sentido, repuntó el interés comercial para la producción y comercialización que se destinan para usos culinarios y para la obtención de elementos como capsaicina, usada en la industria química, farmacéutica y cosmética. La diversificación del chile ha derivado en un abanico de posibilidades en términos culinarias y gastronómicas, así como el uso de sus componentes que implica la tecnificación y desarrollo de procesos industriales que pueden ser favorable para todos los actores implicados en la producción y comercialización del habanero.

Los eslabones productivos se encuentran poco consolidados, existe una escasa e incipiente organización de productores primarios, dispersión de las parcelas productivas, bajo nivel tecnológico en los procesos productivos. Se requiere fortalecer la comercialización y disminuir el intermediarismo para que pueda integrarse una adecuada cadena productiva. La organización es una parte fundamental para el impulso de la cadena. A pesar de los conflictos se ha conformado el Consejo Reguladora del Chile Habanero que lidera Yucatán, se espera que puede lograr fortalecer los eslabones productivos. El papel de los diferentes actores es indispensable para lograrlo.

Finalmente se puede observar que el chile habanero goza de reputación internacional, es uno de los picantes predilectos no sólo para su consumo, también por otras bondades emergentes en la industria química, farmacéutica y alimentaria. Sin embargo, la cadena productiva es incipiente, cada actor del ecosistema actúa según sus posibilidades o conveniencias no existiendo punto de acuerdo. Es importante desarrollar investigación inter y transdisciplinaria, que recurra a temas tecnológicos, pero también sociales, para tener una perspectiva integral del ecosistema en la Península de Yucatán.

IV. Referencias

- Aguilar, J. A. Z. (2015) La DO del chile habanero de la península de Yucatán ¿Factor de impulso económico y social para la región? En: Gonzalez H. K y Puerto P. D. (eds.). Un acercamiento a la realidad empresarial: Análisis y posturas de las empresas y el factor de emprendimiento. Universidad Tecnológica Metropolitana, Yucatán, México. 105-113 pp.
- Aguilar M. A., & Rodríguez C. E. (2018). El origen de los chiles domesticados (*capsicum annum* L.) del México multiétnico. En: Rivera E. S., Martínez V. V., Lascurain, M., Rodríguez L. E., (eds.). De la Recolección a los agroecosistemas. Soberanía alimentaria y conservación de la biodiversidad. Universidad veracruzana. México. 285 pp.
- Borges-Gómez, L., Moo-Kauil, C., Ruíz-Novelo, J., Osalde-Balam, M., González-Valencia, C., Yam-Chimal, C., & Can-Puc, F. (2014). Suelos destinados a la producción de chile habanero en Yucatán: características físicas y químicas predominantes. *Agrociencia*, 48(4), 347-359.
- Conocimiento y uso de los alimentos: el chile. (2019). Comisión Nacional para el conocimiento y uso de la diversidad (CONABIO). México. Revisado en <https://www.biodiversidad.gob.mx/ usos/ alimentacion/ chile. html#>

- Corrales-García, J., Carrillo, M. G. A., Santos, G. A., Sandoval, A. G., Trejo, M. M. H., del Rosario Justo, M. R., Ruiz L. G., y López, N. M. (2014). El sistema agroindustrial "chile habanero" en Yucatán. Frutas y hortalizas: estado actual y nuevas alternativas en México, 81.
- Diario Oficial. (2012). Declaratoria general de protección de la denominación de origen Chile Habanero de la Península de Yucatán. Instituto Mexicano de la Propiedad Intelectual. México.
- Fideicomiso del Riesgo Compartido. (2017). Chile habanero con Denominación de Origen. Gobierno de México. URL: <https://www.gob.mx/firco/articulos/chile-habanero-con-denominacion-de-origen?idiom=es>. Última consulta: 10 de junio de 2019.
- Flores, A., Jiménez, O. y Eastmon, A. (2008). Análisis Comparativo de la Estructura de los Canales de Distribución de Chile Habanero y Miel en Yucatán. XII Congreso Anual de la Academia de las Ciencias Administrativas AC. (ACACIA). Tijuana, BC. México.
- González, T., Gutiérrez, L. y Contreras, F. (2018). El chile habanero en la cultura peninsular. En González, T., Zúñiga, J. y Vázquez, F. (Coords.), Mejoramiento genético del chile habanero de la Península de Yucatán. pp. 17-23, CONACYT-CICY-FOMIX-SIIES. Disponible en: https://www.cicy.mx/Documentos/CICY/Ligas_Interes/2018/Mejoramiento_genetico_del_chile_habanero_de_la_peninsula_de_yucatan.2018.pdf. Última consulta: 11 de junio de 2019.
- Harris, M. (1994). *Bueno para comer*. Alianza editorial. 228 pp.
- Heiser C. (1964). Los chiles y ajíes (*Capsicums*) de Costa Rica y Ecuador. Ciencia y Naturaleza, Ecuador, 7, 50-57.
- La Jornada. (2019). Yucatán encabeza el Consejo Regulador del Chile Habanero. Consultado en: <https://www.lajornadamaya.mx/2019-06-03/Yucatan-encabeza-el-Consejo-Regulador-del-Chile-Habanero>. Última consulta: 7 de junio del 2019.
- Landa, D. (1978). Relaciones de las Cosas de Yucatán, Editorial Porrúa.
- Loeza-Deloya, V., Uzcanga-Pérez, N., Cano-González, A., Ramírez-Jaramillo, G., Ramírez-Silva, J., & Aguilar-Duarte, Y. (2016). Cadenas de importancia socioeconómica para el desarrollo agrícola e industrial de la Península de Yucatán, México. Agroproductividad, 9(5).
- Lopez- Alzina, D. G. (2014). Una red comunal de acceso a alimentos: el huerto familiar como principal proveedor de productos para intercambio en una comunidad Maya-Yucateca. *Gaia Scientia*, 8(2).
- López-Puc, G, Canto-Flick A. y Santana-Buzzy N. (2009). El reto biotecnológico del chile habanero. Revista Ciencia. No. Pp. 30-35. URL: https://www.revistaciencia.amc.edu.mx/images/revista/60_3/PDF/04-486-El-chile-habanero.pdf. Última consulta: 12 de noviembre de 2019.
- Long, T. J. (2004). Los orígenes del chile habanero. *Cuadernos de Nutrición*, 27 (2), 77-81.
- Long, J. (2009). Los senderos prehispánicos del *capsicum*. En: Long, J. Y Attolini, A. (coords) Caminos y mercados de México. Serie Historia General 23. pp. 79-106. UNAM-IIH-INAH. Disponible en: <http://www.historicas.unam.mx/publicaciones/publicadigital/libros/caminosymercados/cm006.pdf>. Última consulta: 25 de mayo de 2019.
- Long, L. T. (1986). *Capsicum* y cultura: la historia del chilli. Fondo de Cultura Económica. México.
- Martínez, V. (2019). Buscan certificación para el Consejo Regulador del Habanero. INFORURAL. URL: <https://www.inforural.com.mx/buscan-certificacion-para-consejo-regulador-del-habanero/>. Última consulta: 5 de mayo de 2019.
- Manrique, J. M. T., Martínez, E., & Méndez, G. M. (2014). Análisis comparativo de la sustentabilidad de dos unidades productivas de Chile Habanero convencionales y dos unidades productivas orgánicas en Yucatán, México. Observatorio de la Economía Latinoamericana, (194).
- Milenio Diario (2015). Crean organismo para regular el chile habanero. Revisado en: <https://sipse.com/milenio/crean-consejo-regulador-chile-habanero-yucatan-153597.html>. Última consulta: 20 de mayo del 2019.

- Mintz, S. W. (2003). Sabor a comida, sabor a libertad: incursiones en la comida, la cultura y el pasado. CIESAS. México.
- Montes, H. S. (2010). Recopilación y análisis de la información existente de las especies del género *Capsicum* que crecen y se cultivan en México. Informe Final. Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO). México, D.F.
- Novedades Campeche (2018). Chile habanero de Campeche se queda en la región. En: <https://www.novedadescampeche.com.mx/estado/campeche/chile-habanero-de-campeche-se-queda-en-la-region/>. Última consulta 8 de junio del 2019.
- Panorama Agropecuario (2016). Producción de Chile Habanero y Capsaicina Cap 290. Panorama Agropecuario. URL: <https://www.youtube.com/watch?v=i-T54nZXtfc>. Última consulta: 12 de noviembre de 2019.
- Perea, E. (2007). Los diversos usos del chile habanero. URL: <http://imagenagropecuaria.com/2007/los-diversos-usos-del-chile-habanero/>. Última consulta: 28 de mayo de 2019.
- Quintana Roo Hoy. (2018). Chile habanero, “tesoro” de Quintana Roo. En: <http://quintanarohoy.com/chetumal/chile-habanero-tesoro-de-quintana-roo/>. Última consulta: 8 de junio del 2019.
- Ramírez, G. (2017). Análisis de la producción del chile habanero (*Capsicum chinense*, jacq.) en los principales estados productores de México Durante 2006 – 2015. México: Universidad Autónoma Antonio Narro., División de Ciencias Económicas, Departamento de Economía Agrícola.
- Rincón, V. H. A., Torres, T. C., López, P. L., Moreno, L. L., Meraz, M. R., Mendoza, H. V., & Castillo, J. A. A. (2010). Los chiles de México y su distribución. SINAREFI.
- Rozin, P. (1995). Perspectivas psicobiológicas sobre las preferencias y aversiones alimentarias. En Jesús Contreras (editor). Alimentación y cultura: necesidades, gustos y costumbres (pp. 85-110). Editorial Alfabeta. Madrid. España.
- Ruiz-Lau, N., Medina, F. y Martínez, M. (2011). “El chile habanero: su origen y usos”. Revista ciencia, julio-septiembre. Pp. 70-77. Disponible en: https://www.amc.edu.mx/revistaciencia/images/revista/62_3/PDF/Habanero.pdf. Última Consulta: 11 de junio de 2019.
- Santana, N., Canto, A., Balam, E. et. Al. (2018). “Los recursos genéticos de *Capsicum chinense* Jacq. en la Península de Yucatán. Caracterización de variedades ‘criollas’ de chile habanero”. Mejoramiento genético del chile habanero de la Península de Yucatán, González, T., Zúñiga, J. y Vázquez, F. (Coords). pp. 45-51, CONACYT-CICY-FOMIX-SIIES disponible en: https://www.cicy.mx/Documentos/CICY/Ligas_Interes/2018/Mejoramiento_genetico_del_chi_le_habanero_de_la_peninsula_de_yucatan.2018.pdf. Última consulta: 11 de junio de 2019.
- Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación (SAGARPA) (2018). Registro Nacional Agropecuario. <http://www.sagarpa.mx/quienesomos/MarcoJuridico/Paginas/REGISTRONACIONALAGROPECUARIO.aspx>. Última consulta: 11 de junio de 2019.
- Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera (SIAP). 2015. Producción agrícola. México: SIAP.
- Sosa Alcaraz, M. A., & Sarmiento Franco, J. F. (2015). Los sistemas locales de innovación para la sustentabilidad en la agricultura. El caso del chile habanero en dos comunidades de Yucatán. En: Pasado, presente y futuro de las regiones en México y su estudio. Asociación Mexicana de Ciencias para el Desarrollo Regional. AMECIDER. Instituto de Investigación económica. Repositorio Universitario. México.
- Valverde V. M. C. (2011). “La Guerra de Castas. Península de Yucatán (1847-1901)”, *Arqueología Mexicana* núm. 111, pp. 54-59. Revisado en: <https://arqueologiamexicana.mx/mexico-antiguo/la-guerra-de-castas-peninsula-de-yucatan-1847-1901>. 7 de junio del 2019.

ISBN: 978-607-8734-09-2

