



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE QUERÉTARO

FACULTAD DE QUÍMICA

**“EVALUACIÓN DE VIDA DE ANAQUEL DE TOMATE
(*Solanum lycopersicum* cv. “Merlice”) CULTIVADO EN
SISTEMAS ORGÁNICO Y CONVENCIONAL”**

TESIS

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE

INGENIERO QUÍMICO EN ALIMENTOS

PRESENTA

MARÍA GUADALUPE RENDÓN DUCOING

DIRIGIDA POR

DR. EDMUNDO MERCADO SILVA

SANTIAGO DE QUERÉTARO, QUERÉTARO, 20



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE QUERÉTARO

FACULTAD DE QUÍMICA

**“EVALUACIÓN DE VIDA DE ANAQUEL DE TOMATE
(*Solanum lycopersicum* cv. “Merlice”) CULTIVADO EN
SISTEMAS ORGÁNICO Y CONVENCIONAL”**

TESIS

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE

INGENIERO QUÍMICO EN ALIMENTOS

PRESENTA

MARÍA GUADALUPE RENDÓN DUCOING

DIRIGIDA POR

DR. EDMUNDO MATEO MERCADO SILVA

SINODALES

Dr. EDMUNDO MATEO MERCADO SILVA
DIRECTOR

M. en C. CAROLINA RESÉNDIZ NAVA
SINODAL

Dr. DULCE MARÍA RIVERA PASTRANA
SINODAL

M. en C. ÁNGEL RAMÓN FLORES SOSA
SINODAL

ÍNDICE GENERAL

Contenido	Página
ÍNDICE GENERAL	i
ÍNDICE DE CUADROS	v
ÍNDICE DE FIGURAS	vii
RESUMEN	
1. INTRODUCCIÓN	1
2. ANTECEDENTES	4
2.1 Tomate	4
2.1.1 Origen y taxonomía	4
2.1.2 Descripción botánica	4
2.2 Características de cultivo	6
2.2.1 Características de cultivo en cielo abierto	6
2.2.2 Características de cultivo en invernadero	7
2.2.3 Requerimiento de nutrientes para el cultivo del tomate	7
2.2.3.1 Requerimiento de Nitrógeno	9
2.2.3.2 Fósforo	9
2.2.3.3 Potasio	9
2.2.3.4 Calcio	10
2.2.3.5 Micronutrientes	10

2.2.4 Descripción del fruto	11
2.3 Importancia económica de la producción de tomate en México	13
2.3.1 Producción nacional, sistemas de cultivo y variedades	13
2.3.2 Valor de la producción	17
2.4 Factores que definen la calidad del tomate	19
2.5 Composición química y nutrimental del tomate	22
2.5.1 Características químicas de los carotenoides	22
2.6 Metabolismo del tomate en el almacenamiento	25
2.6.1 Metabolismo primario	26
2.6.1.1 Metabolismo de carbohidratos	26
2.6.1.2 Metabolismo de ácidos orgánicos	27
2.6.2 Metabolismo secundario	29
2.6.3 Sistema antioxidante	31
2.7 Vida de anaquel del tomate	32
2.8 Efecto del sistema de cultivo en la vida de anaquel del tomate	34
3. OBJETIVO	37
3.1 General	37
3.2 Específicos	37
4. METODOLOGÍA	38
4.1 Materiales	38

4.1.1 Manejo de la fruta	38
4.1.2 Estrategia experimental	38
4.1.3 Análisis estadísticos de los resultados	39
4.2 Métodos	40
4.2.1 Parámetros físicos y fisicoquímicos	40
4.2.1.1 Densidad relativa	40
4.2.1.2 Firmeza	40
4.2.1.3 Color	41
4.2.1.4 Acidez titulable y sólidos solubles totales	41
4.2.1.4.1 Preparación de extracto	41
4.2.1.4.2 Acidez titulable	41
4.2.1.4.3 Sólidos solubles totales e índice de sabor	42
4.2.2 Parámetros fisiológicos	42
4.2.2.1 Tasa de respiración	42
4.2.2.2 Pérdida de peso	43
4.2.3 Determinación de la composición de los frutos	43
4.2.3.1 Azúcares reductores	43
4.2.3.2 Contenido de Licopeno	44
4.2.3.3 Contenido de Vitamina C	45
4.2.4 Cuantificación de la actividad de enzimas del sistema antioxidante	46

4.2.4.1 Preparación de polvos de acetona	46
4.2.4.2 Actividad de Catalasa (CAT)	46
4.2.4.3 Actividad de superóxido dismutasa (SOD)	47
4.2.5 Evaluación de la capacidad antioxidante	48
4.2.5.1 Preparación del extracto	48
4.2.5.2 Determinación de la capacidad antioxidante por el método del DPPH	48
4.2.5.3 Determinación de la capacidad antioxidante por el método del ABTS	49
5. RESULTADOS Y DISCUSION	50
5.1 Parámetros físicos (densidad, peso, volumen, diámetro y altura)	50
5.2 Efectos en los factores de calidad	52
5.2.1 Cambios en la pérdida de peso y firmeza	57
5.2.2 Cambios en el color de los frutos	61
5.2.3 Cambios en el índice de sabor (°Bx/Ac), acidez titulable, sólidos solubles totales y azúcares reductores	69
5.3 Cambios en los componentes nutricionales, vitamina C, licopeno y capacidad antioxidante	75
5.4 Cambios en las actividades de enzimas del sistema antioxidante	83
6. CONCLUSIONES	89
7. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	91
8. ANEXOS	110

ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro		Página
1	Clasificación Taxonómica del tomate.	4
2	Condiciones óptimas de temperatura, humedad relativa y VPD en las diferentes etapas de desarrollo del cultivo de tomate.	7
3	Nutrientes requeridos en el cultivo del tomate y sus funciones.	8
4	Niveles de nutrientes recomendados en el suelo y en la planta del tomate.	8
5	Descripción de las características visuales de los estados de madurez del tomate.	21
6	Valores óptimos de calidad del tomate en estado de madurez 6 (completamente maduro o rojo firme).	22
7	Composición química y nutrimental del tomate.	23
8	Composición típica de carotenoides en el tomate fresco.	24
9	Gradiente de elución de la fase móvil para la determinación de vitamina C por HPLC.	45
10	Comparación de medias para el factor sistema de cultivo en diferentes variables de respuesta físicas de frutos de tomate.	50
11	Valores del cuadrado medio del error del sistema de cultivo, día de almacenamiento y su interacción del análisis de varianza de los factores de calidad del tomate.	52
12	Comparación de medias globales de los factores de calidad de tomate producido bajo dos sistemas de cultivo y condición de almacenamiento.	56

13	Correlación entre los valores de color a^*/b^* y el valor de madurez asignado según la carta de color de estados de madurez del tomate.	64
14	Significancia estadística del efecto del sistema de cultivo, día de almacenamiento y su interacción (valores del cuadrado medio del error del análisis de varianza) en el contenido de vitamina C, licopeno y su capacidad antioxidante de tomate orgánico y convencional almacenados a diferentes condiciones.	76
15	Comparación de medias del contenido de licopeno, vitamina C y capacidad antioxidante de tomate producido en sistema orgánico y convencional, almacenados a 12°C y sus transferencias a 20°C.	78
16	Significancia estadística del efecto del sistema de cultivo, día de almacenamiento y su interacción (cuadrados medio del error del análisis de varianza) en la actividad de enzimas del sistema antioxidante de tomate.	84
17	Comparación de medias del efecto del sistema de cultivo y de la condición de almacenamiento en las actividades de enzimas del sistema antioxidante del tomate.	85
18	Análisis de correlación entre niveles de pérdida de peso (PP), firmeza, ángulo de matiz (Hue), luminosidad (L^*), croma, sólidos solubles totales ($^{\circ}Bx$), azúcares reductores, acidez titulable (AT), pH, sabor, DPPH, ABTS, vitamina C, licopeno, SOD y CAT.	114

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura		Página
1	Partes de la flor del tomate.	5
2	Etapas de crecimiento de la planta del tomate.	6
3	Anatomía del tomate.	11
4	Cambios en la producción nacional de tomate en el periodo 2010-2019.	14
5	Cambios en el a) área sembrada y b) rendimiento del tomate en México 2010-2019.	15
6	Producción de tomate rojo en México, por tipo de tecnología (2010-2019).	16
7	Rendimiento promedio del tomate rojo en México por tipo de tecnología.	17
8	Estados de madurez del tomate.	20
9	Resumen de los cambios metabólicos que ocurren durante la maduración del fruto de tomate. Desde la fruta verde en expansión hasta la fruta roja madura.	25
10	Metabolismo del ácido málico durante la respiración.	27
11	Metabolismo del citrato en la respiración.	28
12	Esquema simplificado mostrando la gluconeogénesis a partir de malato.	29
13	Síntesis del licopeno.	30

14	Mecanismo de acción del sistema antioxidante enzimático y no enzimático en las plantas.	32
15	Patrón de respiración del tomate.	34
16	Esquema general de la experimentación para evaluar los cambios de calidad y vida de anaquel.	39
17	Estructura interna de los tomates orgánicos a) y convencionales b).	51
18	Evolución de la pérdida de peso del tomate orgánico y convencional durante el almacenamiento a 12°C a) y transferencias a 20°C por 72 h b).	58
19	Cambios en la firmeza del tomate orgánico y convencional durante su almacenamiento a 12°C a) y transferencias a 20°C por 72 h b).	60
20	Apariencia visual de los frutos de tomate orgánico y convencional almacenados a 12°C.	62
21	Evolución del índice de color a*/b* en frutos de tomate orgánico y convencional durante el almacenamiento a 12°C a) y sus transferencias a 20°C por 72 h b).	63
22	Apariencia visual de frutos de tomate orgánico y convencional durante las transferencias de 12 a 20°C por 72 h.	65
23	Cambios en el ángulo de matiz de tomate orgánico y convencional durante su almacenamiento a 12°C a) y su transferencia a 20°C por 72 h b).	67
24	Cambios en la luminosidad de tomate orgánico y convencional durante su almacenamiento a 12°C a) y su transferencia a 20°C por 72 h b).	68

25	Cambios en la cromaticidad de tomate orgánico y convencional durante el almacenamiento a 12°C a) y su transferencia a 20°C por 72 h b).	69
26	Cambios en la acidez titulable de tomate orgánico y convencional durante su almacenamiento a 12°C a) y su transferencia a 20°C por 72 h b).	70
27	Cambios en el contenido de sólidos solubles totales de tomate orgánico y convencional durante su almacenamiento a 12°C a) y su transferencia a 20°C por 72 h b).	71
28	Cambios en el índice de sabor (°Bx/Ac) de tomate orgánico y convencional durante su almacenamiento a 12°C a) y su transferencia a 20°C por 72 h b).	72
29	Cambios en el contenido de azúcares reductores totales de tomate orgánico y convencional durante su almacenamiento a 12°C a) y su transferencia a 20°C por 72 h b).	73
30	Cambios en el pH de tomate orgánico y convencional durante su almacenamiento a 12°C a) y su transferencia a 20°C por 72 h b).	74
31	Cambios en el contenido de licopeno de tomate orgánico y convencional durante su almacenamiento a 12°C a) y su transferencia a 20°C por 72 h b).	79
32	Cambios en el contenido de vitamina C de tomate orgánico y convencional durante su almacenamiento a 12°C a) y su transferencia a 20°C por 72 h b).	81
33	Cambios en la capacidad antioxidante de tomate orgánico y convencional (por DPPH) durante su almacenamiento a 12°C a) y su transferencia a 20°C por 72 h b).	82

- 34 Cambios en la capacidad antioxidante de tomate orgánico y convencional (por ABTS) durante su almacenamiento a 12°C a) y su transferencia a 20°C por 72 h b). 83
- 35 Cambios en la actividad de la enzima superóxido dismutasa (SOD) de tomate orgánico y convencional durante su almacenamiento a 12°C a) y su transferencia a 20°C por 72 h b). 87
- 36 Cambios en la actividad de la enzima catalasa (CAT) de tomate orgánico y convencional durante su almacenamiento a 12°C a) y su transferencia a 20°C a 72 h b). 88

RESUMEN

El mayor porcentaje de tomate que se produce en México proviene del sistema convencional, en el cual se utilizan fertilizantes y plaguicidas químicos; no obstante, la producción de tomate orgánico se ha incrementado en los últimos años, debido al aumento en su demanda por parte de los consumidores. Los tomates orgánicos podrían tener menor calidad poscosecha y vida de anaquel debido al estrés nutricional en el que se desarrollan, sin embargo, no existen reportes que lo demuestren de forma contundente. Por este motivo, el objetivo de este estudio fue evaluar el efecto del sistema de cultivo (convencional y orgánico) en la calidad y vida de anaquel del tomate (*Solanum lycopersicum* cv. "Merlice") cultivado en invernadero. Los tomates orgánicos presentaron mayor pérdida de peso (50 %) que los convencionales, lo que permitió estimar que la vida de anaquel del tomate orgánico fue tres veces menor que el convencional. Adicionalmente, los frutos convencionales presentaron mayor acidez, °Brix, pH, azúcares y firmeza, sugiriendo, que los tomates de este sistema de cultivo muestran mejores características organolépticas (sabor y textura). En cuanto a los compuestos con capacidad antioxidante, se observó que los frutos de ambos sistemas presentaron valores comparables, lo que indica que las prácticas agrícolas no influyeron en el contenido de estos compuestos. Los resultados del presente trabajo demuestran que el sistema de cultivo orgánico reduce la vida de anaquel y la calidad de los frutos del tomate, pero no modifica el contenido de los compuestos antioxidantes.

1. INTRODUCCIÓN

El tomate es un fruto climatérico ampliamente conocido por su calidad nutricional debido a su alto contenido de componentes antioxidantes. El tomate es utilizado para la elaboración de una diversa gama de productos alimenticios; sin embargo, su venta en fresco tiene mayor valor comercial.

El tomate es la hortaliza de mayor producción en el mundo, en el año 2019 se registró una producción de 180 766 329 toneladas, siendo China el principal país productor con una producción de 62 764 571 toneladas (34.7%), mientras que México ocupó el lugar número 9 con 4 271 914 toneladas (2.4%) (FAOSTAT, 2019). Del total de la producción nacional, México exportó en el 2019 el 19.1%, por ello es un cultivo de alta importancia económica para el país (SIAP, 2019).

En la producción comercial se plantan diferentes variedades que responden a las preferencias del consumidor; del total de la producción del año 2019, el 82.5% correspondieron a tomates alargados o saladette y el 12.8% correspondieron al tomate bola. Los tomates cherry y uva solo representan una producción menor (5%) (SIAP, 2019).

La tecnología de producción de esta hortaliza ha tenido cambios importantes que han incrementado sus rendimientos; para el año del 2019, el 38% de la producción nacional se llevó a cabo en invernaderos, el 28% en malla sombra y el 32% se realizó bajo cielo abierto (tecnología ampliamente utilizada hace 15 años) (SIAP, 2019). El uso de ambientes protegidos eleva notablemente los rendimientos (100-200 ton ha⁻¹ en malla sombra y 400-700 ton ha⁻¹ en invernaderos) además economiza agua y fertilizantes al utilizar sistemas de fertirriego (SIAP, 2019).

No obstante, en los últimos 10 años ha habido una demanda incrementada en los mercados de consumo por productos orgánicos, los cuales tienen como característica que en su producción no emplea fertilizantes químicos ni utiliza plaguicidas o fungicidas sintéticos y en su lugar utiliza abonos naturales o residuos orgánicos composteados para la fertilización y extractos de productos naturales o

agentes microbianos de biocontrol para el control de plagas y enfermedades (Codex Alimentarius, 1999; FAO, 2009; IFOAM, 2005; USDA, 2015). Desde el punto de vista del consumidor, la producción orgánica es una tecnología amigable con el ambiente porque reduce la contaminación de los mantos freáticos con fertilizantes químicos que utiliza en el sistema de producción convencional (Guilabert y Wood, 2012, Lee y col., 2015, PROFECO, 2018). Así mismo se considera que estos productos tienen un mejor contenido de vitaminas y fitoquímicos que mejoran el estado de salud del consumidor (Guilabert y Wood, 2012, Lee y col., 2015).

Desde el punto de vista de precios, el producto orgánico es comercializado a mayores precios que el producido por el sistema convencional siendo éste un incentivo para la producción por parte de las empresas que se dedican a su producción. No obstante, en México la producción de tomate orgánico es aún marginal ya que solamente el 1.5% de la producción se produce por este sistema y el 98.5% se realiza por el sistema convencional (SIAP, 2019).

Existen diferentes problemas tecnológicos que se deben resolver para establecer un cultivo orgánico en invernadero. Uno de ellos es establecer un sistema de control estricto de plagas y enfermedades que permita reducir el riesgo de estas, ya que su eliminación es muy complicada y constituye un reto que pone en peligro toda la producción. Otro problema es que el uso de abonos como sustituyentes de los fertilizantes químicos genera un estrés de nitrógeno en la planta que altera su fisiología afectando los rendimientos de la producción y vida de anaquel del fruto en poscosecha.

La calidad poscosecha de los tomates depende de distintos factores como las prácticas agrícolas. En la literatura, están disponibles diversos estudios del efecto del sistema de cultivo en la calidad nutricional y sensorial del tomate cultivado en invernadero; sin embargo, los resultados no son contundentes.

Vinha y col. (2014) reportaron que el tomate orgánico tipo saladette (cv. Redondo) tiene mayor contenido de vitamina C (+30%), sólidos solubles totales (+18%), fenoles totales (+24%), flavonoides (+21%), licopeno (+20%) y actividad antioxidante (+6%).

También señalaron que el sabor y la textura del tomate orgánico fue de mayor agrado para los panelistas. Por otro lado, Uçurum y col. (2019) encontraron que los tomates convencionales cv. Rio Grande presentaron mayor contenido de licopeno (+9%), sólidos solubles totales (+9%), acidez titulable (+18%) y vitamina C (+11%).

En algunos estudios se encontró que la variedad también influye en el efecto del sistema de cultivo. Hallmann y col. (2012) encontró que el contenido de vitamina C y β -caroteno en los tomates dependió del sistema de cultivo y la variedad del fruto (estándar o cherry). En otro estudio realizado por los mismos autores en 2007 evaluaron 4 variedades de tomate (cv. Rumba, Kmicic, Gigant y Koralik) observando que la variedad y el sistema de cultivo afecta el contenido de vitamina C, licopeno, flavonoides y acidez titulable.

No existen reportes del efecto del sistema de cultivo en tomate de racimo y como este factor afecta la vida de anaquel de los frutos. Es por ello que la presente tesis pretende generar información acerca del efecto del sistema de producción orgánico y convencional en la calidad y vida de anaquel de tomates bola en racimo utilizando como variedad de referencia el cv. "Merlice" cultivado bajo invernadero en el Bajío Mexicano.

2. ANTECEDENTES

2.1 Tomate

2.1.1 Origen y taxonomía

El tomate (*Solanum lycopersicum*) es un arbusto nativo de América del Sur que fue domesticado en Centroamérica (Bergougnoux, 2014; Jenkins, 1948; Waheed y col., 2020). Los primeros cultivos de tomate se limitaron a Perú-Ecuador (Jenkins, 1948). Sin embargo, fue domesticado extensivamente hasta que llegó a México, y desde allí se difundió a toda Europa (Jenkins, 1948).

El tomate pertenece al género *Solanum* y especie *Lycopersicum* (Cuadro 1). La especie *Lycopersicum* se diferencia del resto de las especies de la familia *Solanaceae* por los espacios multiloculares en sus frutos (Razdan y Matto, 2006).

Cuadro 1. Clasificación Taxonómica del tomate (NCBI, 2020)

Clasificación Científica	
Reino	<i>Viridiplantae</i>
Filo	<i>Streptophyta</i>
Clase	<i>Magnoliopsida</i>
Orden	<i>Solanales</i>
Familia	<i>Solanaceae</i>
Género	<i>Solanum</i>
Especie	<i>Lycopersicum</i>

2.1.2 Descripción botánica

El tomate es una planta perenne que crece en forma de enredadera y puede alcanzar 2-4 m de longitud. El tallo puede crecer erecto o postrado y cuenta con un sistema de raíces que puede crecer hasta 50 cm de profundidad (Waheed y col., 2020).

Las hojas de la planta del tomate se encuentran dispuestas en espiral y tienen de 15 a 50 cm de largo y 10 a 30 cm de ancho (OECD, 2017; Waheed y col., 2020). Las flores del tomate nacen de inflorescencias que crecen opuestas o entre las hojas,

cada una produce de 6 a 12 flores de color amarillo con diámetro entre 1.5-2.5 cm cuando están en plena floración (Naika y col., 2005; OECD, 2017; Waheed y col., 2020).

La flor del tomate es una flor bisexual (Naika y col., 2005; Waheed y col., 2020). El tubo del cáliz (pedúnculo) es corto y piloso y el cáliz está compuesto por sépalos firmes. Las flores del tomate suelen tener seis pétalos de hasta 1 cm de longitud, amarillos y estructura similar cuando maduran (Naika y col., 2005). Cuenta con seis estambres (órgano masculino) que forman el cono estaminal, dentro de él, se encuentran dos o más carpelos unidos entre sí para formar el pistilo (órgano femenino). Cada carpelo está formado por un ovario, estilo y estigma (Figura 1) (Naika y col., 2005). El número de carpelos varía entre especies y se relaciona con el número de lóculos presentes en el fruto (OECD, 2017).

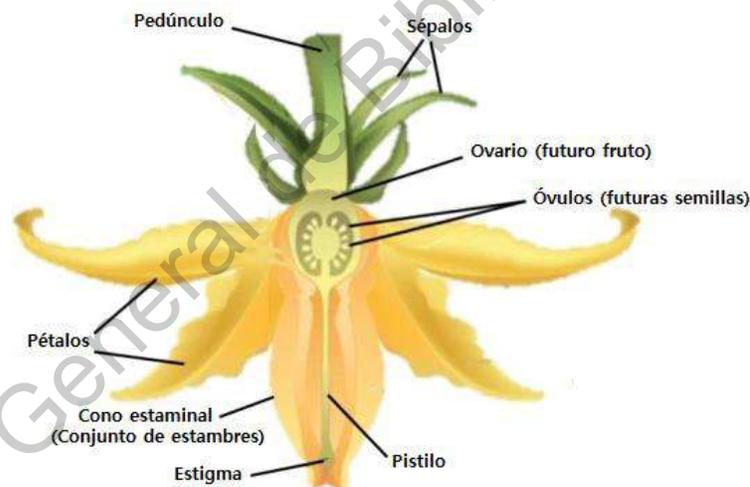


Figura 1. Partes de la flor del tomate (Medina y col., 2013).

Las flores pueden ser autopolinizadas o polinizarse de manera cruzada con insectos. Una vez polinizadas, las flores se transforman en frutos de diferentes colores: rojo, amarillo, naranja y marrón (Naika y col., 2005; Waheed y col., 2020). Como las flores no se abren simultáneamente, pueden encontrarse flores y frutos en diferentes etapas de desarrollo en una misma inflorescencia.

La planta del tomate presenta cinco etapas de crecimiento: germinación y crecimiento temprano con hojas iniciales (entre 25 y 35 días), período vegetativo (20 a 25 días), floración (20 a 30 días), fructificación temprana (20 a 30 días) y fructificación madura (15 a 20 días) (Shamshiri y col., 2018) (Figura 2). Los días exactos dentro de cada etapa dependen de la variedad y de factores ambientales como temperatura del aire, condiciones de luz, condiciones del suelo y aporte de nutrientes.

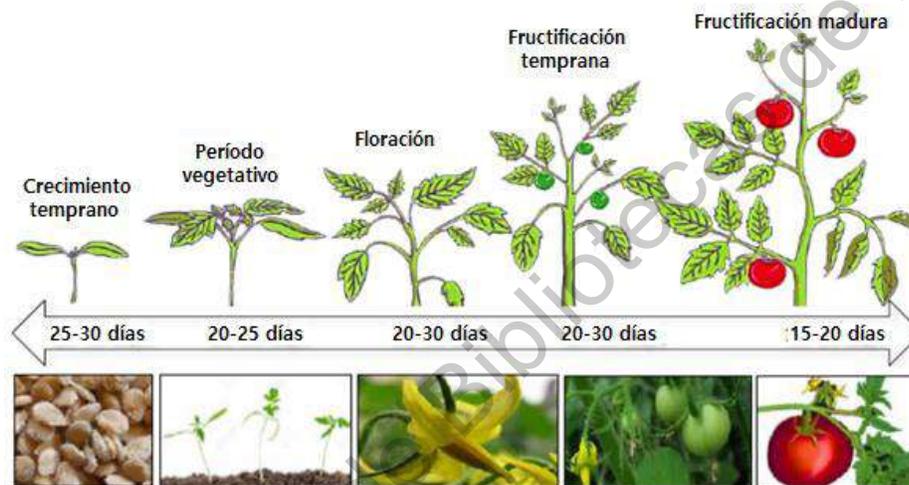


Figura 2. Etapas de crecimiento de la planta del tomate (Shamshiri y col., 2018).

2.2 Características de cultivo

2.2.1 Características de cultivo en cielo abierto

En cielo abierto, el tipo de suelo franco arenoso profundo (15-20 cm) con pH ácido (5.5 - 6.8) y presencia de materia orgánica es más favorable para el cultivo del tomate (FAO, 2020; Kimura y Sinha 2008; Mohammadi y col., 2011; Naika y col., 2005; OECD, 2017; Sainju y col., 2003). Las condiciones ambientales óptimas de temperatura y humedad relativa pueden variar entre 18-25°C y 55-60%, respectivamente (Kimura y Sinha, 2008; Naika y col., 2005; Shamshiri y col., 2018). Además, es necesario contar con suministro agua de entre 3 y 4 meses (FAO, 2020).

Bajo estas condiciones ideales, para la primera cosecha es necesario que transcurran entre 90 y 150 días (FAO, 2020; Naika y col., 2005; OECD, 2017). No

obstante, debido al incremento en la demanda del fruto en los últimos años, ha sido necesario aplicar estrategias para disminuir el tiempo de cosecha y así cubrir las necesidades de la población. La principal estrategia implementada es el cultivo en invernadero.

2.2.2 Características de cultivo en invernadero

Bajo el sistema invernadero, el tiempo promedio de cosecha disminuye considerablemente, siendo necesario un periodo total de 65 a 100 días (Shamshiri, 2017; Shamshiri y col., 2018). A diferencia del cultivo a cielo abierto, en este sistema es necesario controlar distintas variables, de las cuales, la temperatura, humedad relativa (HR) y el déficit de presión de vapor (VPD) son las más críticas y pueden variar dependiendo de la etapa de desarrollo del cultivo (Cuadro 2).

Cuadro 2. Condiciones óptimas de temperatura, humedad relativa y VPD en las diferentes etapas de desarrollo del cultivo de tomate (Argus, 2009; Jones y col., 1999; Naika y col., 2005; Shamshiri y col., 2018; Shamshiri, 2017).

Etapas de crecimiento	Temperatura (°C)	Humedad relativa (%)	VPD
Germinación de la semilla	11-34	>70	0.029-1.3
Crecimiento de la plántula	18-32	60-85	0.3-1.6
Crecimiento y maduración del fruto	10-30	50-85	0.25-2

2.2.3 Requerimiento de nutrientes para el cultivo del tomate

Para el desarrollo del tomate se requieren de 12 nutrientes, denominados “elementos esenciales”, los cuales, pueden dividirse en 2 grupos: macronutrientes que se utilizan en gran cantidad (nitrógeno, fósforo, potasio, calcio, magnesio y azufre) y micronutrientes que se utilizan en menor cantidad (hierro, cobre, zinc, manganeso, boro y molibdeno) (OECD, 2017; Sainju y col., 2003). Cada nutriente tiene funciones específicas tanto en la planta como en el fruto (Cuadro 3).

Cuadro 3. Nutrientes requeridos en el cultivo del tomate y sus funciones (Sainju y col., 2003).

Nutriente	Función
N	Constituyente de proteínas y aminoácidos
P	Constituyente de ácidos nucleicos
K	Activador de enzimas (Ej. piruvato quinasa) , regula el pH del tomate
Mg	Constituyente de la clorofila
Ca	Componente de la pared celular vegetal, afecta la permeabilidad de la membrana celular, regulador del metabolismo celular
S	Constituyente de proteínas y aminoácidos (Ej. Metionina)
B	Regula el nivel de sustancias de crecimiento
Fe	Constituyente de enzimas (Ej. peroxidasa, catalasa)
Mn	Activa enzimas (Ej. enzima málica)
Cu	Constituyente de enzimas oxidantes (Ej. fenolasa)
Zn	Constituyente de enzima anhidrasa carbónica
Mo	Involucrado en la utilización del NO ₃ -N (nitrato reductasa)

Ha sido reportada la cantidad óptima de nutrientes necesaria para obtener buen rendimiento y frutos de calidad (Cuadro 4) ya que el exceso o deficiencia puede tener consecuencias negativas (Sainju y col., 2003).

Cuadro 4. Niveles de nutrientes recomendados en el suelo y en la planta del tomate (Sainju y col., 2003).

Nutriente	Contenido en tierra (mg kg⁻¹)	Contenido en planta (mg kg⁻¹)
P	60-70	4000
K	600-700	60000
Mg	350-700	5000
Ca	1000	12500
N	50-100	30000-50000
B	1.5-2.5	40-60
Mn	5-20	30

2.2.3.1 Requerimiento de Nitrógeno

La deficiencia de nitrógeno afecta directamente al follaje (Corine y col., 2003). En la planta del tomate se ha observado que la deficiencia de nitrógeno causa que las hojas en la base de la planta se atrofien y se vuelvan delgadas y amarillas; las hojas jóvenes permanezcan pequeñas y de color verde pálido; y las hojas viejas mueren prematuramente (Bénard y col., 2009). En el fruto se ha encontrado que deficiencias severas pueden afectar el rendimiento (menor cantidad y tamaño de fruto), calidad organoléptica (menor sabor y color) y vida de anaquel del tomate (Frías y col., 2020; Hernández y col., 2020; Sainju y col., 2003; Wang y col., 2007), mientras que deficiencias leves pueden mejorar la calidad organoléptica y nutricional tomate como aumentar el contenido de sólidos solubles totales, algunos compuestos fenólicos y vitamina C (Bénard y col., 2009; Hernández y col., 2020; Li y col., 2017).

Por el contrario, exceso de nitrógeno puede generar crecimiento excesivo de follaje, lo cual, afecta de forma indirecta el rendimiento (menor peso y tamaño del fruto) y calidad de los frutos (menor firmeza y contenido de vitamina C) (Frías y col., 2020). Además, retrasa la madurez de los frutos de tomate, reduciendo así su producción (Sainju y col., 2003).

2.2.3.2 Fósforo

Bajo suministro de P afecta el crecimiento de la planta (Corine y col., 2003; Zhang y col., 2017). También se ha encontrado que puede causar la formación de tallos delgados y senescencia prematura de hojas viejas (Heydari y col., 2018; Sainju y col., 2003) mientras que su exceso reduce la disponibilidad de algunos micronutrientes como el Fe, Zn, Mn y Cu (Passam y col., 2007).

2.2.3.3 Potasio

La deficiencia de K en las plantas del tomate aumenta su sensibilidad al estrés oxidativo y genera quemaduras marrones y de color amarillo (Koleška y col., 2017; Sainju y col., 2003). También afecta el rendimiento y calidad sensorial del tomate (Caretto y col., 2008; Woldemariam y col., 2018).

El exceso de potasio reduce la disponibilidad de Mg en el suelo (Caretto y col., 2008; Woldemariam y col., 2018).

2.2.3.4 Calcio

La deficiencia de calcio puede causar disminución en rendimiento y la aparición de podredumbre apical en los frutos. Además, la tasa de germinación disminuye, las flores tienden a caer, disminuyendo el número de frutos y el rendimiento. (Gholamnejad y col., 2020; Sahin y col., 2015; Sainju y col., 2003). Por otra parte, alta concentración de calcio puede disminuir la disponibilidad de P en el suelo (Sainju y col., 2003).

2.2.3.5 Micronutrientes

El déficit o exceso de micronutrientes pueden causar efectos muy similares entre sí en la planta del tomate (Sainju y col., 2003). Ligera deficiencia de micronutrientes genera en hojas viejas cambio de color de verde a amarillo y en muchos casos se desarrollan áreas necróticas marrones entre las venas de la planta (Cervilla y col., 2007; Prieto y col., 2020; Sainju y col., 2003). Con severa deficiencia se desarrolla clorosis intervenal en las hojas que se encuentran en la base de la planta junto con la generación de manchas moradas y parches necróticos (Sainju y col., 2003). El boro en particular se ha observado que reduce el crecimiento de las raíces, así como expansión irregular de las hojas, entrenudos acortados y anomalías en la estructura celular (Haleema y col., 2018; Passam, 2007; Sainju y col., 2003). Con deficiencia de hierro y cobre también se observa efecto en el crecimiento de hojas, manteniéndolas pequeñas y rizadas (Passam y col., 2007; Sainju y col., 2003).

También la limitación de micronutrientes puede tener efectos negativos en el rendimiento del tomate (Haleema y col., 2018; Passam y col., 2007; Sabatino y col., 2019; Sainju y col., 2003). El boro, además de disminuir el rendimiento, disminuye la firmeza del tomate (Haleema y col., 2018; Sainju y col., 2003). Micronutrientes como Mo y B influyen en el sabor y calidad nutricional del fruto (Harris y col., 2016; Sabatino y col., 2019).

Por el contrario, cuando hay un exceso de micronutrientes como azufre, boro y manganeso se desarrolla necrosis en las plantas, generándose manchas blancas y secas, y manchas necróticas entre las nervaduras de las hojas. Exceso de boro puede causar la formación de ROS en tal magnitud que genera daño oxidativo en la planta (Cervilla y col., 2007). En el caso del manganeso y zinc causan lesiones marrones en tallos y el crecimiento de la planta se atrofia (Sainju y col., 2003). También el exceso de Mn y Cu pueden causar competitividad con la captación del Fe, generando deficiencia de este componente en la planta (Passam y col., 2007).

2.2.4 Descripción del fruto

Generalmente el fruto del tomate tiene forma globular u ovoide y, dependiendo de la variedad, el diámetro puede variar entre 2 y 15 cm (OECD, 2017; Naika y col., 2005). Los frutos inmaduros son de color verde mientras que los maduros pueden ser amarillos, naranjas o rojos (Naika y col., 2005).

El tomate está compuesto por cuatro partes o fracciones principales: pericarpio (pared interna y externa o piel, columela y pared radial o septos), tejido locular interno o placenta, gel locular y semillas (Figura 3) (Salunkhe y col., 1974; Zushi y col. 2012).

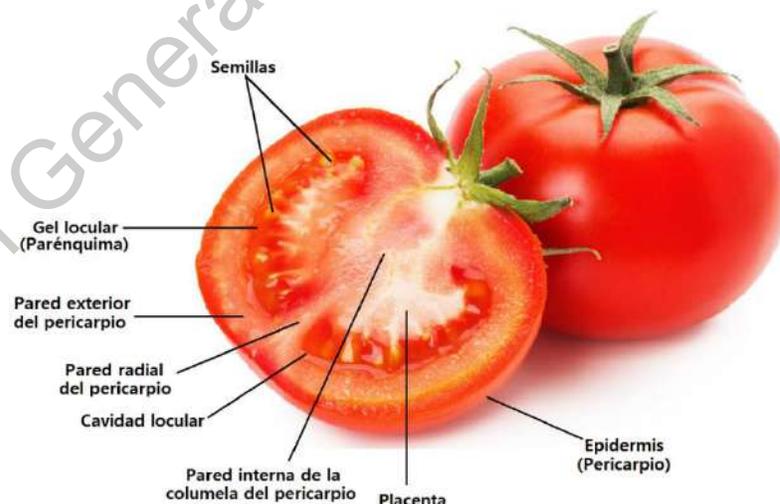


Figura 3. Anatomía del tomate (Salunkhe y col., 1974; Slimestad y Verheul, 2009).

La piel del pericarpio o pared externa consta de una capa epidérmica seguida de tres o cuatro capas bien definidas de tejido colénquimatoso, es decir, tejido compuesto de células de paredes gruesas de pectinas, celulosas y hemicelulosas, las cuales, le confieren a este tejido sus características de resistencia y flexibilidad (Salunkhe y col., 1974). El tamaño y el número de células epidérmicas aumentan considerablemente con el crecimiento del fruto (Salunkhe y col., 1974).

La epidermis, a su vez, cuenta con una delgada cutícula altamente hidrófoba rica en lípidos, la cual, descansa sobre la pared exterior de las células epidérmicas y se fusiona con ella (Segado y col., 2015). La cutícula es la principal barrera entre la atmósfera y el fruto, además, previene la pérdida masiva de agua, regula el intercambio de gases, protege al fruto contra lesiones mecánicas e invasión de patógenos, filtra la luz UV potencialmente dañina y genera un microambiente adecuado para ciertos organismos endémicos del tomate (Segado y col., 2015).

La pared interna del pericarpio está compuesta por células grandes de paredes delgadas con numerosos espacios intercelulares, estas, en conjunto, se encargan de brindar la textura carnosa característica del tomate (Salunkhe y col., 1974). De hecho, la calidad del fruto depende en gran medida de la cantidad células en el tejido debido a que está estrechamente relacionado con su contenido de materia seca (Salunkhe y col., 1974).

En su interior, los tomates pueden tener dos o varias cavidades, llamadas lóculos, divididas por paredes radiales y dentro de estas cavidades se encuentra la placenta (Salunkhe y col., 1974). Durante el desarrollo de los tomates, la placenta prolifera llenando los lóculos de células parenquimatosas (Salunkhe y col., 1974). El parénquima aumenta hasta que encierra completamente las semillas en desarrollo en un tejido homogéneo (Salunkhe y col., 1974). Al principio, el tejido es firme y compacto, pero a medida que la fruta madura, sus paredes se vuelven más delgadas y las células colapsan parcialmente (Salunkhe y col., 1974).

Las semillas maduras son de color marrón claro y contorno ovalado, según la variedad, su tamaño puede variar de 3-5 mm de largo y 2-4 mm de ancho (Naika y

col., 2005; Salunkhe y col., 1974). Dentro de las cavidades se encuentran alrededor de 50 y 200 semillas encerradas en la períquima (OECD, 2017).

2.3 Importancia económica de la producción de tomate en México

2.3.1 Producción nacional, sistemas de cultivo y variedades

La creciente demanda del tomate alrededor del mundo ha incentivado el aumento de su producción en los últimos años (USDA, 2018). De acuerdo con datos de la FAO en el año 2018, se produjeron alrededor de 243 millones de toneladas en 176 países (FAOSTAT 2018 <http://www.fao.org/faostat/es/#data/QC>), siendo China el país con mayores volúmenes de producción (alrededor de 69 millones de toneladas) y México ocupó el noveno lugar con un total de 4.5 millones de toneladas registradas en esa organización.

A nivel nacional y de acuerdo con el Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera (SIAP, 2019), la producción de tomate en México continúa con una tendencia al alza; durante los años 2010-2019 (Figura 4), se registraron producciones desde 2 millones 277 mil toneladas hasta un máximo de producción en el año 2018 (3,780,950.01 toneladas). Desde el punto de vista de producción por estado de la república, la mayor producción de tomate se concentra en el estado de Sinaloa quien aporta del 36 al 22% de la producción nacional; no obstante, en los últimos años su participación ha mostrado una tendencia a la baja. En tanto que otros 4 o 5 estados han contribuido significativamente a la producción como San Luis Potosí, Michoacán, Jalisco y Zacatecas los cuales en conjunto con Sinaloa aportan entre 50 al 60% de la producción (SIAP, 2019).

En contraste con los aumentos de producción, la superficie sembrada de tomate se ha reducido desde 55 000 hectáreas registradas en el 2012 hasta 49 000 hectáreas en el año de 2018, sin haber una tendencia directa con la producción (Figura 5). No obstante, los rendimientos por hectárea globales se han incrementado en un 75% comparados con los datos del año 2010 (Figura 5). Esto señala cambios importantes

en el sistema de producción que permite obtener mayores volúmenes de producto por unidad de superficie sembrada.

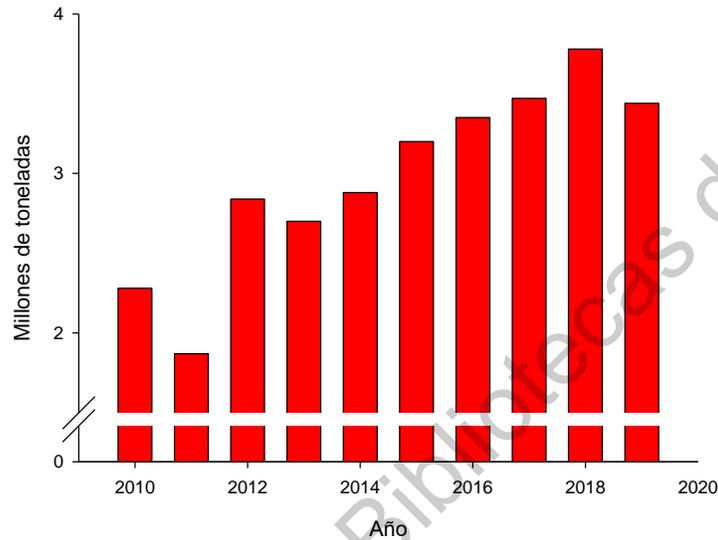


Figura 4. Cambios en la producción nacional de tomate en el periodo 2010-2019 (SIAP, 2019).

En el periodo del 2010 al 2019, la participación de la producción a cielo abierto disminuyó desde el 68% hasta el 32.4% (SIAP, 2019), mientras que la producción en sistemas protegidos se incrementó del 32.3 hasta el 67.8% (Figura 6). Dentro de la agricultura protegida, existen tres sistemas aplicados; malla sombra, invernaderos y macro túnel.

El uso de macro túnel se inició en el 2017 pero su participación en la producción es todavía marginal (1.35% en 2019). No obstante, el uso de malla sombra e invernaderos ha incrementado dentro del periodo 2010 al 2019 y su participación en la producción total también se ha visto reflejada en ese mismo periodo (8.3 al 44% en malla sombra y del 23 al 62% para invernaderos). Ambos sistemas han mejorado los rendimientos por hectárea (de 97 a 123 ton ha⁻¹ y de 121 a 184 ton ha⁻¹ en malla

sombra e invernaderos respectivamente) respecto de los obtenidos a cielo abierto (27 a 39 ton ha⁻¹); es decir, ha habido un incremento de 3 a 5 veces en los rendimientos mediante el uso de agricultura protegida.

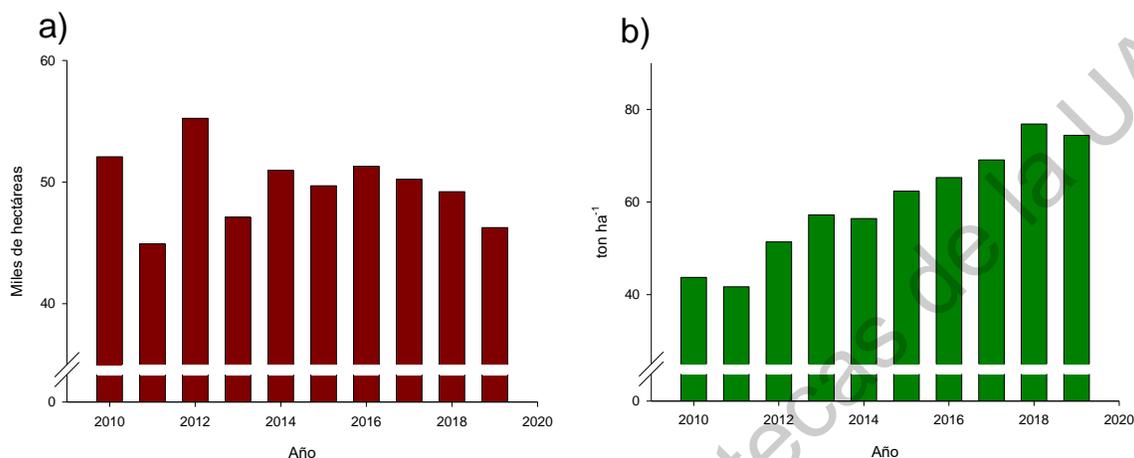


Figura 5. Cambios en el a) área sembrada y b) rendimiento del tomate en México 2010-2019 (SIAP, 2019).

Los estados del centro de la república como Querétaro y Estado de México tienen mayor número de invernaderos de producción de tomate (USDA, 2018). En el año 2019, los principales estados productores de tomate bajo invernadero fueron Puebla, San Luis Potosí, Jalisco, Querétaro y Morelos; es en estos estados donde se han instalado invernaderos de alta tecnología cuyos rendimientos superan las 400 y 700 ton ha⁻¹ de tomate gracias a un control más estricto de los factores que controlan la producción.

Se ha reportado que la agricultura protegida influye en el rendimiento de los cultivos debido al control más eficiente de los factores ambientales (temperatura, HR) así como del cultivo (nutrición, riegos, control de plagas etc.). El cultivo bajo invernadero puede aumentar la producción de tomate hasta cuatro veces más en comparación con el cultivo a cielo abierto y en malla sombra (Figura 7).

Desde el punto de vista de producción sustentable o amigable con el ambiente, la producción de tomate también debiera mostrar cambios que reflejen la respuesta del sector de producción hacia la demanda del consumidor por productos que sean

producidos por sistemas amigables con el ambiente. Por ello surgieron los sistemas de producción orgánica en contraste con los sistemas convencionales.

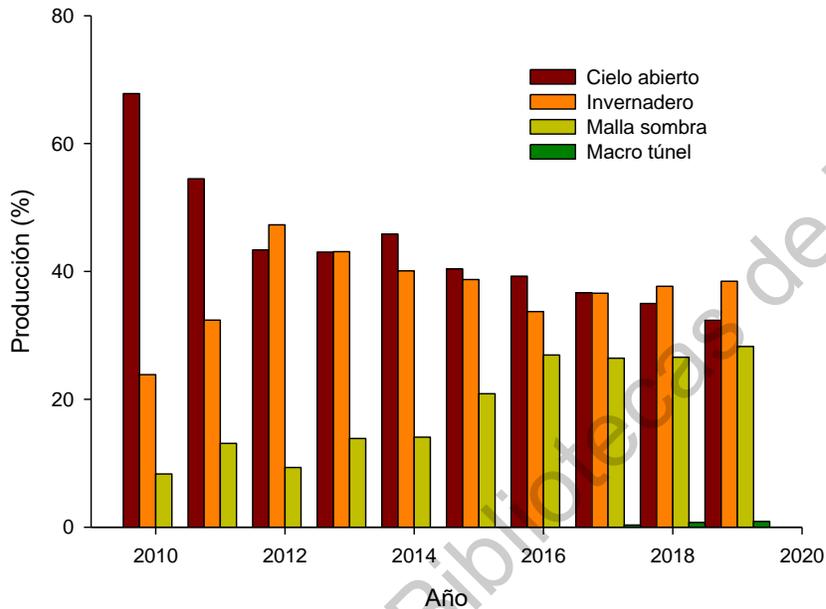


Figura 6. Producción de tomate rojo en México, por tipo de tecnología (2010-2019) (SIAP, 2019).

El sistema convencional se caracteriza por el uso intensivo de fertilizantes para satisfacer las necesidades de nutrición de la planta, así como el uso de productos químicos para el control de plagas y enfermedades; mientras que el sistema orgánico emplea fertilizantes orgánicos para satisfacer la nutrición del cultivo y el uso de extractos naturales o el control biológico para el control de plagas y enfermedades.

Aunque los volúmenes de producción orgánica se duplicaron en el periodo 2010-2019, estos no impactaron las proporciones de participación en las estadísticas de producción anual. En el periodo referido, el sistema de producción convencional dominó la producción de esta hortaliza con una participación de más del 98% (SIAP, 2019), en tanto que la producción orgánica solamente mostró una producción marginal del 1.5% y no mostró tendencias de crecimiento importantes.

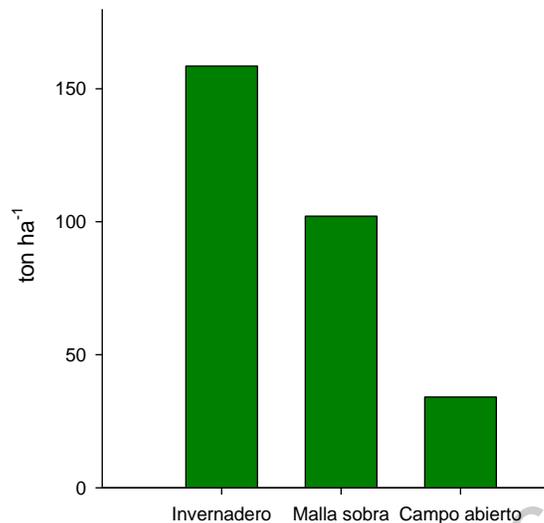


Figura 7. Rendimiento promedio del tomate rojo en México por tipo de tecnología (SIAP, 2019).

En cuanto al tipo de variedades producidas, hay una gran cantidad de ellas; no obstante, de forma general se agrupan en tres grandes grupos, las variedades redondas (tomate tipo bola), variedades alargadas (tomate saladette o roma) y tomates especiales como cherry y uva. En el periodo 2010-2019, la producción ha sido dominada por las variedades tipo saladette (48-84%) y en segundo lugar por las variedades redondas o tipo bola (8-14%). En el periodo señalado ha habido una mayor participación de los tomates tipo saladette y una disminución de los tomates redondos. Los tomates especiales aportan el resto de la producción.

2.3.2 Valor de la producción

Para el periodo 2010-2019, el valor de la producción de tomate se duplicó (SIAP, 2019) alcanzando un total de 29 874 millones de pesos en el 2019, ocupando el 3er lugar nacional en importancia económica después del aguacate (49 481 millones) y los chiles (32 761 millones). De manera global el mercado interno generó el 73% del valor de la producción y el 27% lo ocuparon las exportaciones de esta hortaliza.

En México, el tomate se encuentra en el segundo lugar de las frutas y hortalizas con mayor venta en el extranjero (SIAP, 2020). La alta venta del tomate en el extranjero ha posicionado a México como líder mundial de exportación, con una participación del 25.11% del total de exportaciones en el mercado internacional (SADER, 2019; SAGARPA, 2017). Su principal importador es Estados Unidos, al cual, se destina del 90.1% al 99.7% de las exportaciones del país, gracias a su condición geográfica tan favorable (SADER, 2019; SIAP, 2018). En el año 2017, el tomate bola fue la variedad de mayor exportación con 7-8 millones de toneladas seguido del saladette con 5-6 millones de toneladas, uva y cherry con menos de un millón de toneladas (FIRA, 2019).

Los precios del tomate rojo difieren de acuerdo con el tipo de producto, sistema de cultivo (orgánico, convencional, de invernadero o cielo abierto) y variedad (saladette, bola y cherry). La estacionalidad de la producción nacional y de las exportaciones también influyen en los precios del producto (FIRA, 2017). El sistema de producción convencional u orgánico representa un diferencial del precio por tonelada, tanto en el mercado nacional como en el de exportación. El precio por tonelada en el mercado nacional del tomate convencional varió de 5 717 a 7 802 pesos, mientras que el tomate orgánico sus precios variaron de 8 525 a 16 559 pesos.

Por otro lado, en el mercado de exportación, se registró un precio record de 21 372 pesos por tonelada en el año 2018. Estos datos en su conjunto parecen mostrar que el impulso de la producción orgánica está fuertemente influido por los precios en el mercado y en mucho menor medida por la sustentabilidad del sistema utilizado. También es importante señalar que los rendimientos de la producción orgánica son menores que los obtenidos por la agricultura convencional; en sistemas de alta tecnología los rendimientos en sistemas orgánicos pueden ser de 80 a 100 ton ha⁻¹ menores que el cultivo convencional.

Actualmente, los mejores precios de venta en cuanto a frutas y hortalizas se refieren, son las producidas en la agricultura orgánica (PROFECO, 2018; SAGARPA, 2005). El tomate rojo se encuentra entre los productos que destacan en la producción

orgánica en México (CEDRSSA, 2015). El precio del tomate orgánico puede ser hasta 5.83 veces mayor que el del tomate convencional (SAGARPA, 2005).

El cultivo de tomate orgánico ha ganado auge en el mercado debido a que los consumidores lo asocian con un alimento más saludable y nutritivo (PROFECO, 2018). Además, es una alternativa sostenible para evitar daño al medio ambiente (IFOAM, 2005)

En los últimos 6 años se ha triplicado la producción de tomates orgánicos en México, pasando de 11 954 toneladas en el 2013 a 44 778 en el 2018 (SIAP, 2019). Siendo el tomate saladette el más producido, seguido del cherry y bola (SIAP, 2019).

A pesar del rápido aumento en la producción del tomate orgánico, la producción sigue siendo baja en comparación a la producción convencional. Este comportamiento se asocia principalmente al gasto de inversión que la agricultura orgánica representa, no obstante, el costo-beneficio es mayor (FIRA, 2019).

Aunque la SAGARPA en 2017 estableció diversas estrategias para generar e implementar tecnología de producción de la agricultura protegida y el manejo orgánico además de un mejor manejo poscosecha; es necesario esperar a que estas propicien el consumo de productos orgánicos con precios comparables a la agricultura convencional lo cual, hasta este momento, no parece ser esa la tendencia de los mercados dado que el control de enfermedades y plagas en la agricultura orgánica tienen limitaciones en sus espectros de aplicación y por ello este sistema implica menores rendimientos, mayores riesgos de enfermedades y plagas y mayores costos en la producción.

2.4 Factores que definen la calidad del tomate

Los atributos de mayor importancia para determinar la calidad organoléptica del tomate son la textura, color y sabor (Quinet y col., 2019).

La textura de un alimento incluye las propiedades estructurales y mecánicas y su percepción sensorial en mano o boca (Abbott, 2004; Batu, 2015). La textura de las

frutas y hortalizas se debe a la resistencia y elasticidad de la pared celular, disposición y densidad celular, unión de célula a célula y turgencia (Abbott, 2004). En el tomate, un fruto firme es preferible que uno blando o suave debido a que comercialmente la baja firmeza del fruto está relacionada con alta susceptibilidad al daño físico durante la cosecha y almacenamiento (Abera, 2013; Cantwell y col., 2010). También, el consumidor asocia la textura suave del tomate con un fruto sobre madurado y vida de anaquel limitada (Abbott, 2004). En el cuadro 6 se muestra la textura óptima para el tomate, aunque puede variar de acuerdo con el método empleado.

Al igual que la firmeza, el color del tomate depende del estado de madurez del fruto. El aumento de color rojo está relacionado con el incremento del contenido total de sólidos solubles y, por tanto, mejor sabor de este (Abera, 2013), por lo que es utilizado como un indicador para evaluar la calidad sensorial del fruto.

De acuerdo a la United Fresh Fruit and Vegetables Association y la USDA, el tomate se clasifica en seis estados de madurez de acuerdo con su color (Figura 8), siendo el estado “Red” o rojo el óptimo para su consumo y el “Breaker” o inicio de color el óptimo para su cosecha, este último, es el estado de madurez más común, pero puede variar dependiendo del mercado al que será dirigido (Cantwell, 2010; Verheul y col., 2015).

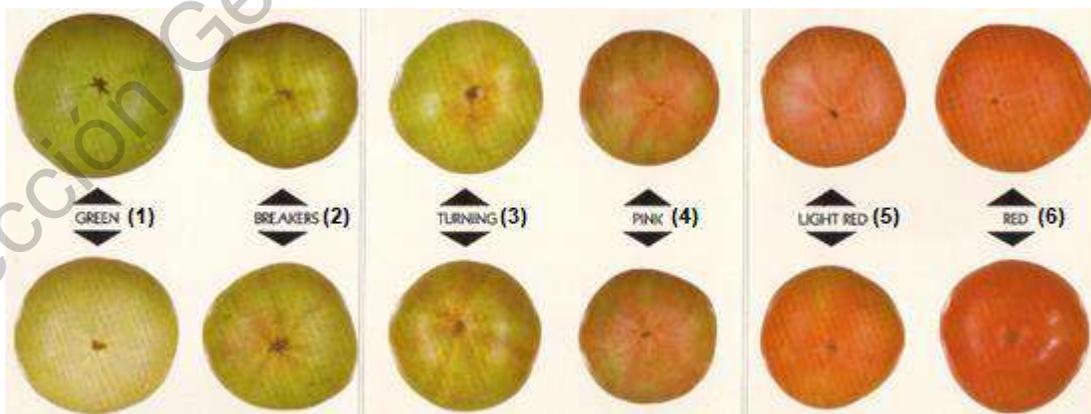


Figura 8. Estados de madurez del tomate (USDA, 1975).

La descripción detallada de cada estado de madurez se muestra en el Cuadro 5. Estas plantillas visuales se utilizan para evaluar cualitativamente la madurez del tomate, sin embargo, también puede medirse cuantitativamente a partir del valor del ángulo de matiz o valor hue°. El valor del ángulo de matiz y croma del tomate maduro (estado de madurez 6) es 45.60° y 34.80 aproximadamente (Batu, 2004; Cantwell, 2010; Perkins y col., 2007) (Cuadro 6).

El sabor del tomate está determinado principalmente por el contenido de azúcares y ácidos orgánicos (Abera, 2013; Verheul y col., 2015). El sabor ácido en el tomate se atribuye al ácido cítrico y málico, que constituyen el 90% de la reserva total de los ácidos orgánicos en los frutos (Quinet y col., 2019). Por otro lado, la dulzura del tomate depende de los niveles de azúcares, principalmente glucosa y sacarosa (Tigist y col., 2013). De acuerdo con la literatura el contenido óptimo de °Brix oscila entre 4 y 6% (Tigist y col., 2013).

Cuadro 5. Descripción de las características visuales de los estados de madurez del tomate (Batu, 2004; Cantwell, 2010).

Estado de madurez	Descripción
1 (Verde)	La superficie del tomate es completamente verde.
2 (Inicio de color)	Hay un cambio de color de verde a amarillo, rosa o rojo del 10% o menos de la superficie del tomate.
3 (Pinto)	El color amarillo, rosa o rojo se muestra en más del 10% pero no más del 30% de la superficie del tomate.
4 (Rosa)	El color rosa o rojo se muestra en más del 30% pero no más del 90% de la superficie del tomate.
5 (Rojo claro)	El color rojo rosa o rojo se muestra en más del 60%, pero el color rojo no cubre más del 90% de la superficie del tomate.
6 (Rojo)	Rojo significa que más del 90% de la superficie del tomate, en conjunto, es rojo.

En cuanto a los ácidos orgánicos el porcentaje óptimo puede variar entre 0.28 y 0.45% (Cantwell y col., 2010) lo que provoca que el pH se encuentre entre 4.05 y 4.65 (Cuadro 6) (Abera, 2013; Ağçam y col., 2018).

El índice de sabor de los frutos se evalúa de acuerdo con la relación que existe entre su contenido de sólidos solubles totales y ácidos orgánicos (Beckles, 2012). Para el tomate, la relación ideal es de 12.5 para producir un sabor agradable al consumidor (Cuadro 6) (Beckles, 2012).

Cuadro 6. Valores óptimos de calidad del tomate en estado de madurez 6 (completamente maduro o rojo firme).

Parámetro	Valor
AT (%)	0.28 - 0.45
pH	4.05 - 4.65
°Bx	4 - 6
Firmeza* (N)	12.2-15.2
Índice de sabor (°Bx/Ac)	12.5
*a/*b	0.6-0.95
Ángulo de matiz (°)	45.60
Croma	34.80

*Fuerza necesaria para comprimir el fruto 5 mm (Puede variar de acuerdo con el método empleado)

2.5 Composición química y nutricional del tomate

El tomate está compuesto en su mayoría de agua y de una pequeña proporción de materia seca (5-7%) (USDA, 2019).

La materia seca está compuesta en mayor proporción por carbohidratos, proteína y lípidos y contiene una gran cantidad de vitaminas y minerales (Waheed y col., 2020) (Cuadro 7).

Además, el tomate es ampliamente conocido por contener diferentes compuestos antioxidantes, los más importantes son los carotenoides por sus efectos benéficos en la salud humana (Salehi y col., 2019).

2.5.1 Características químicas de los carotenoides

Los carotenoides pertenecen a los isoprenoides y su estructura básica está compuesta por ocho unidades de isopreno, dando como resultado una cadena de 40 carbonos (Liu y col., 2015; Lohr, 2009). De acuerdo con su estructura química, los

carotenoides se clasifican en dos grupos: carotenos y xantófilas. Los carotenos (Ej. α -caroteno, β -caroteno y licopeno) están compuestos solo por cadenas de hidrocarburos, mientras que las xantófilas (Ej. luteína, fucoxantina, cantaxantina, zeaxantina, beta-criptoxantina, capsorrubina y astaxantina) adicionalmente contienen átomos de oxígeno en su estructura (Lohr, 2009; Rivera y col., 2020).

Cuadro 7. Composición química y nutrimental del tomate (USDA, 2019).

Componente	Contenido por cada 100 g de fruto
Agua	94.52 g
Proteína	0.88 g
Grasas	0.2 g
Cenizas	0.5 g
Carbohidratos	3.89 g
Fibra dietaria	1.2 g
Azúcares	2.63 g
Fructosa	1.37 g
Glucosa	1.27 g
Calcio	10 mg
Hierro	0.27 mg
Magnesio	11 mg
Fósforo	24 mg
Sodio	5 mg
Zinc	0.17 mg
Cobre	0.059 mg
Manganeso	0.114 mg
Vitamina C	13.7 mg
β -caroteno	449 μ g
α -caroteno	101 μ g
Licopeno	2573 μ g

Una de las principales funciones de los carotenoides es actuar como antioxidantes y su capacidad antioxidante depende del número de dobles enlaces conjugados que presenta en su estructura (Rivera y col., 2020). El licopeno o ψ -caroteno es conocido como el carotenoide con mayor capacidad antioxidante ya que en su estructura, 11 de sus 13 enlaces dobles carbono-carbono, son conjugados (Rivera y col., 2020).

La acumulación de carotenoides es de gran importancia en las propiedades visuales y funcionales en frutas y hortalizas (Liu y col., 2015). En tomate, los carotenoides se sintetizan en hojas, flores y frutos (Martí y col., 2016). En frutos de tomate maduros, el licopeno es el principal carotenoide ya que representa aproximadamente el 84% del contenido total de carotenoides y es el principal responsable de conferir la coloración roja al tomate (El Mashad y col., 2019; Martí y col., 2016). El licopeno se encuentra distribuido en todo el fruto, pero la mayor concentración se encuentra en el pericarpio (El Mashad y col., 2019; Quinet y col., 2019). La concentración de licopeno puede variar según la variedad, etapa de madurez y condiciones ambientales (El Mashad y col., 2019). Otros carotenoides como fitoeno, neurosporeno, fitoflueno, β -caroteno y luteína, también se encuentran en el tomate, pero en menor proporción (Cuadro 8).

Los carotenoides participan en distintos procesos fisiológicos, como el crecimiento, desarrollo y respuestas de la planta a estímulos ambientales (Liu y col., 2015). En tejidos no verdes, los carotenoides confieren colores distintivos a plástidos especializados conocidos como cromoplastos (Liu y col., 2015). Funcionalmente, los carotenoides aumentan la cosecha de luz y participan en la fotosíntesis, así como también atraen polinizadores a las flores y dispersores de semillas de los frutos (Liu y col., 2015).

Cuadro 8. Composición típica de carotenoides en el tomate fresco (Martí y col., 2016).

Carotenoide	Concentración (mg 100g⁻¹)
Licopeno	7.8-18.1
Fitoeno	1.0-2.9
Fitoflueno	0.2-1.6
β -caroteno	0.1-1.2
γ -caroteno	0.05-0.3
δ -caroteno	0-0.2
Luteína	0.09
Neurosporeno	0-0.03
α -caroteno	0.002

2.6 Metabolismo del tomate en el almacenamiento

Con la finalidad de aumentar la vida de anaquel del tomate, este fruto se cosecha en estado de madurez dos (Figura 7) y llega al estado seis durante el almacenamiento. Durante la maduración del tomate se activan vías metabólicas que influyen en la producción de metabolitos primarios y secundarios, como azúcares, ácidos orgánicos, y compuestos antioxidantes (Quinet y col., 2019). Al mismo tiempo, se promueve el ablandamiento y degradación de los tejidos para facilitar su consumo y permitir la liberación de semillas (Quinet y col., 2019). En la Figura 9 se muestra de manera resumida los cambios metabólicos del tomate durante su almacenamiento, así como los componentes que participan en ellos.

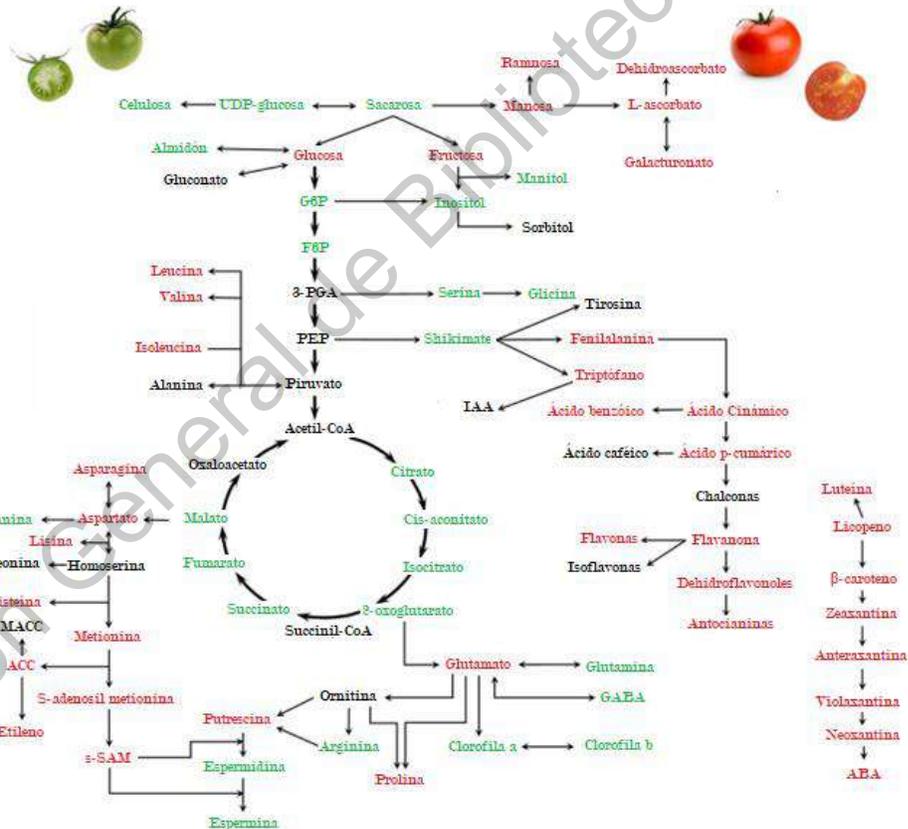


Figura 9. Resumen de los cambios metabólicos que ocurren durante la maduración del fruto de tomate. Desde la fruta verde en expansión hasta la fruta roja madura.

(Los nombres de los metabolitos en rojo, verde y negro indican aumento, disminución o ningún cambio, respectivamente) (Quinet y col., 2019).

2.6.1 Metabolismo primario

El metabolismo primario abarca reacciones y vías metabólicas vitales para el crecimiento y desarrollo de un organismo vivo (Li, 2012; Pott y col., 2019). En estos procesos fisiológicos, ocurren diferentes reacciones de diversos compuestos de reserva, como azúcares, ácidos orgánicos, aminoácidos y ácidos grasos para generar energía (ATP) y componentes de la estructura y funcionalidad de los organismos (Li, 2012; Pott y col., 2019; Quinet y col., 2019). Una vez agotados los compuestos de reserva, se inicia un proceso de senescencia que conduce a la muerte y putrefacción del tomate (Li, 2012).

Algunas de las rutas que participan en el metabolismo primario son glucólisis, ciclo de Krebs, cadena de transporte de electrones, ruta de las pentosas y vía de shikimato, entre otras (Pott y col., 2019; Quinet y col., 2019). El metabolismo primario tiene gran influencia en la vida de anaquel y en la calidad organoléptica del tomate (Por ejemplo el sabor), ya que de éste depende el contenido de azúcares y ácidos orgánicos en el fruto (Li y col., 2018).

2.6.1.1 Metabolismo de carbohidratos

En el tomate los azúcares proporcionan dulzor y son importantes para la generación de turgencia en el fruto y promover la expansión celular (Quinet y col., 2019). También, actúan como moléculas señalizadoras que controlan el desarrollo y el metabolismo del fruto (Quinet y col., 2019). Dentro de los carbohidratos contenidos en el tomate se encuentra el almidón, pectina, sacarosa, fructosa y glucosa. A lo largo de la maduración la concentración de glucosa y fructosa aumentan mientras que la concentración de almidón y sacarosa se mantienen bajas (Bastías y col., 2011; Quinet y col., 2019).

El almidón es uno de los principales carbohidratos de reserva y es la fuente más importante para la obtención de hexosas-fosfato, sustrato principal de la respiración del tomate (Quinet y col., 2019). Durante la maduración, el almidón es metabolizado hasta moléculas de sacarosa, a partir de la cual, con ayuda de enzimas invertasas

se genera fructosa y glucosa. En la glucólisis, la glucosa se convierte en 2 moléculas de piruvato las cuales son metabolizadas en el ciclo de Krebs, produciendo ATP, dióxido de carbono y agua como producto final (Li, 2012).

También durante la maduración, la pared celular compuesta por protopectinas se solubilizan como consecuencia de la activación de las enzimas poligalacturonasa y pectinmetilesterasa que despolimerizan y desesterifican las pectinas ramificadas generando ablandamiento en el fruto (Li, 2012; Quinet y col., 2019).

2.6.1.2 Metabolismo de ácidos orgánicos

La fase de división celular del tomate hasta el inicio de la maduración se caracteriza por tasas muy altas de acumulación de ácidos orgánicos y durante la maduración la concentración disminuye (Famiani y col., 2015). Alto nivel de ácidos orgánicos contribuye a disminuir el potencial del agua celular permitiendo la absorción de agua durante el crecimiento del fruto (Quinet y col., 2019).

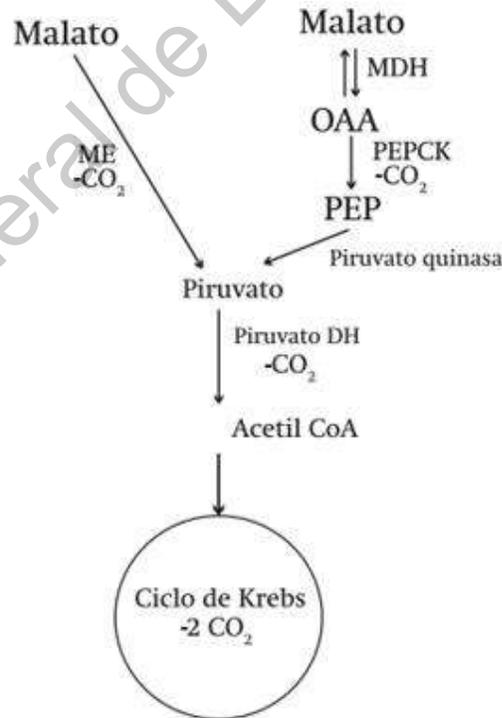


Figura 10. Metabolismo del ácido málico durante la respiración. Acetil CoA = acetilcoenzima A, MDH = malato deshidrogenasa, ME = enzima málica, OAA =

oxalacetato, PEP = fosfoenolpiruvato, PEPCK = fosfoenolpiruvato carboxiquinasa piruvato y DH = piruvato deshidrogenasa (Famiani y col., 2015).

En la maduración del tomate la acumulación de ácidos orgánicos disminuye debido a que son liberados de las vacuolas para ser utilizados como sustrato de manera directa o indirecta en la respiración, ya que los aniones de estos ácidos son intermediarios directos del ciclo de Krebs, o bien, el malato puede integrarse indirectamente al transformarse en piruvato a través de la enzima málica o la malato deshidrogenasa (Figuras 10 y 11) (Famiani y col., 2015).

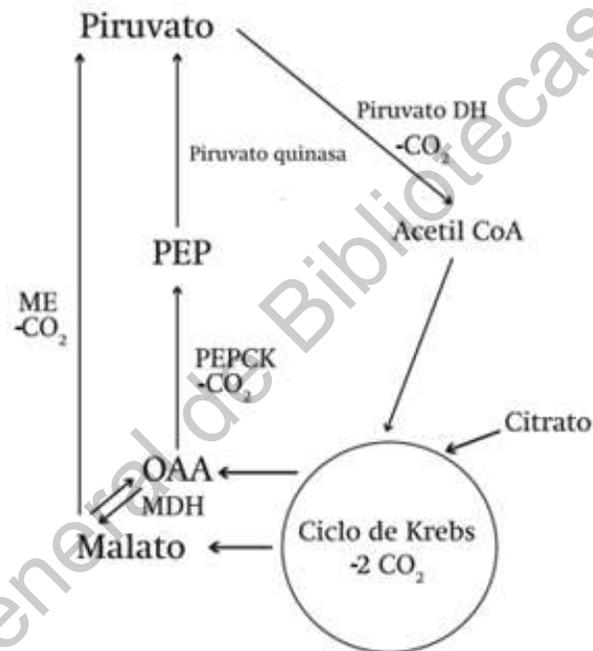


Figura 11. Metabolismo del citrato en la respiración. Acetil-CoA = acetil-coenzima A, MDH = malato deshidrogenasa, ME = enzima málica, OAA = oxalacetato, PEP = fosfoenolpiruvato, PEPCK fosfoenolpiruvato carboxiquinasa piruvato y DH = piruvato deshidrogenasa (Famiani y col., 2015).

Malato y citrato también pueden ser desasimilados por la enzima fosfoenolpiruvato carboxiquinasa en la gluconeogénesis para obtener azúcares (Figura 12) (Brizzolaro y col., 2020; Famiani y col., 2015; Quinet y col., 2019).

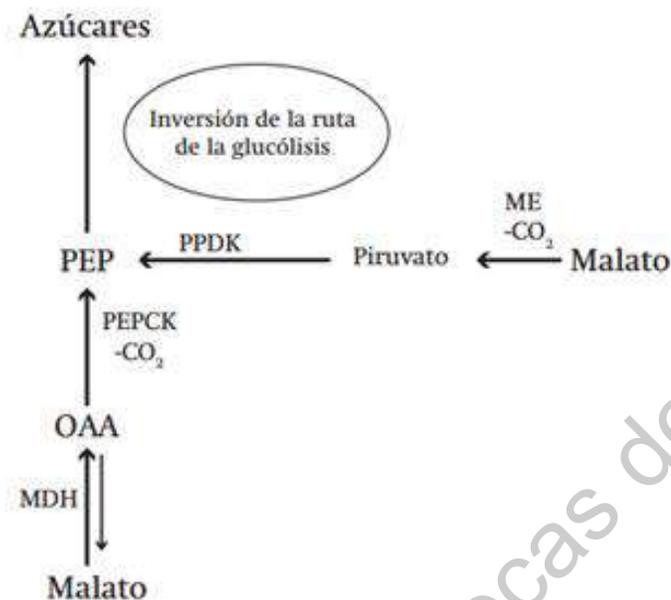


Figura 12. Esquema simplificado mostrando la gluconeogénesis a partir de malato.

MDH = malato deshidrogenasa, OAA = oxalacetato, PEP = fosfoenolpiruvato y PEPCK = fosfoenolpiruvato carboxiquinasa (Famiani y col., 2015).

2.6.2 Metabolismo secundario

Mientras que la síntesis de metabolitos primarios se lleva a cabo a inicios y durante el crecimiento y desarrollo del tomate, los metabolitos secundarios son sintetizados durante el desarrollo y también al final o cerca de la fase estacionaria de crecimiento (Pott y col., 2020). La síntesis de metabolitos secundarios tiene como principal objetivo aumentar el atractivo de los frutos (aroma y pigmentación) para los dispersores de semillas (Pott y col., 2020; Quinet y col., 2019). También algunos metabolitos ayudan a proteger al fruto del estrés biótico y abiótico así como de microorganismos patógenos y radiación UV-B (Mitchell y col., 2007; Pott y col., 2020; Quinet y col., 2019).

El inicio y la progresión de la maduración del tomate generalmente se asocia con cambios en el color rojo de la piel y pulpa del tomate, lo que refleja la acumulación de pigmentos especialmente carotenoides (Quinet y col., 2019). Durante la

maduración, la concentración de carotenoides, en particular de licopeno, puede aumentar entre 10 y 14 veces su contenido inicial (Quinet y col., 2019).

El licopeno es un polímero de 5 moléculas de isopreno (hidrocarburo de cinco átomos de carbono) (Liu y col., 2015; Zuo y col., 2018). La síntesis del isopreno se lleva a cabo a través de la vía mevalonato (MVA) y después entra como precursor a la síntesis de carotenoides donde se tiene como producto el licopeno (Liu y col., 2015; Zuo y col., 2018). El licopeno, a su vez, puede ciclarse en uno o ambos extremos por las enzimas b-ciclasa y e-ciclasa para formar β -caroteno y α -caroteno (Figura 13) (Quinet y col., 2019).

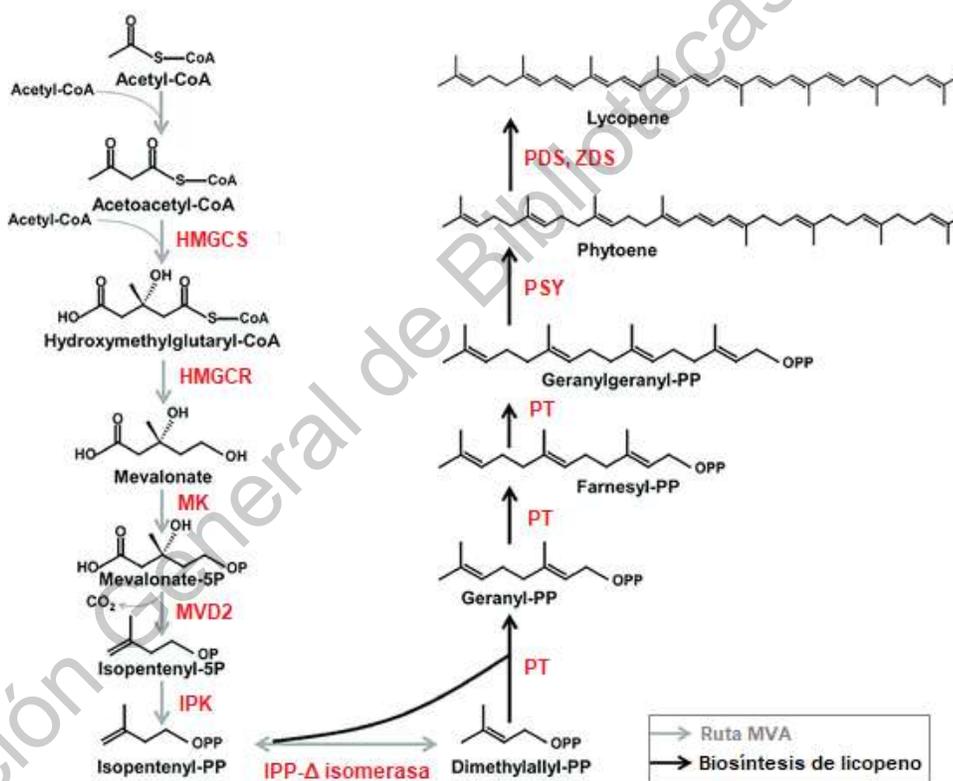


Figura 13. Síntesis del licopeno. HMGCS = Hidroximetilglutaril-CoA sintasa, HMGCR = Hidroximetilglutaril-CoA reductasa, MK = Mevalonato quinasa, IPP- Δ isomerasa = Isopentenil-difosfato delta-isomerasa, MVD2 = Difosfomevalonato descarboxilasa, PT = Preniltransferas, PSY = Fitoeno sintasa, PDS, ZDS = Fitoeno desaturasa y caroteno desaturasa, IPK = Isopentenil fosfato quinasa (Liu y col., 2015; Zuo y col., 2018).

2.6.3 Sistema antioxidante

La maduración o senescencia de los frutos es un fenómeno oxidativo que requiere la eliminación de ROS (especies reactivas de oxígeno) y H_2O_2 por lo que debe haber un equilibrio entre la producción de ROS y su eliminación por los sistemas antioxidantes para disminuir la tasa de senescencia del fruto (Zushi y col., 2012).

Los frutos cuentan con sistemas antioxidantes enzimáticos y no enzimáticos que protegen a las células del estrés oxidativo inducido por la captación de ROS, ambos sistemas actúan sinérgicamente formando una red de antioxidantes (Zushi y col., 2012).

El sistema no enzimático consiste en la síntesis de compuestos con características antioxidantes capaces de reaccionar con los ROS. En el tomate este sistema está compuesto por compuestos fenólicos, flavonoides, carotenoides, el L-ascorbato una forma reducida de vitamina C y el glutatión (Atkinson y col., 2011; Quinet y col., 2019; Zushi y col., 2012).

El sistema enzimático, por otra parte, está compuesto, por la enzima superóxido dismutasa (SOD) que cataliza la reacción de dismutación de $O_2^{\cdot-}$ a H_2O_2 , que, a su vez, es eliminado mediante las enzimas catalasa (CAT) y ascorbato peroxidasa (APX) para evitar la conversión de H_2O_2 en radicales hidroxilo a través de la reacción de Haber-Weiss (Zushi y col., 2012). La enzima APX utiliza dos moléculas de L-ascorbato para reducir el H_2O_2 en agua (Ceron y col., 2012; Zushi y col., 2012).

En los tomates, además del proceso de maduración, el estrés biótico y abiótico al que está expuesto el fruto también causa la síntesis de estas moléculas altamente reactivas (Krishna y col., 2019; Quinet y col., 2019). Algunos ejemplos de estrés abiótico es la salinidad, estrés hídrico, alta temperatura y déficit de nutrientes en los cultivos (Krishna y col., 2019; Quinet y col., 2019). En algunas ocasiones, la producción de ROS es tal, que puede desencadenar estrés oxidativo en el fruto (Zhang y col., 2017).

El estrés oxidativo se define como una alteración en el equilibrio prooxidante/antioxidante a favor de los prooxidantes, que conduce a un daño potencial (Zhang y col., 2017). En los frutos, el exceso de ROS daña la membrana celular ya que pueden reaccionar con los ácidos grasos insaturados, así como el ADN y enzimas importantes para el metabolismo de la célula lo que eventualmente conduce a su muerte (Atkinson y col., 2011; Quinet y col., 2019; Zhang y col., 2017; Zushi y col., 2012). La figura 14, muestra las funciones del sistema de enzimas antioxidantes y los compuestos antioxidantes.

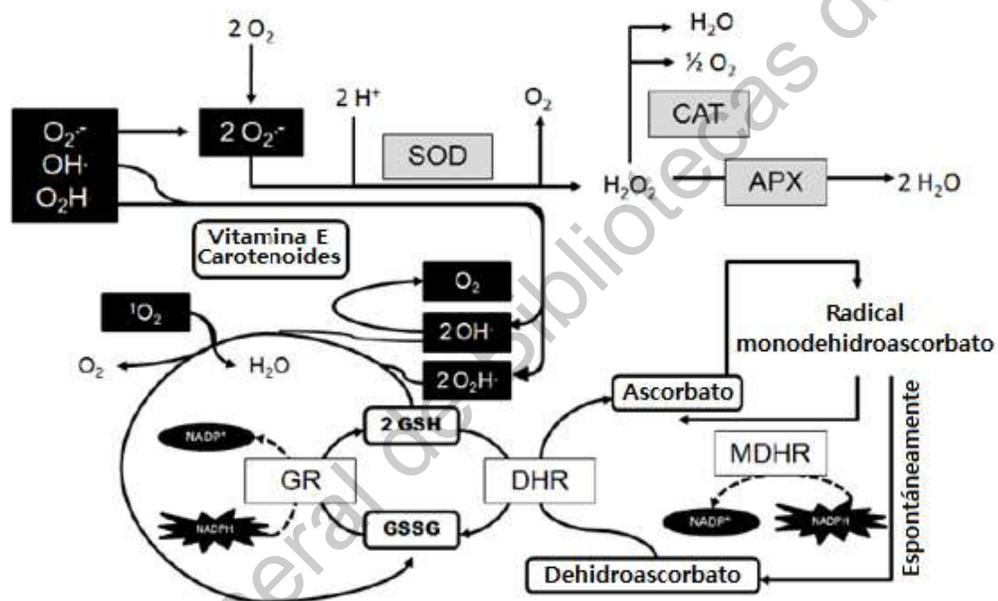


Figura 14. Mecanismo de acción del sistema antioxidante enzimático y no enzimático en las plantas. SOD= superóxido dismutasa, CAT= catalasa y APX= ascorbato peroxidasa, GSH= glutatió oxidado, GSSG= glutatió reducido, MDHR= monodehidroascorbato reductasa, DHR= la deshidroascorbato reductasa, GR= glutatió reductasa (Ceron y col., 2012).

2.7 Vida de anaquel del tomate

La vida de anaquel es el periodo de tiempo en el cual las características físicas y químicas de un alimento permanecen inalteradas y conservan una calidad aceptable para la venta al consumidor (Moschopoulou y col., 2019).

Hay diversos factores que determinan la vida de anaquel de un alimento, estos factores se clasifican en dos grupos, intrínsecos y extrínsecos (Moschopoulou y col., 2019). Los factores intrínsecos son aquellos relacionados con las características del alimento como composición, actividad de agua, pH, microorganismos, enzimas y potencial óxido reducción (Moschopoulou y col., 2019). Por otro lado, los factores extrínsecos están relacionados con el entorno como las condiciones de almacenamiento, empaque y transporte del alimento. En general, la actividad de agua, pH y temperatura son los factores que más influyen en la velocidad de deterioro microbiológico y enzimático en los alimentos (Moschopoulou y col., 2019).

Los tomates son tejidos vivos que muestran una respuesta fisiológica a las condiciones de manejo pre- y poscosecha (Eskin y Robinson, 2001). Cuando son separados de la planta, se privan del suministro de agua, nutrientes y hormonas anti senescencia (Sousa y Mahajan., 2011). Sin embargo, los procesos biológicos como respiración, transpiración y transformaciones bioquímicas continúan (Eskin y Robinson, 2001; Sousa y Mahajan, 2011).

La transpiración provoca una constante pérdida de peso por la pérdida de humedad, mientras que la respiración conduce a la maduración natural, senescencia y posterior deterioro del fruto (Ashenafi y col., 2018; Sousa y Mahajan., 2011). En el caso de frutos climatéricos como el tomate, durante el almacenamiento ocurre un aumento de respiración o pico respiratorio que indica el inicio de la senescencia (Ashenafi y col., 2018; Sousa y Mahajan, 2011) (Figura 15).

No obstante, la velocidad en la que ocurren los procesos biológicos poscosecha del tomate puede disminuir manipulando factores como temperatura, la humedad relativa (HR) y la composición de la atmósfera durante su almacenamiento (Eskin y Robinson, 2001; Sousa y Mahajan, 2011). Las bajas temperatura ralentizan los procesos metabólicos, como respiración y transpiración, y retardan crecimiento de patógenos, mientras que humedades relativas adecuadas disminuyen considerablemente la pérdida de peso en el fruto (Sousa y Mahajan, 2011).

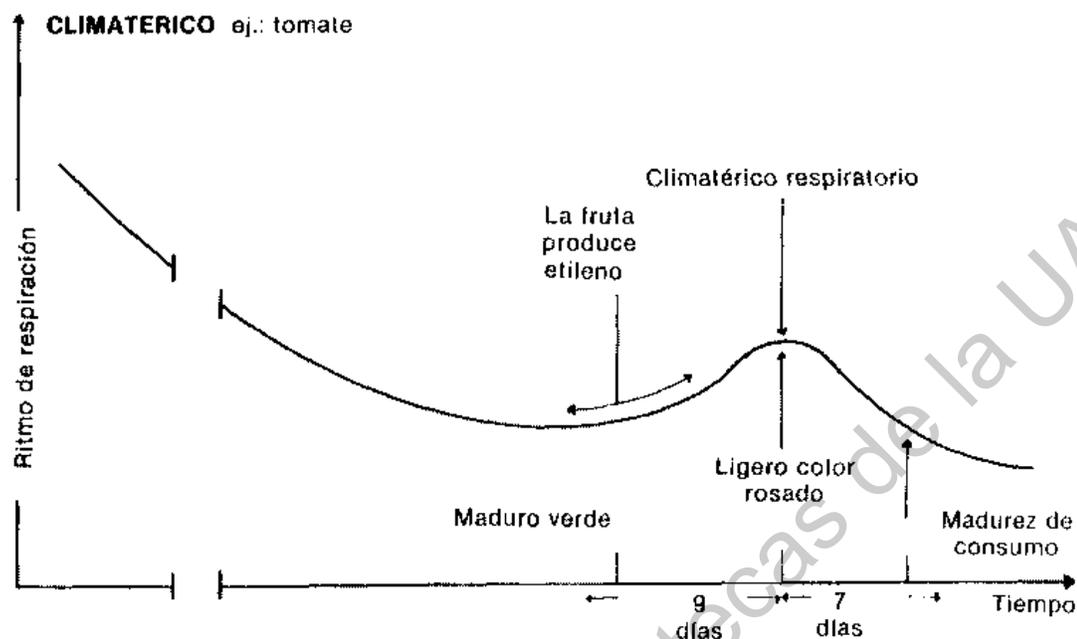


Figura 15. Patrón de respiración del tomate (FAO, 1987).

Las condiciones ambientales óptimas para el almacenamiento del tomate son: temperatura de 10 a 12°C y humedad relativa de 85 a 95%. Temperaturas por debajo de 10°C por más de 24 horas pueden generar daño por frío además de pérdida de color, textura, aroma y sabor (Salunkhe y Kadam, 1998). En el tomate, el daño por frío se manifiesta como incapacidad para desarrollar completamente el color y sabor, provoca depresiones en la superficie e incremento de pudriciones (Salunkhe y Kadam, 1998). Por otro lado, temperaturas superiores a 25°C da como resultado frutos blandos y disminuye su intensidad de color, ya que las altas temperaturas inhiben la producción de etileno, que es necesario para sintetizar licopeno (Cantwell, 2010). Respecto a la humedad relativa, valores por arriba del 95% puede generar crecimiento de hongos y por debajo de 85% se acelera la pérdida de peso del fruto (Salunkhe y Kadam, 1998). En general, los tomates, a temperatura y humedad relativa óptima, tienen vida de anaquel de 2 a 4 semanas (Sinha y col., 2011).

2.8 Efecto del sistema de cultivo en la vida de anaquel del tomate

El efecto del sistema de cultivo en invernadero sobre la vida de anaquel del tomate no se ha evaluado sistemáticamente. Hay una gran variedad de estudios del efecto del sistema de cultivo en la calidad nutricional y sensorial del tomate (Chassy y col., 2006; Dumas y col., 2003; Hallmann y col., 2007; Hallmann y col., 2012; Migliori y col., 2012; Mitchell y col., 2007; Oliveira y col., 2013; Uçurum y col., 2018; Vinha y col., 2014). Sin embargo, los resultados no son contundentes.

Vinha y col. (2014) reportaron que el tomate orgánico (cv. Redondo) tiene mayor contenido de vitamina C (+30%), sólidos solubles totales (+18%), fenoles totales (+24%), flavonoides (+21%), licopeno (+20%) y actividad antioxidante (+6%). Además, realizaron una evaluación sensorial donde el tomate orgánico fue el preferido por los panelistas por sus propiedades gustativas de sabor y textura. Por otro lado, Uçurum y col. (2019) encontraron que los tomates convencionales cv. Rio Grande presentaron mayor contenido de licopeno (+9%), sólidos solubles totales (+9%), acidez titulable (+18%) y vitamina C (+11%). Chassy y col. (2006) reportaron que los tomates orgánicos cv. Roproco y Burbank tienen un mayor contenido de sólidos solubles totales +9 y +18%, respectivamente y vitamina C +14 y +26%, respectivamente que los convencionales.

También se ha indicado que la variedad es un factor que influye la respuesta al sistema de cultivo. Hallmann (2012) encontró que los tomates orgánicos (estándar y cherry) presentaron mayor contenido de azúcares y flavonoides totales, los convencionales mayor acidez y el contenido de licopeno, azúcares reductores, polifenoles y ácidos fenólicos permanecieron similares entre sistemas de cultivo por otra parte, el contenido de vitamina C y β -caroteno dependió de la variedad. En otro estudio realizado por Hallmann y col. (2007) encontraron resultados similares donde se evaluaron 4 variedades de tomate (cv Rumba, Kmicic, Gigant y Koralik). Observaron que los tomates orgánicos tuvieron mayor contenido de azúcares reductores, ácidos fenólicos y β - caroteno mientras que el contenido de vitamina C, licopeno, flavonoides y acidez titulable dependió de la variedad del fruto. También Migliori y col. (2012) evaluaron el efecto del sistema de cultivo en tomates cv. Giulianova y Perbruzzo y encontraron que los tomates cv. Giulianova de ambos

sistemas de cultivo presentaron la misma cantidad de licopeno, mientras que en los tomates cv. Perbruzzo, el tomate orgánico presentó mayor contenido de licopeno (+26.42%) que el convencional.

En base a los antecedentes mencionados, es necesario que se evalúen los cambios de calidad y vida poscosecha a 12°C de tomates de racimo producidos bajo el sistema convencional y orgánico. Por ello el presente trabajo de tesis pretende aportar información que contribuya a mejorar el sistema de manejo de estos frutos.

Dirección General de Bibliotecas de la UJAQ

3. OBJETIVO

3.1 General

Establecer la vida de anaquel del tomate *Solanum lycopersicum* cv. "Merlice". cultivado en invernadero en sistema de cultivo convencional y orgánico.

3.2 Específicos

- Determinar las características físicas generales que afectan la calidad del tomate *Solanum lycopersicum* cv. "Merlice" producidos bajo sistema orgánico y convencional.
- Evaluar los cambios fisiológicos poscosecha del tomate *Solanum lycopersicum* cv. "Merlice" procedentes de ambos sistemas de cultivo.
- Evaluar los cambios de calidad físicoquímica y texturales a lo largo del almacenamiento del tomate *Solanum lycopersicum* cv. "Merlice" de ambos sistemas de cultivo.
- Evaluar el estatus del sistema antioxidante durante el almacenamiento a 12°C y sus transferencias a 20°C en tomates orgánicos y convencionales

4. METODOLOGÍA

4.1 Materiales

Los tomates (*Solanum lycopersicum* cv. "Merlice") orgánicos y convencionales fueron adquiridos de invernaderos de la empresa CEIKOR® en la ciudad de Querétaro, Querétaro siguiendo los procedimientos de producción que la empresa tiene establecidos para ambos tipos de cultivo. Los frutos de ambos cultivos fueron cosechados por racimos y empacados en cajas de cartón comerciales. Se realizó una selección aleatoria de las cajas empacadas y éstas fueron transportadas al Laboratorio de Fisiología y Bioquímica Poscosecha de Frutas y Hortalizas de la Universidad Autónoma de Querétaro.

4.1.1 Manejo de la fruta

Las cajas de tomates fueron almacenadas en un cuarto de enfriamiento a 12°C por 24 h previos a la experimentación para disminuir el calor de campo.

4.1.2 Estrategia experimental

La figura 16, resume de manera gráfica el plan experimental llevado a cabo para alcanzar los objetivos planteados.

Durante la experimentación, los tomates del estado de madurez 3 de ambos cultivos fueron almacenados a 12°C y H.R. de 85-90% por 16 días. Cada 4 días se realizaron muestreos, 9 tomates de cada sistema de cultivo fueron escogidos de manera aleatoria y se determinó la firmeza, color y evidencia fotográfica de los frutos. Parte de la muestra se congeló con nitrógeno líquido y se almacenó a -80°C para la determinación de acidez titulable, sólidos solubles totales, azúcares reductores, vitamina C, capacidad antioxidante y actividad de enzimas antioxidantes. Otra fracción del fruto se congeló a -80°C para la determinación de licopeno. Todas las determinaciones se realizaron por triplicado. La firmeza y el color se evaluaron en 9 frutos independientes. La tasa de respiración y pérdida de peso se evaluó diariamente en 4 frutos independientes los cuales se mantuvieron durante toda la

experimentación. Con el objeto de simular las condiciones de comercialización, en cada muestreo se trasladaron 9 frutos de cada sistema de cultivo desde la temperatura de conservación (12.5°C) a 20°C por 72 h y se evaluaron los mismos parámetros de calidad mencionados.

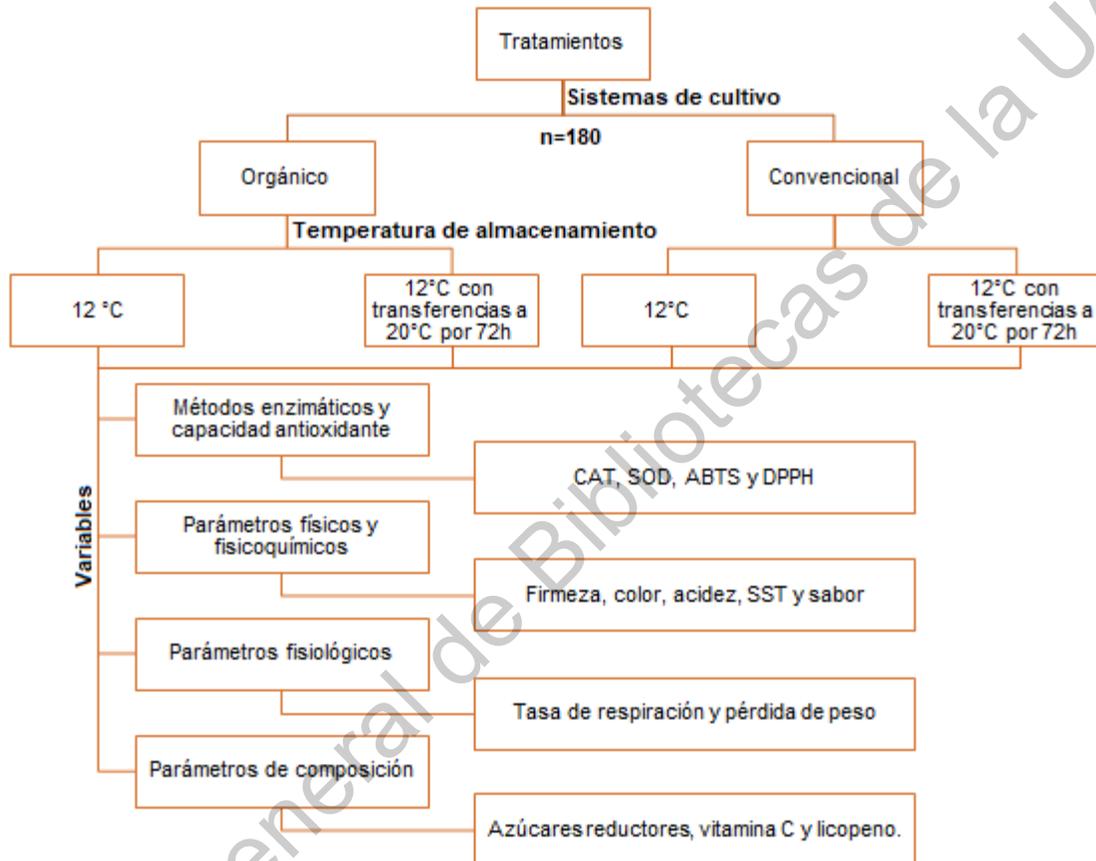


Figura 16. Esquema general de la experimentación para evaluar los cambios de calidad y vida de anaquel.

4.1.3 Análisis estadísticos de los resultados

El experimento fue un diseño bifactorial, donde el primer factor es el sistema de producción con dos niveles (orgánico e inorgánico) y el segundo factor fueron los días de almacenamiento con 6 niveles (0, 4, 8, 12, 16 y 20). Se determinaron las diferencias por medio de una prueba de ANOVA de dos vías y posteriormente se

realizó una comparación de medias por una prueba de Tukey con un nivel de significancia de 0.05 en el programa estadístico JMP 5.0.

4.2 Métodos

4.2.1 Parámetros físicos y fisicoquímicos

4.2.1.1 Densidad relativa

La densidad relativa de los frutos se evaluó en un experimento independiente. Treinta frutos (6 racimos de 5 frutos) de cada sistema de cultivo fueron evaluados individualmente. El volumen de los frutos se determinó mediante el método de desplazamiento de agua. Para fines prácticos, se utilizó como medio semillas de linaza en lugar de agua. En un recipiente de volumen conocido se colocó el fruto y después se llenó con las semillas de linaza hasta el borde. El peso de las semillas desplazadas fue registrado y mediante una curva de calibración relacionando el peso de semillas y el volumen se obtuvo el volumen del fruto. La densidad relativa se calculó con la siguiente fórmula:

$$\rho_e = \frac{w}{v}$$

Donde **w** es el peso del fruto y **v** es su volumen.

4.2.1.2 Firmeza

La firmeza se determinó de acuerdo con los métodos reportados por Huang y col. (2018), Li y Wang (2016) y Zhang y col. (2019) con algunas modificaciones. A nueve tomates de cada sistema de cultivo se les determinó la firmeza mediante una prueba de compresión utilizando un texturómetro (BROOKFIELD®, Modelo CT3 25K, Estados Unidos de América) equipado con una celda de carga de 25 kg fuerza. Se utilizó una sonda cilíndrica de acrílico de 50.8 mm de diámetro, la cual descendió a una velocidad de 1 mm s⁻¹ hasta causar 10% de deformación en el diámetro mayor de la fruta. La fuerza registrada para causar esa deformación se registró como la firmeza. Previo a la determinación, se midieron las dimensiones del tomate (diámetro

mayor y altura) con un vernier y se introdujeron en el programa del instrumento. Los resultados obtenidos fueron expresados en Newtons (N).

4.2.1.3 Color

Los parámetros CIELAB (L, a* y b*) fueron medidos a nueve frutos de cada sistema de cultivo en la zona ecuatorial con un colorímetro CM-600d (Konica Minolta, Japón) utilizando un iluminante D65 y observador a 10°; a partir de los valores a* y b* se estimó croma, ángulo de matiz e índice de color utilizando las expresiones matemáticas reportadas por McGuire (1992).

$$\text{Croma} = \sqrt{(a^2 + b^2)}$$

$$\text{Ángulo de matiz} = \arctan\left(\frac{b}{a}\right)$$

De igual manera, se evaluó el índice de color de los tomates (a*/b*), parámetro ampliamente utilizado en poscosecha para la evaluación del estado de madurez del tomate (Chassy y col., 2006; Huu y col., 2010).

4.2.1.4 Acidez titulable y sólidos solubles totales

4.2.1.4.1 Preparación

Nueve tomates de cada sistema de cultivo se dividieron en 3 grupos para formar 3 réplicas. Cada tomate aportó la misma cantidad de muestra en cada determinación. Para la determinación se pesaron 6 g de muestra (2 g de cada tomate de la réplica), en 25 ml de agua destilada, se homogenizaron a 10000 rpm durante 1 minuto en un homogeneizador ULTRA TURRAX (IKA®, Modelo T 25, Alemania). Después, la muestra se centrifugó a 10000 rpm por 10 minutos.

4.2.1.4.2 Acidez titulable

La acidez titulable se determinó con el método reportado por Majidi y col., (2012). 10 ml del extracto se tituló con una solución valorada de NaOH 0.01 N hasta obtener un pH de 8.2 (Majidi y col., 2012). El porcentaje de acidez se expresó como porcentaje

de ácido cítrico utilizando el peso equivalente del ácido cítrico. El porcentaje se calculó con la siguiente fórmula:

$$\% \text{ acidez titulable} = \frac{V * N * \text{meq}}{V \text{ muestra}}$$

Donde **V** es el volumen gastado de solución de NaOH, **N** es la normalidad de la solución de NaOH (0.01 N), **V muestra** es el volumen de muestra y **meq** son los miliequivalentes de ácido cítrico (0.064).

4.2.1.4.3 Sólidos soluble totales e índice de sabor

Los sólidos solubles totales se determinaron con un refractómetro electrónico (HANNA INSTRUMENTS ®, Modelo HI96801, Rumania). Gotas del extracto se colocaron en el refractómetro. Los resultados fueron expresados en porcentaje de sólidos solubles totales o grados Brix. El sabor se calculó con la siguiente fórmula (Beckles, 2012).

El índice de sabor se calculó con la siguiente expresión (Beckles, 2012).

$$\text{Índice de sabor} = \left(\frac{^{\circ}\text{Bx}}{\text{Ac}} \right)$$

Donde **°Bx** es el porcentaje de sólidos solubles totales del tomate y **Ac** es el porcentaje de acidez titulable obtenido del mismo fruto.

4.2.2 Parámetros fisiológicos

4.2.2.1 Tasa de respiración

La tasa de respiración se evaluó diariamente a 4 frutos independientes de cada sistema de cultivo, los cuales se mantuvieron durante toda la experimentación en cámaras selladas herméticamente y de volumen conocido. Se colocó un tomate de peso conocido, se cerró y el sistema se mantuvo a 12°C durante el tiempo requerido para obtener lecturas en el equipo de análisis. Se registraron las concentraciones de CO₂ y O₂ en el espacio de cabeza del contenedor utilizando un analizador portátil de

CO₂/O₂ (MOCON®, Modelo 325, Estados Unidos de América). La tasa de respiración fue expresada como mg CO₂ kg⁻¹ h⁻¹ utilizando la siguiente expresión.

$$TR = \left(\frac{\%CO_2}{100} \right) \left(\frac{V}{W * t} \right)$$

Donde **%CO₂** es el porcentaje de este gas determinado por el instrumento, **V** es el volumen total de la cámara sin el tomate, **W** es el peso del tomate y **t** es el tiempo en que permaneció el tomate dentro de la cámara hasta obtener las lecturas.

4.2.2.2 Pérdida de peso

Todos los tomates se pesaron al inicio del experimento, dicho valor fue registrado como el peso inicial del fruto. Cada cuatro días, nueve tomates de cada sistema de cultivo fueron tomados aleatoriamente y se pesaron nuevamente, dicho valor se registró como el peso final del fruto. El resultado se expresó como porcentaje de pérdida de peso (Javanmardi y Kubota, 2006) y se determinó mediante la siguiente fórmula:

$$\%PP = \frac{W_o - W_f}{W_o} * 100$$

Donde **W_o** es el peso inicial del tomate y **W_f** es el peso final del tomate.

4.2.3 Determinación de la composición de los frutos

4.2.3.1 Azúcares reductores

Los azúcares reductores fueron cuantificados por el método del ácido di nitro salicílico o DNS (Miller, 1959). Nueve tomates de cada sistema de cultivo se dividieron en 3 grupos para formar 3 réplicas. Cada tomate aportó la misma cantidad de muestra en cada determinación. Para la determinación se realizó un extracto etanólico con 3 g de muestra (1 g de cada tomate de la réplica) y 25 ml de etanol al 80%, después se homogenizó a 10000 rpm durante 1 minuto con el homogeneizador ULTRA TURRAX (IKA®, Modelo T 25 D, Alemania) y se centrifugó a 10000 rpm por 10 minutos. El sobrenadante obtenido se almacenó a -20°C por 24 h.

El reactivo DNS se preparó con 0.8 g de NaOH, 15 g de tartrato de Na-K, 0.5 g de reactivo DNS (ácido 3, 5-dinitrosalisílico) y se aforó a 50 ml con agua. El reactivo preparado se almacenó en un frasco ámbar a 4°C hasta su uso. Para la determinación, el extracto se diluyó 1:5 con agua destilada y en un tubo de ensayo se colocaron 0.5 ml de muestra con 0.5 ml de reactivo DNS y se colocó en baño maría a ebullición por 10 minutos. Transcurrido el tiempo, se detuvo la reacción colocando el tubo en un baño de hielo, se adicionaron 5 ml de agua destilada y se dejó reposar por 15 min. Finalmente se leyó la absorbancia a 540 nm en un espectrofotómetro UV-Vis (PerkinElmer®, Modelo Lambda 365, Estados Unidos de América). Para la cuantificación se utilizó una curva de glucosa de (0.095 - 1.9 mg ml⁻¹) con la que se calculó el contenido de azúcares en la solución y con ello se calculó el contenido de azúcares en el tejido analizado (ANEXO 4). Los resultados fueron expresados en mg por g de tejido fresco.

4.2.3.2 Contenido de Licopeno

La determinación de este compuesto se realizó utilizando el método descrito por Davis y col. (2003) con ligeras modificaciones. Nueve tomates de cada sistema de cultivo se dividieron en 3 grupos para formar 3 réplicas. Cada tomate aportó la misma cantidad de muestra para la determinación. Para la determinación, a 0.6 g de piel de tomate (0.2 g de cada tomate de la réplica) se adicionaron 5 ml de solución 1:1 de etanol al 95% y acetona con 0.05% (p/v) de butil hidroxitolueno (BHT). La mezcla se homogenizó por 1 minuto a 10000 rpm en el homogeneizador ULTRA TURRAX (IKA®, Modelo T 25, Alemania), se adicionó 10 ml de hexano y se colocó en un frasco ámbar con tapa. Posteriormente, la muestra se agitó a 180 rpm en una placa de agitación magnética durante 15 minutos en baño de hielo. Se agregaron 3 ml de agua destilada y se continuó la agitación durante 5 minutos más; la muestra se dejó reposar a temperatura ambiente durante 5 minutos para permitir la separación de fases. Se recuperó la fase orgánica, se tomó una alícuota de 1 ml y se diluyó 1:5 con hexano (Davis y col., (2003). La mezcla se leyó a 505, 453, 663 y 645 nm en un espectrofotómetro UV-Vis (PerkinElmer®, Modelo Lambda 365, Estados Unidos de América), utilizando hexano como blanco. La concentración de licopeno se expresó

en mg 100 g⁻¹ de tejido fresco y se estimó de acuerdo con la ecuación reportada por Nagata y Yamashita (1992):

$$\text{Licopeno (mg 100 ml}^{-1}\text{)} = -0.0458_{A663} + 0.204_{A645} + 0.372_{A505} - 0.0806_{A453}$$

4.2.3.3 Contenido de Vitamina C

El contenido de vitamina C se evaluó mediante HPLC con el método reportado por Melfi y col. (2018) con algunas modificaciones. Nueve tomates de cada sistema de cultivo se dividieron en 3 grupos para formar 3 réplicas. Cada tomate aportó la misma cantidad de muestra para la determinación. Para la determinación se realizó un extracto acuoso con 3 g de muestra (1 g de cada tomate de la réplica) y agua grado HPLC, se homogenizó a 10000 rpm durante 1 minuto con el homogeneizador ULTRA TURRAX (IKA®, Modelo T 25, Alemania), y se centrifugó a 10000 rpm por 10 minutos, el sobrenadante se filtró con una membrana de Nylon (13 mm, 0.22 µm). Se inyectaron 30 µl de extracto en el HPLC equipado con una columna C:18 (Waters® 4.6 x 100 mm, 3.5 µm) para la separación cromatográfica. Los solventes utilizados como fase móvil fueron agua acidificada con ácido fórmico al 0.1% (A) y acetonitrilo 100% (B) con un flujo de 0.5 ml min⁻¹.

Cuadro 9. Gradiente de elución de la fase móvil para la determinación de vitamina C por HPLC (Melfi y col., 2018).

Tiempo (min)	A	B
0	100	0
4.5	100	0
5	75	25
6	75	25
7	20	80
11	20	80
12	0	100
13	0	100
15	100	0
18	100	0

Para la elución del compuesto se utilizó un gradiente de concentración (Cuadro 9). El tiempo total de la corrida fue de 18 minutos. Para la detección de la vitamina C se utilizó un detector de arreglo de diodos ajustado a una longitud de onda de 240 nm. La identificación del compuesto se realizó comparando el tiempo de retención y su espectro de absorción con el de un estándar de ácido ascórbico. Para la cuantificación se utilizó una curva de estándar de ácido ascórbico a diferentes concentraciones (0.01 - 0.083 mg ml⁻¹) las cuales se corrieron en el equipo bajo las mismas condiciones descritas (ANEXO 7). Los resultados fueron expresados en mg de vitamina C 100 g⁻¹ de tejido fresco.

4.2.4 Cuantificación de la actividad de enzimas del sistema antioxidante

4.2.4.1 Preparación de polvos de acetona

Nueve tomates de cada sistema de cultivo se dividieron en 3 grupos para formar 3 réplicas. Cada tomate aportó la misma cantidad de muestra para la preparación de los polvos. El polvo de acetona se realizó con 39 g de muestra (13 g de cada tomate de la réplica) y 100 ml de acetona a 4°C y se homogeneizó a 10000 rpm durante 3 minutos con un homogeneizador ULTRA TURRAX (IKA®, Modelo T 25, Alemania). Se recuperó el polvo por filtración al vacío y se realizó nuevamente el mismo procedimiento hasta obtener un polvo ligeramente amarillo. El polvo obtenido se dejó secar por 24 h y se almacenó en una bolsa plástica hasta su uso.

4.2.4.2 Actividad de Catalasa (CAT)

La actividad de catalasa fue determinada por el método descrito por Blackwell y col. (1990), con algunas modificaciones. 0.05 g de polvo seco se homogeneizó con 10 ml de buffer de extracción (0.1 M Tris/HCl pH 8.5, 5 mM Ditioneitol) y se centrifugó a 4°C por 20 min a 1000 rpm, el sobrenadante se consideró el extracto enzimático. Para la determinación, se realizó una mezcla de reacción con 2.7 ml de buffer Tris/HCl pH 8.5 10 mM, 0.1 ml de peróxido de hidrógeno al 0.88% en 100 mM Tris/HCl pH 8.5 y 0.2 ml del extracto enzimático. La actividad se monitoreó por 10 min a 240 nm con un espectrofotómetro UV-Vis (PerkinElmer®, Modelo Lambda 365, Estados

Unidos de América). La actividad de la enzima se calculó con la fórmula reportada por Maksimović y Zivanović (2012). Los resultados fueron expresaron como U mg proteína⁻¹. (Una unidad de catalasa específica corresponde a la descomposición de 1 μmol de H₂O₂ por minuto por g de proteína).

$$\text{Actividad en volumen } \left(\frac{\text{U}}{\text{ml}} \right) = \frac{\Delta A V_q}{0.0436 V_s}$$

$$\text{Actividad específica } \left(\frac{\text{U}}{\text{g proteína}} \right) = \frac{\text{Actividad en volumen}}{\text{mg proteína ml}^{-1}}$$

Donde ΔA corresponde al cambio de absorbancia por minuto, V_q es el volumen total de la reacción (ml), **0.0436** es el coeficiente de extinción milimolar del H₂O₂ a 240 nm (cm² μmol⁻¹) y V_s es el volumen de muestra utilizada (ml).

4.2.4.3 Actividad de superóxido dismutasa (SOD)

La actividad de superóxido dismutasa se evaluó mediante la inhibición de la reducción fotoquímica del azul de nitrotetrazolio (NBT) (Tejacal y col., 2005). Para la obtención del extracto enzimático se pesaron 0.5 g de polvo acetónico, se adicionaron 10 ml de buffer de fosfatos 50 mM pH 7.8 y la mezcla se centrifugó a 4°C por 20 min a 10000 rpm. Previo al análisis se preparó un buffer de reacción compuesto por 27 ml de buffer de fosfato 50 mM pH 7.8, 0.1 Mm EDTA, 1.5 ml de solución de L-metionina (30 mg ml⁻¹), 1 ml de NBT (1.41 mg ml⁻¹) y 0.75 ml de solución X-100 tritón al 1%. Para la determinación, a 0.4 ml de extracto enzimático se le adicionó 0.03 ml de solución de riboflavina (4.4 mg 100 ml⁻¹) y 2.57 ml de solución amortiguadora de reacción. Después, la mezcla se expuso a luz fluorescente con una lámpara de 20 W por 15 min a temperatura ambiente y se midió la absorbancia a 560 nm en un espectrofotómetro UV-Vis (PerkinElmer®, Modelo Lambda 365, Estados Unidos de América). La actividad de la enzima se calculó con la fórmula reportada por Maksimović y Zivanović (2012). Los resultados fueron expresaron como U min⁻¹ g de proteína⁻¹. (Una unidad de actividad de enzima

súperoxido dismutasa corresponde a concentración de extracto enzimático necesario para causar una reducción del 50% en la tasa de fotoreducción del NBT).

$$\% \text{ inhibición} = \frac{\Delta K - \Delta A}{\Delta K} \times 100$$

$$\text{Actividad en volumen} \left(\frac{U}{\text{ml}} \right) = \frac{\% \text{ inhibición}}{(50\%)(0.02)}$$

$$\text{Actividad específica} \left(\frac{U}{\text{g proteína}} \right) = \frac{\text{Actividad en volumen}}{\text{mg proteína ml}^{-1}}$$

Donde ΔK es la absorbancia del control después de los 15 minutos, ΔA es la absorbancia de la muestra después de los 15 minutos, **50%** es la inhibición de la tasa de fotoreducción del NBT según la definición de unidad y **0.02** es el volumen de la muestra usada (ml).

4.2.5 Evaluación de la capacidad antioxidante

4.2.5.1 Preparación de extracto

Nueve tomates de cada sistema de cultivo se dividieron en 3 grupos para formar 3 réplicas. Cada tomate aportó la misma cantidad de muestra para la preparación del extracto. El extracto metanólico se realizó con 9 g de muestra (3 g de cada tomate de la réplica) y 15 ml de metanol al 80%, se homogenizó a 10000 rpm durante 1 minuto con el homogeneizador ULTRA TURRAX (IKA®, Modelo T 25, Alemania), y se centrifugó a 10000 rpm por 10 minutos. El sobrenadante se recuperó para realizar las determinaciones.

4.2.5.2 Determinación de la capacidad antioxidante por el método del DPPH

Una solución de DPPH 400 μM fue preparada utilizando como solvente metanol al 80% y se ajustó hasta obtener una absorbancia de 1.25 a 517 nm. Posteriormente, a 2900 μl de la solución DPPH ajustada se adicionaron 100 μl de extracto, se dejó incubar por 30 minutos y se leyó la absorbancia a 517 nm, utilizando metanol al 80%

como blanco (Bhandari y Lee, 2016). Para la cuantificación se utilizó una curva estándar de trolox ($0.133 - 0.799 \text{ mg ml}^{-1}$) (ANEXO 6). Los resultados obtenidos se reportaron como $\mu\text{mol trolox } 100 \text{ g}^{-1}$ de tejido fresco.

4.2.5.3 Determinación de la capacidad antioxidante por el método del ABTS

Para la preparación del radical $\text{ABTS}^{+\cdot}$, a 5 ml de reactivo ABTS 7 mM se añadieron 88 μl de solución de persulfato de potasio (2.47 mM) y se dejó en agitación en un frasco ámbar por 16 h. El día de la determinación, esta solución (solución del radical $\text{ABTS}^{+\cdot}$) se ajustó a una absorbancia de 0.7 a 734 nm con etanol. A 2300 μl de la solución ajustada se le adicionaron 200 μl de extracto de la muestra. Se dejó incubar por 6 minutos y se tomó lectura a una absorbancia de 734 nm. Para la cuantificación se realizó una curva de calibración con diferentes concentraciones de Trolox ($0.017 - 0.233 \mu\text{mol ml}^{-1}$) (ANEXO 5). Los resultados obtenidos se reportaron como $\mu\text{mol trolox } 100 \text{ g}^{-1}$ de tejido fresco.

5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

5.1 Parámetros físicos (densidad, peso, volumen, diámetro y altura)

El análisis de varianza (Cuadro 10) mostró que el sistema de cultivo influyó de forma significativa en la densidad, volumen y altura de los tomates, mientras que el peso y diámetro no mostraron diferencias significativas. El tomate orgánico presentó mayor altura (+11%) y mayor volumen (+11%), mientras el tomate convencional presentó mayor densidad (+14%).

Cuadro 10. Comparación de medias para el factor sistema de cultivo en diferentes variables de respuesta físicas de frutos de tomate.

Sistema de cultivo	Densidad específica (g ml ⁻¹)	Peso (g)	Volumen (ml)	Diámetro (mm)	Altura (mm)
Orgánico	0.798 ^a	177.65 ^a	222.89 ^a	68.72 ^a	63.88 ^a
Convencional	0.914 ^b	179.48 ^a	200.66 ^b	66.67 ^a	57.41 ^b
Fuente de variación	9.85 ^{**}	0.05	5.45 [*]	3.07	30.46 ^{**}

n = 30, * p < 0.01, ** p < 0.001, ns = no significativo.

De acuerdo con estos resultados, el tomate orgánico presentó menor densidad que se explica por tener mayor altura y mayor volumen, pero una masa estadísticamente igual al tomate convencional. Este factor es importante en el proceso de empaque pues afecta directamente el peso de las unidades de comercialización. Si las cajas se comercializan con un peso igual para ambos tipos de tomate; el productor deberá colocar un mayor número de tomates en las cajas de tomate orgánico para cumplir con el peso declarado. Esto obviamente también afectará los rendimientos de la producción. Son muy escasos los reportes que informen de estas características físicas del tomate; Stertz y col. (2005) al comparar las densidades de frutos de tomate cherry procedentes de cultivos orgánicos y convencionales (cultivados a cielo abierto) y producidos bajo invernadero (en cultivo convencional), encontraron que los

tomates orgánicos (producidos a cielo abierto) tuvieron mayor masa y volumen que los convencionales y una densidad comparable con los tomates procedentes de invernadero. No obstante, debido a que sus muestras fueron obtenidas en un mercado local no aportaron datos de tomates orgánicos y convencionales producidos en invernadero y por ello no se puede establecer una base de comparación entre sus estudios y los datos aportados en el presente trabajo. Es muy probable, que el sistema de producción, a cielo abierto o invernadero, así como la variedad pueden afectar de manera significativa las características físicas de los frutos como lo señalaron Nyalala y col. (2019).

La observación de secciones transversales de los frutos (Figura 17) señaló que la pared del pericarpio y la pared interna de la columela del tomate orgánico presentan mayor grosor en comparación con los convencionales; así mismo, también se observó una mayor proporción de tomates con dos cavidades locales con un volumen locular más reducido y por tanto, menor cantidad de gel locular. Debido a las características de ambos tejidos, esto podría explicar la menor densidad del tomate orgánico. Sin embargo, es necesario realizar más estudios para evaluar cuantitativamente estas diferencias.



Figura 17. Estructura interna de los tomates orgánicos a) y convencionales b).

Los datos anteriores parecen indicar que el sistema de cultivo orgánico afecta la estructura del tomate de tal manera que produce frutos más huecos.

5.2 Efectos en los factores de calidad

Los valores del cuadrado medio del error del análisis de varianza (Cuadro 11) señalaron que el sistema de cultivo influyó significativamente en la mayoría de los parámetros de calidad, excepto el índice de sabor ($^{\circ}\text{Bx}/\text{Ac}$) y croma, mientras que el día de almacenamiento influyó significativamente la firmeza, pérdida de peso, índice de color a^*/b^* , ángulo de matiz, luminosidad y azúcares reductores. No obstante, la interacción de ambos factores influyó sólo en tres parámetros (pérdida de peso, $^{\circ}\text{Bx}$, índice de sabor ($^{\circ}\text{Bx}/\text{Ac}$) y pH.

Cuadro 11. Valores del cuadrado medio del error del sistema de cultivo, día de almacenamiento y su interacción del análisis de varianza de los factores de calidad del tomate.

Factores de calidad	Fuentes de variación					
	12°C			Transferencia a 20°C		
	Sistema de cultivo	Día	Interacción	Sistema de cultivo	Día	Interacción
Firmeza	55.29**	20.11**	1.31 ^{ns}	47.33**	74.58**	2.68**
Pérdida de peso	81.12**	89.44**	15.88**	23.22**	75.40**	3.04*
a^*/b^*	6.85*	94.54**	1.13 ^{ns}	0.79^{ns}	165.47**	18.34**
Hue	7.81**	99.58**	1.05 ^{ns}	1.37^{ns}	220.92**	17.57**
Croma	0.47 ^{ns}	16.80**	0.91 ^{ns}	0.32 ^{ns}	31.79**	16.07**
L*	47.46**	18.52**	0.48 ^{ns}	42.80**	64.31**	8.15**
$^{\circ}\text{Bx}$	24.88**	2.36 ^{ns}	7.58**	3.10^{ns}	3.94*	0.92^{ns}
Azúcares reductores	55.28**	10.53**	0.69 ^{ns}	19.77**	1.00^{ns}	0.29 ^{ns}
Acidez titulable	18.98**	0.24 ^{ns}	0.73 ^{ns}	66.93**	7.22**	0.32 ^{ns}
pH	9.71**	2.04 ^{ns}	3.80*	0.19^{ns}	13.63**	0.48^{ns}
Sabor	0.82 ^{ns}	1.76 ^{ns}	6.56**	4.26 ^{ns}	2.02 ^{ns}	1.17^{ns}

n = 3 (°Bx, Azúcares reductores, Acidez titulable, pH, sabor), n = 9 (Firmeza, pérdida de peso, a*/b*, Hue, L*), * p < 0.01, ** p < 0.001, ns = no significativo. Los valores en **negrita** son aquellos que se modificaron debido al efecto de las transferencias a 20°C por 72 h.

De acuerdo con los resultados, el sistema de cultivo fue el factor principal que influyó en los parámetros de calidad del tomate. Diversos autores atribuyen este efecto a la diferencia en la nutrición de las plantas entre sistemas de cultivo, siendo el tipo de fuente de nitrógeno utilizada, la más importante (Bénard y col., 2009; Chassy y col., 2006; Hallmann y col., 2007; Hallmann y col., 2012; Heeb y col., 2005; Hernández y col., 2020, Oliviera y col., 2013; Uçurum y col., 2019).

El nitrógeno es considerado uno de los macronutrientes esenciales en las plantas porque participa en la síntesis de ácidos nucleicos, aminoácidos, proteínas, fosfolípidos y metabolitos secundarios. Además, es parte de la estructura de todas las enzimas necesarias para el metabolismo y forma parte de la estructura química de la clorofila (Corine y col., 2003; Sung y col., 2015; Zhang y col., 2017). Por tanto, se reconoce que un déficit de aporte de nitrógeno en la planta afectará de manera significativa el metabolismo general de la misma.

El nitrógeno puede provenir de dos tipos de fuentes, inorgánicas (amoniacales y nitratos) y orgánicas (proteínas, aminoácidos, carbohidratos nitrogenados y ácidos nucleicos) (Heeb y col., 2005). Las fuentes inorgánicas son consideradas de fácil asimilación y las orgánicas de lenta asimilación o fuentes de liberación lenta, esto es porque en las primeras el nitrógeno se encuentra en la forma química adecuada (NO_3^- y NH_4^+) para ser metabolizado por la planta al momento de su aplicación, mientras que el nitrógeno orgánico lleva un proceso de mineralización, que puede durar semanas e incluso meses, en donde el nitrógeno contenido en proteínas y aminoácidos se convierte en nitrógeno inorgánico biodisponible para las plantas (De Pascale y col., 2016; Zhang y col., 2013). En el caso de los cultivos convencionales se utilizan fuentes de nitrógeno inorgánicas como urea, nitrato de amonio, sulfato de amonio, amoniaco anhidro, nitratos y fosfatos amónicos mientras que en los cultivos

orgánicos se utilizan fuentes naturales como estiércol animal, residuos vegetales y materia orgánica composteada y también proteínas de origen animal o marino como la harina de pescado (De Pascale y col., 2016; Zhang y col., 2013).

De acuerdo con la literatura, la concentración y la forma biodisponible del nitrógeno tiene un efecto importante en la calidad organoléptica del tomate (Bénard y col., 2009; Heeb y col., 2005; Hernández y col., 2020). Se ha reportado que el uso de fuentes de nitrógeno de lenta asimilación en los cultivos orgánicos causa limitación de nitrógeno en la planta del tomate, principalmente al inicio de su crecimiento (Heeb y col., 2005). Dicho fenómeno puede afectar la concentración de azúcares y ácidos orgánicos en el fruto. Este efecto ha sido reportado ampliamente en la literatura y se lo atribuyen a diversas causas. Una de ellas es que la baja concentración de nitrógeno disminuye la síntesis de aminoácidos y proteínas y se favorece la síntesis de carbohidratos (Hallmann y col., 2012; Hernández y col., 2020). También, la limitación de nitrógeno disminuye el crecimiento vegetativo, lo cual limita la fotosíntesis y con ello la producción de fotosintatos y por ende una menor acumulación de azúcares en los frutos; no obstante, también se ha reportado que el menor desarrollo foliar favorece un aumento de la irradiación del fruto, aumentando así su actividad fotosintética que contribuyen al aporte de azúcares del fruto (Bénard y col., 2009).

La forma química de aplicación del nitrógeno, también es un factor importante que determina la calidad organoléptica del tomate. El nitrógeno amoniacal es la forma química del nitrógeno más abundante en los cultivos orgánicos, ya que es el subproducto principal del proceso de mineralización de la materia orgánica para lograr obtener nitrógeno biodisponible (Heeb y col., 2005). Estos investigadores evaluaron el efecto de la fuente de nitrógeno (NO_3^- , NH_4^+ , gallinaza, levadura de panadería, césped composteado) en la calidad del tomate; observando que los tomates fertilizados con nitrógeno orgánico y amoniacal mostraban mayor dulzura, acidez, sabor y aceptación general en comparación con los tomates fertilizados con nitratos (Heeb y col., 2005). Estos investigadores atribuyeron este comportamiento a que la asimilación de amonio en metabolitos vegetales requiere menos energía que

la asimilación de nitratos al no necesitar reducirse (Heeb y col., 2005). Por lo tanto, sugirió que las plantas pueden ahorrar energía absorbiendo nitrógeno reducido, la energía ahorrada puede utilizarse para aumentar la producción de metabolitos como los azúcares y ácidos orgánicos, mejorando la calidad y sabor de la fruta (Heeb y col., 2005).

Respecto al pH, se ha reportado que el sistema de cultivo, al influir en el contenido de ácidos orgánicos, también modifica el pH del fruto (Vinha y col., 2014). Sin embargo, este comportamiento no siempre es así, ya que algunos autores han reportado diferencias significativas en la acidez titulable de los tomates orgánicos y convencionales, pero el pH permanece igual en ambos sistemas (Pieper y col., 2009; Uçurum y col., 2019).

También el efecto del sistema de cultivo en el color del tomate está ampliamente reportado. Diversos autores han encontrado que la fertilización orgánica favorece el contenido de licopeno en los tomates, el pigmento responsable del color rojo del fruto (Chassy y col., 2006; Hallmann y col., 2012; Kapoulas y col., 2011; Mitchell y col., 2007; Oliveira y col., 2013; Vinha y col., 2014). Dicho comportamiento lo atribuyen principalmente a la inducción de estrés oxidativo en el fruto debido al limitado suministro de nitrógeno durante su crecimiento en los cultivos orgánicos, lo cual provoca que se activen mecanismos de defensa, como la síntesis de compuestos antioxidantes (Oliveira y col., 2013).

La comparación de la firmeza del tomate producido en sistemas de cultivo orgánico y convencional en invernadero son escasos; no obstante, bajo cultivo a cielo abierto se ha reportado que los tomates convencionales son más resistentes a la deformación que los producidos bajo cultivo orgánico (Mccollum y col., 2005). Nuestros resultados confirman esos datos para el caso de tomate cultivado en invernadero. Otros informes señalan que esos sistemas de cultivo llevados a cabo a cielo abierto pueden ser dependientes de la variedad; unas mostrar menor firmeza mientras que otras no mostraron diferencias entre ambos sistemas cultivo (Riahi y col., 2009)

Durante las transferencias a 20°C, se observó que el sistema de cultivo no influyó en el índice de color a*/b*, ángulo de matiz, azúcares reductores, °Bx y pH. En el caso del día de almacenamiento, el contenido de azúcares reductores resultó no significativo mientras que el pH, °Bx, y acidez titulable resultaron significativos. Por otro lado, la interacción entre ambos factores fue diferente en casi todos los parámetros, a excepción de la pérdida de peso, acidez titulable y el contenido de azúcares reductores. Es importante resaltar que el pH y °Bx fueron los únicos parámetros de calidad que cambiaron completamente su comportamiento con el cambio de temperatura durante el almacenamiento.

El análisis particular de cada uno de los factores de calidad analizados y comparados globalmente para el sistema de cultivo y condición de almacenamiento se concentra en el Cuadro 12

Cuadro 12. Comparación de medias globales de los factores de calidad de tomate producido bajo dos sistemas de cultivo y condición de almacenamiento.

Factores de calidad	12°C		Transferencias a 20°C	
	Orgánico	Convencional	Orgánico	Convencional
Firmeza (N)	21.07 ^b	27.16 ^a	15.83 ^b	20.96 ^a
Pérdida de peso (%)	2.53 ^a	1.25 ^b	4.48 ^a	3.04 ^b
Índice de color a*/b*	0.50 ^a	0.46 ^b	0.65 ^a	0.63 ^a
Ángulo de matiz (hue°)	64.11 ^b	65.83 ^a	58.07 ^a	58.87 ^a
Croma	23.26 ^a	23.72 ^a	24.25 ^a	23.90 ^a
L*	41.36 ^b	43.47 ^a	39.70 ^b	41.68 ^a
°Bx	4.23 ^b	4.81 ^a	4.59 ^a	4.92 ^a
Azúcares reductores (%)	21.80 ^b	25.0 ^a	22.0 ^b	25.10 ^a
Acidez titulable (%)	0.30 ^b	0.35 ^a	0.32 ^b	0.37 ^a
pH	4.21 ^b	4.31 ^a	4.19 ^a	4.20 ^a
Sabor (°Bx/Ac)	14.22 ^a	13.92 ^a	14.52 ^a	13.29 ^a

n = 3 (°Bx, Azúcares reductores, Acidez titulable, pH, sabor), n = 9 (Firmeza, pérdida de peso, a*/b*, Hue, L*).

En general, los tomates convencionales mostraron características de calidad más favorables que los orgánicos. La pérdida de peso y firmeza de los frutos fueron los más influidos por el sistema de cultivo. En el almacenamiento a 12°C, el tomate orgánico presentó el doble de pérdida de peso (2.06 veces) y menor firmeza (-22%) que el convencional. Respecto del color, el tomate orgánico obtuvo mayor índice de color a^*/b^* (+8%) mientras que el convencional tuvo mayor ángulo de matiz y luminosidad (+3% y +5%, respectivamente). Por otra parte, los tomates convencionales presentaron mayores valores acidez titulable (14%), contenido de sólidos solubles totales (5%), azúcares reductores (13%) y pH (2%).

En las transferencias a 20°C (Cuadro 12), los frutos del cultivo convencional mostraron mayores valores de firmeza (+32.4%), luminosidad (+5%), contenido de azúcares reductores (+14 %) y acidez titulable (+16%); mientras que el tomate orgánico siguió presentando mayor pérdida de peso (+47%). No obstante, la diferencia promedio de pérdida de peso entre el tomate orgánico y el tomate convencional disminuyó considerablemente pasando de 51 a 32%, mientras que la diferencia en la firmeza aumentó ligeramente de 22 a 24%. Los parámetros restantes como luminosidad, azúcares reductores y acidez titulable permanecieron con la misma diferencia entre sistemas de cultivo en ambas temperaturas.

5.2.1 Cambios en la pérdida de peso y firmeza

Comúnmente, en los frutos frescos ocurre pérdida de peso durante su almacenamiento (Salas y col., 2019). Conforme transcurrió el tiempo, aumentó la pérdida de peso del fruto (Figura 18).

Durante el almacenamiento a 12°C, los tomates orgánicos presentaron mayor pérdida de peso. Al término del periodo de experimentación los tomates orgánicos disminuyeron 5.10% su peso inicial, mientras que los convencionales disminuyeron su peso en 2.01% (Figura 18a). En las transferencias a 20°C (Figura 18b), la tendencia se mantuvo, aunque con menores diferencias; el tomate orgánico disminuyó su peso inicial un 7.58% y el convencional un 6.23%.

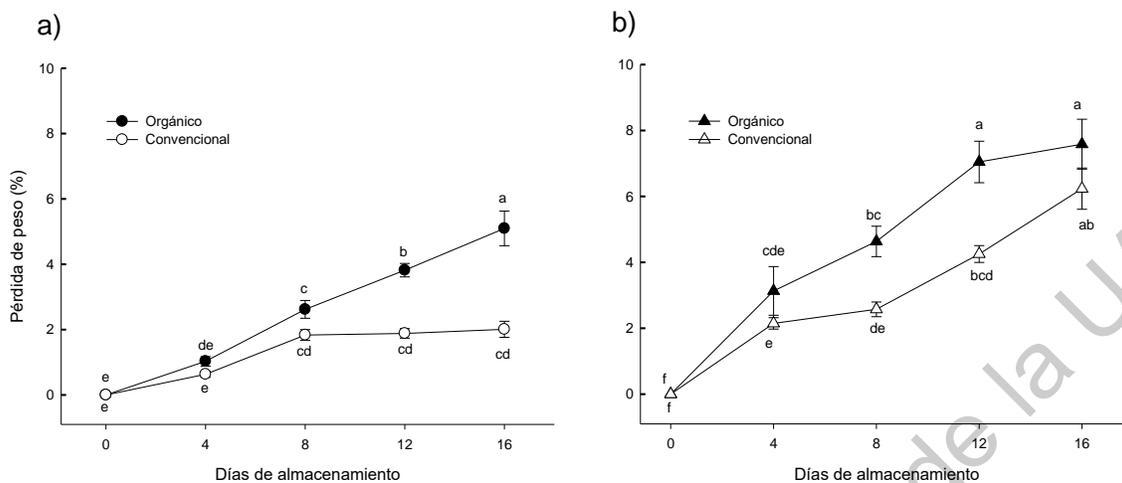


Figura 18. Evolución de la pérdida de peso del tomate orgánico y convencional durante el almacenamiento a 12°C a) y transferencias a 20°C por 72 h b).

En el tomate orgánico, la pérdida de peso tuvo un comportamiento lineal positivo a lo largo del tiempo de almacenamiento obteniendo una ecuación de ajuste lineal con el tiempo de almacenamiento ($y = 0.3245x - 0.0837$) con un coeficiente de correlación de 0.997. El tomate convencional, por otro parte, a partir del día 12 de almacenamiento no presentó diferencias significativas, disminuyendo su ajuste lineal considerablemente ($y = 0.1317x + 0.2186$, $r^2 = 0.851$). Dicho comportamiento se mantuvo en las transferencias a 20°C (Figura 18b), aunque el tomate convencional presentó un mejor ajuste ($y = 0.3643x + 0.1272$, $r^2 = 0.968$) comparado con el almacenamiento a 12°C y el tomate orgánico lo disminuyó levemente ($y = 0.4770x + 0.6628$, $r^2 = 0.955$).

En el proceso de comercialización, los tomates que presentan pérdidas de peso mayores a 5 - 7% son considerados frutos con calidad comercial inaceptable (Aktas y col., 2012; Chilson y col., 2011; Salas y col., 2019). Por ello, varios autores utilizan la pérdida de peso como parámetro crítico para establecer la vida de anaquel del tomate (Aktas y col., 2012; Chilson y col., 2011; Salas y col., 2019, Sinha y col., 2019). De acuerdo con el comportamiento de la pérdida de peso de los tomates en el almacenamiento a 12°C, el tomate orgánico tiene una vida útil de 16 días (periodo de tiempo aproximado en el que el tomate alcanzó una pérdida de peso del 5%)

mientras que en los convencionales se estimó una vida de anaquel aproximada de hasta 43 días de almacenamiento. Sin embargo, a causa de su bajo coeficiente de linealidad dicho periodo solo puede reportado como un dato aproximado (Figura 18a). Es importante resaltar, que a pesar de que el tomate convencional tuvo mayor vida de anaquel, su tasa de respiración no presentó diferencias significativas con la tasa de respiración del tomate orgánico (ANEXO 1, 2 y 3).

En el caso de las transferencias a 20°C, el tomate orgánico tuvo una vida útil de 9 días, mientras que los convencionales de 13 días. Según los resultados, las transferencias a 20°C disminuyeron la vida de anaquel de los tomates considerablemente, no obstante, el efecto fue más severo en los tomates convencionales ya que se redujo su vida de anaquel a menos de la mitad comparado con el almacenamiento a 12°C (Figura 18b).

La firmeza es de los principales parámetros que influyen en la decisión de compra del consumidor, ya que un tomate firme es más fácil de manipular durante su preparación (Mohamed y col., 2019). Para el manejo poscosecha se prefieren tomates firmes por su mayor resistencia a los daños mecánicos durante el transporte y almacenamiento (Kyriacou y col., 2018; Mohamed y col., 2019; Steelheart y col., 2019).

Durante el almacenamiento, generalmente se observa una disminución en la firmeza del tomate (Bui y col., 2010), esto se atribuye al aumento de la actividad enzimática encargada de la degradación de la pared celular, y a la pérdida de peso en el fruto (Bui y col., 2010; Chilson y col., 2011; Pieczywek y col., 2018).

En general, los tomates orgánicos presentaron menor firmeza que los convencionales (Figura 19a). En el almacenamiento a 12°C, los tomates orgánicos mantuvieron su firmeza en los primeros 8 días de almacenamiento, sin embargo, en los días 12 y 16 se observó disminución de la firmeza de 33.8 y 40.2%, respectivamente. Los tomates convencionales conservaron la firmeza hasta el día 12 de almacenamiento, pero en el día 16 presentaron reducción de firmeza en 17.4%.

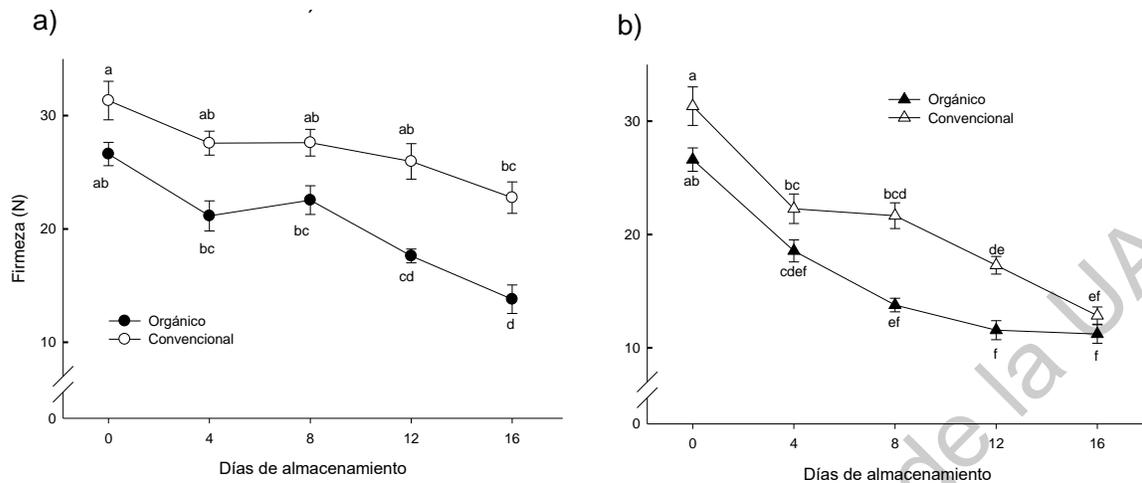


Figura 19. Cambios en la firmeza del tomate orgánico y convencional durante su almacenamiento a 12°C a) y transferencias a 20°C por 72 h b).

En las transferencias a 20 °C, los tomates de ambos sistemas presentaron la mayor disminución en firmeza durante los primeros cuatro días de almacenamiento, 40% en los tomates orgánicos y 29% en los tomates convencionales (Figura 18b). En los tomates orgánicos después del día cuatro la firmeza se mantuvo hasta el día 16, mientras que el convencional al día 12 la firmeza se redujo 22% más.

Al igual que en la pérdida de peso, las transferencias a 20°C afectaron la firmeza de los tomates considerablemente. No obstante, el tomate convencional se vio mayormente afectado, de tal manera que en el día 16 no presentó diferencias significativas respecto a los tomates orgánicos.

La diferencia de firmeza entre sistemas de cultivo puede deberse principalmente a la pérdida de peso, tal como se muestra en la correlación altamente significativa entre ambos parámetros (Cuadro 18). La pérdida de peso en los frutos es resultado de la disminución en el contenido de agua debido al proceso metabólico de la transpiración durante el almacenamiento (Salas y col., 2019). De acuerdo con la literatura, cuando la pérdida de peso en los tomates alcanza entre el 5 - 7% se produce una contracción del fruto y la turgencia y firmeza disminuyen (Chilson y col., 2011).

Se ha encontrado que la relación superficie/volumen afecta la vida útil de los frutos y las tasas de pérdida de humedad durante el almacenamiento (Mohammad y col., 2019). Frutos más grandes tienen una menor proporción de superficie/volumen lo que causa menores tasas de respiración y producción de etileno, y por lo tanto, menor pérdida de humedad (Mohammad y col., 2019). Este comportamiento ha sido estudiado anteriormente en tomates (Mohammad y col., 2019), pimiento y zanahoria (Díaz y col., 2007).

Como se mencionó anteriormente, el tomate orgánico presentó mayor volumen que el convencional (Cuadro 10), es decir, presentó menor proporción superficie/volumen. Sin embargo, este último presentó mayor pérdida de peso. La mayor pérdida de humedad en los tomates orgánicos a pesar de su menor proporción superficie/volumen podría deberse a la diferencia en la densidad relativa entre frutos, ya que en el estudio realizado por Díaz y col. (2007) los tomates presentaron densidad relativa similar, es decir a medida que disminuyó el tamaño de los tomates disminuyó su peso, mientras que los tomates del presente estudio presentaron diferente tamaño, pero pesos similares. Lo anterior parece indicar que la menor densidad relativa de los frutos orgánicos causó una mayor pérdida de humedad debido a que se favoreció la difusión de gases al contener mayor tejido poroso que los frutos convencionales (Figura 18).

Otro factor que afecta la firmeza es la actividad de las enzimas de la pared celular como las poligalacturonasas y pectinasas o pectinmetilesterasas, las cuales, se encargan de la degradación de la pectina de la pared celular (Bui y col., 2010; Oms y col., 2011; Salas y col., 2019). La actividad de estas enzimas favorece la transpiración del fruto ya que aumenta la permeabilidad de la pared celular y da como resultado pérdida de turgencia y firmeza (Li, 2012; Oms y col., 2011).

5.2.2 Cambios en el color de los frutos

El color determina en primera instancia la calidad del tomate (Bui y col., 2010). Se consideran tomates de alta calidad a aquellos que tienen color rojo intenso, uniforme

y brillante, sin signos de lesiones mecánicas ni deshidratación (Shahnawaz y col., 2012).

El cambio en la apariencia de los tomates durante el tiempo de almacenamiento se muestra en la Figura 20. De acuerdo con la clasificación visual de estados de madurez del tomate de la USDA, 1975 (Figura 8), al inicio del experimento en el almacenamiento a 12°C los tomates de ambos sistemas de cultivo se encontraban en estado de madurez 3, el día 4 en el estado de madurez 4, el día 8 y 12 en estado de madurez 5 y el día 16 en estado de madurez 6 (Figura 20).



Figura 20. Apariencia visual de los frutos de tomate orgánico y convencional almacenados a 12°C.

El índice de color a^*/b^* es ampliamente utilizado para la evaluación del estado de madurez del tomate (Chassy y col., 2006; Huu y col., 2010). Los frutos de tomate de ambos sistemas de cultivo almacenados a 12°C (Figura 21a) incrementaron su índice de color a^*/b^* de forma lineal durante todo el estudio observándose valores ligeramente inferiores en los tomates del cultivo convencional respecto de los mostrados por los tomates orgánicos, indicando una mayor velocidad de cambio de color en estos frutos.

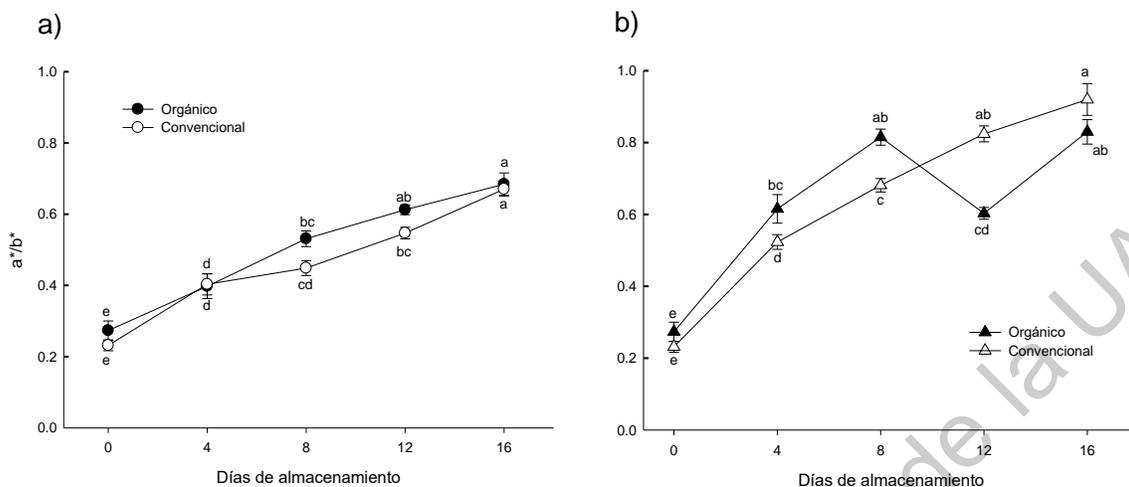


Figura 21. Evolución del índice de color a^*/b^* en frutos de tomate orgánico y convencional durante el almacenamiento a 12°C a) y sus transferencias a 20°C por 72 h b).

Según la clasificación de estados de madurez del tomate de acuerdo con el índice de color a^*/b^* reportada por Huu y col. (2010) y Perkins (2007) (Cuadro 13), los tomates orgánicos almacenados a 12°C se encontraban en estado de madurez 3 al inicio y hasta el día 4 de almacenamiento, en estado de madurez 4 el día 8 y en estado de madurez 5 el día 12 y 16. Por otro lado los tomates convencionales se encontraban en estado de madurez 3 al inicio y hasta el día 4 de almacenamiento, en estado de madurez 4 el día 8 y 12 y en estado de madurez 5 el día 16.

De acuerdo con los resultados de la regresión lineal del índice de color (a^*/b^*) durante el almacenamiento, la pendiente del tomate orgánico fue mayor ($y = 0.0259x + 0.2924$, $r^2 = 0.9822$) que la del convencional ($y = 0.0255x + 0.2559$) aunque solo en un 1.5% (Figura 21a). Lo cual parece indicar que la velocidad de maduración es muy similar entre ambos sistemas de cultivo, lo que concuerda con los resultados encontrados con la clasificación de madurez según la USDA mostrados anteriormente.

La apariencia visual durante las transferencias a 20 °C por 72 h se muestra en la Figura 22. De acuerdo con la clasificación visual de estados de madurez del tomate de la USDA (1975) (Figura 8), los tomates de ambos sistemas de cultivo se

encontraban en estado de madurez 3, el día 4 en el estado de madurez 4, el día 8 en estado de madurez 5 y el día 12 y 16 en estado de madurez 6.

Cuadro 13. Correlación entre los valores de color a^*/b^* y el valor de madurez asignado según la carta de color de estados de madurez del tomate de la USDA (Huu y col., 2010, Perkins, 2007).

Estado de madurez	índice de color a^*/b^*
1-2	< 0.02
3	0.02 - 0.40
4	0.41 - 0.60
5	0.61 - 0.90
6	0.91 - 1.06

Según el Cuadro 13, con base en el parámetro a^*/b^* los tomates orgánicos se encontraban en estado de madurez 3 al inicio del experimento, el día 4 y 8 en estado de madurez 5, el día 12 en estado de madurez 4 y el día 16 de almacenamiento nuevamente en estado de madurez 5. En el caso del tomate convencional, al inicio del experimento se encontraba en estado de madurez 3, el día 4 en estado de madurez 4, el día 8 y 12 en estado de madurez 5 y el día 16 de almacenamiento en estado de madurez 6.

De acuerdo con el análisis estadístico, la relación a^*/b^* de los tomates transferidos a 20°C presentó interacción significativa entre ambos factores (sistema de cultivo x días de almacenamiento) (Figura 21b). El cambio del índice de color en los frutos trasferidos de 12 a 20°C siguió un modelo logístico donde los tomates del sistema orgánico alcanzaron su valor máximo de índice de color (0.8) el día 8 de transferencia mientras que los tomates convencionales lo alcanzaron el día 12. Estos datos señalan que los tomates orgánicos cambian de color más rápido que los convencionales. En los días 4, 8 y 12 de almacenamiento se presentaron diferencias significativas entre sistemas de cultivo ($p < 0.05$), siendo el tomate orgánico el que presentó mayor índice a^*/b^* . No obstante, el día 12 de almacenamiento los tomates

convencionales presentaron mayor madurez que los orgánicos (Figura 21b) aunque visualmente no fue evidente dicho cambio (Figura 22). Esto parece confirmar que los tomates orgánicos se maduran más rápidamente que los tomates convencionales.

Según la regresión lineal del índice de color (a^*/b^*) durante el almacenamiento con transferencias a 20°C (Figura 21b), el tomate orgánico presentó nuevamente mayor pendiente ($y = 0.0419x + 0.3005$, $r^2 = 0.5988$) que los convencionales ($y = 0.0275x + 0.4072$, $r^2 = 0.9562$). La diferencia entre las pendientes de ambos sistemas de cultivo fue mayor (34.4%) que en el almacenamiento a 12°C (1.5%), siendo el tomate orgánico el que aumentó su velocidad de madurez de manera considerable. Lo anterior parece indicar que el cambio de temperatura durante el almacenamiento afecta la velocidad de madurez de los tomates y de forma más considerable en el tomate cultivado en sistemas orgánicos. Esto último concuerda con los resultados encontrados con la clasificación de madurez según la USDA mostrados anteriormente.



Figura 22. Apariencia visual de frutos de tomate orgánico y convencional durante las transferencias de 12 a 20°C por 72 h.

Los parámetros de color como el ángulo de matiz y luminosidad también fueron afectados por el sistema de cultivo. En el almacenamiento a 12°C el tomate orgánico presentó una tendencia a disminuir más rápido el ángulo de matiz y la luminosidad

indicando una tasa de cambio de color de las zonas verdes a rojas más acelerada y una apariencia más opaca comparada con el tomate convencional (Figura 23a y 24a). Dicho comportamiento fue similar al encontrado en un estudio realizado por Vinha y col. (2014) donde se evaluó el color de tomates orgánicos y convencionales del cultivar “Redondo” indicando que los tomates convencionales presentaron mayor ángulo de matiz (+43.37%), señalando un cambio de color de verde a rojo más acelerado en los tomates orgánicos, lo cual confirma los resultados aquí encontrados.

El licopeno es el pigmento que brinda el color rojo característico del tomate (Chilson y col., 2011; Fagundes y col., 2015; Paulsen y col., 2019; Radzevičius y col., 2009). En el pericarpio se encuentra el 80% del total de este pigmento (Chilson y col., 2011; Fagundes y col., 2015). Mayor contenido de licopeno puede generar oscurecimiento del color rojo generando menor ángulo de matiz y luminosidad en el tomate (Paulsen y col., 2019; Radzevičius y col., 2009). De acuerdo al análisis estadístico los tomates orgánicos presentaron ligeramente mayor contenido de licopeno, no obstante, las diferencias no fueron significativas (resultados reportados en la sección 5.3) (Cuadro 14 y Figura 31a). Por lo tanto, las diferencias encontradas en el ángulo de matiz y luminosidad de los tomates podrían atribuirse a las ligeras variaciones en el contenido de licopeno de los frutos orgánicos y convencionales. Por otro lado, los análisis de correlación (ANEXO 8) señalan que la pérdida de peso de los tomates presentó una correlación altamente significativa con el ángulo de matiz, luminosidad y cromaticidad (Cuadro 18). Por lo que es posible que dichas diferencias también se pueden deber al efecto de concentración de sólidos por la pérdida de agua de los tomates, siendo los tomates orgánicos los que perdieron mayor cantidad de agua que los convencionales.

En las transferencias a 20°C, el ángulo de matiz, cromaticidad y luminosidad presentaron interacción entre el sistema de cultivo y día de almacenamiento (Figura 23b, 24b y 25b). El ángulo de matiz y cromaticidad fue diferente entre sistemas solamente el día 12 de almacenamiento, donde el sistema orgánico presentó valores de hue° que lo ubican en la zona de los tonos verdes y presentó menor saturación

del color, mientras que la luminosidad fue diferente el día 0 y 12 de almacenamiento, nuevamente el sistema orgánico presentó menores valores.

El ángulo de matiz y luminosidad de los tomates almacenados a 12°C aumentaron (Figura 23a y 24a) mientras que la cromaticidad aumentó hasta llegar a un máximo y disminuyó nuevamente (Figura 25a). Estos comportamientos ya han sido ampliamente reportados para el tomate durante su almacenamiento (Chilson y col., 2011; Fagundes y col., 2015; Paulsen y col., 2019; Radzevičius y col., 2009; Salehi y col., 2019).

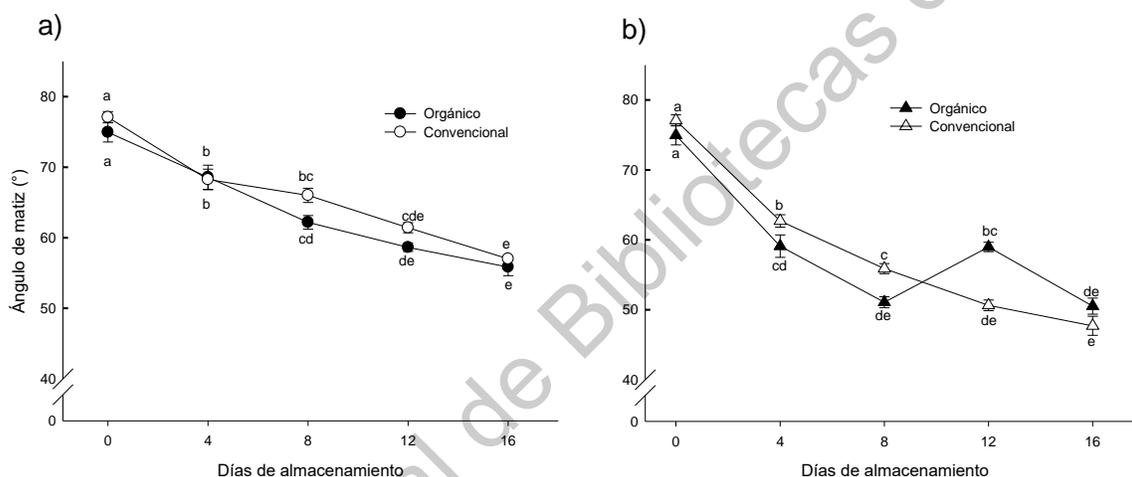


Figura 23. Cambios en el ángulo de matiz de tomate orgánico y convencional durante su almacenamiento a 12°C a) y su transferencia a 20°C por 72 h b).

El decremento del ángulo de matiz en el tomate indica desplazamiento del color del fruto de las zonas verdes a las rojas causado por la degradación de la clorofila a compuestos incoloros y biosíntesis de carotenoides, en su mayoría licopeno (Fagundes y col., 2015; Salehi y col., 2019). En el almacenamiento a 12°C el ángulo de matiz del tomate orgánico cambió significativamente cada 4 días de almacenamiento a excepción del día 12 de almacenamiento (Figura 23a). En el tomate convencional, este valor cambió los primeros 4 días de almacenamiento y no presentó diferencias significativas sino hasta el día 12 y el día 16 permaneció nuevamente sin diferencias. Lo anterior parece mostrar que la degradación de la clorofila podría ser más rápida en los tomates orgánicos que los convencionales.

En las transferencias a 20°C se encontró un comportamiento similar en el tomate orgánico, y en el convencional que se mantuvo hasta el día 16 de almacenamiento (Figura 23b). Esto señala que el cambio de temperatura en el almacenamiento acelera la transición de color en ambos tomates, pero el tomate orgánico alcanza su máximo cambio de color en un menor tiempo, mientras que el tomate convencional continúa con su cambio de color durante 4 días más aproximadamente.

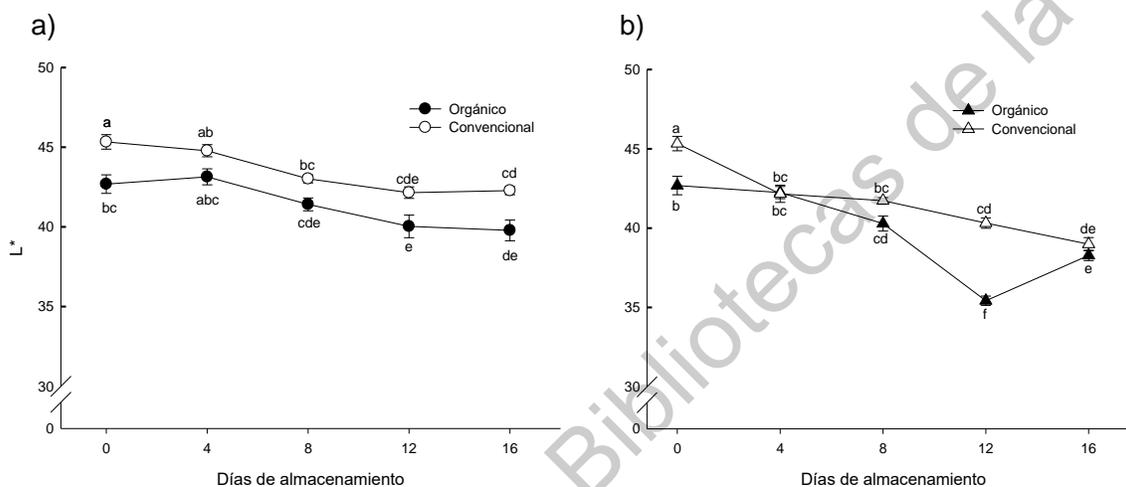


Figura 24. Cambios en la luminosidad de tomate orgánico y convencional durante su almacenamiento a 12°C a) y su transferencia a 20°C por 72 h b).

La pérdida de luminosidad de los tomates es un comportamiento común que está asociado a un leve oscurecimiento del fruto propio de la maduración; a medida que aumenta el tiempo de almacenamiento, el color del tomate cambia de un rojo claro (valores L* más altos) a rojo más oscuro (valores L* más bajos) (Chilson y col., 2011; Fagundes y col., 2015; Paulsen y col., 2019). En el almacenamiento a 12°C la luminosidad del tomate orgánico disminuyó significativamente hasta el día 8 de almacenamiento, después volvió a disminuir el día 12 y el día 16 permaneció sin diferencias significativas, mientras que el convencional también presentó diferencias hasta el día 8 pero después permaneció sin diferencias (Figura 24a). Lo anterior, señala que el tomate orgánico madura más rápidamente que el convencional. En las transferencias a 20°C se disminuyó la luminosidad más rápidamente. En el tomate orgánico disminuyó significativamente cada 4 días de almacenamiento y el

convencional, por otra parte, disminuyó los primeros 4 días de almacenamiento y permaneció sin diferencias significativas hasta el día 16 de almacenamiento (Figura 24b).

La cromaticidad del tomate va cambiando de acuerdo con la madurez del fruto, al inicio de la maduración aumenta a medida que los tomates cambian de verde a rojo claro y disminuye en la etapa en que el color rojo es más intenso (estado de madurez 6) (Radzevičius y col., 2009). Este comportamiento se mostró en los tomates almacenados a 12°C, pero en los tomates transferidos a 20°C no presentaron dicha tendencia ya que su maduración fue más rápida debido al aumento de la temperatura (Figura 25a y b).

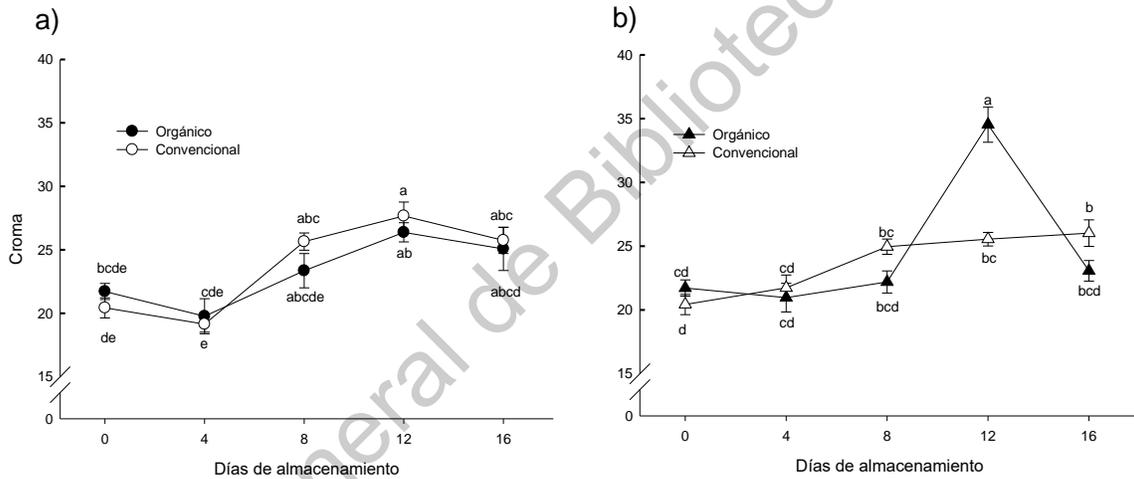


Figura 25. Cambios en la cromaticidad de tomate orgánico y convencional durante el almacenamiento a 12°C a) y su transferencia a 20°C por 72 h b).

5.2.3 Cambios en el índice de sabor ($^{\circ}\text{Bx}/\text{Ac}$), acidez titulable, sólidos solubles totales y azúcares reductores

El sabor, es un parámetro importante para lograr el agrado y preferencia del consumidor. El sabor del tomate está determinado principalmente por el contenido de azúcares y ácidos orgánicos (Abera, 2013; Verheul y col., 2015). Es posible evaluar el sabor con base en la relación que existe entre el contenido sólidos solubles totales y ácidos orgánicos de los frutos. Para tomates, la relación óptima es de 12.5,

mayor a este valor se consideran tomates dulces y valores menores tomates ácidos (Beckles, 2012).

De acuerdo con el análisis de varianza (Cuadro 11), durante el almacenamiento a 12°C, el sistema de cultivo influyó de manera significativa en el contenido de sólidos solubles totales (SST), acidez titulable y contenido de azúcares reductores, siendo el tomate convencional el que obtuvo mayor contenido en las tres variables, (Figura 26a, 27a y 29a). A pesar de que el tomate convencional tuvo mayor contenido de ambos componentes, el índice de sabor °Bx/Ac permaneció similar en los tomates de ambos sistemas de cultivo (Figura 28a). En promedio, el tomate orgánico obtuvo una relación °Bx/Ac de 14.22 y el convencional de 13.92. Ambos se encontraron por arriba de la relación ideal reportada para el tomate (12.5) (Cuadro 6) por lo que se consideran tomates dulces.

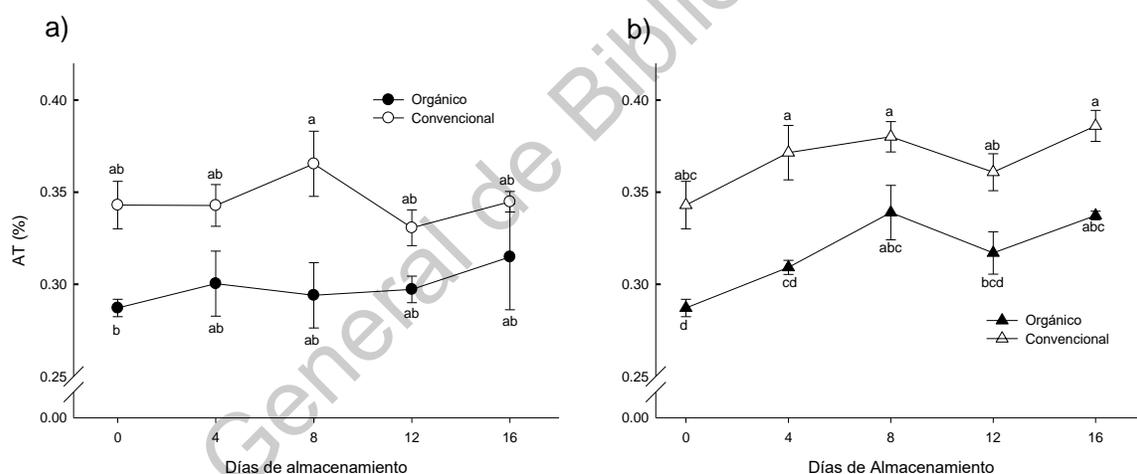


Figura 26. Cambios en la acidez titulable de tomate orgánico y convencional durante su almacenamiento a 12°C a) y su transferencia a 20°C por 72 h b).

En las transferencias a 20°C, no se encontraron diferencias significativas entre sistemas de cultivo. La acidez titulable y los azúcares reductores nuevamente fueron mayores en el tomate convencional (+14% y +12%, respectivamente). A pesar de tener mayor acidez titulable en los tomates convencionales, nuevamente el índice de sabor no presentó diferencias entre ambos sistemas de cultivo.

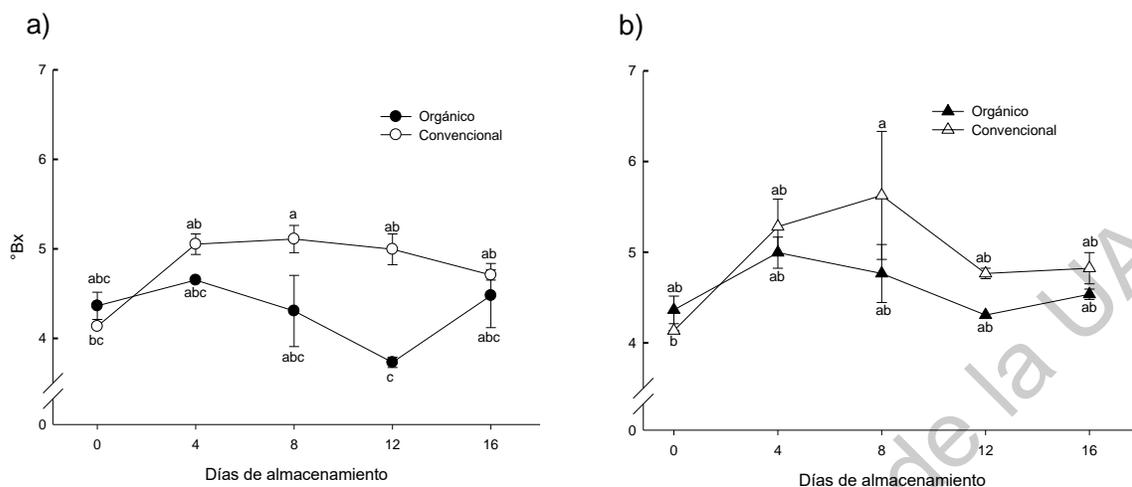


Figura 27. Cambios en el contenido de sólidos solubles totales de tomate orgánico y convencional durante su almacenamiento a 12°C a) y su transferencia a 20°C por 72 h b).

El efecto del sistema de cultivo en la acidez titulable y SST fueron contrarios a lo reportado anteriormente en la literatura. Generalmente se ha encontrado que tomates orgánicos cuentan con mayor contenido de ambos componentes (Bénard y col., 2009; Chassy y col., 2006; Hallmann y col., 2007; Hallmann y col., 2012; Heeb y col., 2005; Hernández y col., 2020; Oliviera y col., 2013). Solo en un estudio realizado en el tomate cv. Rio Grande en el 2018 se encontró que los tomates convencionales contenían mayor contenido de SST y acidez titulable (Uçurum y col., 2019).

Como los ácidos orgánicos también son considerados en la determinación de SST, la diferencia entre sistemas de cultivo en el contenido de SST se puede atribuir al alto contenido de acidez titulable en los tomates convencionales. El análisis de correlación (Cuadro 18) señala una correlación positiva y significativa entre ambos componentes.

La menor concentración de ácidos orgánicos en los tomates orgánicos puede indicar mayor actividad metabólica en el fruto, debido a que los aniones de estos ácidos son utilizados como sustrato de manera directa o indirecta durante la respiración (Famiani y col., 2015).

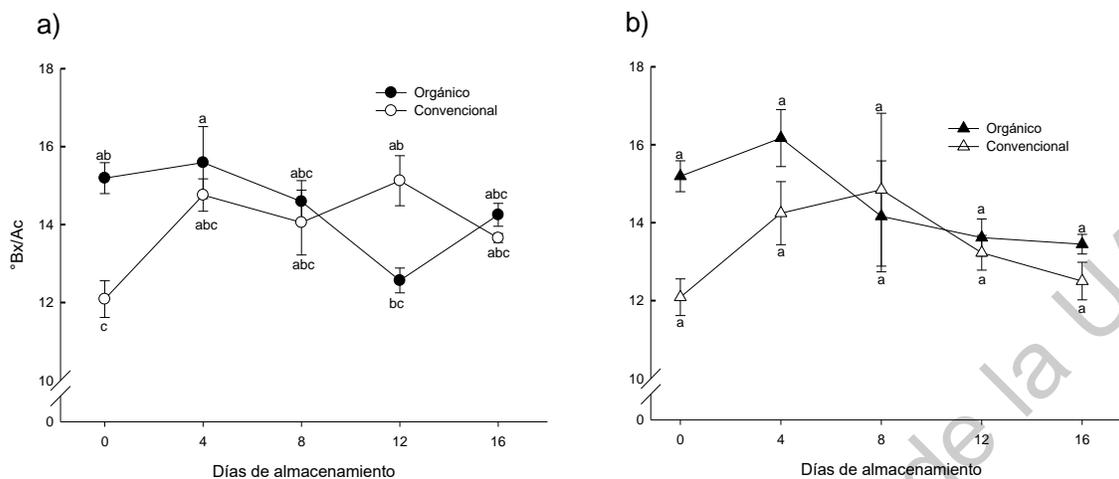


Figura 28. Cambios en el índice de sabor ($^{\circ}\text{Bx}/\text{Ac}$) de tomate orgánico y convencional durante su almacenamiento a 12°C a) y su transferencia a 20°C por 72 h b).

En el almacenamiento a 12°C , hubo interacción entre el sistema de cultivo y día de almacenamiento en el contenido de SST y el índice de sabor (Figura 27a y 28a). Solo en el día 12 el tomate convencional presentó mayor concentración de SST (+25.25%) que el orgánico, debido a que en el mismo día el tomate orgánico disminuyó su contenido de SST considerablemente. Sin embargo, en el día 16 el tomate orgánico aumentó nuevamente su contenido de SST igualando al tomate convencional. En el caso del índice de sabor, en el día 0 el tomate orgánico presentó mayor índice de sabor (+20.4%) que el convencional. Sin embargo, a partir del día 4 ya no se encontraron diferencias significativas entre ambos sistemas de cultivo. Las transferencias a 20°C no presentaron interacción en dichos factores.

En el almacenamiento a 12°C , el tomate orgánico alcanzó la madurez comercial (estado de madurez 6) el día 12 de almacenamiento, en este día presentó un contenido de acidez titulable y $^{\circ}\text{Bx}$ de 0.30% y 3.73, respectivamente y solo la acidez titulable entró dentro del rango óptimo de calidad del tomate (0.28 - 0.45%). Por otro lado, en los tomates convencionales se alcanzó la madurez comercial hasta el día 16 de almacenamiento, en este periodo presentó acidez titulable de 0.34% y 4.99 $^{\circ}\text{Bx}$, ambos entraron en los rangos óptimos de calidad del tomate (Beckles, 2012).

Sin embargo, el tomate orgánico fue el que presentó resultados más favorables en cuanto al índice de sabor, ya que cuando alcanzó la madurez comercial su índice de sabor fue de 12.6, valor cercano a lo óptimo (12.5) indicado por Beckles, (2012), mientras que el convencional obtuvo un índice de sabor de 15.12.

En las transferencias a 20°C, el tomate convencional alcanzó la madurez comercial el día 16 de almacenamiento y presentó acidez titulable de 0.386% y 4.82 °Bx. Por otro lado, el tomate orgánico no alcanzó los valores del estado de madurez 6, de acuerdo con el índice de color a^*/b^* . Dicho comportamiento no es el esperado ya que, al aumentar la temperatura, debería incrementar la actividad metabólica del fruto y con ello su maduración.

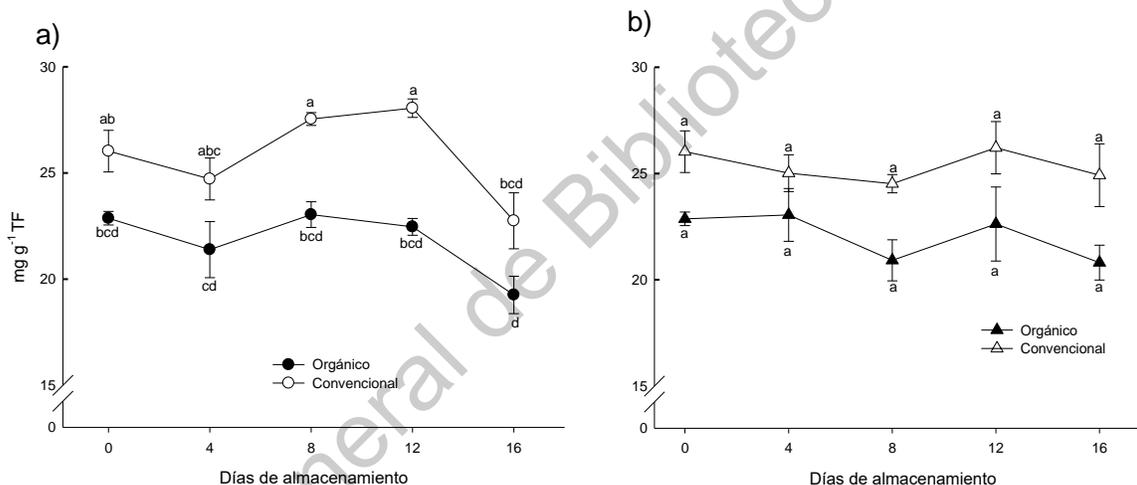


Figura 29. Cambios en el contenido de azúcares reductores totales de tomate orgánico y convencional durante su almacenamiento a 12°C a) y su transferencia a 20°C por 72 h b).

Los cambios en el contenido de azúcares reductores fluctuaron desde 19.2 hasta 28.0 mg g⁻¹ durante el almacenamiento (Figura 29a y b). Estos resultados se encuentran por debajo de lo reportado por algunos autores (Gautier y col., 2008; Isack y col., 2013; Moneruzzaman y col., 2008; Sood y col., 2011), quienes señalan que el contenido de azúcares reductores puede variar entre 29 y 50 mg g⁻¹ en tomates completamente maduros. De acuerdo con los resultados indicados por estos autores, los contenidos de azúcares eran mayores en frutos maduros (estado 6), no

obstante, las muestras analizadas por estos autores procedían de diferentes estados de madurez alcanzados en la planta, es decir que los tomates rojos maduros alcanzaron ese estado de madurez en la planta. En este trabajo se analizaron racimos de tomate cuyo estado de madurez de referencia fue el estado 3 de la carta de color, un estado de madurez que en la planta ha acumulado menos almidón y azúcares y por ello es lógico esperar que durante el almacenamiento no alcancen los niveles de azúcares que presentan los tomates madurados en la planta; esto explicaría los menores valores registrados en este trabajo.

En ese ámbito de análisis de los frutos, en el almacenamiento a 12°C, el contenido de azúcares reductores fue mayor en los tomates convencionales (+13%) que, en los orgánicos, esto se atribuye a su mayor contenido de SST (Figura 29a). El análisis de correlación (ANEXO 8) indica una correlación positiva entre ambas determinaciones (Cuadro 18). Es posible que las mayores dificultades de aporte de nutrientes en el tomate orgánico, que afectan la capacidad fotosintética (menor área foliar) afecten la acumulación de fotosintatos o azúcares en los frutos.

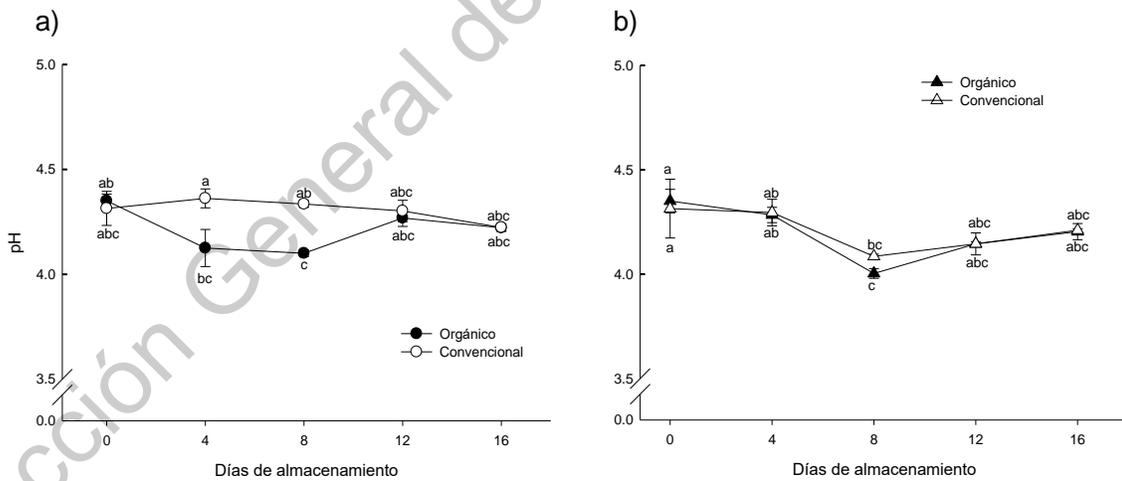


Figura 30. Cambios en el pH de tomate orgánico y convencional durante su almacenamiento a 12°C a) y su transferencia a 20°C por 72 h b).

Respecto al pH, al término del tiempo de almacenamiento los tomates de ambos sistemas de cultivo presentaron valores de 4.22 (Figura 30a). Dicho valor también se

encuentra dentro de los rangos de calidad reportados para el tomate (Beckles, 2012) y resumidos en el Cuadro 6.

Al contener mayor acidez, se esperaba que tomate convencional presentara menor pH que el tomate orgánico. Sin embargo, en el almacenamiento a 12°C se encontró un comportamiento contrario donde el pH del tomate convencional fue mayor. Estas diferencias fueron significativas en los días 8 y 12 de almacenamiento (Figura 30a).

De acuerdo con la literatura, los principales compuestos que contribuyen a la capacidad amortiguadora del tomate son el ácido cítrico, seguido del ácido málico, fosfato, ácido glutámico y ácido aspártico (Paulson y col., 1974). También, el contenido de aminoácidos y proteínas puede influir en la actividad amortiguadora del tomate gracias a sus propiedades anfóteras, pero su aporte es mucho menor (Paulson y col., 1974; Turza y col., 1986). Se ha reportado que a medida que aumenta la concentración de fosfato, los iones hidrogeno disminuyen, proporcionando un pH más alto (Mahakun y col., 1979; Paulson y col., 1974). Por ello, se puede inferir que posiblemente el tomate convencional, que su fertilización es a través de sales minerales, contiene mayor cantidad de fosfatos en comparación de los orgánicos lo cual causa que tenga un pH más elevado, aunque tenga un mayor contenido de acidez.

En las transferencias a 20°C también se encontró dicho efecto amortiguador, pero no se presentaron diferencias significativas entre ambos sistemas de cultivo (Figura 30b). Es posible que los componentes con capacidad reguladora de los tomates convencionales hayan disminuido durante el almacenamiento a 20°C

5.3 Cambios en los componentes nutricionales, vitamina C, licopeno y capacidad antioxidante

De acuerdo con el análisis de varianza general (Cuadro 14), en el almacenamiento a 12°C y en las transferencias 20°C el día fue el único factor que influyó en los componentes nutricionales del tomate. También, en el almacenamiento a 20°C solo se presentó interacción significativa en la capacidad antioxidante (ensayo DPPH).

Cuadro 14 Significancia estadística del efecto del sistema de cultivo, día de almacenamiento y su interacción (valores del cuadrado medio del error del análisis de varianza) en el contenido de vitamina C, licopeno y su capacidad antioxidante de tomate orgánico y convencional almacenados a diferentes condiciones.

Componentes nutricionales	Fuentes de variación					
	12°C			Transferencias a 20°C		
	Sistema de cultivo	Día	Interacción	Sistema de cultivo	Día	Interacción
Vitamina C	0.03 ^{ns}	9.00 ^{**}	1.00 ^{ns}	0.33 ^{ns}	3.53 ^{ns}	3.73 ^{ns}
Licopeno	0.07 ^{ns}	45.40 ^{**}	1.10 ^{ns}	1.28 ^{ns}	42.60 ^{**}	0.62 ^{ns}
ABTS	0.14 ^{ns}	9.34 ^{**}	0.27 ^{ns}	2.06 ^{ns}	5.07 ^{**}	2.20 ^{ns}
DPPH	0.55 ^{ns}	9.29 ^{**}	2.78 ^{ns}	1.34 ^{ns}	5.09 ^{**}	3.76 [*]

n = 3, * p < 0.01, ** p < 0.001, ns = no significativo.

De acuerdo con los resultados, en el almacenamiento a 12°C y transferencias a 20°C, el sistema de cultivo no influyó en el contenido de vitamina C, licopeno y capacidad antioxidante de los tomates. Este comportamiento no concuerda con lo reportado en la literatura anteriormente. Esto podría deberse a que las muestras utilizadas para realizar estos trabajos fueron tomates de racimo en los que los tomates de referencia fueron aquellos del estado de madurez 3 y no el estado 6.

Actualmente se encuentran disponibles varios estudios donde se ha reportado que el sistema de cultivo influye de manera importante en el contenido de componentes nutricionales del tomate. Las diferencias encontradas se atribuyen principalmente a la baja biodisponibilidad del nitrógeno en los cultivos orgánicos y la gran biodisponibilidad del mismo en los cultivos convencionales (Chassy y col., 2006; Hallmann y col., 2007; Hallmann y col., 2012; Oliveira y col., 2013; Uçurum y col., 2019).

La limitada disponibilidad del nitrógeno puede generar estrés oxidativo en el fruto causando un aumento en la síntesis de componentes antioxidantes como la vitamina C, compuestos fenólicos y flavonoides (Chassy y col., 2006; Mitchell y col., 2007; Oliveira y col., 2013; Uçurum y col., 2019; Vinha y col., 2014). En los tomates

orgánicos se ha reportado un aumento de vitamina C de hasta 30% en comparación con los tomates convencionales (Chassy y col., 2006; Hallmann y col., 2007; Hallmann y col., 2012; Oliveira y col., 2013; Uçurum y col., 2019).

También, el uso de nitrógeno altamente biodisponible en los cultivos convencionales conduce a un crecimiento excesivo del área foliar de la planta provocando un mayor sombreado del fruto y dando como resultado la reducción de la síntesis de vitamina C (Chassy y col., 2006; Dumas y col., 2003; Hallmann y col., 2007). Además, una gran concentración de este macroelemento da como resultado una mayor síntesis de componentes proteicos y proteínas, lo que inhibe la síntesis de compuestos a base de carbono, a los cuales la vitamina C pertenece (Dumas y col., 2003; Hallmann y col., 2012).

Además, como consecuencia del aumento de la síntesis de compuestos antioxidantes también se ha reportado que la actividad antioxidante total del tomate aumenta (Vinha y col., 2014). Sin embargo, la correlación entre compuestos nutricionales y capacidad antioxidante no siempre es significativa (Oliveira y col., 2013).

En el caso del contenido de licopeno el efecto del sistema de cultivo aún no es claro, ya que se encuentran disponibles estudios con resultados contradictorios. Algunos autores han encontrado que los tomates convencionales contienen mayor contenido de licopeno (Chassy y col., 2006; Hallmann y col., 2007; Uçurum y col., 2019), otros que los orgánicos (Vinha y col., 2014) y algunos otros que el efecto del sistema de cultivo depende de la variedad del tomate (Hallmann y col., 2012; Kapoulas 2011).

Hallmann y col. (2007) atribuyen la disminución de licopeno en frutos orgánicos al tipo de fertilizantes que son utilizados, los cuales, a menudo, cuentan con deficiencia de azufre lo que puede inhibir la biosíntesis del licopeno en los tomates. Por otro lado, Hallmann y col. (2012) asocian la gran disponibilidad del nitrógeno en la fertilización convencional con el incremento de licopeno, ya que el nitrógeno es el elemento principal que forma la acetil-CoA; metabolito precursor que juega un papel importante en la síntesis de pigmentos carotenoides y facilita la conversión de β -

caroteno en licopeno. Este último comportamiento también se ha visto reflejado en estudios donde se evalúa el efecto de diversas concentraciones de nitrógeno en el contenido de licopeno del tomate, en dichos estudios a mayor concentración de nitrógeno se favorece la síntesis de licopeno (Hernández y col., 2020; Montagu y col., 1990; Stefanelli y col., 2010).

Vinha y col. (2014) indicaron que tomates orgánicos cv 'Redondo' maduros presentaron mayor concentración de licopeno respecto de los tomates orgánicos, asociaron este comportamiento a una mayor síntesis de este antioxidante como mecanismo de defensa contra el estrés que puede llegar a desarrollar el tomate debido al tipo de fertilizante utilizado en el sistema orgánico, aunque se necesitan más estudios para sustentar dicha hipótesis.

Al no presentar ninguno de los comportamientos anteriormente reportados se puede inferir que los tomates orgánicos no presentaron alteración suficiente en su estado oxidativo para aumentar o decrecer la síntesis de estos antioxidantes. El efecto del sistema de cultivo en los componentes nutricionales del tomate se muestra en la Cuadro 15.

Cuadro 15. Comparación de medias del contenido de licopeno, vitamina C y capacidad antioxidante de tomate producido en sistema orgánico y convencional, almacenados a 12°C y sus transferencias a 20°C.

Componentes nutricionales	12°C		Transferencias a 20°C	
	Sistema de cultivo		Sistema de cultivo	
	Orgánico	Convencional	Orgánico	Convencional
Lycopeno (mg 100 g ⁻¹ TF)	6.68 ^a	6.34 ^a	12.99 ^a	14.34 ^a
Vitamina C (mg 100 g ⁻¹ TF)	27.43 ^a	26.14 ^a	25.18 ^a	26.05 ^a
ABTS (μmol trolox 100 g ⁻¹ TF)	234.66 ^a	236.65 ^a	231.28 ^a	242.89 ^a
DPPH (μmol trolox 100 g ⁻¹ TF)	498.74 ^a	511.07 ^a	492.33 ^a	507.26 ^a

n = 3, TF = tejido fresco.

En cuanto al efecto del tiempo de almacenamiento, el contenido de vitamina C y licopeno aumentaron gradualmente (Figura 31 y 32). Este comportamiento es ampliamente conocido en el tomate (García y col., 2011; Gautier y col., 2008; Huu y col., 2010).

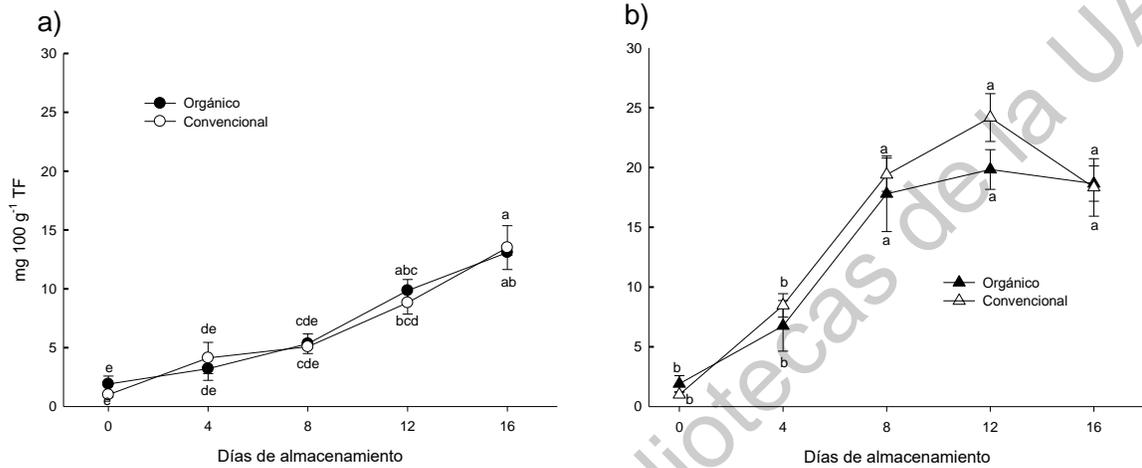


Figura 31. Cambios en el contenido de licopeno de tomate orgánico y convencional durante su almacenamiento a 12°C a) y su transferencia a 20°C por 72 h b).

En el almacenamiento a 12°C, el contenido de licopeno en el tomate orgánico y convencional se encontraron diferencias significativas hasta el día 12 de almacenamiento. En el tomate orgánico no se presentaron diferencias significativas después de este periodo mientras que en el convencional se volvió a incrementar en el día 16 de almacenamiento. (Figura 31a). En el caso de las transferencias a 20°C, el aumento de licopeno se presentó más rápido. En ambos sistemas de cultivo, se presentaron diferencias significativas desde el día 4 de almacenamiento y después permaneció constante (Figura 31b).

El aumento del licopeno a lo largo de la vida de anaquel se atribuye al aumento del catabolismo de carbohidratos durante la maduración, el cual, proporciona los sustratos necesarios (Acetil-coA) para la síntesis de carotenoides, principales precursores del licopeno (Taber y col., 2020).

Al término de la vida de anaquel, el contenido de licopeno aumentó 8 veces su contenido inicial obteniendo un total de 13.08 ± 0.40 y 13.50 ± 3.23 mg 100 g^{-1} TF en el tomate orgánico y convencional; respectivamente. Los resultados obtenidos fueron mayores a lo reportado por algunos autores (Hallmann y col., 2007; Hallmann y col., 2012; Kapoulas y col., 2011; Vinha y col., 2014). Estas diferencias pueden atribuirse a la muestra utilizada, ya que en dichos estudios se utilizó una fracción del fruto compuesta por pulpa, piel y semillas del tomate, mientras que en el presente estudio se evaluó solamente en la piel del tomate ya que es la fracción del fruto que contiene mayor concentración de licopeno (Vinha y col., 2014). Es importante señalar, que estos autores analizaron muestras de frutos maduros, pero no indicaron el estado de color analizado, suponemos que las muestras fueron del estado seis y que probablemente a esto se deban las diferencias de comportamiento observadas en este trabajo con respecto a lo obtenido por dichos autores.

Respecto al contenido de vitamina C, este fue aumentando ligeramente durante el almacenamiento (Figura 32). No obstante, en el almacenamiento a 12°C , el tomate orgánico no presentó cambios significativos entre los días de almacenamiento mientras que el convencional aumentó su contenido significativamente el día 16 de almacenamiento (Figura 32a). El aumento del contenido de vitamina C se podría deber al incremento de la degradación de la pectina de la pared celular del tomate durante la maduración, dando lugar a sustrato abundante (D-galacturonato) para la síntesis del ascorbato (Di Matteo y col., 2010; Fenech y col., 2019).

Cuando los tomates de ambos sistemas de cultivo alcanzaron la madurez comercial (estado 6), el tomate orgánico alcanzó mayores contenidos de vitamina C (35.94 ± 3.85 mg 100 g^{-1} TF), mientras que en el convencional fue de 31.70 ± 4.78 mg 100 g^{-1} TF. Dichos resultados concuerdan con lo reportado por Chassy y col., (2006); y Oliveira y col., (2013). No obstante, durante las transferencias de 12 a 20°C (Figura 32b), los contenidos de vitamina C fueron mayores en los frutos del sistema orgánico hasta la transferencia del día 4; después de ese periodo, el comportamiento se invirtió y los tomates convencionales mostraron un mayor contenido indicando con ello que durante el periodo de comercialización los tomates convencionales (cosechados en

estado de madurez 3 y madurados hasta la etapa 6) son capaces de generar mayores contenidos de vitamina C. Este comportamiento no se ha reportado previamente y muestra que, en tomates de racimo, debemos encontrar un amplio espectro de contenidos de este compuesto de acuerdo con su estado de madurez en cada tomate de la cosecha y del sistema de cultivo.

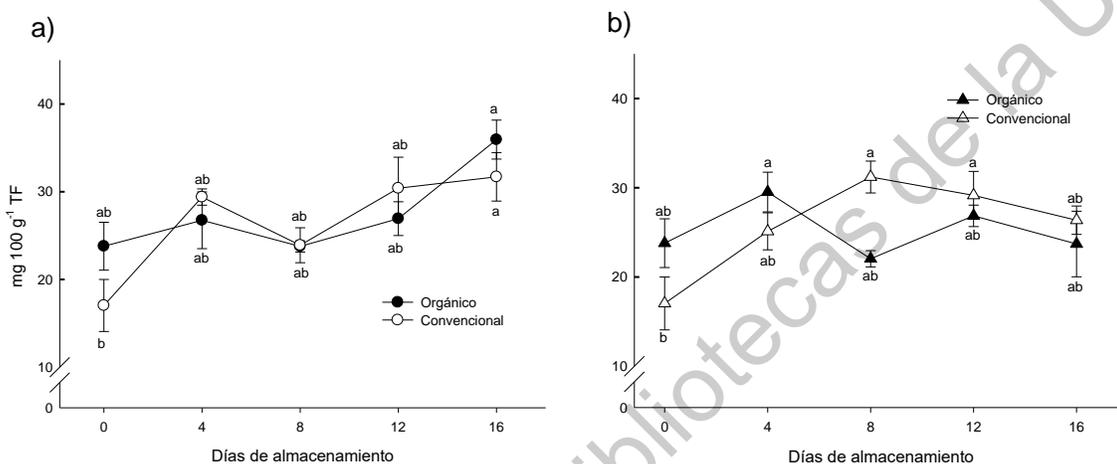


Figura 32. Cambios en el contenido de vitamina C de tomate orgánico y convencional durante su almacenamiento a 12°C a) y su transferencia a 20°C por 72 h b).

En cuanto a la capacidad antioxidante registrada mediante los ensayos (DPPH y ABTS), no se observaron tendencias definidas durante el almacenamiento a 12°C y en las transferencias a 20°C (Figura 33 y 35).

En el almacenamiento a 12°C (Figura 33a), en el ensayo DPPH el tomate orgánico presentó diferencias significativas el día 4 de almacenamiento. El tomate convencional, por otro lado, presentó diferencias significativas el día 4 y 16 de almacenamiento. En el caso de las transferencias a 20°C (Figura 33b) el tomate orgánico presentó diferencias significativas nuevamente el día 4 de almacenamiento mientras que el convencional el día 12 de almacenamiento.

Cuando el tomate alcanzó la madurez comercial (etapa 6), la capacidad antioxidante determinada por el ensayo DPPH para los tomates orgánicos y convencionales fue de 504.84 ± 17.18 y 561.71 ± 50.94 μmol de trolox 100 g^{-1} TF respectivamente. No

existe en la literatura datos de los cambios de la capacidad antioxidante durante el almacenamiento en tomates de racimo cuyos estados de madurez son variables al momento de la cosecha.

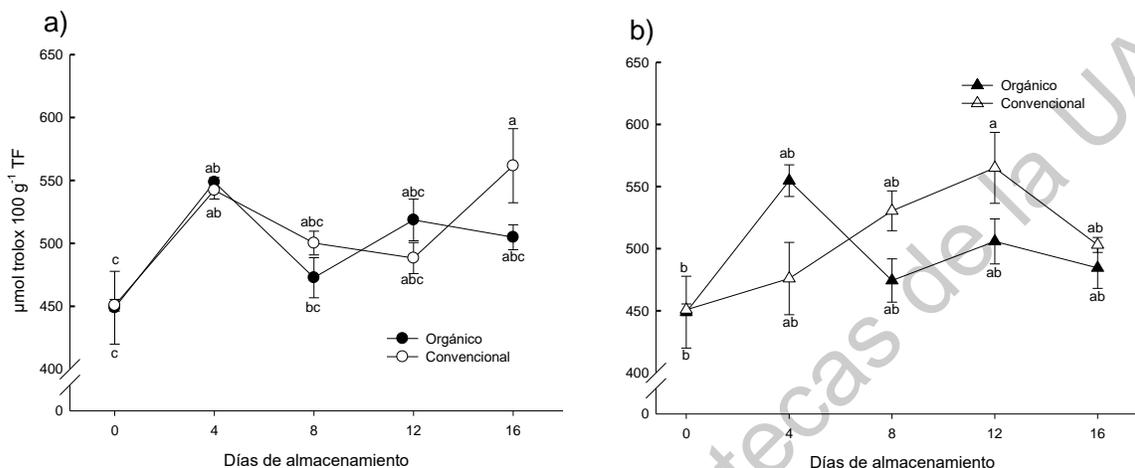


Figura 33. Cambios en la capacidad antioxidante de tomate orgánico y convencional (por DPPH) durante su almacenamiento a 12°C a) y su transferencia a 20°C por 72 h b).

En el ensayo de capacidad antioxidante por el método ABTS, señaló que, en el almacenamiento a 12°C, el tomate orgánico y convencional presentaron diferencias significativas entre los días de almacenamiento hasta el día 16 (Figura 34a). En el caso de las transferencias a 20°C, el tomate orgánico presentó diferencias significativas el día 4 de almacenamiento, mientras que el convencional hasta el día 12 (Figura 34b).

Cuando los tomates alcanzaron la madurez comercial (etapa 6), se obtuvieron valores de 256.41 ± 5.90 y $263.24 \pm 22.72 \mu\text{mol de trolox } 100 \text{ g}^{-1} \text{ TF}$ para el tomate orgánico y convencional, respectivamente. Estos resultados concuerdan con lo reportado en la literatura (Chen y col., 2014).

De acuerdo con la capacidad antioxidante obtenida en ambos ensayos, en el ensayo DPPH se obtuvo mayor capacidad antioxidante que en el ensayo ABTS (Cuadro 13), tal como ya se ha reportado anteriormente (Zushi y col., 2015). En el almacenamiento

a 12°C, en el ensayo DPPH se obtuvieron valores de entre 511.7 - 498.74 $\mu\text{mol trolox } 100 \text{ g}^{-1} \text{ TF}$ mientras que en ABTS se obtuvieron valores de 236.65 - 234.66 $\mu\text{mol trolox } 100 \text{ g}^{-1} \text{ TF}$. Dicha diferencia se puede atribuir a las características químicas de los radicales utilizados en cada ensayo.

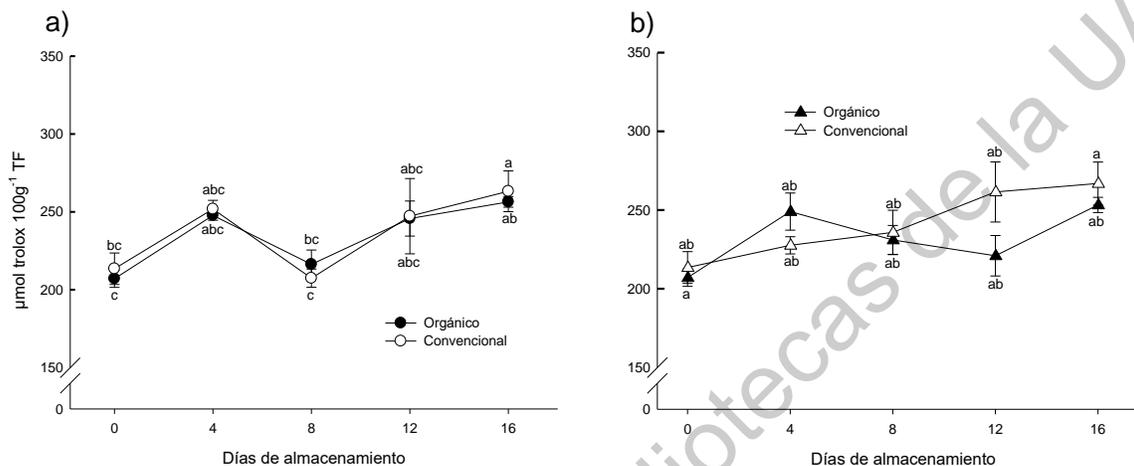


Figura 34. Cambios en la capacidad antioxidante de tomate orgánico y convencional (por ABTS) durante su almacenamiento a 12°C a) y su transferencia a 20°C por 72 h b).

El radical catiónico ABTS es soluble en medios orgánicos y acuosos en contraste con el radical DPPH, que se disuelve solo en medio orgánico (Bibi y col., 2020). El ensayo ABTS puede, por tanto, utilizarse en muestras tanto lipofílicas como hidrofílicas mientras que el DPPH en muestras lipofílicas solamente (Bibi y col., 2020). Es por ello que muestras que contienen compuestos antioxidantes con características hidrofílicas (vitamina C, ácidos fenólicos y flavonoides) y lipofílicas (licopeno) como el tomate tienen mayor afinidad con el radical ABTS, es decir, se necesita menor concentración de estos componentes para generar un decremento del 50% de dicho radical (Nunes y col., 2012), tal como se mostró en el presente estudio (Cuadro 15). De hecho, el ensayo ABTS presentó correlación positiva con el contenido de vitamina C y licopeno, confirmando el supuesto anterior (Cuadro 18).

5.4 Cambios en las actividades de enzimas del sistema antioxidante

El efecto general del sistema de cultivo y los días de almacenamiento, así como la interacción de ambos factores para cada una de las condiciones de almacenamiento se resume en el Cuadro 16; en el almacenamiento a 12°C el sistema de cultivo, el día y la interacción entre ambos factores tuvieron efectos significativos en la actividad de las enzimas antioxidantes catalasa (CAT) y súperoxido dismutasa (SOD). En las muestras transferidas a 20°C, la actividad de la SOD fue influida significativamente por ambos factores de estudio y la interacción entre ambos factores. La actividad de la CAT no presentó cambios significativos debidos al sistema de cultivo, pero si al tiempo de almacenamiento mientras que la interacción entre ambos factores no fue significativa.

Cuadro 16. Significancia estadística del efecto del sistemas de cultivo, día de almacenamiento y su interacción (cuadrados medio del error del análisis de varianza) en la actividad de enzimas del sistema antioxidante de tomate.

Enzimas antioxidantes	Fuente de variación					
	12°C			Transferencias a 20°C		
	Sistema de cultivo	Día	Interacción	Sistema de cultivo	Día	Interacción
SOD	64.30**	468.42**	41.42**	200.64**	208.26**	24.24**
CAT	5.96**	28.18**	7.92**	0.15 ^{ns}	10.50**	1.13 ^{ns}

n = 3, * p < 0.01, ** p < 0.001, ns = no significativo.

La comparación global de medias de las actividades enzimáticas SOD y CAT durante el almacenamiento a 12°C, fue significativamente mayor en los tomates orgánicos con un 12% y 14% mayores que las medias calculadas para los tomates convencionales (Cuadro 17). Durante las transferencias a 20°C, la actividad de la SOD de los tomates orgánicos fue mayor en un 42 % mientras que la actividad de la enzima CAT no presentó diferencias significativas entre ambos sistemas de cultivo. Estos resultados parecen indicar que los tomates orgánicos están sujetos a un mayor estrés oxidativo en comparación a los tomates convencionales. Este comportamiento concuerda con lo reportado por Oliveira y col. (2013) para tomates orgánicos y convencionales cultivados a cielo abierto donde la actividad de la enzima SOD fue

notablemente mayor en los tomates orgánicos verde maduros y maduros en una proporción 2.5 a 5.5 veces la registrada en los tomates convencionales en dichos estados de madurez respectivamente. Aunque este trabajo concuerda con lo encontrado por dichos autores, los niveles de incremento fueron notablemente menores (12 y 42%) en el almacenamiento a 12°C y sus transferencias a 20°C respectivamente. Es posible que bajo cielo abierto el cultivo este sujeto a mayor estrés ambiental que en un invernadero.

Cuadro 17. Comparación de medias del efecto del sistema de cultivo y de la condición de almacenamiento en las actividades de enzimas del sistema antioxidante del tomate.

Enzimas antioxidantes	12°C		Transferencias a 20°C	
	Orgánico	Convencional	Orgánico	Convencional
SOD	18.36 ^a	16.38 ^b	25.45 ^b	36.37 ^a
CAT	64.84 ^a	57.02 ^b	79.23 ^a	80.88 ^a

n = 3

Oliveira y col. (2013) atribuyeron el aumento de la actividad de la enzima SOD al incremento de ROS, particularmente H₂O₂, gracias al estrés oxidativo causado por la baja biodisponibilidad de nitrógeno en los cultivos orgánicos.

Como se mencionó anteriormente, debido a las características de la fuente de nitrógeno utilizado en la agricultura orgánica es común que los cultivos orgánicos tengan limitado suministro de este nutriente (Bénard y col., 2009; Hallmann y col., 2012; Hernández y col., 2020).

La deficiencia de nitrógeno puede causar un decremento en la tasa de fijación del CO₂ lo que afecta considerablemente la fotosíntesis induciendo estrés oxidativo en la planta (Corine y col., 2003; Zhang y col., 2017). Esto ocurre debido a que el nitrógeno, al ser un elemento fundamental para la síntesis de ácidos nucleicos, aminoácidos, proteínas, fosfolípidos y muchos metabolitos secundarios, tiene un papel crítico en el crecimiento de las plantas, al ser parte de la de síntesis de todas

las enzimas necesarias para el metabolismo energético (fotosíntesis y respiración) y forma parte de la estructura química de la clorofila (Corine y col., 2003; Sung y col., 2015; Zhang y col., 2017).

Es bien conocido que el estrés oxidativo induce mayor actividad de enzimas y compuestos antioxidantes como mecanismo de defensa contra las ROS. Sin embargo, en el estudio realizado por Oliveria (2013) solo se incrementó la actividad de SOD y no la de CAT, lo que incrementó la concentración H_2O_2 en los tomates orgánicos. También estos autores encontraron alto grado de peroxidación de lípidos en los tomates orgánicos, considerado indicador de estrés oxidativo (Zhang y col., 2017), así como, mayor actividad de la enzima APX y mayor concentración de vitamina C confirmando así dicha hipótesis. Dicho comportamiento también se presentó en el presente estudio (Cuadro 15). No obstante, la concentración de vitamina C no fue diferente entre sistemas (Cuadro 13). Por lo que se puede concluir que el sistema de cultivo influyó en la actividad de enzimas antioxidantes del tomate; sin embargo, el estrés oxidativo no fue suficientemente para inducir mayor síntesis de compuestos antioxidantes.

El análisis de los cambios en las actividades durante el periodo de almacenamiento puede señalar en qué periodo de tiempo se presentaron las diferencias en las actividades de estas enzimas. Durante el almacenamiento a $12^{\circ}C$ la actividad de SOD en el tomate orgánico y convencional aumentaron de manera gradual; no obstante, después del día 8 la actividad SOD se hace mayor en el tomate orgánico (Figura 35a). Para los tomates transferidos de 12 a $20^{\circ}C$, se intercambió la tendencia siendo los tomates convencionales los que presentaron mayor actividad de la SOD, esto se observa desde el día 4 de almacenamiento (Figura 35b). Lo anterior parece indicar que el sistema antioxidante del tomate orgánico se ve afectado negativamente debido a cambios de temperatura durante el almacenamiento, desencadenando entonces mayor estrés oxidativo en el fruto por la acumulación de ROS por no contar con un sistema antioxidante eficiente.

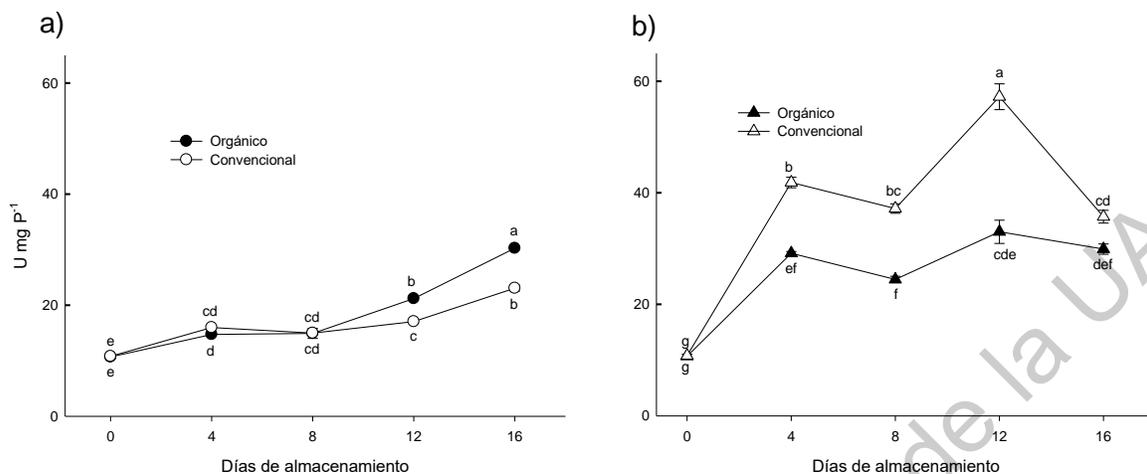


Figura 35. Cambios en la actividad de la enzima superóxido dismutasa (SOD) de tomate orgánico y convencional durante su almacenamiento a 12°C a) y su transferencia a 20°C por 72 h b).

Por otro lado, la enzima CAT no presentó tendencias claras durante el almacenamiento. En el almacenamiento a 12°C la actividad de la enzima CAT del tomate orgánico disminuyó significativamente hasta el día 8, mientras que en el convencional la disminución se observó en el día 4, 8 y 16. En las transferencias a 20°C, no se presentaron diferencias significativas a excepción del día 16, donde aumentó significativamente (Figura 36a y b).

El inicio de la maduración da como resultado cambios rápidos en los componentes celulares, un aumento del proceso catabólico y el inicio de la senescencia (Mondal y col., 2004; Zushi y col., 2012). La maduración o senescencia de los frutos es un fenómeno oxidativo que requiere de la eliminación de ROS (especies reactivas de oxígeno) y H₂O₂ (Zushi y col., 2012). Durante las primeras etapas de maduración del fruto, el sistema antioxidante trabaja eficazmente, pero a medida que se madura el fruto hay una pérdida gradual de la capacidad de las enzimas antioxidantes para neutralizar los radicales libres produciendo daño oxidativo (Mondal y col., 2004). El comportamiento anterior concuerda con lo reportado por Zushi y col. (2012).

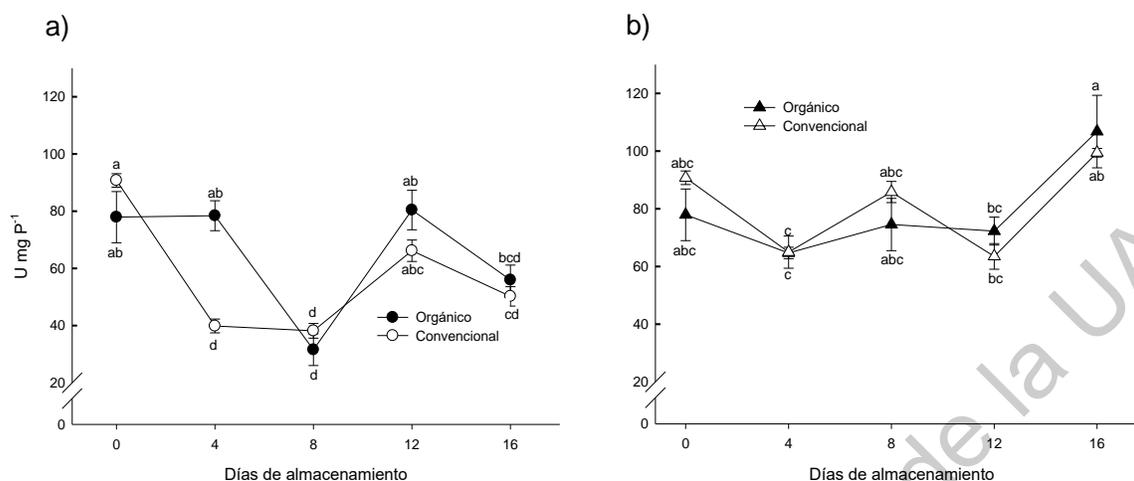


Figura 36. Cambios en la actividad de la enzima catalasa (CAT) de tomate orgánico y convencional durante su almacenamiento a 12°C a) y su transferencia a 20°C a 72 h b).

Por otro lado, la enzima SOD aumentó gradualmente (Figura 35). Durante el almacenamiento, es común un aumento de SOD en las primeras etapas de maduración y después tiende a disminuir cuando el fruto se encuentra completamente maduro (Lai y col., 2011; Li y col., 2020; Zushi y col., 2012). Este comportamiento puede deberse al aumento de la producción de ROS a lo largo de la maduración ya que la enzima SOD es la única encargada de la eliminación de los radicales súperoxido ($O_2^{\cdot-}$), que corresponde a la primera etapa del mecanismo de defensa contra las ROS. Además, la enzima SOD se correlacionó significativamente con la capacidad antioxidante (ABTS y DPPH), el contenido de vitamina C y licopeno (Cuadro 17). Esto es debido a que, como ya se había mencionado anteriormente, los ROS son segundos mensajeros que activan tanto la síntesis de compuestos antioxidantes como la actividad de las enzimas antioxidantes (Gerszberg y col., 2017; Zushi y col., 2012).

6. CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos en el presente trabajo permiten anotar las siguientes conclusiones:

La pérdida de peso determina el potencial de vida de anaquel de los frutos de tomate; porcentajes de pérdida de peso mayores de 5 a 6% muestran a los frutos no aptos para la comercialización. Los frutos de tomate orgánico superaron ese límite a los 16 días de almacenamiento, mientras que en los tomates convencionales se alcanzó a los 43 días aproximadamente de acuerdo al comportamiento de pérdida de peso que presentó.

Las características físicas de los frutos fueron diferentes entre ambos sistemas de cultivo. Los frutos del sistema orgánico mostraron una densidad relativa menor que los frutos de cultivo convencional. Esto provoca que en los procesos de empaque se deba de empacar un mayor número de tomates para cumplir con los requisitos de peso de las unidades de comercialización.

Los tomates convencionales presentaron mejores características de firmeza, luminosidad, ángulo de matiz, acidez titulable, SST, y azúcares reductores que los tomates orgánicos.

El cambio de color de los frutos expresado como el índice de color a^*/b^* fue más acelerado en los tomates orgánicos que en los convencionales, principalmente en el almacenamiento con transferencias de 12 a 20°C, lo cual parece indicar que el metabolismo de estos frutos es más acelerado, lo cual confirmaría su menor vida de anaquel.

Los menores contenidos de azúcares reductores y acidez en los frutos orgánicos parecen indicar que estos frutos tuvieron un menor aporte de fotosintatos durante su desarrollo y una mayor actividad metabólica durante su almacenamiento.

Los contenidos de vitamina C, licopeno y actividad antioxidante no mostraron diferencias significativas entre los sistemas de cultivo.

El sistema enzimático en contra del estrés oxidativo mostró una mayor actividad de la enzima superóxido dismutasa en los tomates orgánicos en el almacenamiento a 12°C, y un sistema enzimático deficiente en el almacenamiento con transferencias a 20°C demostrando que estos frutos se encuentran sometidos a un mayor estrés oxidativo que seguramente contribuye a una menor vida de anaquel.

El sistema de cultivo orgánico afecta de manera significativa la vida de anaquel del tomate, disminuye las características de calidad, aunque no modifica el contenido de compuestos nutricionales en los frutos.

Dirección General de Bibliotecas de la UJAQ

7. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Abbott J. Textural Quality Assessment for Fresh Fruits and Vegetables. En: Shahidi F, Spanier A, Ho C, Braggins T, Eds. Quality of Fresh and Processed Foods. Nueva York: Editorial Springer. **2004**:265–279.

Abera, T. Analysis of the effect of maturity stage on the postharvest biochemical quality characteristics of tomato (*Lycopersicon esculentum* Mill.) fruit. IRJPAS. **2013**; 3:180-186.

Ağçam E, Akyıldız A, Dündar B. Thermal Pasteurization and Microbial Inactivation of Fruit Juices. En: Tiwari B, Rajauria G, Eds. Fruit Juices. Cambridge: Editorial Academic Express, **2018**:309–339.

Aktas H, Bayındır D, Dilmaçunal T, and Koyuncu M. The Effects of Minerals, Ascorbic Acid, and Salicylic Acid on the Bunch Quality of Tomatoes (*Solanum lycopersicum*) at High and Low Temperatures. HortScience. **2012**; 47:1478-1483.

Argus. Understanding and Using VPD Argus Application Note. Argus Control Systems Ltd. Canadá: Argus Control Systems Ltd, **2009**. [Consultado 2020 octubre 13]. http://www.arguscontrols.com/resources/VPD_Application_Note.pdf

Ashenafi H, and Tura S. Shelf life and quality of tomato (*Lycopersicon esculentum* Mill.) fruits as affected by different Packaging Materials. Afr. J. Food Sci. **2018**; 12: 21–27.

Atkinson N, Dew T, Orfila C, Urwin P. Influence of Combined Biotic and Abiotic Stress on Nutritional Quality Parameters in Tomato (*Solanum lycopersicum*). J. Agric. Food Chem. **2011**; 59:9673–9682.

Bastías A, López-Climent M, Valcarcel M, Rosello S, Gómez-Cadenas A, Casaretto JA. Modulation of organic acids and sugar content in tomato fruits by an abscisic acid-regulated transcription factor. Physiol. Plant. **2011**; 141:215–226

Batu A. Determination of acceptable firmness and colour values of tomatoes. *J. Food Eng.* **2004**; 61:471–475.

Beckles D. Factors affecting the postharvest soluble solids and sugar content of tomato (*Solanum lycopersicum* L.) fruit. *Postharvest Biol. Technol.* **2012**; 63:129–140.

Bénard C, Gautier H, Bourgaud F, Grasselly D, Navez B, Caris-Veyrat C, Génard M. Effects of Low Nitrogen Supply on Tomato (*Solanum lycopersicum*) Fruit Yield and Quality with Special Emphasis on Sugars, Acids, Ascorbate, Carotenoids, and Phenolic Compounds. *J. Agric. Food. Chem.* **2009**; 57:4112–4123.

Bergougnoux V. The history of tomato: From domestication to biopharming. *Biotechnol. Adv.* **2014**; 32:170–189.

Bhandari S, Lee J. Ripening-Dependent Changes in Antioxidants, Color Attributes, and Antioxidant Activity of Seven Tomato (*Solanum lycopersicum* L.) Cultivars. *J. Anal. Methods Chem.* **2016**; 2016:1–13.

Bibi S, Montesano N, Albrizio D, Zengin S, Mahomoodally M. The Versatility of Antioxidant Assays in Food Science and Safety—Chemistry, Applications, Strengths, and Limitations. *Antioxidants.* **2020**; 9:709.

Blackwell D, Murray J, Lea P. Enzymes of photorespiratory carbon pathway. En: Bryant J, Ed. *Methods in plant biochemistry*. Cambridge: Editorial Academic Press. **1990**:1-414.

Brizzolara S, Manganaris A, Fotopoulos V, Watkins B, and Tonutti P. Primary Metabolism in Fresh Fruits During Storage. *Front. Plant Sci.* **2020**:11:80.

Bui H, Makhlof J, Ratti C. Postharvest Ripening Characterization of Greenhouse Tomatoes. *Int. J. Food Prop.* **2010**; 13:830–846.

Cantwell M. Optimum Procedures for Ripening Tomatoes. En: Thompson J, Crisosto C, Eds. *Fruit Ripening and Ethylene Management*. California: Editorial Postharvest Technology Center. **2010**; 1:106-116.

Caretto S, Parente A, Serio F, Santamaria P. Influence of Potassium and Genotype on Vitamin E Content and Reducing Sugar of Tomato Fruits. *HortScience*. **2008**; 43:2048-2051.

CEDRSSA Centro de Estudios para el Desarrollo Rural Sustentable y la Soberanía Alimentaria. "Productos orgánicos en México". Ciudad de México: Dirección de Estudios sobre Soberanía Alimentaria y Nueva Ruralidad. **2015**. [Consultado 2020 Abril 03]. Disponible en: <http://www.cedrssa.gob.mx/files/10/97Productos%20org%C3%A1nicos%20en%20M%C3%A9xico.pdf>

Ceron A, Vargas I, Aispuro E, Angel M. Oligoglucan Elicitor Effects During Plant Oxidative Stress. *Cell Metabolism - Cell Homeostasis and Stress Response*. **2012**; 1:1-9.

Cervilla L, Begoña B, Ríos J, Romero L, Ruiz J. Oxidative Stress and Antioxidants in Tomato (*Solanum lycopersicum*) Plants Subjected to Boron Toxicity. *Ann. Bot.* **2007**; 100: 747–756.

Chassy AW, Bui L, Renaud EN, Van Horn M, Mitchell AE. Three-Year Comparison of the Content of Antioxidant Microconstituents and Several Quality Characteristics in Organic and Conventionally Managed Tomatoes and Bell Peppers. *J. Agr. Food Chem.* **2006**; 54:8244–8252.

Chen G, Chen S, Zhao Y, Luo C, Li J, Gao Y. Total phenolic contents of 33 fruits and their antioxidant capacities before and after in vitro digestion. *Ind. Crop. Prod.* **2014**; 57:150–157.

Chilson D, and Nascimento N. Shelf life of vine tomato (*Lycopersicum esculentum*) stored at non-chilling temperature and different relative humidity levels. *FSHS*. **2011**; 124:246-255.

Codex alimentarius. Guidelines for the production, processing, labeling and marketing of organic produced products GL-32 - 1999. Italia: Comisión del Codex

Alimentarius, **1999**. [consultado 2019 octubre 04]. Disponible en: http://www.fao.org/docs/eims/upload/230124/CXG_032e.pdf

Corine C, Boogaard R, Marcelis L, Harbinson J, Lambers H. Contrasting effects of N and P deprivation on the regulation of photosynthesis in tomato plants in relation to feedback limitation. *J. Exp. Bot.* **2003**; 54:1957–1967.

Davis AR, Fish WW, Perkins P. A rapid spectrophotometric method for analyzing lycopene content in tomato and tomato products. *Postharvest Biol Tec.* **2003**; 28:425–430.

De Pascale S, Maggio A, Orsini F, Barbieri G. Cultivar, soil type, nitrogen source and irrigation regime as quality determinants of organically grown tomatoes. *Scientia Horticulturae.* **2016**; 199:88–94.

Di Matteo A, Sacco A, Anacleria M. The ascorbic acid content of tomato fruits is associated with the expression of genes involved in pectin degradation. *BMC Plant Biol.* **2010**; 10:163.

Díaz J, Rangel M, Mascorro A. Fruit size and stage of ripeness affect postharvest water loss in bell pepper fruit (*Capsicum annuum L.*). *J Sci Food Agric.* **2007**;87:68–73.

Dumas Y, Dadomo M, Di Lucca G, Grolier P. Effects of environmental factors and agricultural techniques on antioxidant content of tomatoes. *J. Sci. Food Agr.* **2003**; 83:369–382.

El Mashad H, Zhao L, Zhang R, Pan Z. Tomato. En: Pan Z, Zhang R, Zicari S, Eds. *Integrated Processing Technologies for Food and Agricultural By-Products*. Massachusetts: Editorial Academic Press. **2019**:107–131.

Eskin M, and Robinson DS. *Food Shelf Life Stability: Chemical, Biochemical, and Microbiological Changes*. Nueva York: Editorial CRC Press. **2001**:325.

Fagundes C, Moraes K, Pérez-Gago B, Palou L, Maraschin M, and Monteiro A. Effect of active modified atmosphere and cold storage on the postharvest quality of cherry tomatoes. *Postharvest Biol. Tec.* **2015**; 109:73–81.

Famiani F, Battistelli A, Moscatello S, Cruz J, Walker R. The organic acids that are accumulated in the flesh of fruits: occurrence, metabolism and factors affecting their contents - a review. *RCHSH.* **2015**; 2:97-128.

FAO Food and Agriculture Organization of the United Nations. Databases & Software: Crop information: Tomato. USA: Food and Agriculture Organization of the United Nations, **2020**. [Consultado 2020 octubre 13]. Disponible en: <http://www.fao.org/land-water/databases-and-software/crop-information/tomato/en/>

FAO Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. Manual para el mejoramiento del manejo poscosecha de frutas y hortalizas. Santiago: Oficina Regional de la FAO para América Latina y el Caribe, **1987**. [Consultado 2019 octubre 6]. Disponible en: <http://www.fao.org/3/x5055s/x5055S00.htm>

FAO Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. Organic Agriculture Glossary. Version 1.0. Roma: Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura, **2009**. [consultado 2019 octubre 04]. Disponible en: http://www.fao.org/fileadmin/templates/organicag/files/Glossary_on_Organic_Agriculture.pdf

FAOSTAT. Food and Agriculture Organization Corporate Statistical Database. Base de datos de producción mundial de alimentos de la FAO. USA: Food and Agriculture Organization of the United Nations, **2021**. [Consultado 2021 febrero 02]. Disponible en: <http://www.fao.org/faostat/en/#data>

Fenech M, Iraida A, Valpuesta V, Botella M. Vitamin C Content in Fruits: Biosynthesis and Regulation. *Front. Plant. Sci.* **2019**; 9:2006.

FIRA Fideicomisos Instituidos en Relación con la Agricultura. Panorama Agroalimentario: Tomate rojo 2017. Ciudad de México: Dirección de Investigación Económica y Sectorial. **2017**. [Consultado 2019 octubre 6]. Disponible en: <https://www.fira.gob.mx>

FIRA Fideicomisos Instituidos en Relación con la Agricultura. Panorama Agroalimentario: Tomate rojo 2019. Ciudad de México: Dirección de Investigación Económica y Sectorial, **2019**. [Consultado 2020 octubre 14]. Disponible en: <https://www.fira.gob.mx>

Frías M, Espino M, Dávila J, Gonzalez G, Ayala J, Molina F, Parra R, Orozco G. Preharvest nitrogen application affects quality and antioxidant status of two tomato cultivars. *Bragantia*. **2020**; 79:134-144.

García V, Navarro I, García J, Periago M. Antioxidant Bioactive Compounds in Selected Industrial Processing and Fresh Consumption Tomato Cultivars. *Food Bioproc Tech*. **2011**; 6:391–402.

Gautier H, Diakou V, Bénard C, Reich M, Buret M, Bourgaud F, Génard M. How Does Tomato Quality (Sugar, Acid, and Nutritional Quality) Vary with Ripening Stage, Temperature, and Irradiance?. *J. Agric. Food Chem*. **2008**; 56:1241–1250.

Gerszberg A, Hnatuszko K. Tomato tolerance to abiotic stress: a review of most often engineered target sequences. *Plant Growth Regul*. **2017**; 83:175–198.

Gholamnejad S, Haghghi M, Etemadi N, Shariatmadari H. Fortification of tomato with Ca and its effects on the fruit quality, calcium status and nutraceutical values of tomato in different $\text{NO}_3^-:\text{NH}_4^+$ ratios. *N. Z. J. Crop Hortic. Sci*. **2020**; 1:1–16.

Guilabert M, Wood J. USDA Certification of Food as Organic: An Investigation of Consumer Beliefs about the Health Benefits of Organic Food. *J. Food Prod. Market*. **2012**; 18:353–368.

Haleema B, Rab A, Hussain S. Effect of calcium, boron and zinc foliar application on growth and fruit production of tomato. *SJA*. **2018**; 34:19-30.

Hallmann E, Rembialkowska E, Gospodarstwa SG, and Ekologicznej ZZ. Estimation of fruits quality of selected tomato cultivars (*Lycopersicon esculentum* Mill) from organic and conventional cultivation with special consideration of bioactive compounds content. J. Agric. Eng. **2007**; 3:55-60.

Hallmann E. The influence of organic and conventional cultivation systems on the nutritional value and content of bioactive compounds in selected tomato types. J. Sci. Food Agric. **2012**; 92:2840–2848.

Harris K, Lavanya L. Influence of Foliar Application of Boron, Copper and their Combinations the quality of Tomato (*Lycopersicon esculentum* Mill.) Res. J. Agr. Forest. Sci. **2016**; 4:1-5.

Heeb A, Lundegårdh B, Ericsson T, Savage G. Nitrogen form affects yield and taste of tomatoes. Journal of the Science of Food and Agriculture. **2005**; 85:1405–1414.

Hernández V, Hellín P, Fenoll J, Flores P. Impact of nitrogen supply limitation on tomato fruit composition. Sci Hort. **2020**; 264:109-173.

Heydari M, Brook R, Jones D. The role of phosphorus sources on root diameter, root length and root dry matter of barley (*Hordeum vulgare* L.). J. Plant Nutr. 2018; 1:1–15.

Huang Y, Lu R, Chen K. Prediction of firmness parameters of tomatoes by portable visible and near-infrared spectroscopy. J. Food Eng. **2018**; 222:185–198.

Huu B, Ratti M. Postharvest Ripening Characterization of Greenhouse Tomatoes. Int. J. Food Prop. **2010**; 13:4:830-846.

IFOAM Federación Internacional de Movimientos de Agricultura Orgánica. Definition of organic agriculture. Alemania: Federación Internacional de Movimientos de Agricultura Orgánica, **2005**. [consultado 2019 octubre 04]. Disponible en: <https://www.ifoam.bio/en/organic-landmarks/definition-organic-agriculture>.

Isack M, Lyimo M. Effect of Postharvest Handling Practices on Physicochemical Composition of Tomato. *Int. J. Veg. Sci.* **2013**; 21:118–127.

Javanmardi J, and Kubota C. Variation of lycopene, antioxidant activity, total soluble solids and weight loss of tomato during postharvest storage. *Postharvest Biol and Technol.* **2006**; 41:151–155.

Jenkins J. The origin of the cultivated tomato. *Econ. Bot.* **1948**; 2:379–392.

Jones J, Kenig A, Vallejos E. Reduced state– variable tomato growth model. *Trans. ASAE.* **1999**; 42:255-265.

Kapoulas K, Ilic ZS, Durovka M, Trajkovic R, Milenkovic L. Effect of organic and conventional production practices on nutritional value and antioxidant activity of tomatoes. *Afr J Biotechnol.* **2011**; 10:15938-15945.

Kimura S, Sinha N. How to Grow Tomatoes. *Cold Spring Harbor Protocols.* **2008**; 12:5081.

Koleška I, Hasanagić D, Todorović V, Murtić S, Klokić I, Parađiković N, Kukavica B. Biostimulant prevents yield loss and reduces oxidative damage in tomato plants grown on reduced NPK nutrition. *J. Plant. Interact.* **2017**; 12:209–218.

Krishna R, Karkute S, Ansari W, Jaiswal D, Verma J, Singh M. Transgenic tomatoes for abiotic stress tolerance: status and way ahead. *Biotech.* **2019**; 9:143.

Kyriacou C, and Roupheal Y. Towards a new definition of quality for fresh fruits and vegetables. *Sci Hortic-Amsterdam.* **2018**; 234:463–469.

Lai T, Wang Y, Li B, Qin G, Tian S. Defense responses of tomato fruit to exogenous nitric oxide during postharvest storage. *Postharvest Biol Tec.* **2011**; 62:27–132.

Lee H, Yun Z. Consumers' perceptions of organic food attributes and cognitive and affective attitudes as determinants of their purchase intentions toward organic food. *Food Qual. Prefer.* **2015**; 39:259–267.

Li K. Physiology and Classification of Fruits. En: Nirmal K, Sinha S, Sidhu S, Wu M, Cano P, Eds. Handbook of Fruits and Fruit Processing. 2° Edición. Nueva Jersey: Editorial Wiley-Blackwell Publishing, **2012**:1–12.

Li Q., Xie, F., Zhao, Y., & Cao, J. Inhibitory effect of postharvest yeast mannan treatment on *Alternaria* rot of tomato fruit involving the enhancement of hemicellulose polysaccharides and antioxidant metabolism. *Sci Hort.* **2020**; 277:109798.

Li Y, Lu Y, Li L, Chu Z, Zhang H, Li H, Ouyang B. Impairment of hormone pathways results in a general disturbance of fruit primary metabolism in tomato. *Food Chem.* **2018**; 274:170-179.

Li Y, Sun Y, Liao S, Zou G, Zhao T, Chen Y, Zhang L. Effects of two slow-release nitrogen fertilizers and irrigation on yield, quality, and water-fertilizer productivity of greenhouse tomato. *Agric. Water Manag.* **2017**; 186:139–146.

Li Z, Wang Y. A multiscale finite element model for mechanical response of tomato fruits. *Postharvest Biol. Tec.* **2016**; 121:19–26.

Liu L, Shao Z, Zhang M, Wang, Q. Regulation of Carotenoid Metabolism in Tomato. *Molecular Plant.* **2015**; 8:28–39.

Lohr M. Carotenoids. En: Harris E, Ed. *The Chlamydomonas Sourcebook.* Cambridge: Editorial Academic Press. **2009**: 799–817.

Mahakun N, Leeper P, Burns E. Acid constituents of various tomato fruit types. *J. Food Sci.* **1979**; 44:1241–1244.

Majidi H, Minaei S, Almassi M, and Mostofi Y. Tomato quality in controlled atmosphere storage, modified atmosphere packaging and cold storage. *J. Food Sci. Technol.* **2012**; 51:2155–2161.

Maksimović J, Zivanović B. Quantification of the antioxidant activity in salt-stressed tissues. *Methods Mol Biol.* **2012**; 913:237-50.

Martí R, Roselló S, and Cebolla-Cornejo J. Tomato as a Source of Carotenoids and Polyphenols Targeted to Cancer Prevention. *Cancers*. **2016**; 86:58.

Mccollum T, Chellemi O, Roskopf E, Church G, Plotto A. Postharvest quality of tomatoes produced in organic and conventional production systems. *Hort Science*. **2005**; 40:959.

McGuire, R. Reporting of Objective Color Measurements. *HortScience*. **1992**; 27:1254-1255.

Medina M, Roque E, Pineda B, Cañas L, Rodriguez M, Beltrán P, Gómez C. Early anther ablation triggers parthenocarpic fruit development in tomato. *Plant Biotechnol. J*. **2013**; 11:770–779.

Melfi M, Nardiello D, Cicco N, Candido V, and Centonze D. Simultaneous determination of water- and fat-soluble vitamins, lycopene and beta-carotene in tomato samples and pharmaceutical formulations: Double injection single run by reverse-phase liquid chromatography with UV detection. *J. Food. Compos. Anal*. **2018**; 70:9–17.

Migliori C, Di Cesare LF, Lo Scalzo R, Campanelli G, and Ferrari V. Effects of organic farming and genotype on alimentary and nutraceutical parameters in tomato fruits. *J Sci. Food Agr*. **2012**;92: 2833–2839.

Miller G. Use of dinitrosalicylic acid reagent for determination of reducing sugar. *Anal. Chem*. **1959**; 31:426-428.

Mitchell AE, Hong Y, Koh E, Barrett DM, Bryant DE, Denison FR, and Kaffka S. Ten-Year Comparison of the Influence of Organic and Conventional Crop Management Practices on the Content of Flavonoids in Tomatoes. *J. Agr. Food Chem*. **2007**; 55:6454-6159.

Mohamed S, and Tarek A. Effect of hydrogen peroxide (H₂O₂) treatment on physicochemical characteristics of tomato fruits during post-harvest storage. *AJCS*. **2019**; 13:798-802.

Mohammad Z, Young-Tack L, Mahmuda A, Choi I, Ho-Min K. Effect of fruit size on fruit quality, shelf life and microbial activity in cherry tomatoes. *AIMS Agriculture and Food*. **2019**;4:340-348.

Mohammadi K, Heidari G, Khalesro S, Sohrabi Y. Soil management, microorganisms, and organic matter interactions: A review. *Afr. J. Biotechnol.* **2011**; 10:19840-19849.

Mondal K, Sharma N, Malhotra S, Dhawan K, Singh R. Antioxidant Systems in Ripening Tomato Fruits. *Biol. Plantarum*. **2004**; 48:49-53.

Moneruzzaman K, Hossain A, Sani w, Saifuddin M. Effect of Stages of Maturity and Ripening Conditions on the Biochemical Characteristics of Tomato American. *Journal of Biochemistry and Biotechnology*. **2008**; 4:336-344.

Montagu K, Goh K. Effects of forms and rates of organic and inorganic nitrogen fertilisers on the yield and some quality indices of tomatoes (*Lycopersicon esculentum* Miller). *N. Z. J. Crop Hortic. Sci.* **1990**; 18:31–37.

Moschopoulou E, Moatsou G, Syrokou MK, Paramithiotis S, Drosinos E. Food quality changes during shelf life. En: Galanakis C, Ed. *Food Quality and Shelf Life*. Grecia: Editorial Academic press, **2019**:1–31.

Nagata M, and Yamashita I. Simple method for simultaneous determination of chlorophyll and carotenoids in tomato fruit. *J. Jpn. Soc. Food Sci. Technol.* **1992**; 39:925–928.

Naika S, Jeude J, Goffau M, Hilmi M, Van Dam B. Cultivation of tomato production, a processing and marketing. Netherlands: Editorial: Digigrafi. **2005**:9.

NCBI National Center for Biotechnology Information. NCBI taxonomy database: Tomato. Maryland: National Center for Biotechnology Information, **2020**. [Consultado 2020 octubre 13]. Disponible en: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/>

Nunes R, Anastácio A, Carvalho I. Antioxidant and Free Radical Scavenging Activities of Different Plant Parts from Two Erica Species. J. Food Qual. **2012**; 35:307–314.

Nyalala I., C. Okinda, L. Nyalala, N. Makange, Q. Chao, L. Chao, K. Yousaf, Kunjie Chen. Tomato volume and mass estimation using computer vision and machine learning algorithms: Cherry tomato model. J. of Food Engineering. 263: 288-298

OECD The Organisation for Economic Co-operation and Development. “Tomato (*Solanum lycopersicum*)”. En: Oshima R, Dagallier B, Eds. Safety Assessment of Transgenic Organisms in the Environment. Paris: Editorial OECD Publishing, **2017**:69-110.

Oliveira AB, Moura CF, Gomes E, Marco CA, Urban L, and Miranda MR. The Impact of Organic Farming on Quality of Tomatoes Is Associated to Increased Oxidative Stress during Fruit Development. PLoS ON Sainju E. **2013**; 8:1-6.

Oms G, Hertog M, Van de Poel B, Ampofo-Asiama J, Geeraerd A, and Nicolaï B. Metabolic characterization of tomato fruit during preharvest development, ripening, and postharvest shelf-life. Postharvest Biol. Tec. **2011**; 62:7–16.

Passam H, Karapanos I, Bebeli P, Sayvas D. A Review of Recent Research on Tomato Nutrition, Breeding and Post-Harvest Technology with Reference to Fruit Quality. EJBIO. **2007**; 1:1-21.

Paulsen E, Barrios S, Lema P. Ready-to-eat cherry tomatoes: Passive modified atmosphere packaging conditions for shelf lie extension. Food Packag. Shelf Life. **2019**; 22:100407.

Paulson K, Stevens M. Relationships among titratable acidity, pH and buffer composition of tomato fruits. J. Food Sci. **1974**; 39:354–357

Perkins P, Roberts W, Collins J. Lycopene Content Among Organically Produced Tomatoes. Int. J. Veg. Sci. **2007**; 12:93-106.

Piecznywek P, Nowacka M, Dadan M, Wiktor A, Rybak K, Witrowa D, Zdunek A. Postharvest Monitoring of Tomato Ripening Using the Dynamic Laser Speckle. Sensors in Agriculture and Forestry. **2018**; 18:1093.

Pieper JR, and Barrett, DM. Effects of organic and conventional production systems on quality and nutritional parameters of processing tomatoes. J. Sci. Food Agr. **2009**; 89:177–194.

Pott D, Osorio S, and Vallarino G. From Central to Specialized Metabolism: An Overview of Some Secondary Compounds Derived From the Primary Metabolism for Their Role in Conferring Nutritional and Organoleptic Characteristics to Fruit. Front Plant. Sci. **2019**; 10:835.

Prieto H, Souza J, Ventrela M, Milagres C, Carmo C, Cecon P, Clemente J, Garbin C. Leaf and Stem Anatomy of Cherry Tomato Under Calcium and Magnesium Deficiencies. Braz. Arch. Biol. Technol. **2020**; 63:e20180670.

PROFECO Procuraduría Federal del Consumidor. Alimentos orgánicos. Ciudad de México: Procuraduría Federal del Consumidor, **2018**. [Consultado 2019 octubre 6]. Disponible en: <https://www.gob.mx/profeco/documentos/alimentos-organicos?state=published>

Quinet M, Angosto T, Yuste-Lisbona J, Blanchard-Gros R, Bigot S, Martinez J, and Lutts S. Tomato Fruit Development and Metabolism. Front. Plant Sci. **2019**; 10:1554.

Radzevičius A, Karklelienė R, Viškelis P, Bobinas C, Bobinaitė R, and Sakalauskienė S. Tomato (*Lycopersicon esculentum* Mill.) fruit quality and physiological parameters at different ripening stages of Lithuanian cultivars. Agron. Res. **2009**; 7:712–718.

Razdan M K, Matto A K. Genetic Improvement of Solanaceous Crops Volume 2: Tomato. USA: Editorial: Science Publishers. **2006**:8.

Re R, Pellegrini N, Proteggente A, Pannala A, Yang M, Rice-Evans C. Antioxidant activity applying an improved ABTS radical cation decolorization assay. Free Radic. Biol. Med. **1999**; 26:1231–1237.

Riahi A., Ch. Hdider, M. Sanaa, N. Tarchoun, M. Ben Khedere, and I Guezal. Effect of conventional and organic production systems on the yield and quality of field tomato cultivars grown in Tunisia. *J. Sci. Food Agric.* **2009**; 89: 2275–2282

Rivera R, Carballo V, Cárdenas Y, Aguilar M, Siva R. Overview of carotenoids and beneficial effects on human health. En: Galanakis C. *Carotenoids: Properties, Processing and Applications*. Cambridge: Editorial Academic Press, **2020**:1–40.

Sabatino L, D'Anna F, Iapichino G, Moncada A, D'Anna E, De Pasquale C. Interactive Effects of Genotype and Molybdenum Supply on Yield and Overall Fruit Quality of Tomato. *Front. Plant Sci.* **2019**; 9:1-10.

SADER Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural. Reporte del Mercado de Tomate Rojo. Ciudad de México: Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural, **2019**. [Consultado 2020 Abril 03]. Disponible en: https://www.cima.aserca.gob.mx/work/models/cima/pdf/cadena/2019/Reporte_mercado_jitomate_130319.pdf

SAGARPA Secretaría de Agricultura, Ganadería, desarrollo rural, pesca y alimentación. Sistema de información agropecuaria de consulta (SIACON): Tomate. Ciudad de México: Secretaría de Agricultura, ganadería, desarrollo Rural, Pesca y Alimentación, **2005**. [Consultado 2020 Octubre 14]. Disponible en: <https://www.gob.mx/siap/documentos/siacon-ng-161430>

SAGARPA Secretaría de Agricultura, ganadería, desarrollo Rural, Pesca y Alimentación. Planeación Agrícola 2017-2030: Jitomate mexicano, México. Ciudad de México: Secretaría de Agricultura, ganadería, desarrollo Rural, Pesca y Alimentación, **2017**. [Consultado 2019 octubre 6]. Disponible en: <https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/257077/Potencial-Jitomate.pdf>

Sahin S, Gebologlu N, Karaman M. Interactive effect of calcium and boro non growth, quality and mineral contenido of tomato (*Solanum Lycopersicon L.*). *Fresenius Environ. Bull.* **2015**; 24: 1624-1628.

Sainju U, Dris R, Singh B. Mineral nutrition of tomato. *J. Food. Agric. Environ.* **2003**:1.

Salas E, Vicente A, Pinheiro A, Ballesteros L, Silva P, Rodríguez R, Rodríguez D. Application of edible nanolaminate coatings with antimicrobial extract of *Flourensia cernua* to extend the shelf-life of tomato (*Solanum lycopersicum L.*) fruit. *Postharvest Biol. Tec.* **2019**; 150:19–27.

Salehi B, Sharifi-Rad R, Sharopov F, Namiesnik J, Roointan A, Kamle M, Sharifi-Rad J. Beneficial Effects and Potential Risks Of Tomatoes Consumption For Human Health: An Overview. *Nutrition.* **2019**; 62:201-208.

Salunkhe D, Jadhav S, Yu D. Quality and nutritional composition of tomato fruit as influenced by certain biochemical and physiological changes. *Qual. Plant.* **1974**; 24: 85-113.

Salunkhe DS, and Kadam SS. Handbook of Vegetable Science and Technology: Production, Composition storage and processing. Nueva York: Editorial Marce Dekker, **1998**:189.

Segado P, Domínguez E, Heredia A. Ultrastructure of the Epidermal Cell Wall and Cuticle of Tomato Fruit (*Solanum lycopersicum L.*) during Development. *Plant Physiology.* **2015**; 170:935–946.

Shahnawaz M, Ahmed S, Hussain A, Akbar A, Khaskheli S. Quality characteristics of tomatoes (*Lycopersicon esculentum*) stored in various wrapping materials. *AJFST.* **2012**; 3:123-128.

Shamshiri R, Jones J, Thorp K, Ahmad D, Man H, Taheri S. Review of optimum temperature, humidity, and vapour pressure deficit for microclimate evaluation and control in greenhouse cultivation of tomato: a review. *Int. Agrophys,* **2018**; 32:287–302.

Shamshiri R. Measuring optimality degrees of microclimate parameters in protected cultivation of tomato under tropical climate condition. *Measurement.* **2017**; 106:236-244.

SIAP Servicio de Información Agroalimentaria y pesquera. Anuario Estadístico de la Producción Agrícola. Ciudad de México: Servicio de Información Agroalimentaria y pesquera, **2019**. [Consultado 2020 Diciembre 19]. Disponible en: <https://nube.siap.gob.mx/cierreagricola/>

SIAP Servicio de Información Agroalimentaria y pesquera. Atlas agroalimentario 2012-2018. Ciudad de México: Servicio de Información Agroalimentaria y pesquera, **2018**. [Consultado 2019 octubre 6]. Disponible en: https://nube.siap.gob.mx/gobmx_publicaciones_siap/pag/2018/Atlas-Agroalimentario-2018

SIAP Servicio de Información Agroalimentaria y pesquera. Producción y rendimientos de cultivos orgánicos. Ciudad de México: Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, **2019**. [Consultado 2020 octubre 14]. Disponible en: http://dgeiawf.semarnat.gob.mx:8080/ibi_apps/WFServlet?IBIF_ex=D2_AGRIGANO_2_04&IBIC_user=dgeia_mce&IBIC_pass=dgeia_mce&NOMBREANIO=*

SIAP Servicio de Información Agroalimentaria y pesquera. SIAP. Expectativas Agroalimentarias: Febrero 2020. Ciudad de México: Servicio de Información Agroalimentaria y pesquera, **2020**. [Consultado 2020 Abril 03]. Disponible en: https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/544844/EXPECTATIVAS_AGROALIMENTARIAS_FEBRERO_2020.pdf

Sinha NK, Hui YH, Evranuz ÖE, Siddiq M, Ahmed J. Handbook of Vegetables and Vegetable Processing. Singapore: Editorial Wiley-Blackwell, **2011**: 740.

Sinha S, Singha A, Faruquee M, Jiku M, Rahaman M, Alam M, Kader M. Post-harvest assessment of fruit quality and shelf life of two elite tomato varieties cultivated in Bangladesh. Doc. Bull. Natl. Res. Cent. **2019**;43:1-12.

Slimestad R, Verheul M. Review of flavonoids and other phenolics from fruits of different tomato (*Lycopersicon esculentum* Mill.) cultivars. Sci Food Agr. **2009**; 89:1255–1270.

Sood M, Kaul R, Singh A. Effect of Post Harvest Treatments on Changes in Sugar and Lycopene Content of Tomato (*Lycopersicon esculentum*). WJAS. **2011**; 7:613-616.

Sousa Gallagher MJ, and Mahajan PV. The stability and shelf life of fruit and vegetables. En: Kilcast D, Subramaniam P. Eds, Food and Beverage Stability and Shelf Life, Irlanda: Editorial Woodhead publishing, **2011**:641–656.

Steelheart C, Alegre M, Vera J, Senn M, Simontacchi M, Bartoli G, and Gergoff Grozeff G. Nitric oxide improves the effect of 1-methylcyclopropene extending the tomato (*Lycopersicum esculentum L.*) fruit postharvest life. Sci Horticulture-Amsterdam. **2019**; 255:193–201.

Stefanelli D, Goodwin I, Jones R. Minimal nitrogen and water use in horticulture: Effects on quality and content of selected nutrients. Food Res. Int. **2010**; 43:1833–1843.

Stertz, S. C., A. P. do Espírito Santo, C. Bona, R. J. Sossela de Freitas. Comparative morphological analysis of cherry tomato fruits from three cropping systems. Sci. Agric. (Piracicaba, Braz.) **2005**; 62(3): 296-298.

Sung J, Sonn Y, Lee Y, Kang S, Ha S, Krishnan B. Oh T. Compositional changes of selected amino acids, organic acids, and soluble sugars in the xylem sap of N, P, or K-deficient tomato plants. J. Soil Sci. Plant Nutr. **2015**; 178: 792–797.

Taber H, Perkins P, Li S, White W, Rodermel S, Xu Y. Enhancement of Tomato Fruit Lycopene by Potassium Is Cultivar Dependent, HortScience horts. **2020**; 43:159-165.

Tejacal I, León M, Damián M, Hernández R. Chilling in sapote mamey. (*Pouteria sapota* (Jacq.) H. E. Moore and Stearn). II. Changes in total phenols and enzymatic activity. Rev Fitotec Mex. **2005**; 28:25-32.

Tigist M, Workneh S, Woldetsadik K. Effects of variety on the quality of tomato stored under ambient conditions. Int J Food Sci Tech. **2013**; 50:477–486.

Turza P. Flavor of tomato and tomato products. Food Rev. Int. **1986**; 2:309–351.

Uçurum, ÖH, Variş S, Alpsoy HC, Keskin M. A comparative study on chemical composition of organic versus conventional fresh and frozen tomatoes. *J. Food Process Preserv.* **2019**; 43:1-11.

USDA United States Department of Agriculture. FoodData Central: Tomato - USDA Nutrient Database. United States: United States Department of Agriculture, **2019**. [Consultado 2020 Abril 16]. Disponible en: <https://fdc.nal.usda.gov/fdc-app.html#/food-details/170457/nutrients>

USDA United States Department of Agriculture. Tomato Grades and Standards. United States: United States Department of Agriculture, **1975**. [Consultado 2020 Abril 16]. Disponible en: https://www.ams.usda.gov/sites/default/files/media/Tomato_Visual_Aids%5B1%5D.pdf

USDA United States Department of Agriculture. Mexico Tomato Annual Protected Agriculture Production Expanding. Washington: USDA Foreign Agricultural Service, **2018**. [Consultado 2019 octubre 6]. Disponible en: https://gain.fas.usda.gov/Recent%20GAIN%20Publications/Tomato%20Annual_Mexico%20City_Mexico_5-30-2018.pdf

USDA. Departamento de Agricultura de los Estados Unidos. Coexistence Fact Sheets: Conventional Farming. Washington: Departamento de Agricultura de los Estados Unidos, **2015**. [consultado 2019 octubre 04]. Disponible en: <https://www.usda.gov/sites/default/files/documents/coexistence-conventionalfarming-factsheet.pdf>

Verheul M, Slimestad R, Tjøstheim I. From Producer to Consumer: Greenhouse Tomato Quality As Affected by Variety, Maturity Stage at Harvest, Transport Conditions, and Supermarket Storage. *J. Agric. Food. Chem.* **2015**; 63:5026–5034.

Vinha AF, Barreira SV, Costa AS, Alves RC, and Oliveira MP. Organic versus conventional tomatoes: Influence on physicochemical parameters, bioactive compounds and sensorial attributes. *Food Chem. Toxicol.* **2014**; 67:139–144.

Waheed K, Nawaz H, Hanif A, Rehman R. Tomato. Medicinal Plants of South Asia. J. Agri. Food Chem. **2020**:631–644.

Wang Y, Huang S, Liu R, Jin J. Effects of nitrogen application on flavor compounds of cherry tomato fruits. J. Soil Sci. Plant Nutr. **2007**; 170: 461–468. .

Woldemariam S, Lal S, Zeru D, Solomon M. Effect of Potassium Levels on Productivity and Fruit Quality of Tomato (*Lycopersicon esculentum* L.). J. Agric. Stud. **2018**; 6:104.

Zhang X, Xi B, Zhao Y, Wei Z, Li Y, Zhao X. [Characteristics of organic nitrogen mineralization in organic waste compost-amended soil]. Huan Jing Ke Xue. **2013**; 34:2448-55.

Zhang Y, Zhao G, Cheng P, Yan X, Li Y, Cheng D, and Shen W. Nitrite accumulation during storage of tomato fruit as prevented by hydrogen gas. Int J Food Properties. **2019**; 22:1425–1438.

Zhang Z, Lynch J, Zhang B, Wang Q. NPK deficiency modulates oxidative stress in plants. Plant Macronutrient Use Efficiency. **2017**; 1:245–265.

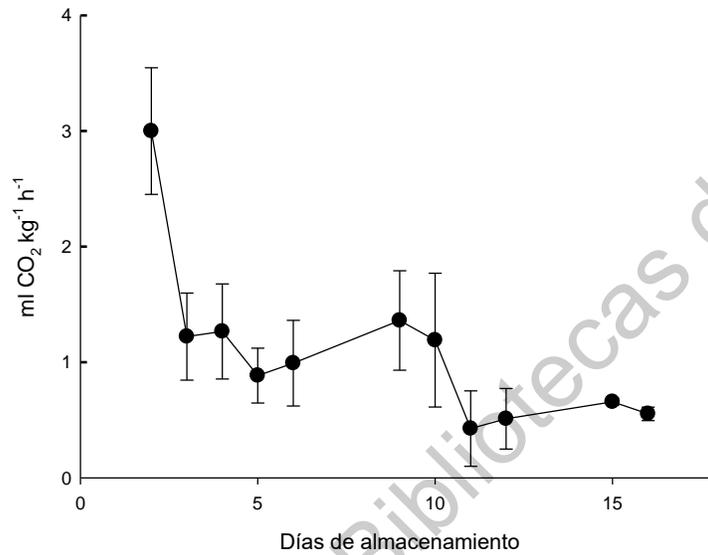
Zuo Z, Xue Q, Zhou J, Zhao D, Han J, Xiang H. Engineering *Haloferax mediterranei* as an Efficient Platform for High Level Production of Lycopene. Front. Microbiol. **2018**; 9:1-13.

Zushi K, Matsuzoe N. Comparative Analysis of Oxidative Parameters, Antioxidant Content, and Antioxidant Enzyme Activity during Fruit Ripening in Tomato Pericarp and Pulp. J. Jpn. Soc. Hortic. Sci. **2012**; 81:109–116.

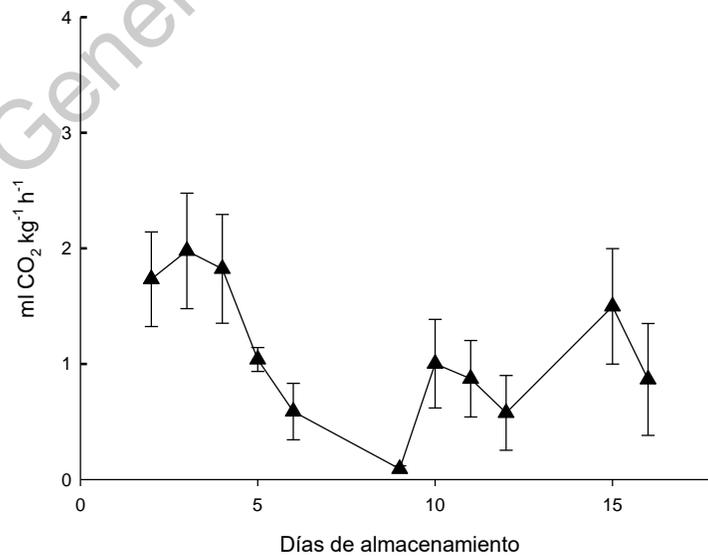
Zushi K, Matsuzoe N. Metabolic profile of organoleptic and health-promoting qualities in two tomato cultivars subjected to salt stress and their interactions using correlation network analysis. Sci Hort. **2015**; 184:8–17.

8. ANEXOS

ANEXO 1: Patrón de respiración de tomate convencional cv “Merlice” cultivado en invernadero



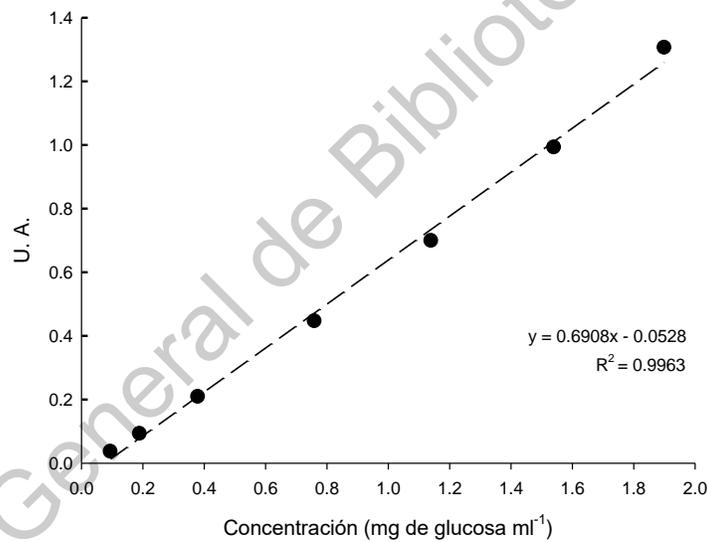
ANEXO 2: Patrón de respiración de tomate orgánico cv “Merlice” cultivado en invernadero.



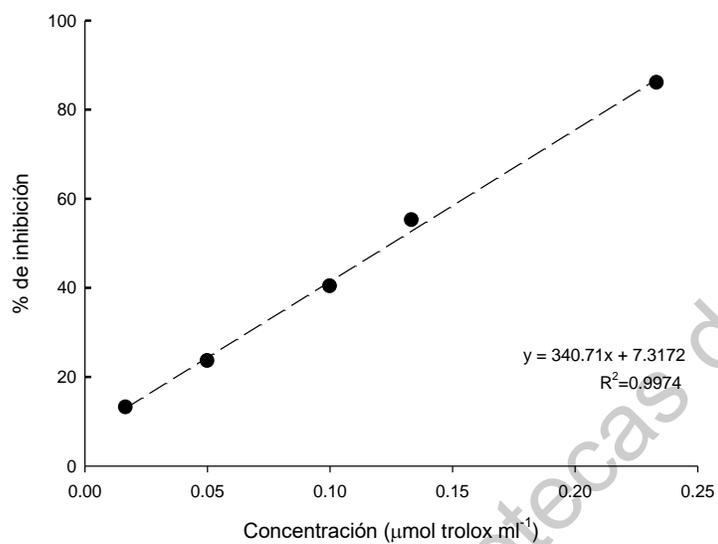
ANEXO 3: Significancia del sistema de cultivo en cuadrados medios del análisis de varianza de la tasa de respiración.

Sistema de cultivo	Tasa de respiración (ml CO ₂ h ⁻¹ kg ⁻¹)
Orgánico	1.097 ^a
Convencional	1.097 ^a
Fuente de variación	0.00 ^{ns}

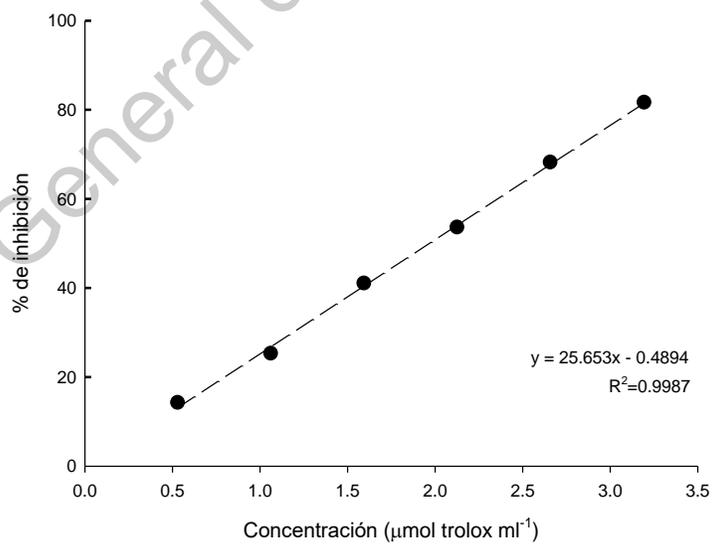
ANEXO 4: Curva de calibración de determinación de azúcares reductores



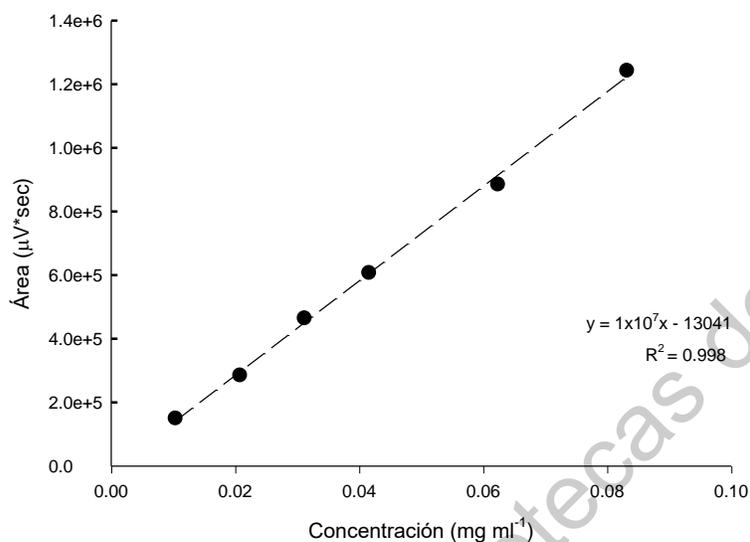
ANEXO 5: Curva de calibración de ensayo ABTS



ANEXO 6: Curva de calibración de ensayo DPPH.



ANEXO 7: Curva de calibración de determinación de vitamina C



ANEXO 8: Análisis de correlación entre factores.

Se realizó un análisis de correlación de Pearson entre factores en el software estadístico JPM, en donde se correlacionó todas las características físicas, fisicoquímicas y fisiológicas de los tomates.

Cuadro 18. Análisis de correlación entre niveles de pérdida de peso (PP), firmeza, ángulo de matiz (Hue), luminosidad (L*), croma, sólidos solubles totales (°Bx), azúcares reductores, acidez titulable (AT), pH, sabor, DPPH, ABTS, vitamina C, licopeno, SOD y CAT.

	PP	Firmeza	Hue	L*	Croma	°Bx	Az Red	AT	pH	Sabor	DPPH	ABTS	Vit C	Licopeno	SOD
PP	-														
Firmeza	0.473**	-													
Hue	0.567**	0.365**	-												
L*	0.459**	0.363**	0.398**	-											
Croma	0.139*	0.04	0.148**	0.217**	-										
°Bx	0.295**	0.046	0.253**	0.135*	0.064	-									
Az Red	0.198*	0.038	0.104	0.063	0.017*	0.135*	-								
AT	0.366**	0.021	0.277**	0.037	0.037	0.384*	0.248**	-							
pH	0.112	0.085	0.067	0.024	0	0.005	0.243**	0.0323	-						
Sabor	0.02	0.18*	0	0.039	0.009	0.251**	0.012	0.132*	0.011	-					
DPPH	0.205*	0.009	0.138*	0.007	0.001	0.064	0.078	0.009	0.033	0.033	-				
ABTS	0.101	0.04	0.147*	0.04	0.001	0.004	0.15*	0	0.038	0.002	0.597**	-			
Vit C	0.029	0.003	0.244**	0.013	0.025	0.046	0.102	0	0	0.042	0.123	0.486**	-		
Licopeno	0.109	0.09	0.211*	0.007	0	0	0.067	0.004	0.024	0.011	0.11	0.241**	0		
SOD	0.07	0.049	0.148*	0.011	0.089	0.002	0.246	0	0.039	0.007	0.189*	0.398**	0.459**	0.768**	-
CAT	0.135	0.017	0.085	0.043	0.002	0.181*	0.002	0.058	0.015	0.043	0.035	0.002	0.057	0.048	0.043