Centro de Investigación en Alimentación y Desarrollo, A.C.

EFECTO DE LA APLICACIÓN POSCOSECHA DE OLIGOSACÁRIDOS PÉCTICOS EN LA CALIDAD DE FRESA (*Fragaria x ananassa* Duch)

Por:

Angélica María Gutiérrez Fernández

TESIS APROBADA POR LA

COORDINACIÓN DE FISIOLOGÍA Y TECNOLOGÍA DE ALIMENTOS DE LA ZONA TEMPLADA

Como requisito parcial para obtener el grado de

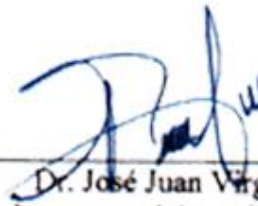
MAESTRA EN CIENCIAS

Cuauhtémoc, Chihuahua Enero 2021

APROBACIÓN

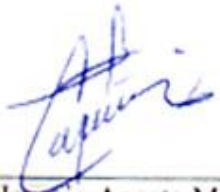
Los miembros del comité designado para la revisión de la tesis de Angélica María Gutiérrez Fernández la han encontrado satisfactoria y recomiendan que sea aceptada como requisito parcial para obtener el grado de Maestra en Ciencias.

Dr. José de Jesús Ornelas Paz
Director de Tesis



Dr. José Juan Virgen Ortiz
Integrante del comité de Tesis

Dr. Claudio Rios Velasco
Integrante del comité de Tesis



Dr. Carlos Horacio Acosta Muñiz
Integrante del comité de Tesis

DECLARACIÓN INSTITUCIONAL

La información generada en la tesis "Efecto de la Aplicación Poscosecha de Oligosacáridos Pécticos en la Calidad de Fresa (*Fragaria x ananassa* Duch)" es propiedad intelectual del Centro de Investigación en Alimentación y Desarrollo, A.C. (CIAD). Se permiten y agradecen las citas breves del material contenido en esta tesis sin permiso especial de la autora Angélica María Gutiérrez Fernández, siempre y cuando se dé crédito correspondiente. Para la reproducción parcial o total de la tesis con fines académicos, se deberá contar con la autorización escrita de quien ocupe la titularidad de la Dirección General del CIAD.

La publicación en comunicaciones científicas o de divulgación popular de los datos contenidos en esta tesis, deberá dar los créditos al CIAD, previa autorización escrita del manuscrito en cuestión del director(a) de tesis.

CENTRO DE INVESTIGACIÓN EN ALIMENTACIÓN Y DESARROLLO, A.C.
Coordinación de Programas Académicos

CIAD

Dr. Pablo Wong González
Director General

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar, expreso mi agradecimiento al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por el apoyo brindado para la realización de mi posgrado.

Agradezco también al Centro de Investigación en Alimentación y Desarrollo, A.C. (CIAD), por admitirme en su programa de posgrados y por el apoyo brindado por parte del personal docente y administrativo.

Extiendo mi agradecimiento para los integrantes de mi comité de Tesis, al director Dr. José de Jesús Ornelas Paz, por integrarme en su equipo de trabajo y su guía durante el desarrollo de este proyecto. Al Dr. José Juan Virgen Ortiz, por aceptar integrarme en el proyecto de investigación y todo el apoyo brindado. Al Dr. Claudio Rios Velasco y al Dr. Carlos Horacio Acosta Muñiz por sus valiosas aportaciones para el enriquecimiento de esta tesis de investigación.
Agradezco también al M.C. Elías Chaves Millán, a la Ingeniera Laura Viridiana Rodríguez González y a la M.C Lourdes Liliana Serrato Palacios, por el apoyo técnico que me brindaron para realizar el presente trabajo, especialmente con la recolección del material vegetal.

DEDICATORIA

A la memoria de mis padres Reyes y Emilia.

A Dios por darme los medios para culminar este proyecto.

A mi esposo José Ángel por todo su amor y su apoyo.

A mis hermanos: Sandra, Nena, Alex y Juan por su amor y por darme ánimos siempre.

CONTENIDO

APROBACIÓN……...2
DECLARACIÓN INSTITUCIONAL.....3
AGRADECIMIENTOS.....4
DEDICATORIA.....5
CONTENIDO.....6
LISTA DE FIGURAS…….8
LISTA DE CUADROS……...9
RESUMEN.....10
ABSTRACT.....11
1. INTRODUCCIÓN.....12
2. ANTECEDENTES.....14
2.1. Producción de Fresa.....14
2.2. Las Fresas, Frutas no Climatéricas.....15
2.3. Calidad en las Fresas.....19
2.3.1. Tamaño.....20
2.3.2. Firmeza.....21
2.3.3. Dulzor y Acidez.....22
2.3.4. Compuestos Protectores de la Salud.....28
2.3.5. Color.....31
2.4. Estrategias para el Mantenimiento de la Calidad de Fresas en Poscosecha.....34
2.5. Oligosacáridos.....38
3. HIPÓTESIS.....46
4. OBJETIVOS.....47
4.1. Objetivo General.....47
4.2. Objetivos Específicos.....47
5. METODOLOGÍA.....48
5.1. Material Vegetal.....48
5.2. Obtención de Oligosacáridos Pécticos.....48
5.3. Evaluación de Atributos Fisicoquímicos.....49
5.4. Análisis Cromatográfico de Azúcares y Ácidos Orgánicos.....51
5.5. Análisis Cromatográfico de Compuestos Fenólicos.....52
5.6. Evaluación de Fenoles Totales, Antocianinas Totales y Capacidad Antioxidante.....53
5.7. Análisis Estadístico.....54
6. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....56
6.1. Peso, Diámetro y Longitud de los Frutos.....56
6.2. Humedad.....57

CONTENIDO (continuación)

6.3. Contenido de Sólidos Solubles Totales y Azúcares 58
6.3.1. Contenido de Sólidos Solubles Totales 58
6.3.2. Contenido de Azúcares 59
6.4. Acidez Titulable, pH y Contenido de Ácidos Orgánicos 62
6.4.1. Acidez Titulable y pH 62
6.4.2. Contenido de Ácidos Orgánicos 63
6.4.3. Relación de Azúcares Individuales/Ácidos Orgánicos 66
6.5. Firmeza 69
6.6. Color 70
6.7. Antocianinas Totales e Individuales 74
6.7.1 Contenido de Antocianinas Totales 74
6.7.2 Contenido de Antocianinas Individuales 75
6.8. Compuestos Fenólicos Totales e Individuales 77
6.8.1. Contenido de Fenoles Totales 77
6.8.2. Contenido de Compuestos Fenólicos Individuales 78
6.9. Capacidad Antioxidante 84

7. CONCLUSIONES 90

8. RECOMENDACIONES 91

9. REFERENCIAS 92

10. ANEXOS 104
10.1. Información de las Curvas de Calibración Utilizadas para la Cuantificación de Compuestos Identificados por Cromatografía Líquida de Alta Resolución……....104
10.2. Análisis Estadístico……..……..105

LISTA DE FIGURAS

Figura **Página**

1. Conformación de la fresa y sus etapas de maduración. 19
2. Metabolismo de azúcares y las vías de síntesis de ácidos orgánicos.. 27
3. Principales vías de ramificación de la biosíntesis de compuestos fenólicos 30
4. Estructura de antocianidinas comúnmente encontradas en bayas 34

LISTA DE CUADROS

Cuadro **Página**

1. Efecto de la aplicación poscosecha de oligosacáridos pécticos sobre las características biométricas (peso, diámetro y longitud) y el porcentaje de humedad en fresas. 58
2. Efecto de la aplicación poscosecha de oligosacáridos pécticos sobre el contenido de sólidos solubles totales (SST), contenido individual de azúcares y la suma de azúcares y ácidos orgánicos en fresas. 61
3. Efecto de la aplicación poscosecha de oligosacáridos pécticos sobre el pH, porcentaje de acidez y la relación de azúcares y ácidos orgánicos en fresas. 68
4. Efecto de la aplicación poscosecha de oligosacáridos pécticos sobre el contenido de ácidos orgánicos en fresas. 68
5. Efecto de la aplicación poscosecha de oligosacáridos pécticos sobre la firmeza y las variables de color CIELab, incremento de color (ΔEab) y porcentaje de coloración interna (%CTI) en fresas..... 73
6. Efecto de la aplicación poscosecha de oligosacáridos pécticos sobre el contenido de antocianinas totales e individuales en fresas..... 76
7. Efecto de la aplicación poscosecha de oligosacáridos pécticos sobre el contenido de fenoles totales y la actividad antioxidante en fresas. 86
8. Identificación de compuestos fenólicos individuales en fresas por cromatografía líquida de alta resolución. 87
9. Efecto de la aplicación poscosecha de oligosacáridos pécticos sobre el contenido de compuestos fenólicos individuales en fresas. 88

RESUMEN

Las fresas son ampliamente consumidas por sus características organolépticas y los beneficios que causan en la salud humana, atributos que muestran su valor máximo cuando el fruto está totalmente maduro. Lamentablemente la vida poscosecha de las fresas completamente maduras es baja, razón por la cual se cosechan a una madurez de ¾ o rosa, mostrando un desarrollo incompleto de color, una acidez alta, un dulzor bajo y una firmeza excesiva. Se ha demostrado que la aplicación poscosecha de oligosacáridos mejora la calidad de diferentes frutos. En la presente investigación se evaluó el efecto de la aplicación de oligosacáridos pécticos (POS) en la calidad de fresa, durante el almacenamiento poscosecha. Las fresas (cv. 'Festival') se cosecharon en Tangancícuaro, Michoacán, al estado de madurez ¾ (rosa) y se asperjaron inmediatamente con POS a dosis de 2, 5 y 9 g/L y se almacenaron a 2 °C y 90 % de humedad relativa (HR).

La dosis más alta de POS causó una menor disminución de firmeza (20 %) y una menor pérdida de peso (7 %) en comparación con las fresas sin tratar. Las fresas sometidas a este tratamiento también mostraron un incrementó en el contenido de los solubles totales (SST) (25 %) y en el contenido de glucosa y fructosa (22 y 48 %). Además, promovió el aumento de ácidos orgánicos y compuestos fenólicos individuales, especialmente de antocianinas. El aumento en el contenido de los pigmentos en las fresas tratadas con POS a esta dosis se reflejó en un incremento de color superficial (38 %) e interno (15%). Aunado al incremento de antocianinas, se observó un incremento de procianidinas, catequina y ácidos fenólicos, lo cual influyó en un aumento de la capacidad antioxidante (69 %). Se infiere que los POS promovieron un mayor flujo de carbono para la síntesis de metabolitos primarios y secundarios, algunos de ellos asociados a la reducción de la susceptibilidad al ataque por patógenos. La aplicación poscosecha de POS a una dosis de 9 g/L mejora la calidad de las fresas y aumenta su vida poscosecha.

Palabras claves: Calidad de fresa, Oligosacáridos pécticos, tratamientos poscosecha, azúcares, ácidos orgánicos, compuestos fenólicos.

ABSTRACT

Strawberries are widely consumed for their organoleptic characteristics and benefits they cause in human health. These attributes show their maximum values in fully ripe fruit, however, the post-harvest life of this fruit is very low, compromising their commercialization in distant markets. Thus, strawberries are commonly harvested at the pink stage of ripening under commercial conditions, showing incomplete development of color, high acidity, low sweetness and excessive firmness. Some studies have demonstrated that the post-harvest application of oligosaccharides improves the quality of different fruits. In the present investigation, the effect of pectic-oligosaccharides (POS) on the postharvest quality of strawberries was tested. 'Festival' strawberries were harvested in Tangancícuaro, Michoacán. The fruit was immediately sprayed with POS at doses of 2, 5 and 9 g/L and stored at 2 °C and 90 % RH. The dose of 9 g/L retarded (20 %) the postharvest softening, reduced (7 %) the weight loss compared to untreated strawberries. This treatment also caused an increase in total soluble content (TSS) (25 %), glucose and fructose (22 and 48 %). It also promoted the increase in organic acids and phenolic compounds, especially of anthocyanins. The increase in pigment content improved the external (38 %) and internal color (15 %) of fruit. The content of other phenolic compounds (procyanidins, catechin and phenolic acids) and the antioxidant capacity also increased significantly in fruit treated with POS at a dose of 9 g/L. The POS retarded the softening of tested fruit. We infer that the POS served as a source of carbon skeletons for the synthesis of primary and secondary metabolites, some of them associated to defense responses against pathogens. The application of POS in strawberries played an important role in extending shelf life of strawberries, especially at a dose of 9 g/L.

Key word: Strawberry quality, pectic-oligosaccharides, post-harvest treatments, sugars, organic acids, phenolic compounds.

1. INTRODUCCIÓN

La fresa es una de las frutas más preferidas por los consumidores debido a sus propiedades organolépticas y a su importancia nutracéutica, puesto que es una fuente importante de flavonoides, fibra, vitaminas, potasio y una variedad diversa de ácidos fenólicos, que tienen una actividad biológica relevante en la salud humana (Giampieri *et al.*, 2012; Azam *et al.*, 2019).

La maduración de la fruta es un proceso complejo que está influenciado por la síntesis y acción de las hormonas que determinan la biosíntesis de pigmentos, el metabolismo de azúcares, ácidos, compuestos volátiles y muchos otros compuestos (Kafkas *et al.*, 2007). Las fresas son frutas no climatéricas, por lo que deben ser cosechadas en estado completamente maduro, ya que la maduración no continúa normalmente después del desprendimiento de la planta (Nunes *et al.*, 2006). Cuando los frutos son cosechados en estado completamente maduro presentan características organolépticas marcadamente favorables, pero presentan una alta tasa de respiración, ablandamiento, pérdida de agua y susceptibilidad al daño físico y biológico (Hong *et al.*, 2018; Azam *et al.*, 2019). Cada año, cerca del 20 – 40 % de las pérdidas poscosecha de los cultivos de frutas se producen por daños mecánicos, microbianos y fisiológicos (Bose *et al.*, 2020). Las pérdidas poscosecha de fresas se han estimado en un 28 % (Salami *et al.*, 2010). El 1 – 6 % de la cosecha se pierde en el empaque, la compra mayorista y central, mientras que el 10 % se pierde en la etapa de distribución y el 2 – 30 % a nivel de consumidor (Collins y Perkins-Veazie, 1993; Céline *et al.*, 2020). Sin embargo, en algunos casos, se puede perder del 80 al 85 % de una cosecha de fresas principalmente por el hongo patógeno *Botrytis cinerea* (Salami *et al.*, 2010).

Para evitar tales inconvenientes, las fresas se cosechan comercialmente cuando el 50 – 75 % de la superficie presenta una pigmentación rosada o roja, dependiendo de la lejanía de los mercados donde se van a comercializar (Azam *et al.*, 2019). Sin embargo, dada la naturaleza no climatérica de este fruto, una cosecha temprana trae consigo una menor calidad que ocasiona una baja aceptación por el consumidor final (Bhat *et al.*, 2015).

Diversas estrategias han sido desarrolladas para mejorar la calidad y aumentar la vida poscosecha de las fresas. La aplicación de 1-metilciclopropeno permite reducir la pérdida de firmeza, pero causa una reducción del contenido de compuestos fenólicos, especialmente de antocianinas, causantes del color rojo característico de las fresas (Azam *et al.*, 2019). El tratamiento con

melatonina es efectivo para retrasar la senescencia, la incidencia y la severidad de pudriciones, la pérdida de peso y firmeza, sin embargo, retrasa el desarrollo del color y la acumulación del contenido de sólidos solubles totales (SST) (Liu *et al.*, 2018). El uso de oligosacáridos ha surgido como otra estrategia alternativa para mejorar la vida poscosecha y calidad de diversos frutos (color, firmeza, sabor y resistencia sistémica a infecciones fúngicas) (Enríquez-Guevara *et al.*, 2010) debido a que poseen actividad elicitora, contribuyendo al control natural del metabolismo, crecimiento y desarrollo de las plantas (Simpson *et al.*, 1998; Dumville y Fry, 2000). Un elicitor se define como un compuesto que, en bajas concentraciones, puede activar diferentes respuestas de las plantas, como las respuestas de protección endógena, incluida la producción de diferentes metabolitos secundarios (Moreno-Escamilla *et al.*, 2018). Los oligosacáridos parecen ser una buena estrategia para obtener frutas y hortalizas con mayor contenido de fitoquímicos y mejor calidad. El objetivo del presente estudio fue evaluar el efecto de la aplicación poscosecha de oligosacáridos derivados de pectina, en fresas cosechadas en punto rosa a fin de determinar si el tratamiento genera efectos positivos en la calidad fisicoquímica del fruto y en el contenido de metabolitos secundarios.

2. ANTECEDENTES

2.1. Producción de Fresa

La producción de fresa (*Fragaria* × *ananassa*) tiene gran importancia dentro de la producción agrícola, debido a su gran demanda. En 2019, México ocupó el tercer lugar en producción de fresa a nivel mundial con un total de 861,336 toneladas, siendo Michoacán el principal productor con un total de 564,553 toneladas, volumen que representa el 66 % de la producción nacional (SIAP, 2019).

La fresa mexicana es un producto exitoso en el mercado internacional. México exporta el 52.21 % de su producción, lo cual representa un 14.83 % del valor de las exportaciones mundiales de fresa. Estados Unidos de América, Alemania, Francia y Canadá son los principales importadores de fresa en el mundo. La fresa mexicana representa un 87.79 % de la fresa importada por Estados Unidos de América (CONAFRE, 2019).

En México se cultivan diferentes variedades de fresa, cada una con características específicas en cuanto a rendimiento, épocas de producción, resistencia a plagas y enfermedades, sabor, color y tamaño. Las variedades utilizadas en México han sido desarrolladas por la Universidad de California y la Universidad de Florida. Entre las más explotadas en México se encuentran la 'Festival', 'Camino Real', 'Albión' y 'San Andreas' (SAGARPA, 2017).

La variedad 'Festival' es actualmente la variedad líder en los estados productores, especialmente en Guanajuato, Michoacán y Estado de México. Se estima que se está utilizando en el 60 % de las plantaciones. Esta variedad produce fruta abundante y de excelente calidad, tanto para consumo en fresco como para la industria. Es una planta vigorosa de día o fotoperiodo corto, productora en invierno con producción temprana, consistente y uniforme. Es gran productora de estolones y presenta buen rendimiento. Produce fresa brillante y roja de forma cónica, de textura firme con excelente sabor. El fruto mantiene un tamaño mediano a grande a lo largo de la producción. Es susceptible a antracnosis de fruto (*Colletotrichum maculatum*), pudrición de corona (*Colletotrichum gloeosporioides*) y bacterias (CONAFRE, 2019).

Esta variedad, con patente de Estados Unidos No. PP14,739 P2, se originó como una sola planta

en una parcela de cría de fresas en Dover, Florida, a partir de un cruce entre 'Rosa Linda' (Patente de planta de Estados Unidos No. 9,866), como padre debido a su alto potencial de rendimiento al comienzo de la temporada y su forma de fruta deseable, y 'Oso Grande' (patente de planta de Estados Unidos No. 6578), como progenitor del polen puesto que es una variedad que puede producir frutos grandes y firmes. El cultivar recibió el nombre de 'Strawberry Festival' en reconocimiento al Florida Strawberry Festival®, un festival anual en Plant City que celebra la abundante cosecha de fresas en el este del condado de Hillsborough a fines de febrero y principios de marzo (Chandler *et al.*, 2000).

2.2. Las Fresas, Frutas no Climatéricas

Diversos factores, como el estado de madurez al momento del corte, la temperatura, la humedad relativa (HR), la incidencia de pudriciones y daños físicos, favorecen la pérdida de la calidad comercial, nutricional y sensorial de la fresa de manera acelerada (Pineli *et al.*, 2011).

La fresa es clasificada como fruta no climatérica, ya que no presenta un aumento en la respiración ni en la producción de etileno después del corte (Martínez-González *et al.*, 2017). Mientras que los frutos climatéricos pueden madurar desprendidos de la planta debido a que muestran un incremento autocatalítico en la producción de etileno durante la maduración (biosíntesis de etileno del sistema 2), las fresas carecen de una respuesta autocatalítica de etileno, pero aún muestran algunos cambios típicamente asociados con la maduración, como el desarrollo del color rojo cuando se desprenden de la planta (Van de Poel *et al.*, 2014).

Aunque el etileno no inicia una respuesta climatérica, puede estar involucrado en los niveles de expresión génica que promueven algunas características asociadas con la maduración (Schwab y Raab, 2004), por lo que se ha sugerido que la fresa podría ser una fruta climatérica en lugar de una fruta no climatérica absoluta (Nunes *et al.*, 2006). La razón principal de este comportamiento está asociada a la particular conformación de las fresas, consideradas una fruta falsa ya que en realidad es una fruta agregada que se origina a partir del tejido receptáculo (parte carnosa) y varios ovarios que se encuentran en un receptáculo común y se denominan aquenios (verdaderas frutas), los cuales se encuentran adheridos a la superficie exterior del receptáculo (Figura 1). Ambos órganos están

conectados a través de haces vasculares que suministran nutrientes al aquenio y a las células del parénquima circundante del receptáculo (Perkins-Veazie y Huber, 1988; Merchante *et al.*, 2013).
Las fresas tienen cuatro etapas de madurez, denominadas verde, blanco, rosado (¾) y rojo (Figura 1) (Perkins-Veazie y Huber, 1988). Se ha informado que, a pesar de su baja concentración, el etileno es necesario para el desarrollo normal del fruto de la fresa, presentando un patrón característico de producción durante las diferentes etapas de desarrollo; es relativamente alto en frutos verdes, disminuye en frutos blancos y finalmente aumenta en la etapa roja de maduración. Este último aumento va acompañado de una mayor tasa de respiración que se asemeja a la que ocurre en los frutos climatéricos al inicio de la maduración. Además, actúa de manera diferente en los aquenios y el receptáculo. En los aquenios actúa en las etapas verde y roja, mientras que en el receptáculo actúa en las etapas verde y blanco (Merchante *et al.*, 2013).
El desarrollo del aquenio ocurre en la etapa verde, en donde la semilla en el aquenio alcanza la etapa de cotiledón y los eventos principales posteriores incluyen la preparación para la latencia de la semilla y los cambios asociados con la maduración del pericarpio seco. En el receptáculo, el cambio principal entre las etapas verde y blanca es el agrandamiento celular, y las que se encuentran entre las etapas blanca y roja son el desmontaje de la pared celular y el metabolismo asociado con la maduración. Tras la maduración del embrión, la tasa de crecimiento del receptáculo aumenta y se inicia la maduración del fruto (Perkins-Veazie y Huber, 1988; Merchante *et al.*, 2013). Durante este proceso se ha observado que las auxinas participan en la mayor parte del crecimiento de la fresa; estas inhiben la maduración del receptáculo carnoso mientras estimulan el transporte de asimilados promoviendo el desarrollo del fruto, cuando el nivel de auxinas cae por debajo del nivel crítico, en el receptáculo y los aquenios, se inicia la maduración (Perkins-Veazie y Huber, 1988; Kuchi y Sharavani, 2019). Se sugiere que la acción coordinada entre el aquenio y el receptáculo sea parte del mecanismo que garantiza la maduración del aquenio antes de la maduración de la fruta (Fait *et al.*, 2008). También se ha observado la participación de giberelinas (GAs), citoquininas y ácido abscísico (ABA) en la maduración de las fresas. Se ha indicado que el ABA puede acelerar la absorción de sacarosa y promover el desarrollo del color (Perkins-Veazie y Huber, 1988). Las citoquininas promueven la división celular. Se producen activamente en aquenios inmaduros. Su actividad es alta de 10 a 15 días después de la antesis y disminuye gradualmente a medida que se desarrollan los frutos (Schwab y Raab, 2004). Las GAs estan asociadas al agrandamiento de las células durante el desarrollo de la fresa. Las GAs son más

abundantes en las primeras etapas del desarrollo del receptáculo, alcanzando su punto máximo en la etapa blanca y disminuyen a medida que madura la fresa (Csukasi *et al.*, 2011; Kim *et al.*, 2019). EL contenido de ABA aumenta gradualmente desde la etapa verde hasta la etapa roja, encontrándose en mayor concentración en los aquenios que en los tejidos del receptáculo (Schwab y Raab, 2004). El aumento de ABA coincide con la caída de los niveles de auxinas y GAs (Symons *et al*., 2012; Kim *et al.*, 2019). Se ha considerado que el ABA es un importante regulador en la maduración de frutos no climatéricos (Chai y Shen, 2016). Adicionalmente, se ha informado que el ácido salicílico (ASA) presenta incrementos en la fresa a partir de la etapa rosada, lo cual sugiere que el ASA también podría estar involucrado en la maduración de la fresa (Kim *et al.*, 2019).

Se ha indicado que la fresa debe cosecharse en la etapa de maduración completa, debido a que no desarrolla atributos de calidad adecuados para el consumo en fresco después del desprendimiento (Ornelas-Paz *et al.*, 2013). Sin embargo, la fresa generalmente se cosecha en la etapa de ¾ de maduración (Nunes *et al.*, 2006; García Espejel *et al.*, 2017) debido a que se ha observado que a partir de esta etapa la fresa puede seguir presentando cambios bioquímicos y fisiológicos asociados a la madurez. Un corte previo a esta etapa no es recomendado, ya que se ha informado que, aunque las fresas blancas se vuelven rojas durante el almacenamiento, los cambios en la textura, los azúcares y la acidez no se desarrollan completamente (Perkins-Veazie y Huber, 1988; Nunes *et al.*, 2006). Se ha informado que las fresas cosechadas en la etapa ¾ almacenadas por 8 días a 1 °C presentaron una mayor firmeza que las fresas maduradas en el campo y que además mostraron contenidos de pH, acidez titulable (TA), SST, ácido ascórbico (AA) y fenoles totales similares a los de las fresas maduradas en campo, sin embargo, el contenido de antocianinas totales (CAT), y el contenido individual de las antocianinas cianidina-3-glucósido y pelargonidina-3-glucósido fue menor en la fruta cosechada a un estado de ¾ de maduración en comparación con la fruta madurada en el campo (Nunes *et al.*, 2006). En otro estudio realizado en fresas cosechadas en etapa verde y almacenadas en condiciones cercanas al 100 % de humedad (aplicando enjuagues con aire burbujeando a través de agua), 18 °C y ciclos de luz-oscuridad de 12 h, se observó que estas fueron capaces de madurar, sin embargo, mostraron una calidad inferior a la de fresas que maduraron en la planta, presentando solo una mayor firmeza y un contenido similar de ácido cítrico (AC), mientras que las fresas maduradas en campo fueron más grandes y jugosas, mostrando además una mayor capacidad antioxidante y mayores contenidos de ácido málico (AM), glucosa, fructosa y sacarosa, esto posiblemente debido a un suministro continuo de productos de la fotosíntesis y

nutrientes por parte de la planta, los cuales son esenciales para el desarrollo normal de la fresa (Van de Poel *et al.*, 2014).

La maduración poscosecha de la fresa depende de la señal desencadenada por el ABA. El ABA es reconocido por receptores (FaPYR, FaABAR y FaCHLH), que regulan positivamente la maduración de la fresa mediante la vía de transducción de señales (FaASR) y la expresión de genes de biosíntesis de ABA (FaNCED1 y FaABA2) (Bose *et al.*, 2019; Kim *et al.*, 2019; Siebeneichler *et al.*, 2020).

Por otra parte, se ha sugerido que el ABA, la sacarosa y la glucosa inducen la expresión de FaABI4, una proteína de tipo APETALA 2 (AP2), en fresa. El factor ABI4 (ABA-INSENSITIVE-4) es un regulador positivo para la maduración que promueve la transcripción de varios genes incluidos cinamato-4-hidroxilasa (C4H), chalcona isomerasa (CHI), dihidroflavonol reductasa (DFR), chalcona sintasa (CHS), β-galactosidasa, pectinmetilesterasa (PME) y D-xylulosa reductasa (Chai y Shen, 2016).

Siebeneichler *et al.* (2020) sugieren que la maduración poscosecha de la fresa es una consecuencia de la inducción de ABA como respuesta al estrés por sequía ocasionado por déficit hídrico tras la remoción de la fresa de la planta. Los investigadores observaron que los frutos que fueron madurados durante el almacenamiento poscosecha mostraron niveles más altos de ABA, ABA-glucosil-éster, ácido dihidrofaseico y contenido de prolina, considerados compuestos marcadores de estrés.

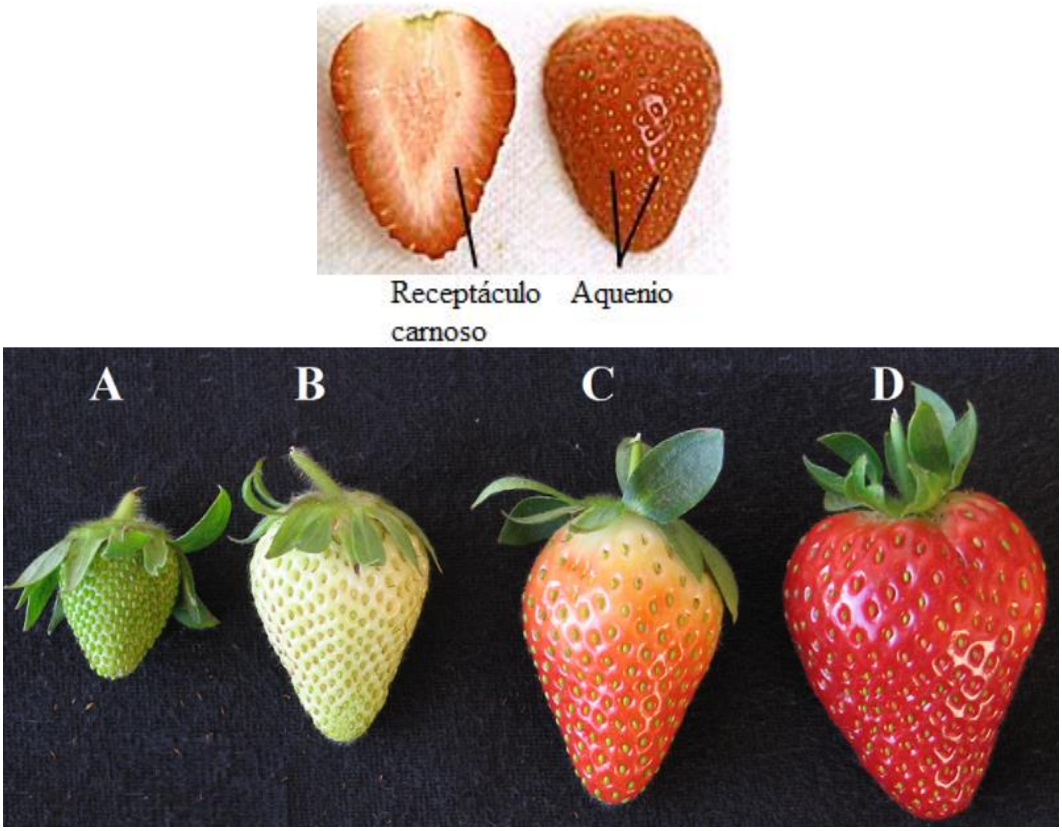


Figura 1. Conformación de la fresa y sus etapas de maduración. A) verde, B) blanco, C) rosado (¾) y D) rojo. (Modificado de Basson *et al.*, 2010).

2.3. Calidad en las Fresas

La calidad de la fresa comprende muchas propiedades o características, tales como las propiedades sensoriales (tamaño, color, textura, sabor y aroma), valor nutritivo, compuestos protectores de la salud, constituyentes químicos, propiedades mecánicas, propiedades funcionales y defectos (Montero *et al.*, 1996; Mazur *et al.*, 2014). El consumidor utiliza todos sus sentidos para evaluar la calidad e integra todas esas entradas sensoriales en un juicio final sobre la aceptabilidad (Abbott, 1999). La calidad óptima de un fruto está relacionada con un determinado desarrollo o grado de maduración. La madurez fisiológica ("maturity") del fruto es alcanzada cuando éste alcanza su tamaño y peso máximos, lo cual solo puede ocurrir mientras la fruta está unida a la planta. La madurez organoléptica ("ripening") inicia antes de la cosecha y puede continuar en poscosecha y

se caracteriza por la activación de todo un conjunto de rutas bioquímicas donde la composición o combinación de atributos físicos y componentes químicos mejora la palatabilidad y genera la máxima aceptación por parte de los consumidores (Sinha *et al.*, 2012; Martínez-González *et al.*, 2017; Brasil y Siddiqui, 2018). La mayoría de los compuestos protectores de la salud se acumulan a niveles más altos durante esta fase (Kumar *et al.*, 2014). Los carbohidratos complejos se convierten en azúcares, la acidez de las frutas disminuye con la acumulación de azúcares, los compuestos de sabor, color y aroma se acumulan, y la estructura de la pared celular cambia (Kumar *et al*, 2014; Martínez-González *et al.*, 2017).

La cosecha de las fresas debe retrasarse hasta que estén lo suficientemente maduras como para acumular azúcares suficientes para equilibrar la acidez y la astringencia de la fruta. Además, el momento de la cosecha y las condiciones de manejo posteriores a la cosecha son críticas debido a la vida útil relativamente corta desde la cosecha hasta la distribución minorista (Zhao, 2007).

2.3.1. Tamaño

El crecimiento de la fresa, después de la caída de los pétalos, se debe inicialmente a una combinación de división celular (15 días después de la antesis) y, posteriormente, a una expansión celular. En la caída de los pétalos, las células del receptáculo tienen paredes celulares densas y pequeñas vacuolas. Los gránulos de almidón están presentes en los plastidios y el aparato de Golgi, y abundan los ribosomas. Durante el desarrollo, las paredes celulares se hinchan y se difunden cada vez más y los plastidios pierden sus gránulos de almidón. La creciente hidratación y desorganización de la pared celular y la mayor solubilidad de la laminilla media y la matriz de la pared durante la maduración acompañan al ablandamiento de la fruta (Perkins-Veazie y Huber, 1988; Schwab y Raab, 2004). En la fresa el crecimiento puede continuar después del inicio del proceso de maduración. Este continúa hasta que el 25 % o más de la superficie de la fresa alcanza un tono rojo, cuando las clorofilas se han degradado por completo y las antocianinas comienzan a acumularse (Kuchi y Sharavani, 2019).

La forma final se ve afectada por la posición de los botones florales, la duración de la división celular en cada capa de la fruta, el grado de agrandamiento celular, el número de células y el tamaño

de los espacios de aire intercelulares. Otros factores que afectan la forma incluyen el número de aquenios polinizados, la temperatura en el momento de la siembra o durante el desarrollo y la nutrición de las plantas (Perkins-Veazie y Huber, 1988).

El tamaño de las fresas se determina con base en su diámetro ecuatorial, el cual debe ser considerado el valor más alto que resulta de medir el fruto de fresa horizontalmente según la norma mexicana NMX-FF-062-2002, la cual establece la clasificación "A" para fresas con un diámetro mayor de 32 mm, "B" para las fresas con un diámetro de 26 a 31 mm, "C" para fresas con un diámetro de 20 a 26 mm y "D" para fresas con un diámetro de 16 a 19 mm.

2.3.2. Firmeza

Uno de los principales factores que reducen la calidad de la fresa y conducen a pérdidas económicas importantes es el ablandamiento poscosecha, propio de frutas muy maduras (Bhat *et al.*, 2015; Martínez-González *et al.*, 2017). Resulta difícil establecer un valor de firmeza adecuado para los frutos a través de la literatura, puesto que para obtener este valor se utilizan muchos métodos e instrumentos, por lo tanto, los resultados a menudo muestran grandes variaciones (Døving y Måge, 2002). En fresas se han reportado valores desde 0.675 N hasta 9 N (Lado *et al.*, 2012; Ornelas-Paz *et al.*, 2013; García Espejel *et al.*, 2017; He *et al.*, 2018; Bose *et al.*, 2019; Kelly *et al.*, 2019). Bath *et al*. (2015) indican que los consumidores prefieren fresas con una firmeza moderada, que se relaciona con una madurez de consumo apropiada. Las fresas duras se asocian con un estado de inmadurez y las suaves con frutos senescentes, con sabores y aromas característicos de fermentaciones.

Las paredes celulares son estructuras complejas naturales, compuestas principalmente de polisacáridos de alto peso molecular, proteínas y lignina. Las células vegetales están rodeadas por capas de fibrillas de celulosa largas incrustadas en una matriz de hemicelulosa y pectina, que es el término colectivo utilizado para la fracción rica en ácido galacturónico (AGal) de la pared celular. La pared celular es una organización dinámica que es esencial para la división, agrandamiento y diferenciación celular, así como para responder al estrés biótico y abiótico (Osorio *et al.*, 2008).

El ablandamiento es causado por el efecto acumulativo de una serie de modificaciones que ocurren en las redes de polímeros que constituyen la pared celular primaria: 1) relajación de la pared celular mediada por expansinas, 2) despolimerización de hemicelulosas y 3) despolimerización de poliurónidos por enzimas hidrolíticas; lo cual contribuye a una pérdida de firmeza y cambios en calidad de la textura (Martínez-González *et al.*, 2017). Las frutas que se ablandan durante la maduración están estrechamente relacionadas con la desintegración y despolimerización de compuestos de la pared celular por enzimas como la PME, pectinliasa (PL), poligalacturonasa (PG) y endo-1,4-β-glucanasa (EG) (Draye y Van Cutsem, 2008). En fresa, los cambios en la pared celular asociados con el ablandamiento se relacionan principalmente con la solubilización y la despolimerización de la pectina (Figueroa *et al.*, 2010). Bose *et al*. (2019) encontraron que los genes FaPL, FaPE y FaEG, asociados a las enzimas PME, PL y EG, mostraron niveles de transcripción altos durante el almacenamiento, que coincidieron con la degradación de la pared celular durante el ablandamiento de la fruta, proporcionando evidencia de que las enzimas modificadoras de la pared celular controlan la degradación de la pared celular. El ablandamiento conlleva a un aumento en la susceptibilidad al ataque de patógenos oportunistas (Kumar *et al.*, 2014; Martínez-González *et al.*, 2017). Entre los dos problemas más importantes que se reconocen están el ataque por los hongos *Botrytis cinerea* y *Rhyzopus stolonifer*; el primero causa la enfermedad más importante de las fresas denominada podredumbre gris y el segundo origina podredumbre blanda, en la que los tejidos pierden jugos que gotean de los envases (Forney, 2017). Se ha observado que fresas de diversos cultivares cosechadas en la etapa de ¾ de madurez y almacenadas en refrigeración a 6 °C por 7 días, disminuyeron su firmeza significativamente tras el almacenamiento (Cordenunsi *et al.*, 2003).

2.3.3. Dulzor y Acidez

El dulzor y la acidez son propiedades asociadas al contenido de azúcares y ácidos orgánicos (AOs) presentes en las fresas, los cuales son componentes principales de su calidad organoléptica (Basson *et al.*, 2010), siendo los azúcares sacarosa, glucosa y fructosa y los ácidos AC, AM y AA los más abundantes en fresas (Montero *et al.*, 1996; Kallio *et al.*, 2000; Enomoto *et al.*, 2018). La mayoría

de los consumidores prefieren frutas más dulces; esto no es solo una consecuencia de una mayor concentración de azúcares, sino también del equilibrio entre los ácidos y otros componentes, como los compuestos fenólicos, que pueden afectar la percepción del dulzor (Zhao, 2007). Se ha indicado que la fresa suele presentar un sabor aceptable cuando tiene un contenido de SST de mínimo 7 % y una TA máxima del 0.8 % (Cordenunsi *et al.*, 2003).

Los SST de la fruta están compuestos por azúcares, ácidos y otras sustancias disueltas en la savia celular. Varían con el cultivar, clima y estado de madurez. Los SST en la fresa aumentan constantemente durante el desarrollo, desde el 5 % en la fruta verde pequeña hasta el 11 % en las frutas demasiado maduras (Perkins-Veazie y Huber, 1988). El contenido de SST aumenta desde 7 a 25 % tras el almacenamiento en refrigeración (4 y 6 °C) (Cordenunsi *et al.*, 2003; Octavia y Choo, 2017). Este aumento puede ser consecuencia de la degradación de la pared celular, en conjunto con la disminución de AOs, los cuales podrían ser una fuente alternativa de carbono para la síntesis de azúcares (Cordenunsi *et al.*, 2003).

El almidón es la principal reserva de energía en las plantas. En las fresas se almacena principalmente en las raíces, tallos y hojas y solo está presente en las primeras etapas del desarrollo del fruto, en los cloroplastos del tejido de las fresas verdes (Zhao, 2007). El almidón desaparece antes de la maduración, se cree que este se requiere solo en el crecimiento temprano de la fruta hasta que los aquenios se hayan desarrollado lo suficiente como para inducir una rápida asimilación de nutrientes de la planta madre (Perkins-Veazie y Huber, 1988). Durante el desarrollo temprano de las fresas, la sacarosa es el producto principal de los tejidos fotosintéticos por lo que generalmente domina como el carbohidrato primario y es el principal azúcar transportado a través del floema hacia el fruto (tejido sumidero) (Perkins-Veazie y Huber, 1988; Li *et al.*, 2019; Stein y Granot, 2019).

La sacarosa, la glucosa y la fructosa representan más del 99 % del total de carbohidratos en la fruta madura, en donde la glucosa y la fructosa están presentes en concentraciones equivalentes. La sacarosa está presente en un nivel bajo en la fruta durante los primeros 10 días después de la antesis, pero luego aumenta rápidamente para alcanzar un máximo en la etapa rosada antes de disminuir drásticamente en la fruta demasiado madura. Durante los primeros 10 días, la glucosa disminuye y la fructosa permanece constante, luego ambos aumentan (Schwab y Raab, 2004; Souleyre *et al.*, 2004; Zhao, 2007). La fructosa es más dulce que la glucosa o la sacarosa y confiere a las fresas un rasgo organoléptico deseable, pero el contenido de azúcar total es generalmente un mejor marcador

de la aceptabilidad del consumidor (Zhao, 2007).

Durante el desarrollo del fruto, la glucosa generada a través de la fotosíntesis se puede utilizar para la respiración y la biosíntesis del almidón, mientras que, durante la maduración, hay un alto requerimiento de energía y el patrón del metabolismo del azúcar cambia al catabolismo a través de la respiración. La degradación del almidón se produce a través de una secuencia de reacciones catabólicas en el plastidio para generar glucosa-1-fosfato, que se moviliza hacia el citoplasma, lo que resulta en un aumento de fosfatos de azúcar (Figura 2). Los azúcares ingresan en el conjunto metabólico para ser utilizados como sustratos respiratorios durante la glucólisis, proporcionando potencia reductora o precursores de carbono para aminoácidos, ácidos nucleicos y metabolitos secundarios, entre otros, a través de la vía de la pentosa fosfato, o pueden convertirse a otros metabolitos a través de reacciones de recambio para mantener la homeostasis en las células (Sinha *et al.*, 2012).

La sacarosa es un disacárido no reductor compuesto de α-D-glucopiranósido y β-D-fructofuranósido y no es un sustrato respiratorio porque no puede fosforilarse (Zhao, 2007). La acumulación de sacarosa está determinada por el equilibrio entre la síntesis de sacarosa, debido a la sacarosa fosfatasa sintasa, y la degradación, debido a la invertasa y la sacarosa sintasa. La sacarosa sintasa participa en la producción de sustratos respiratorios y uridina difosfato glucosa (UDP) para la síntesis de carbohidratos complejos (Sinha *et al.*, 2012). La actividad de sacarosa sintasa parece ser relativamente alta en las primeras etapas de la maduración, pero disminuye a medida que esta avanza, mientras que la actividad de la invertasa ácida soluble aumenta a medida que maduran los frutos, correlacionándose con un aumento de azúcares de seis carbonos, junto con una disminución dramática en los niveles de fosfatos de azúcar (Souleyre *et al.*, 2004; Fait *et al.*, 2008).

La sacarosa puede ingresar a las células sumidero a través de varias vías diferentes. Puede descargarse del floema al apoplasto mediante transportadores de sacarosa e ingresar a las células sumidero a través de transportadores de sacarosa o hidrolizarse por la invertasa de la pared celular para producir glucosa y fructosa, que a su vez pueden ingresar a las células sumidero a través de transportadores de hexosa. Dentro de las células sumidero, la sacarosa puede metabolizarse o transportarse a la vacuola, donde puede almacenarse como sacarosa, transformarse en fructanos por las fructosiltransferasas o hidrolizarse mediante la invertasa vacuolar y almacenarse como hexosas (Perkins-Veazie y Huber, 1988; Zhao, 2007; Stein y Granot, 2019).

El contenido de azúcares en las frutas contrarresta sensorialmente el efecto de los AOs predominantes, como AC y AM, así como de ácidos fenólicos que pueden impartir sabores amargos o astringentes, que son responsables de los componentes básicos del sabor. Los AOs también ayudan a estabilizar el AA y son críticos en el desarrollo del color de la fruta al estabilizar las antocianinas y extender la vida útil de las frutas frescas y procesadas (Zhao, 2007). Participan en varias vías bioquímicas, siendo el ciclo de Krebs el más importante. Son precursores de la síntesis de aminoácidos, hormonas vegetales (auxinas, GAs y ASA), ácidos grasos, una gran cantidad de metabolitos secundarios y ciertos componentes de la pared celular (Walker y Famiani, 2018). Además, sus vías metabólicas están altamente interconectadas con azúcares, siendo ambos los principales sustratos respiratorios durante la maduración de la fruta. Los AOs también se acumulan a concentraciones elevadas en la vacuola durante el desarrollo del fruto, lo que puede servir para mantener la alta presión de turgencia requerida para la expansión celular y el crecimiento del fruto. En general, las frutas jóvenes en desarrollo son extremadamente ácidas y acumulan un alto porcentaje de AOs. Como resultado, el pH de las frutas inmaduras a menudo es inferior a 3, pero generalmente aumenta durante la maduración ("ripening") de la fruta debido a la conversión a azúcares (Figura 2) (Sinha *et al.*, 2012). La relación azúcares / AOs es un parámetro importante del sabor de la fresa (Kuchi y Sharavani, 2019). El contenido combinado de azúcares y ácidos y la proporción de azúcares a ácidos aumentan durante la maduración (Basson *et al.*, 2010).

La mayor parte de los ácidos del ciclo de Krebs que se acumulan en las frutas se sintetizan a partir de azúcares dentro de la fruta. Los azúcares entran en la glucólisis y se convierten en fosfoenolpiruvato (PEP), que luego se convierte en oxaloacetato (OAA) en el citosol por la enzima PEP carboxilasa. En el caso del AM, el OAA se convierte en malato mediante malato deshidrogenasa citosólica. En el caso del AC, además de la conversión de una molécula de PEP en OAA, una segunda molécula de PEP se convierte en acetil CoA, la cual se combina con OAA mediante citrato sintasa en la mitocondria para producir citrato. El malato y el citrato se transportan a través del tonoplasto hacia la vacuola, en la que se almacenan (Fig. 1) (Walker y Famiani, 2018). El ácido orgánico primario es el AC, que comprende el 88 % de los ácidos totales, su concentración en fresas varía de 4 a 12 g/Kg. La TA aumenta hasta un máximo en la fruta verde y disminuye en las últimas etapas de maduración (Schwab y Raab, 2004; Kuchi y Sharavani, 2019).

En un estudio realizado en aquenios y receptáculos por separado en las diferentes etapas de desarrollo de la fresa, se observó que en el receptáculo el AC presentó un aumento en las etapas

verdes y una ligera disminución en las etapas de maduración posteriores, mientras el ácido fumárico (AF) y el AM aumentaron durante la maduración, el AA disminuyó y el ácido succínico (AS) presentó una disminución hasta la etapa blanca y posteriormente aumentó en el receptáculo maduro. Por otra parte, en el aquenio, se apreció una reducción del AF, AM y AS, mientras que el AA y el AC presentaron su máximo valor en la etapa verde y disminuyeron en las posteriores etapas, informando que la disminución de los AOs durante la maduración en los aquenios estaba acoplada a una acumulación de ácidos grasos (16:0 y 18:0) posiblemente para apoyar la biosíntesis de aceite (Fait *et al.*, 2008). Otros investigadores han informado pocos cambios de las concentraciones de AM y disminuciones de AC y AA en fresa durante el desarrollo y la maduración (Ornelas-Paz *et al.*, 2013; Walker y Famiani, 2018).

Adicionalmente, se ha observado que las fresas cosechadas en la etapa rosada, empacadas en cajas de plástico perforadas y almacenadas a 0 °C de temperatura y 90 – 95 % de HR durante 10 días presentaron disminuciones en el contenido de AA, AC y AM, mientras que el ácido tartárico (AT), el ácido oxálico (AO) y el AF fluctuaron durante el almacenamiento, pero al final de éste presentaron valores menores en comparación con los valores iniciales.

Las disminuciones de los AOs podrían estar relacionadas con el proceso de maduración durante el almacenamiento de las fresas. Una disminución de alrededor del 50 % de AA también fue reportada en fresas cosechadas en el estado de madurez de ¾, almacenadas a 4 °C por 6 días y a 6 °C por 7 días (Cordenunsi *et al.*, 2003; Octavia y Choo, 2017). El AA es altamente inestable y en condiciones adversas se degrada fácilmente por enzimas y factores no enzimáticos, como los SST, el pH, la pérdida de agua y la presencia de oxígeno, de acuerdo a estudios efectuados durante el almacenamiento poscosecha de fresas (Octavia y Choo, 2017).

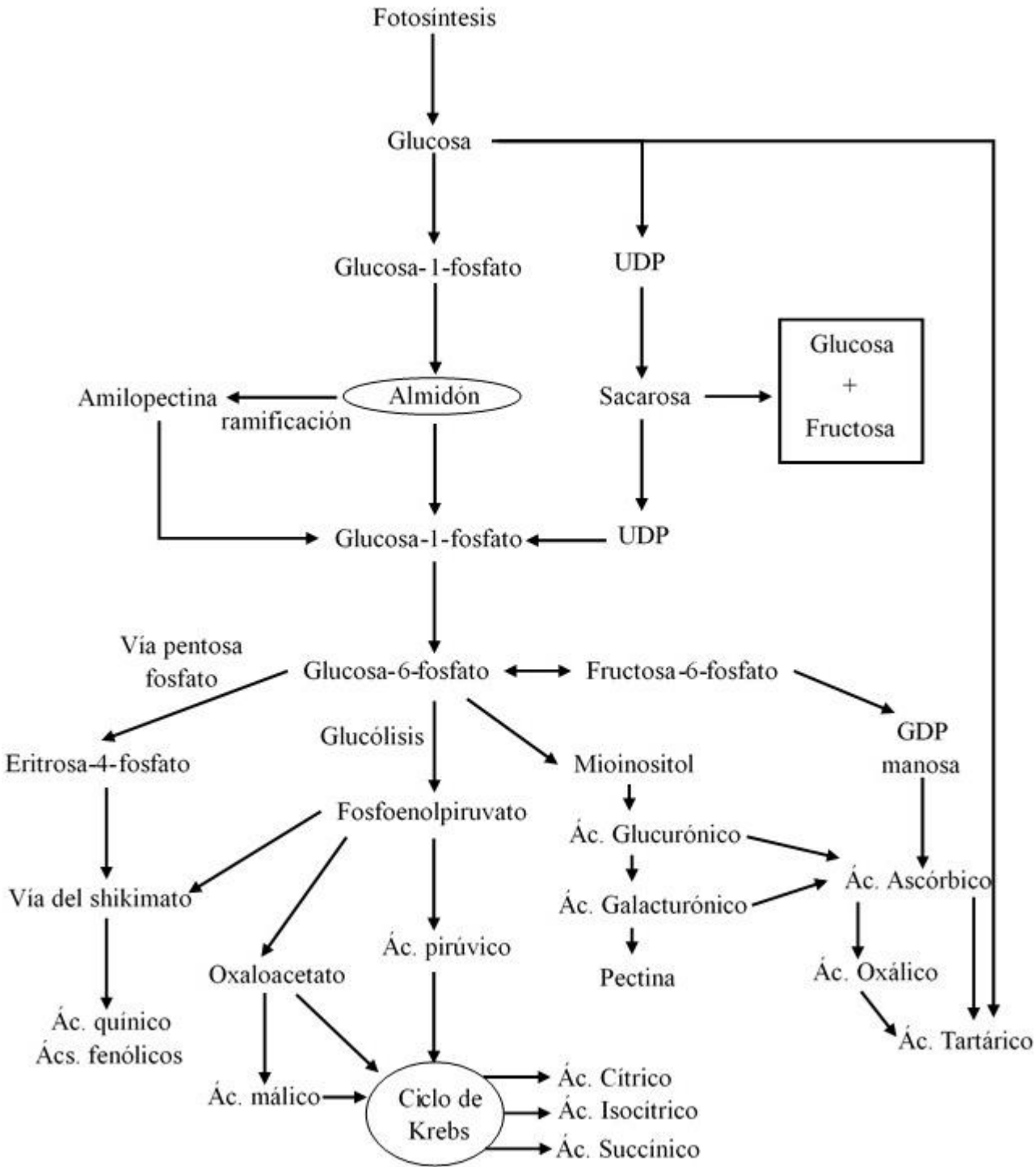


Figura 2. Metabolismo de azúcares y las vías de síntesis de ácidos orgánicos. UDP, uridina difosfato glucosa. GDP, guanosina difosfato (Modificado de Sinha *et al*., 2012; Walker y Famiani, 2018).

2.3.4. Compuestos Protectores de la Salud

Las fresas son altamente apreciadas debido a su contenido en nutrientes tales como minerales, fibra, azúcares y vitaminas y su contenido de fitoquímicos o compuestos protectores de la salud, principalmente compuestos fenólicos, los cuales también están involucrados en las propiedades organolépticas de la fresa (Fait *et al.*, 2008; Mazur *et al.*, 2014). Estos son responsables de la astringencia, debido a su interacción con las proteínas y mucopolisacáridos de la saliva. La fresa pierde astringencia durante la maduración (Schwab y Raab, 2004).

Los polifenoles o compuestos fenólicos derivan del fenol, un anillo aromático con un grupo hidroxilo. Son un grupo diverso que comprende desde moléculas sencillas, como los ácidos fenólicos, hasta polímeros complejos como los taninos y la lignina (García y Pérez-Urria, 2011). Estos confieren diversas funciones fisiológicas para que las plantas sobrevivan y se adapten a las perturbaciones ambientales (Cheynier *et al.*, 2013).

En fresas, la clase principal de compuestos fenólicos está representada por los flavonoides, que incluyen flavanoles, flavonas, flavanonas, isoflavonas, flavonoles y antocianinas. Seguido de los flavonoides, se tienen los taninos hidrolizables (elagitaninos y gallotaninos), taninos condensados (proantocianidinas), ácidos fenólicos (ácidos hidroxibenzóicos y ácidos hidroxicinámicos), estilbenos y lignanos (Giampieri *et al.*, 2012; Cong-Cong *et al.*, 2017; Gan *et al.*, 2019).

Los compuestos fenólicos destacan principalmente por sus efectos antioxidantes, siendo la actividad de eliminación de radicales libres el modo de acción biológico más potente. El poder antioxidante de la fresa está estrechamente relacionado con la presencia de eficientes eliminadores de radicales de oxígeno, que previenen la oxidación celular, como el AA y los compuestos fenólicos como las antocianinas, derivados de ácido elágico (AE) y flavonoles (Giampieri *et al.*, 2012; Vincente *et al.*, 2014). También se ha sabido que polifenoles específicos de la fresa, como los taninos, ejercen efectos anticancerosos significativos en células humanas de carcinoma de mama, cuello uterino y colon, a través de efectos antioxidantes y apoptóticos. Se han reportado, además, efectos antiinflamatorios y antihipertensivos de las fresas, y la prevención de enfermedades cardiovasculares. También se ha indicado el potencial de las fresas para revertir los trastornos neurodegenerativos relacionados con la edad (Giampieri *et al.*, 2012; Basu *et al.*, 2014).

La acumulación de compuestos fenólicos en los tejidos vegetales es una característica distintiva

del estrés vegetal. Esta acumulación se debe al aumento de la actividad enzimática de la fenilalanina amonio liasa (PAL), la CHS y otras enzimas. Se ha observado que también aumenta la actividad de PEP carboxilasa, lo que sugiere un cambio de la producción de sacarosa a proceso en apoyo de la defensa y reparación (Cheynier *et al.*, 2013).

La vía de la pentosa fosfato se relaciona con la biosíntesis de compuestos fenólicos, proporcionando el metabolito primario eritrosa-4-fostato a la vía del shikimato, la cual es responsable de la biosíntesis de la mayoría de los compuestos fenólicos de plantas. A partir de eritrosa-4-fostato y de ácido fosfoenolpirúvico (Figura 3) se inicia una secuencia de reacciones que conducen a la síntesis de ácido shikímico y aminoácidos aromáticos (fenilalanina, triptófano y tirosina) que derivan de éste. La mayoría de los compuestos fenólicos derivan de la fenilalanina, la enzima PAL cataliza la formación de ácido cinámico por eliminación de una molécula de amonio (NH_3) de la fenilalanina. Esta enzima está situada en un punto de ramificación entre el metabolismo primario y secundario por lo que la reacción que cataliza es una importante etapa reguladora en la formación de muchos compuestos fenólicos. En la biosíntesis de prácticamente todos los compuestos fenólicos, tras la actividad de la enzima PAL también es necesaria la actividad de las enzimas C4H y 4-cumaroil: CoA-ligasa (4CL), tras la acción de estas 3 enzimas, ocurren básicamente adiciones de más grupos hidroxilo y otros sustituyentes. Los ácidos *trans*-cinámico y *p*-cumárico se metabolizan para formar ácido ferúlico y ácido cafeico cuya principal función es ser precursores de otros derivados más complejos como cumarinas, lignina, taninos, flavonoides e isoflavonoides (García y Pérez-Urria, 2011; Cheynier *et al.*, 2013; Macheix, 2018; Li *et al.*, 2019).

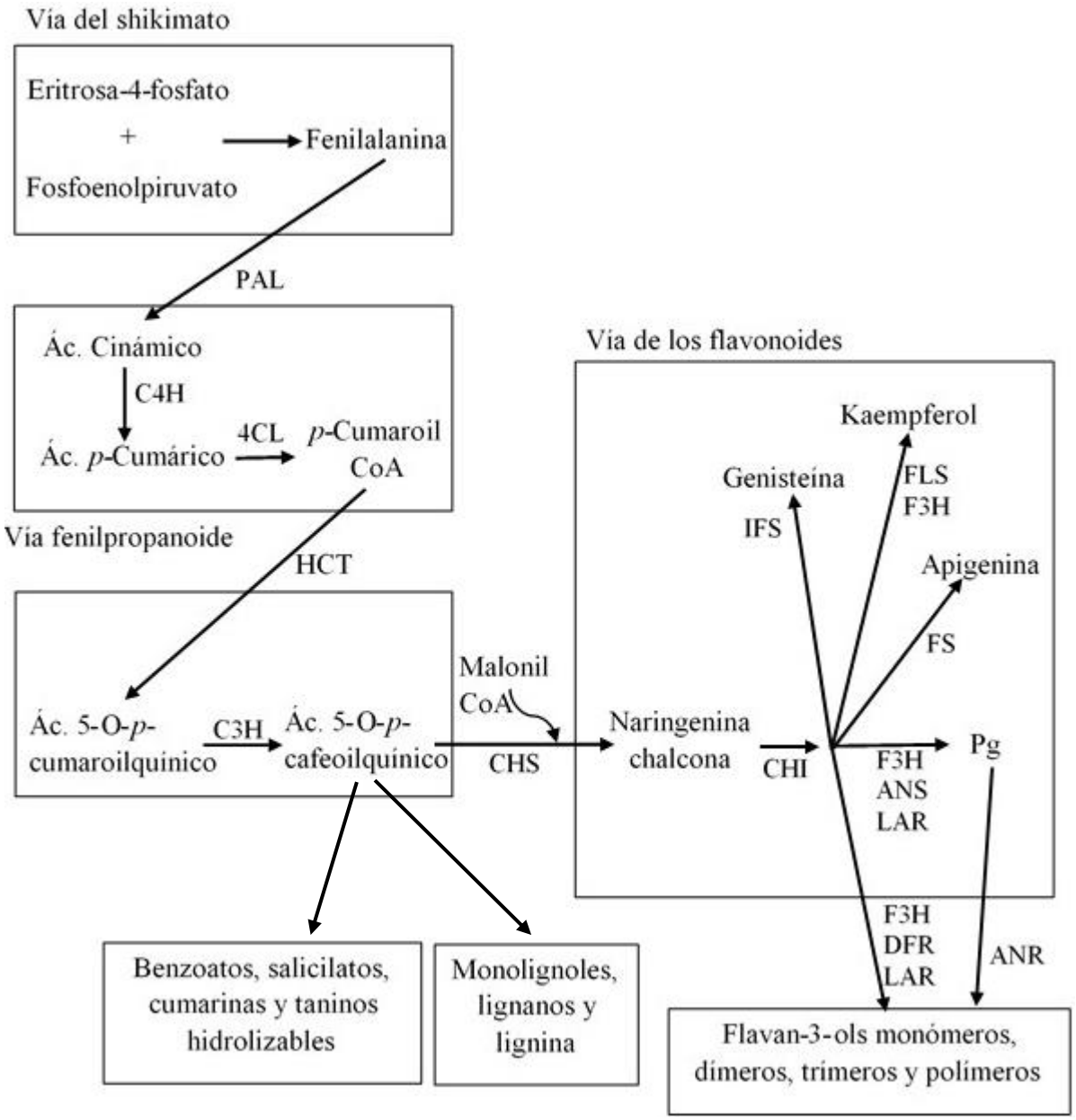


Figura 3. Principales vías de ramificación de la biosíntesis de compuestos fenólicos. PAL, fenilalanina amoniaco liasa; C4H, cinamato-4-hidroxilasa; 4CL, *4*-cumaroil: CoA-ligasa; HCT, hidroxicinamoil transferasa; C3H, *p*-cumarato-3-hidroxilasa; CHS, chalcona sintasa; CHI, chalcona isomerasa; ANS, antocianidina sintasa; DFR, dihidroflavonol reductasa; FS, flavona sintasa; FLS, flavonol sintasa; F3H, flavanona-3-hidroxilasa; IFS, isoflavona sintasa; ANR, antocianidina reductasa; LAR, leucoantocianidina reductasa; Pg, Pelargonidina (Modificado de Cheynier *et al.*, 2013)

El contenido total de compuestos fenólicos puede aumentar (57 %) durante el almacenamiento refrigerado (4 °C), según lo reportado por Tudor *et al.* (2015).

Los compuestos fenólicos muestran los cambios metabólicos más notables durante el desarrollo del fruto de la fresa. Los fenoles solubles totales disminuyen a medida que maduran las fresas, de 0.6 % en fresas verdes a 0.3 % en fresas rojas. En las primeras etapas, los flavonoides, principalmente taninos condensados, se acumulan a niveles altos y proporcionan a la fruta inmadura un sabor astringente. Más tarde, cuando la fruta comienza a madurar, otros flavonoides, como las antocianinas, los derivados del ácido cinámico y *p*-cumárico, y los flavonoles se acumulan a niveles altos (Perkins-Veazie y Huber, 1988; Fait *et al.*, 2008). Ornelas-Paz *et al.* (2013) observaron un aumento en el contenido de ácidos fenólicos hasta la etapa rosada y una posterior disminución en la etapa madura, así como una disminución a través de la maduración de flavonoles, entre ellos los derivados de kaempferol y quercetina. También se observó un aumento de catequina en etapas iniciales de la maduración, la cual descendió en la etapa madura. Se reportaron, además, valores sumamente altos para el contenido de naringenina en las etapas iniciales, la cual disminuyó drásticamente al final de la maduración. Finalmente mencionaron que los niveles iniciales de elagitaninos (galoil-HHDP-glucosa) fueron bajos, pero aumentaron considerablemente en frutos maduros. Pineli *et al.* (2011) observaron una disminución en el contenido de AE desde las fresas verdes hasta las fresas completamente rojas.

2.3.5. Color

El color es el factor más importante que utiliza el consumidor para determinar el punto de maduración y la vida poscosecha de las frutas, por lo tanto, es un factor determinante en la decisión de compra (Abbott, 1999; Corrêa *et al.*, 2014). Estudios indican que los consumidores se inclinan por un color rojo brillante uniforme (Lado *et al.*, 2012; Bhat *et al.*, 2015), el cual se asocia a la percepción de dulzura y sabor (Ornelas-Paz *et al.*, 2013). Por ejemplo, se ha descubierto que la adición de un colorante rojo a las soluciones de sacarosa con sabor a cereza y fresa aumenta la percepción de dulzor (Zampini *et al.*, 2007), mientras que la adición de color amarillo a las bebidas con sabor a fresa disminuye la percepción de dulzura, asociándose con frutas no maduras (Johnson *et al.*, 1983). Las fresas rojas y maduras son preferidas, ya que generalmente se consideran más

dulces y jugosas en comparación con otras menos maduras (Bhat *et al.*, 2015).

El color se favorece conforme transcurre la maduración, debido a la disminución de clorofila y carotenoides a consecuencia de la degradación de los cloroplastos y cromoplastos (Schwab y Raab, 2004) y la acumulación de antocianinas (Enríquez-Guevara *et al.*, 2010). La concentración de antocianinas proporciona más información sobre el estado de madurez de la fruta (Abbott, 1999).

Las antocianinas comparten la estructura básica de un esqueleto de carbonos C6-C3-C6. Pertenecen al grupo de los flavonoides. Son glucósidos de antocianidinas, compuestos por dos anillos aromáticos A y B unidos por una cadena de 3 C. Variaciones estructurales del anillo B resultan en seis antocianidinas: cianidina, pelargonidina, peonidina, delfinidina, petunidina y malvidina (Figura 4). Las antocianinas consisten en la base aglicona (antocianidinas), sustituciones glicosídicas en las posiciones 3 y/o 5 con mono, di o trisacáridos que incrementan su solubilidad (glucosa, galactosa, xilosa, ramnosa, arabinosa, rutinosa, soforosa, sambubiosa y gentobiosa). Otra posible variación en la estructura es la acilación de los residuos de azúcares de la molécula con AOs alifáticos, como el malónico, acético, AM, AS y AO, o aromáticos, como el *p*-cumárico, cafeico, ferúlico, sinápico, gálico, o p-hidroxibenzóico (Seigler, 1998; Zhao, 2007; Garzón, 2008).

El anillo A de las antocianinas se sintetiza por la ruta del ácido malónico con la condensación de tres moléculas de malonil-CoA, mientras que el anillo B se sintetiza por la ruta de ácido shikímico. El *p*-cumaril-CoA participa en una reacción de condensación con las tres moléculas de malonil-CoA, para formar una chalcona de 15 C, reacción propiciada por una CHS. Este compuesto intermedio de 15 C es transformado en una flavanona en una reacción catalizada por una CHI. Finalmente, la flavanona es transformada en la correspondiente antocianidina por una reacción de hidroxilación en el carbono 3 seguido de una deshidratación. La molécula de antocianidina se estabiliza por glicosilación del heterociclo; reacción en la que interviene una glicosil transferasa y posteriores posibles reacciones de metilación de los hidroxilos seguido de acilaciones (Garzón, 2008; Li *et al.*, 2019). El color de las antocianinas depende del número de grupos hidroxilo y metoxilo en el anillo B y del pH de las vacuolas en las que se almacenan. La antocianina más abundante en fresas es la pelargonidina-3-glucósido, independientemente de los factores genéticos y ambientales, y además la presencia de cianidina-3-glucósido también es constante en las fresas, aunque solo en menores proporciones (Giampieri *et al.*, 2012). Otras antocianinas como malonilglucósido de pelargonidina y cianidina, rutinósido y acetilglucósido de pelargonidina, rutinósido de cianidina y glucósidos de peonidina, delfinidina y malvidina han sido reportadas en fresa (Lopes-da-Silva *et al.*, 2007; Buendia *et al.*, 2009; Aaby *et al.*, 2012; Ornelas-Paz *et al.*, 2013;

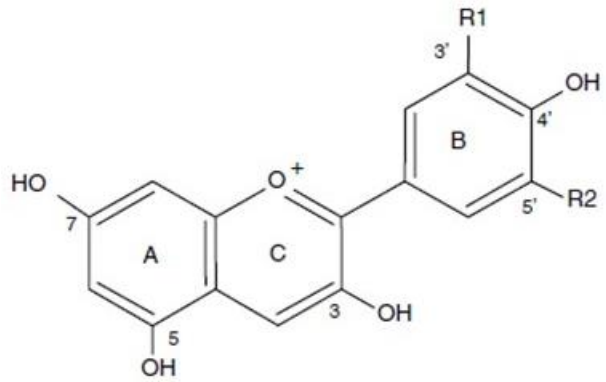
Enomoto *et al.*, 2018; Siebeneichler *et al.*, 2020).

Se ha informado que las antocianinas son los compuestos fenólicos más abundantes en la mayoría de los cultivares de fresa, las cuales aumentan considerablemente durante la maduración, contribuyendo en promedio al 41 % del contenido fenólico total. La concentración de antocianinas varía entre 85 y 660 mg/Kg, presentando un promedio de 340 mg/Kg. La pelargonidina-3-glucósido contribuye del 60 al 95 % al contenido total de antocianinas (Aaby *et al.*, 2012). Adicionalmente, ha sido observado que los flavonoides derivados de la fenilalanina se acumulan en forma de proantocianidinas durante las primeras etapas del desarrollo, y durante el período de maduración, la producción de metabolitos se desplaza hacia los productos finales de la vía flavonoide, es decir, pigmentos de antocianinas (Fait *et al.*, 2008).

Las características cromáticas se definen mediante el sistema de color o espacio CIELab, en donde las coordenadas colorimétricas o de cromaticidad son la luminosidad (L^* = 0 negro y L^* = 100 blanco), el componente de color rojo / verde a^* ($a^* > 0$ rojo, $a^* < 0$ verde) y componente de color azul / amarillo b^* ($b^* > 0$ amarillo, $b^* < 0$ azul), además del índice de saturación (C^*) y el ángulo de tonalidad ($°h$ 0-360º) (OIV-MA-AS2-11, 2006).

En las fresas se ha observado que el valor de L^* aumenta de la etapa blanca a la rosada y disminuye en la etapa de completa madurez. El $°h$ presenta disminuciones a partir de la etapa blanca hasta la etapa madura, mientras que a^* y C^* tienden a aumentar a partir de la etapa rosada. Los valores de b^* aumentan desde la etapa de frutos blancos a rosados y luego valores similares fluctúan durante las siguientes etapas (Ménager *et al.*, 2004; Nunes *et al.*, 2006; Ornelas-Paz *et al.*, 2013). Además, se ha informado que durante el almacenamiento en refrigeración (4 °C) por 6 días, de fresas cosechadas en etapa rosada, se continuó observando una disminución de L^*, mientras que a* y b^* no presentaron cambios significativos (Octavia y Choo, 2017).

El CAT depende del cultivar y de las condiciones de almacenamiento, puesto que se ha indicado que en algunos cultivares el CAT aumenta en condiciones de almacenamiento refrigerado (6 °C) mientras que en otros disminuye, sin embargo, se ha observado que generalmente no hay cambios visibles asociados en el color, pero considerando los efectos beneficiosos que trae el poder antioxidante de las antocianinas, la disminución del CAT se considera una disminución en la calidad del fruto (Cordenunsi *et al.*, 2003). En fresas cosechadas en etapa rosada, almacenadas a 4 °C también fue reportada una disminución del CAT (Octavia y Choo, 2017).



Antocianidinas	Sustitutos		λ_{max} (nm) espectro visible	Peso molecular
	R_1	R_2		
Pelargonidina	H	H	494 (naranja)	271
Cianidina	OH	H	506 (naranja-rojo)	287
Delfinidina	OH	OH	508 (rojo)	303
Peonidina	OCH_3	H	506 (naranja-rojo)	301
Petunidina	OCH_3	OH	508 (rojo)	317
Malvidina	OCH_3	OCH_3	510 (azulado-rojo)	331

Figura 4. Estructura de antocianidinas comúnmente encontradas en bayas (Modificado de Zhao, 2007)

2.4. Estrategias para el Mantenimiento de la Calidad de Fresas en Poscosecha

Las fresas se encuentran entre las frutas más perecederas. Una gran proporción es desechada (Kelly *et al.*, 2019), por lo que es sumamente importante establecer estrategias para favorecer la calidad de la fresa cosechada tempranamente, de tal forma que se puedan almacenar por un período más largo y al mismo tiempo mejorar su color, sabor y firmeza (Nunes *et al.*, 2006). Las prácticas posteriores a la cosecha tienen como objetivo disminuir la tasa de respiración y la pérdida de agua, manteniendo la firmeza de la fruta y minimizando el crecimiento de patógenos. Las fresas tienen una ventana de comercialización estrecha de 7 a 10 días si se tiene especial cuidado (Azam *et al.*, 2019).

El preenfriamiento rápido es esencial para productos como la fresa, que tiene una alta tasa de

metabolismo, ya que ralentiza la maduración, la respiración, la senescencia, la descomposición y la pérdida de agua. El hidro enfriamiento es el método de preenfriamiento más rápido, sin embargo, trae consigo problemas de descomposición por el agua que queda en las fresas después del hidro enfriamiento, por lo que las fresas se enfrían típicamente con aire forzado a 4 °C y posteriormente se almacenan en refrigeración a 4 °C (Kuchi y Sharavani, 2019). Sin embargo, se sugiere que las condiciones óptimas de almacenamiento a lo largo de la cadena de suministro son 1 °C y 90 % de HR. Estas condiciones resultan primordiales para reducir las pérdidas en la calidad de la fresa, particularmente en apariencia, textura, pérdida de peso, azúcares y compuestos bioactivos. Las condiciones no óptimas, como el almacenamiento en el productor a 5 °C, el envío a las tiendas a 8 °C y el almacenamiento a nivel del consumidor a 20 °C, tiene un impacto en la calidad general de la fresa, en comparación con el mantenimiento de las condiciones óptimas (Kelly *et al.*, 2019).

La vida útil de las fresas frescas en almacenamiento en frío (0 °C) suele ser de alrededor de 2 semanas y, después del almacenamiento en frío, estos productos tienen hasta 3 a 4 días de vida útil, que suele ser a temperatura ambiente (aprox. 20 °C) (Gol *et al.*, 2013).

Una estrategia de almacenamiento son las atmósferas controladas, en particular con altas concentraciones de CO_2. Esta tecnología se utiliza ampliamente para prolongar el almacenamiento y la vida útil. Estas condiciones mantienen una serie de características de calidad importantes, como la firmeza, los sólidos solubles, la acidez y la frescura, y reducen la descomposición por hongos. Sin embargo, el contenido de vitamina C se reduce por altos niveles de CO_2. Además, la firmeza de las fresas aumenta, en lugar de simplemente mantenerse, cuando las frutas están expuestas a altos niveles de CO_2 durante el almacenamiento en frío (Schwab y Raab, 2004).

Por otra parte, entre los métodos de control alternativos, la radiación ultravioleta (UV-C) es conocida por prevenir la descomposición por hongos y mejorar el contenido fitoquímico en la fruta cuando se aplica después de la cosecha. Albán *et al.* (2010) informaron que la exposición a una distancia de 40 cm por 7.5 min permitió conservar fresas por 10 días en refrigeración a 5 °C mantenidas en bandejas de polipropileno, observándose una disminución del crecimiento bacteriano y un mejor color atribuido a un aumento de antocianinas en las fruta tratadas, así como un contenido similar de SST en relación al control, sin embargo, se observó una disminución de la firmeza en las frutas tratadas, debido a que la absorción de energía genera especies reactivas de oxígeno que causan estrés oxidativo afectando la estabilidad de la pared y membrana celular, lo que promovió una disminución de la humedad. En otro estudio, se evaluó el efecto de la radiación

UV-C combinado con ClO_2 o AF en fresas cosechadas en etapa rosada, las cuales se empaquetaron en cajas de tereftalato de polietileno con pocos orificios de ventilación y se almacenaron a 4 °C y 75 % de HR durante 12 días. El ClO_2 acuoso se ha utilizado como alternativa al cloro para inactivar las bacterias patógenas en la fruta fresca, mientras que el AF también ha demostrado tener actividad antimicrobiana. Se observó que ambos tratamientos redujeron las poblaciones iniciales de bacterias (aeróbicos totales), mohos y levaduras y que además mostraron mejores puntuaciones sensoriales que el control, sugiriendo que existe una correlación entre la calidad sensorial y el crecimiento de microorganismos en las fresas (Kim *et al.*, 2010).

El ozono es un desinfectante eficaz con un amplio espectro antimicrobiano y su aplicación para la descontaminación superficial de cultivos cosechados ha sido estudiada en tratamientos gaseosos o acuosos. La ozonización (3.5 mg/L) de fresas en etapa madura por un lapso de 5 min, almacenadas en refrigeración a 5 °C, retrasó el inicio de la infección por *B. cinerea*. El tratamiento con ozono no afectó la calidad sensorial, la actividad antioxidante y el contenido de fenoles totales y tampoco tuvo un efecto sobre el color y el contenido de antocianinas en los frutos. Sin embargo, en ese estudio mencionan discrepancias con otros estudios en donde sí se vio afectado el color y el contenido de antocianinas, indicando que esto podría estar asociado en parte con diferencias en las dosis de ozono aplicadas y los diferentes cultivares de fresa evaluados, lo que sugiere que no es un tratamiento efectivo en todos los cultivares de fresa existentes (Contigiani *et al.*, 2020).

El 1-metilciclopropeno es un gas que inhibe la acción del etileno y prolonga la vida de muchas frutas y hortalizas. Se observó que su aplicación en fresas, cosechadas cuando el 90 % de su superficie presentaba una coloración roja, mantenidas en recipientes cerrados pero ventilados durante 3 días en oscuridad a 20 °C y 95 – 100 % de HR, permitió reducir la pérdida de firmeza, lo que incrementó su vida poscosecha, pero causó una reducción del contenido de compuestos fenólicos, especialmente de antocianinas, causantes del color rojo característico, debido a la disminución de la actividad de la enzima PAL, efecto causado por la disminución de la producción de etileno en los frutos (Jiang *et al.*, 2001; Azam *et al.*, 2019).

La melatonina actúa no solo como una molécula de señalización para mejorar la resistencia de las plantas al estrés biótico y abiótico, sino también como un poderoso eliminador de radicales libres por lo que posee una actividad antioxidante directa. En fresas cosechadas en etapa rosada se aplicó melatonina, encontrándose que tanto la concentración de 0.1 mmol/L como la de 1 mmol/L fueron efectivas para retrasar la senescencia, la incidencia y la severidad de pudriciones, así como la

pérdida de peso y firmeza, además que aumentó el contenido total de fenoles, lo que resultó en una mayor capacidad antioxidante. Sin embargo, el tratamiento con melatonina tuvo un impacto negativo en el contenido de AA, además que retrasó el desarrollo del color y la acumulación de SST (Liu *et al.*, 2018).

El ASA es un compuesto fenólico simple que regula una serie de procesos en las plantas que incluyen la producción de calor, la resistencia a enfermedades, la germinación de semillas, la polarización sexual y la producción de etileno. El ASA ha sido aplicado en fresa en las etapas de crecimiento vegetativo, desarrollo del fruto y poscosecha (en etapa rosada) y en sus combinaciones, en diferentes concentraciones, siendo la más efectiva 2 mmol/L en la combinación de las 3 etapas de aplicación. Las fresas se almacenaron en oscuridad a 2 °C por 14 días. Se informó una disminución de la producción de etileno, así como la inhibición de la descomposición fúngica y una retención de la calidad general. La disminución en la producción de etileno en frutos cosechados de plantas tratadas con ASA en las etapas de crecimiento vegetativo y desarrollo del fruto se debe a una disminución en la tasa de biosíntesis y actividad de la 1-aminociclopropano-1-carboxilato (ACC) sintasa que conduce a una disminución en la acumulación de etileno en el tejido del fruto. El ASA y sus derivados desencadenan el sistema de defensa de las plantas contra enfermedades (Babalar *et al.*, 2007). En otro estudio fue evaluado el efecto del tratamiento precosecha de ASA combinado con un tratamiento poscosecha de $CaCl_2$ acuoso en fresas en etapa roja almacenadas por 7 días a 2 °C. El calcio tiene efectos sobre los procesos de maduración. La combinación de los tratamientos mejoró la firmeza, disminuyó el deterioro, la pérdida de peso y la vitamina C, pero no tuvo efectos sobre el contenido de SST y la TA. El ASA incrementa la actividad de ascorbato peroxidasa (APX), que aumenta la capacidad antioxidante y la cantidad de AA en las frutas. También afecta la hinchazón celular que conduce a una mayor firmeza de las frutas. El calcio favorece la formación de enlaces cruzados entre los grupos carboxilo de las cadenas de poliurónidos que se encuentran en la laminilla media de la pared celular, además aumenta la presión de turgencia celular y estabiliza la membrana celular (Shafiee *et al.*, 2010).

En la búsqueda de más alternativas naturales se ha realizado un notable trabajo de investigación sobre la utilización de oligosacáridos derivados de la hidrólisis enzimática de polisacáridos, tales como alginato, quitosano y pectina en tratamientos pre y poscosecha para aumentar la vida útil de almacenamiento de diferentes productos hortícolas (Bose *et al.*, 2019). El uso de éstos podría mejorar parámetros de calidad como el color y la firmeza y aumentar la resistencia sistémica

adquirida en plantas. Se ha considerado el uso de oligosacáridos como alternativa a la aplicación de agroquímicos (Enríquez-Guevara *et al.*, 2010).

2.5. Oligosacáridos

Un oligosacárido es cualquier fragmento corto de un polisacárido, cuyas unidades monoméricas están interconectados por enlaces glicosídicos. Algunos oligosacáridos pueden, a concentraciones bajas, ejercer efectos de señalización en los tejidos vegetales, debido a que actúan como sustratos de enzimas vegetales específicas (Fry *et al.,* 1993). Son compuestos derivados de la pared celular de plantas, hongos y tejidos animales, que pueden generar efectos genéticos, bioquímicos y fisiológicos diversos en tejidos vegetales (Enríquez-Guevara *et al.,* 2010). Una fuente importante de oligosacáridos es la pectina cítrica, un polisacárido primario de la pared celular obtenido a partir de los desechos de la producción de jugos de naranja. Los residuos de la industria del procesamiento de jugo oscilan entre 60 y 40% del peso de la fruta y están compuestos por membranas de piel y segmentos (Fry *et al.*, 1993; Falcón Rodríguez *et al.*, 2015; Babbar *et al.*, 2016). Las pectinas son polisacáridos ácidos que constituyen una alta proporción de la matriz primaria de la pared celular y de la lámina media en las plantas (Dumville y Fry, 2000). Las pectinas son heteropolímeros ramificados con un esqueleto lineal constituido por unidades de AGal unidas por enlaces α (1-4) que pueden estar parcialmente esterificados por grupos metilo en la posición C-6 y/o por grupos acetilo en la posición C-2 o C-3. Estas estructuras lineales forman el homogalacturonano (HG), que se alternan con azúcares neutros intermedios dando lugar al Ramnogalacturonano I y Ramnogalacturonano II. También se encuentra el xilogalacturonano, que es una cadena de HG en la que parte de las unidades de AGal están sustituidas en el C-3 y/o en el C-2 por residuos de D-xilosa unidos por enlaces β-(1-3) (Van Cutsem y Messiaen, 1994; Dumville y Fry, 2000; Ferreira, 2015). Las pectinas contribuyen a la fuerza y flexibilidad de las paredes celulares de los órganos no lignificados y las frutas en maduración. Son los primeros objetivos de las enzimas liberadas por patógenos invasores fúngicos o bacterianos, y los oligómeros pécticos liberados parecen ser moléculas señalizadoras que desencadenan mecanismos de defensa de las plantas y la morfogénesis (Van Cutsem y Messiaen, 1994). Durante la maduración de los frutos, la PG degrada las pectinas

en la pared celular y laminillas medias, provocando el ablandamiento de la fruta y, al mismo tiempo, la producción de oligómeros pécticos, los cuales, al ser reconocidos por receptores en la pared celular y la membrana plasmática, provocan respuestas biológicas a través de una cascada de transducción de señales (Van Cutsem y Messiaen, 1994; Vera-Guzman *et al.*, 2017).

La actividad biológica de los oligosacáridos depende en gran medida de su grado de polimerización (GP), grado de des acetilación y enlaces glicosídicos (Fry *et al.*, 1993; Bose *et al.*, 2019). Los oligosacáridos con un GP > 3 tienen una bioactividad significativa cuando se aplican a las plantas, incluyendo la promoción del crecimiento y la inducción de la defensa de la planta hospedera (Liu *et al.*, 2020). Se ha demostrado que los oligómeros con un GP de 10 a 12 son los más activos (Simpson *et al.*, 1998; Falcón Rodríguez *et al.*, 2015). La dependencia del tamaño de los oligogalacturónidos biológicamente activos podría deberse al hecho de que se requiere un tamaño mínimo para que los oligogalacturónidos adopten la conformación reconocida por su receptor, mientras que el tamaño máximo para la bioactividad puede reflejar la capacidad de los oligogalacturónidos para alcanzar y/o encajar en su receptor (Van Cutsem y Messiaen, 1994; Enríquez-Guevara *et al.*, 2010). Entre las respuestas que los oligosacáridos generan, se ha informado que favorecen el fortalecimiento de la pared celular a través de la reticulación oxidativa de polímeros, la generación y acumulación de especies reactivas de oxígeno. También inducen la producción de metabolitos antimicrobianos como las fitoalexinas y la síntesis de proteínas relacionadas con la patogénesis, aumentando la resistencia sistémica adquirida en plantas. Regulan el crecimiento y desarrollo de las plantas, modulan el flujo iónico transmembranal, regulan la síntesis y acción de hormonas como el etileno y el ABA (Fry *et al.*, 1993; Ramírez *et al.*, 2003; Osorio *et al.*, 2008; Enríquez-Guevara *et al.*, 2010).

La síntesis de etileno desempeña un papel importante en la coordinación de las respuestas de defensa de las plantas a las heridas mecánicas y la invasión de patógenos; también desempeña un papel en la coordinación del proceso de maduración de las frutas mejorando los parámetros de calidad como el color (Dumville y Fry, 2000; Enríquez-Guevara *et al.*, 2010). En fresa, se ha observado que la aplicación de oligosacáridos de quitosano (OQ) podría intervenir en la regulación genética de la biosíntesis de etileno, inhibiendo la actividad ACC sintasa y ACC oxidasa, lo cual influye en el proceso de maduración y senescencia de los frutos (He *et al.*, 2019). Por otra parte, se ha informado que la expresión de genes relacionados con la señalización de ABA, el cual también juega un papel importante durante la maduración de la fresa, se vio suprimida por la acción de

oligosacáridos de alginato (OA), permitiendo un aumento de la vida poscosecha del fruto (Bose *et al.*, 2019).

Estudios realizados con un producto comercial de oligosacáridos desarrollado por investigadores del Instituto Nacional de Ciencias Agrícolas (INCA) en Cuba (PectiMorf'® de Labiofam, San José de las Lajas, Mayabeque, Cuba) aplicado en plantas de guayaba a dosis de 10 y 20 mg/L causaron un mayor desarrollo de raíces, siendo la dosis de 20 mg/L la más efectiva (Ramírez *et al.*, 2003).

En tomate se evaluó el efecto de dos productos comerciales de oligosacáridos, PectiMorf'® y Enerplant® (Biotec, Monterrey, N.L, México) aplicados vía foliar a dosis de 10 mg/L y 1.3 mL/ha, respectivamente, observando que Enerplant® causó mayores rendimientos, frutos con una mayor firmeza y contenido de AC, sin embargo, su concentración de SST y la relación SST / TA fue menor en comparación con los frutos de plantas tratadas con PectiMorf'® El tratamiento con PectiMorf'® causó frutos con color rojo más intenso que los producidos por plantas tratadas con Enerplant®. Quizá estas diferencias se deban a la procedencia de los oligosacáridos, ya que PectiMorf'® es producido a partir de pectina conteniendo 58 – 61 % de AGal, mientras que Enerplant® es una mezcla de diferentes tipos de oligosacáridos. Los oligosacáridos producen efectos de fosforilación en proteínas membranales al unirse a ellas e inducen así la floración y los consecuentes incrementos en el rendimiento, también inducen la producción de etileno que activa la fosforilación como parte de la respiración controlando la síntesis de AC, además inducen la síntesis de enzimas que degradan azúcares de almacenamiento. Los oligosacáridos también podrían tener efecto sobre el influjo de potasio y el eflujo de calcio, que permiten la apertura de estomas y en consecuencia hay mayor captación de CO_2, mayor eficiencia fotosintética y más azúcares. Los oligosacáridos pécticos (POS) pueden formar el complejo denominado “caja de huevo” al unirse al calcio y así estabilizar la estructura de la pared celular (García-Sahagún *et al.*, 2009).

Yan *et al.* (2012) aplicaron en etapa precosecha OQ (0, 0.3, 0.7 y 1.0 g/L) en dátil chino y observaron una reducción de daños por hongos (*Monilinia fructicola y Alternaria alternata*) y un incremento de la vida poscosecha, ya que los OQ retrasaron el cambio de color de la piel y la disminución de la firmeza durante el almacenamiento a 0 °C y 80–90 % HR por 60 días. La dosis más efectiva fue de 0.7 g/L. Los OQ mejoraron la actividad de las principales enzimas relacionadas con la defensa, la peroxidasa (POD) y la β-1,3-glucanasa (GLU). La POD cataliza la formación de lignina en la pared celular que ayuda a reforzar la estructura celular como uno de los mecanismos de defensa contra la infección patógena, mientras que la GLU induce la producción de proteínas

que participan en las respuestas de defensa de la fruta. Estas enzimas pueden ser activadas por la presencia de peróxido de hidrógeno (H_2O_2). Los OQ también influyeron en la actividad de las enzimas antioxidantes, disminuyendo la actividad de catalasa (CATA), la cual puede contribuir a la acumulación de H_2O_2, aumentando la actividad de superóxido dismutasa (SOD) y APX, las cuales podrían proteger los tejidos de la fruta de cualquier posible daño del exceso de H_2O_2.

Yin *et al.* (2012) también aplicaron OQ (0, 50, 200, 500 y 1000 mg/L) de manera foliar en orégano griego. La concentración de 500 mg/L fue efectiva para inducir la promoción del crecimiento en altura, mientras que la dosis de 50 mg/L fue la más eficaz para inducir la acumulación de polifenoles (ácidos fenólicos, fenoles y flavonoides totales), sugiriendo un aumento de la actividad de las enzimas PAL y CHS. Además, los OQ a 50 mg/L promovieron la generación de H_2O_2 poco después de la aplicación, sugiriendo una relación entre el H_2O_2 inducido por OQ y la acumulación de polifenoles.

Ochoa-Villarreal *et al.* (2011) aplicaron POS (0, 0.5, 1.0 y 1.5 mg/L) en uva de mesa, antes del envero, e informaron un aumento en la coloración y el contenido de antocianinas, siendo la dosis 1.5 mg/mL la dosis más efectiva. El aumento en la coloración fue relacionado a un incremento en el contenido de antocianinas asociado a la inducción de mayores niveles de PAL. Martínez-Téllez y Aispuro (2011) publicaron un método (US 2011/0281728 A1) para aumentar la coloración de uva de mesa a partir de la aplicación exógena de POS (2.0 mg/mL). La dosis recomendada es de 0.25 L por planta. Se recomienda realizar la aplicación en la etapa de envero, durante la mañana a una temperatura de 18-20 °C, por un período de dos días. La aplicación de los POS puede aumentar el color de las uvas en un 32 % en el índice de color para uvas rojas (CIRG). En uva de vino, Villegas *et al.* (2016) decidieron aplicar la mejor dosis de POS reportada por Ochoa-Villarreal *et al.* (2011) (1.5 mg/mL). Los investigadores observaron que la aplicación exógena de POS, antes del envero, generó un aumento significativo en el contenido total de antocianinas. En las uvas se han identificado varias proteínas de la familia MYB que controlan varios puntos de la vía fenilpropanoide, y el aumento de antocianinas se ha relacionado con un aumento a corto plazo en la expresión de la PAL, mediado por una disminución en la expresión de MYB4A (un inhibidor de la expresión de C4H y 4CL), sugerido como inhibidor de la expresión de la enzima PAL. También se observó un aumento a largo plazo en la expresión de la enzima UFGT (p), que participa en la estabilización de antocianidinas mediante la adición de un residuo de glucosa en la posición 3 del anillo C, dicha expresión es probablemente mediada por un aumento en MYBA1 (activa la expresión de UFGT).

Vera *et al.* (2017) realizaron un estudio en naranjas y pomelos en donde evaluaron el tratamiento poscosecha con POS (10 g/L), en condiciones de almacenamiento (40 días) a 2 °C y 90 % de HR y a 20 °C y 95 % de HR. Se observó que los POS fueron capaces de reducir la descomposición y también los desórdenes fisiológicos (lesiones por frío) posteriores a la cosecha sin inducir cambios relevantes en el color o sabor de la fruta, sugiriendo que los POS pueden contribuir en la defensa de los frutos mediante la inducción de genes biosintéticos de metabolitos secundarios como la enzima PAL, así como del sistema enzimático antioxidante.

Recientemente, OQ fueron aplicados en durazno (0 y 5 g/L) (Chen *et al.*, 2018) y manzana (0, 2 y 4 g/L) (Sarkar *et al.*, 2018), mientras que en kiwi se aplicaron OA (0, 25, 50 y 100 mg/L) (Liu *et al.*, 2020). En durazno se observó una reducción de infecciones fúngicas (*M. fructicola y Penicillium expansum*), induciendo una regulación positiva de los genes relacionados con la vía de señalización del ASA, la cual es esencial para la activación de la resistencia sistémica, mediante el aumento de los niveles de transcripción de genes relacionados con la vía de señalización de ASA (PAL y genes relacionados con la patogénesis como el NPR1 y PR1). Además, se observó un aumento en los niveles de fenoles totales, flavonoides y lignina, los cuales se asocian a la resistencia a diversas enfermedades y un aumento en las actividades enzimáticas de SOD y CATA, polifenoloxidasa (PFO) y APX, así como una disminución del contenido de malondialdehído (MDA), el cual es un producto de la peroxidación de lípidos que puede reflejar el grado de peroxidación de lípidos inducida por el estrés oxidativo. Un nivel más alto de actividades de SOD, CATA, POD y APX y un nivel más bajo de contenido de MDA equivalen a un sistema de defensa antioxidante más eficaz y están estrechamente asociados con el retraso de la senescencia en la fruta cosechada. La PFO está involucrada en la lignificación de las células vegetales y la oxidación de polifenoles en quininas que pueden restringir el crecimiento del fitopatógeno.

En manzana almacenada a 4 °C por 15 semanas, se observó un aumento de la actividad de SOD, CATA y guayacol peroxidasa (GPX), una isoenzima peroxidasa que entrecruza los restos fenólicos de la vía fenilpropanoide para la biosíntesis de ligninas y lignanos. Se informó además un aumento de fenoles totales, siendo en general el tratamiento de 2 g/L el más efectivo.

En kiwi almacenado a 25 °C durante 4 días, se observó que el tratamiento con OA a 50 mg/L causó una reducción de la descomposición poscosecha y fue efectivo para controlar patógenos causantes del moho gris, moho azul y podredumbre negra. Se observó además una disminución de la pérdida de firmeza indicando que los OA inhibieron la degradación natural de la protopectina insoluble a

pectina soluble en agua, debido a una disminución de la actividad de PME y PG. Además, que se redujo la pérdida de agua, ayudando así a mantener la firmeza de los kiwis durante el almacenamiento. Por lo tanto, se disminuyó la capacidad de los patógenos poscosecha para establecerse e iniciar una infección. También se informó una mayor actividad de CATA, durante los primeros dos días de almacenamiento y SOD, durante todo el almacenamiento. Fue reportado además un aumento del contenido de fenoles totales, así como del contenido de flavonoides totales a partir del segundo día de almacenamiento.

En fresa, He *et al.* (2018) evaluaron el efecto de la aplicación de OQ (0 y 50mg/L) en etapa precosecha, observando un incremento en la firmeza asociado a un aumento de la viscosidad indicando mayor fuerza de la unión de célula a célula y un aumento del contenido de lignina, la cual proporciona dureza y estabilidad a la estructura de la pared celular. Además, al evaluar los componentes de la pared celular (pectina soluble en agua, pectina iónica, pectina de tipo enlace covalente, hemicelulosa y celulosa) se informó que los OQ mejoraron el contenido de todos los componentes, mientras que sólo la fracción péctica soluble en agua fue menor que en el control, influyendo en el aumento de la firmeza de la fresa, lo anterior debido a una disminución de la actividad de los genes FaPL, FaPE y FaEG. También se observó un incremento de SST, TA, así como de la relación de SST / TA, indicando un mejor sabor y calidad de las fresas tratadas. Por otra parte, se incrementó el contenido de vitamina C, fenoles, flavonoides y antocianinas totales, lo que implicó un aumento en la actividad antioxidante de las fresas. Posteriormente, el mismo autor evaluó el efecto de la aplicación de OQ (0, 50 y 100 mg/L) en fresas cosechadas en etapa roja, las cuales se almacenaron a 20 °C y 80 % de HR por 7 días (He *et al.*, 2019), siendo el tratamiento de 100 mg/L el más efectivo, el cual causó una menor disminución de firmeza debido a la reducción de la expresión génica de las enzimas de degradación de polisacáridos de la pared celular (FaPL, FaPE y FaEG), retrasando la degradación de los componentes de la pared celular, lo que originó un menor contenido de pectina soluble en agua de las fresas tratadas. Además, informaron que los contenidos de azúcares totales, SST, vitamina C, fenoles y flavonoides y antocianinas totales disminuyeron tras el almacenamiento, sin embargo, las fresas tratadas presentaron la menor disminución. El CAT y la actividad antioxidante incrementó en todos los grupos en el día 2, posteriormente en el día 4 solo las fresas tratadas con 100 mg/L continuaron incrementado y en el día 6 los contenidos disminuyeron en todos los grupos, pero estos fueron mayores para las fresas tratadas con 100 mg/L de OQ. En cuanto a la TA se observó una

disminución tras el almacenamiento, sin diferencias entre el testigo y los tratamientos. La disminución de compuestos fenólicos al final del almacenamiento podría deberse a la descomposición de la estructura celular a medida que madura la fruta. Se sugiere que los OQ podrían ralentizar la tasa de respiración, lo que retrasa la reacción de oxidación deteriorante de la fruta durante el almacenamiento.

Por otra parte, Bose *et al.* (2019) aplicaron OA (0, 50 y 100 mg/L) en fresas cosechadas en etapa rosada, las cuales se almacenaron a 20 °C y 80 % de HR por 6 días. El tratamiento más efectivo fue el de 100 mg/L de OQ, observándose una disminución de la firmeza durante el almacenamiento tanto en frutas tratadas como sin tratar. Esto fue asociado a la desintegración y despolimerización de la pectina y la hemicelulosa de las paredes celulares. Sin embargo, los OA retrasaron significativamente la disminución de la firmeza de la fresa en comparación con la fruta no tratada, esto debido a que los OA inhibieron la expresión de los genes FaPL, FaPE y FaEG. Se informó además que el porcentaje de pudrición aumentó durante todo el período de almacenamiento en el caso de todas las frutas tratadas y no tratadas. Sin embargo, los OA presentaron un menor porcentaje de descomposición de las fresas almacenadas en comparación con la fruta sin tratar, probablemente debido a la respuesta de defensa de OA hacia la infección por patógenos. Los OA causaron un incremento en el contenido de SST y azúcares totales. El pH de las fresas mejoró considerablemente durante el período de almacenamiento. El contenido de TA disminuyó significativamente durante todo el período de almacenamiento, con valores más bajos en las frutas sin tratar en comparación con las frutas tratadas con OA. Esta reducción de la acidez pudo deberse a los cambios metabólicos y el uso de AOs en el proceso respiratorio de la fruta. El contenido de vitamina C tanto en la fruta tratada como en la no tratada disminuyó durante el tiempo de almacenamiento, sin embargo, el tratamiento con OA inhibió significativamente la disminución, probablemente debido a la actividad de inhibición de la reacción de oxidación de vitamina C y la pérdida de peso de las frutas causada por los OA. Durante el almacenamiento, tanto las frutas tratadas como las no tratadas mostraron un aumento significativo en el contenido de antocianinas, aunque hasta el día 4 de almacenamiento el contenido de antocianinas fue mayor en la fruta sin tratar en comparación con la fruta tratada, pero al final del almacenamiento el contenido de antocianinas fue más alto en las frutas tratadas. El contenido total de fenoles y flavonoides, así como la actividad antioxidante disminuyeron gradualmente durante todo el período de almacenamiento, sin embargo, las fresas tratadas presentaron un mayor contenido de fenoles y

flavonoides totales. Una mayor actividad antioxidante fue asociada a la preservación de la vitamina C y los compuestos fenólicos. Adicionalmente, las frutas no tratadas exhibieron un mayor contenido de ABA en comparación con las frutas tratadas con OA durante todo el período de almacenamiento, indicando que los OA retrasaron la acumulación de ABA y suprimieron la expresión de genes de señalización de ABA, lo que resultó en un aumento de la vida de almacenamiento de la fresa.

La obtención de POS tiene ventajas sobre otros tipos de oligosacáridos debido a la alta abundancia de pectina en la naturaleza. Recientemente, Virgen-Ortiz *et al.* (2020) informaron sobre el efecto de la aplicación poscosecha de POS (2, 5 y 9 g/L) en fresas almacenadas por 14 días a 2 °C y 90 % de HR. Se observó que las fresas tratadas con 5 y 9 g/L causaron un retraso de la descomposición y en la pérdida de agua de los frutos. Estas fresas resultaron más oscuras que la fruta testigo y mostraron un mantenimiento de la calidad en los valores de SST, TA y pH. Además, mostraron un mayor contenido de fenoles y antocianinas totales, así como un aumento en la capacidad antioxidante. Los POS indujeron una mayor actividad de la enzima PAL, así como en las enzimas GLU y quitinasa asociadas con la resistencia a enfermedades en plantas. A partir de estos hallazgos resulta interesante conocer el efecto de los POS en los compuestos individuales de las fresas por lo que nos planteamos evaluar además de los atributos de calidad, la composición individual de los azúcares, AOs y compuestos fenólicos de las fresas tratadas con POS.

3. HIPÓTESIS

La aplicación poscosecha de oligosacáridos pécticos en fresa mejorará su calidad.

4. OBJETIVOS

4.1. Objetivo General

Determinar el efecto de la aplicación poscosecha de oligosacáridos pécticos en la calidad de la fresa (cv. 'Festival') durante el almacenamiento en refrigeración.

4.2. Objetivos Específicos

1. Evaluar el efecto de la aplicación poscosecha de tres dosis de oligosacáridos pécticos en los atributos físicos de las fresas durante su almacenamiento en refrigeración.
2. Evaluar el efecto de la aplicación poscosecha de tres dosis de oligosacáridos pécticos en la composición química de las fresas durante su almacenamiento en refrigeración.

5. METODOLOGÍA

5.1. Material Vegetal

Las fresas (cv. 'Festival') se cosecharon en un huerto comercial en Tangancícuaro, Michoacán. Las fresas se cultivaron bajo macro túnel mediante manejo agronómico tradicional y se cosecharon en su madurez comercial, cuando el 80 % de la superficie del fruto presentó una coloración roja. Solo se incluyeron en el estudio frutos de tamaño y color similar, sin daños físicos aparentes, sin deformaciones o lesiones por fitopatógenos.

Los frutos se agruparon en cuatro submuestras, tres de ellas se asperjaron con una solución acuosa de POS a diferentes concentraciones (2, 5 y 9 g/L). Las muestras restantes se asperjaron con agua destilada y se utilizaron como testigos. Los frutos se dejaron secar a temperatura ambiente y se almacenaron a 2 °C y 90 % de HR. De cada tratamiento se tomaron muestras de frutos a los 0, 4, 8 y 14 días de almacenamiento. Parte de los frutos de cada muestra se evaluaron en cuanto a firmeza, características biométricas (peso, longitud y diámetro mayor) y color. Las frutas restantes se congelaron inmediatamente en nitrógeno líquido y se almacenaron a -80 °C hasta ser analizadas en cuanto a su contenido de humedad, TA, SST, pH, contenido de compuestos fenólicos totales, antocianinas totales, perfil de compuestos fenólicos, azúcares y AOs. Las mediciones fueron realizadas en 17 frutos por día-tratamiento.

5.2. Obtención de Oligosacáridos Pécticos

Los POS con un GP de 3 a 20 se obtuvieron por hidrólisis enzimática de pectina de bajo metoxilo (Grindsted® LC-950, Danisco/DuPont, Tecomán, México) utilizando una pectinasa de *Aspergillus niger* (Sigma-Aldrich, San Luis, Misuri, EUA) por 15 minutos a 23 °C. El GP se determinó mediante cromatografía de intercambio aniónico de alto rendimiento con detección amperométrica pulsada (Dionex Corp., Sunnyvale, California, EUA) y se calculó según el estándar de ácido

trigalacturónico (Sigma-Aldrich, San Luis, Misuri, EUA) (Ochoa-Villarreal *et al.*, 2011; Vera-Guzman *et al.*, 2017; Virgen-Ortiz *et al.*, 2020)

5.3. Evaluación de Atributos Fisicoquímicos

Para la evaluación de la firmeza, los frutos se cortaron transversalmente a la mitad y la medición se realizó en la cara media de cada parte del fruto, utilizando un analizador de textura Brookfield CT3 (Brookfield Engineering Laboratories Inc., Middleborough, Massachusett, EUA) equipado con una geometría cilíndrica con un diámetro de 4 mm, la cual penetró el fruto 5 mm a una velocidad de 5 mm/s. El texturómetro se ajustó a una fuerza de 10 g. Los resultados se expresaron en N.

El color se midió en cuatro lados opuestos de la superficie de las frutas usando un colorímetro Minolta CR-300 (Minolta Co. Ltd., Osaka, Japón), registrando las variables *L**, *a* y b**. El °*h*, el *C** y el incremento total de color (ΔE^*_{ab}) fueron calculados mediante el uso de las siguientes fórmulas (OIV-MA-AS2-11, 2006)**:**

$$^{\circ}h = \mathrm{Tan}^{-1}\left(\frac{b^*}{a^*}\right) \quad (1)$$

$$C^* = \sqrt{(a^*)^2 + (b^*)^2} \quad (2)$$

$$\Delta E^*_{ab} = [(\Delta L^*)^2 + (\Delta a^*)^2 + (\Delta b^*)^2]^{1/2} \quad (3)$$

Adicionalmente se realizó una medición interna de la proporción de pulpa roja de las fresas, la cual fue nombrada porcentaje de coloración transversal interna (%CTI). El %CTI se obtuvo realizando un corte transversal en la parte media del fruto y con un vernier se midió en ambas mitades el

diámetro total (D. total) y el diámetro correspondiente a la pulpa blanca (D. pulpa blanca), con dichas medidas el porcentaje de coloración interna se calculó mediante la siguiente fórmula:

$$\%\text{CTI} = \left[1 - \left(\frac{D.\,pulpa\ blanca}{D.\ total}\right)\right] * 100 \quad (4)$$

Posteriormente los frutos fueron homogeneizados con la ayuda de una batidora de inmersión, con el puré obtenido fue medido el contenido de SST utilizando un refractómetro de mano Pal-1 (Atago Co. Ltd., Osaka, Japón).

Para la evaluación de pH y TA se tomó una alícuota de 5 ml del extracto obtenido en la descripción de la sección 5.3 y se agregaron 25 ml de agua desionizada. En la solución obtenida se midió el pH con un potenciómetro (Denver Instruments, Arvada, Colorado, EUA) y se determinó la TA siguiendo el método 942.15 (A.O.A.C., 1990), el cual se realizó agregando 5 gotas de fenolftaleína (Golden Bell Trading Co., Ltd., Eschborn, Hessen, Alemania) a la solución, posteriormente se agregó lentamente una solución de NaOH (0.1 N), manteniendo en agitación, hasta observar un cambio de color (pH aproximado de 8.2). Se registró la solución de NaOH utilizada, el porcentaje de acidez fue calculado mediante la siguiente fórmula:

$$\text{TA}(\%) = \frac{\text{V N (peso meq. ac.cítrico)(FD)}}{\text{ml de muestra titulada}} * 100 \quad (5)$$

Donde V es el volumen de NaOH gastado, N es la normalidad de la solución de NaOH y FD es el factor de dilución.

El contenido de humedad se determinó gravimétricamente secando 2g de puré de fresa a 103 °C hasta un peso constante, en una estufa Shel Lab modelo 1370GM-2 (Sheblon Manufacturing, Inc., Oregón, EUA).

5.4. Análisis Cromatográfico de Azúcares y Ácidos Orgánicos

La extracción de azúcares y AOs se realizó de acuerdo a Ramos-Aguilar *et al*. (2017). En un tubo para centrifuga con capacidad de 80 mL se depositaron 3 g de puré y posteriormente se homogeneizaron con 40 mL de agua desionizada con la ayuda de un ultraturrax IKA T18 (IKA® Works, Inc., Wilmington, Delaware, EUA). El extracto obtenido fue sonicado por 2 minutos en un sonicador BRANSON 2510 (Marshall Scientific, Hampton, Nuevo Hampshire, EUA) y posteriormente centrifugado (20000 x *g*, 10 min a 5°C) en una centrífuga Beckman Allegra 64R (Beckman Coulter Inc, Brea, California, EUA). El sobrenadante se filtró a través de una membrana de polietileno de 0.45 µm de tamaño de poro (Millipore Corp., Bedford, Middlesex, EUA). Se diluyó en una relación 1:1 con agua ultrapura y nuevamente se filtró, utilizando una membrana de polietileno de 0.20 µm de tamaño de poro (Millipore Corp., Bedford, Middlesex, EUA).

El análisis de azúcares se realizó por cromatografía líquida de alta resolución (CLAR) inyectando 20 µL en un cromatógrafo Varian (Varian Inc., Walnut Creek, California, EUA) equipado con un detector de índice de refracción Varian modelo Star 9040. La separación se realizó en una columna de intercambio iónico Shodex SC 1821 (8.0 × 300 mm) (Showa Denko K.K., Tokyo, Japón) a 70 °C empleando agua como fase móvil (0.6 ml/min). El análisis de AOs se realizó inyectando 20 µL en un sistema cromatográfico Agilent 1200 (Agilent, Palo Alto, California, EUA) dotado con un detector de arreglo de diodos (Ymc Inc., Milford, Massachusetts, EUA). La separación se realizó en una columna Aminex HPX 87H (7.78 × 300 mm) (Bio-Rad Laboratories, Hercules, California, EUA) a 60 °C empleando una mezcla compuesta por H_2SO_4 (Baker-Mallinckrodt Inc, Ciudad de México, MEX) 0.005 M y acetonitrilo (Baker-Mallinckrodt Inc, Ciudad de México, MEX) (90:10, v/v) como fase móvil (0. 4 ml/min). Los AOs fueron monitoreados a 210 y 260 nm. Las muestras se analizaron por triplicado. La identificación de los compuestos fue mediante estándares (Sigma-Aldrich, San Luis, Misuri, EUA; Grupo Merck, Darmstadt, Hesse, Alemania) y la cuantificación de estos se llevó a cabo mediante curvas de calibración construidas con tres conjuntos independientes de diluciones de los estándares.

5.5. Análisis Cromatográfico de Compuestos Fenólicos

La extracción de compuestos fenólicos fue realizada en 2 etapas, la primera etapa mediante una extracción sólido-líquido y una segunda etapa mediante una extracción líquido-líquido. La primera etapa consistió en homogeneizar 3 g de puré de fresa con 40 mL de acetona al 70 % (Baker-Mallinckrodt Inc, Ciudad de México, MEX) conteniendo 0.1 % de ácido trifluoruoacético (ATF) (Baker-Mallinckrodt Inc, Ciudad de México, MEX) mediante un ultraturrax IKA T18 (IKA® Works, Inc., Wilmington, Delaware, EUA). La muestra se dejó en reposo por 1 h a 4 °C. Posteriormente, el extracto fue filtrado a través de un papel de filtro Whatman No. 4 colocado en un embudo büchner a su vez montado a un matraz kitasato, el cual se encontraba conectado a una bomba de vacío. Los sólidos retenidos en el papel filtro fueron lavados con 40 mL del solvente de extracción antes mencionado hasta la completa despigmentación del tejido. El extracto resultante fue depositado en un matraz balón de fondo plano (capacidad de 250 mL) para evaporar la acetona en un evaporador rotatorio LABCONCO 78830-04 (Labconco Corp., Ciudad de Kansas, Misuri, EUA) a 39 °C y una vez evaporado se aforó a 50 mL de ATF al 0.1 %. Se reservaron 40 mL del extracto para la segunda etapa. Finalmente, una alícuota del extracto acuoso fue filtrada a través de una membrana de polietileno de 0,45 µm de tamaño de poro (Millipore Corp., Bedford, Middlesex, EUA) y 20 µL de esta fueron inyectados en un equipo Agilent 1200 (Agilent, Palo Alto, California, EUA) dotado con un detector de arreglo de diodos (Ymc Inc., Miliford, Massachusetts, EUA). La separación se realizó en una columna ZORBAX XDB-C18 (4.6 × 150 mm) (Agilent, Palo Alto, California, EUA) a 30 °C empleando un sistema de fase móvil en gradiente compuestos por ácido acético acuoso (Baker-Mallinckrodt Inc, Ciudad de México, MEX) al 10% (A) y acetonitrilo (Baker-Mallinckrodt Inc, Ciudad de México, MEX) (B) a 1 ml/min. El gradiente fue programado de la siguiente manera: min 0 - 12 100 % A, min 12-20 93 % A y 7 % B, min 20-35 89 % A y 11 %, B, min 35-36 86 % A y 14% B, min 36-41 84 % A y 16 % B, min 41 - 48 82 % A y 18 % B, min 48-54 76 % A y 24 % B, min 54-59 70 % A y 30 % B, min 59-65 65 % A y 35 % B, min 65-70 50 % A y 50 % B, min 70-80 15 % A y 85 % B, min 80-90 5 % A y 95 % B. Los compuestos fenólicos fueron monitoreados a 280, 320, 350 y 520 nm.

Los 40 mL de extracto provenientes de la primera etapa se mezclaron con 20 mL de acetato de etilo (Baker-Mallinckrodt Inc, Ciudad de México, MEX) en un embudo de separación, agitando

vigorosamente durante 30 s, esta operación se realizó 4 veces consecutivas. Posteriormente se agregaron 100 mL de agua destilada y se agitó por 30 s, realizando esta operación 3 veces consecutivas. El extracto se mantuvo en reposo por 30 minutos para obtener una separación de fases. La fase acuosa fue eliminada por goteo y la fase de acetato de etilo fue recuperada en un matraz balón (capacidad de 50 mL) para evaporarlo completamente en un evaporador rotatorio LABCONCO 78830-04 (Labconco Corp., Ciudad de Kansas, Misuri, EUA) a 39 °C. El sedimento restante en el matraz fue recuperado con 2 mL de metanol (Baker-Mallinckrodt Inc, Ciudad de México, MEX) el cual se filtró a través de una membrana de polietileno de 0.20 µm de tamaño de poro (Millipore Corp., Bedford, Middlesex, EUA) y una alícuota de 20 µL fue inyectada para su análisis cromatográfico bajo las mismas condiciones descritas anteriormente (Mertz *et al.*, 2007; Ramos-Aguilar *et al.*, 2017; Maya-Meraz *et al.*, 2020). El análisis se realizó por triplicado. La identificación de los compuestos fue mediante estándares (Sigma-Aldrich, San Luis, Misuri, EUA) y la cuantificación de estos compuestos se llevó a cabo mediante curvas de calibración construidas con tres conjuntos independientes de diluciones de los estándares.

5.6. Evaluación de Fenoles Totales, Antocianinas Totales y Capacidad Antioxidante

Estas mediciones se realizaron en el extracto acuoso usado para la evaluación cromatográfica de compuestos fenólicos. El contenido de fenoles totales se determinó por el método Folin-Ciocalteu en una microplaca de 96 pozos. Se usaron 16 pozos para cada tratamiento evaluado (4 pozos por cada extracto obtenido * 4 extractos por tratamiento). Se colocó en cada pozo 13 µL del extracto, 280 µL agua desionizada y 13 µL del reactivo de Folin-Ciocalteu (Sigma-Aldrich, San Luis, Misuri, EUA). La micro placa se mantuvo en reposo durante 5 min y posteriormente se agregaron 26 µL $NaCO_3$ (Sigma-Aldrich) 1 N a cada pozo. La reacción se dejó reposar por 40 min en oscuridad. La absorbancia fue medida a λ = 750 nm un lector de microplacas MRX (Dynex Technologies, Chantilly, Virginia, EUA). Se usó ácido gálico como estándar (Honeywell Fluka™, Morristown, Nueva Jersey, EUA). El contenido de fenoles totales se expresó como mg de equivalentes de ácido gálico por Kg de fresa fresca (mg GAE/Kg), considerando la cantidad de muestra inicial sometida a la etapa de extracción (Ornelas-Paz *et al.*, 2013).

El CAT se realizó mediante el método de diferencia de pH (Giusti y Wrolstad, 2001). En una celda se colocaron 1400 µL del extracto acuoso y 100 µL de cloruro de potasio (Sigma-Aldrich, San Luis, Misuri, EUA) 0.025 M (pH 1.0). En otra cubeta se colocaron 1400 µL del extracto acuoso y 100 µL de acetato de sodio (Sigma-Aldrich, San Luis, Misuri, EUA) 0.4 M (pH 4.5). Ambas celdas se mantuvieron en reposo por 15 min, y posteriormente la absorbancia fue medida a λ = 500 y 700 nm utilizando un espectrofotómetro 6505 Jenway UV / Vis (Jenway Ltd., Essex, Inglaterra). La concentración se determinó mediante la fórmula:

$$(6) \qquad CAT = \frac{(\mathrm{A})(PM_{\mathrm{Pg-3-g}})\ (\mathrm{FD})(1000)}{(\varepsilon * 1)}$$

Donde A es la diferencia de absorbancia [$A = (A_{500nmpH1.0} - A_{700nmpH1.0}) - (A_{500nmpH4.5} - A_{700nmpH4.5})$]; $PM_{Pg\text{-}3\text{-}g}$ es el peso molecular de pelargonidina-3-glucósido (432.2 g/ mol); FD es el factor de dilución y ε es el coeficiente de extinción molar de perlagonidina-3-glucósido (ε = 17330). El coeficiente de extinción molar se multiplica por 1 porque la ecuación asume una longitud de trayectoria de 1 cm. El CAT fue expresado en mg/Kg

La determinación de la capacidad antioxidante se realizó por el método DPPH (2,2 difenil-1-picrilhidrazilo), en una microplaca de 96 pozos. Se usaron 16 pozos para cada tratamiento evaluado (4 pozos por cada extracto obtenido * 4 extractos por tratamiento). En cada pozo se colocaron 280 µL de DPPH (Sigma-Aldrich) 100 µM y 20 µL del extracto acuoso, manteniendo la microplaca en reposo durante 30 min. La absorbancia fue medida a λ = 515 nm utilizando un lector de microplacas MRX (Dynex Technologies, Chantilly, Virginia, EUA). Se uso el reactivo trolox (Sigma-Aldrich, San Luis, Misuri, EUA) como estándar de referencia. Los resultados se expresaron como µmol de equivalentes de Trolox por Kg de fresa fresca (µmol TE /Kg) (Cervantes-Paz *et al.*, 2014).

5.7. Análisis Estadístico

Para el análisis estadístico se aplicó un diseño en parcelas divididas y se utilizó una comparación

de medias con pruebas de Tukey-Kramer ($\alpha = 0.05$) para detectar diferencias significativas entre tratamientos. La variable firmeza constó de 2 repeticiones por fruto, las variables de color CIELab constaron de 3 repeticiones por fruto y las demás variables constaron de 3 repeticiones por tratamiento. Los datos se analizaron con el paquete estadístico SAS® 9.0 (SAS Institute. Inc., Cary, Carolina del Norte, EUA, 2000).

6. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

6.1. Peso, Diámetro y Longitud de los Frutos

El tamaño de las fresas analizadas correspondió a la categoría "B", según la clasificación indicada en la norma mexicana NMX-FF-062-2002. Dicho tamaño se considera aceptable para la comercialización nacional e internacional.

Las características biométricas de las fresas se redujeron durante el almacenamiento (Cuadro 1), probablemente debido a la deshidratación. La cosecha desencadena una serie de cambios fisiológicos en el fruto, relacionados principalmente con el estrés, incluida la pérdida de agua debido a la transpiración, respiración y la privación de nutrientes, causando el debilitamiento de los tejidos y la contracción del fruto (Pott *et al.*, 2020). La temperatura y la HR de almacenamiento juegan un papel crucial en la pérdida de peso del fruto (Muley y Singhal, 2020).

Las fresas no tratadas con POS y las fresas tratadas con 5 g/L de POS presentaron las mayores reducciones de peso (18 %, para ambos) y diámetro (8 %, para ambos) al final del almacenamiento. Las fresas tratadas con POS a concentraciones de 2 y 9 g/L presentaron una menor reducción de peso (13 y 7 %) y diámetro (2 y 3 %). La longitud de los frutos se redujo entre 3 y 6% durante el almacenamiento, dependiendo del tratamiento, observándose que las fresas tratadas con 9 g/L de POS mostraron la menor disminución de longitud en poscosecha. En general, el tratamiento con POS redujo la alteración de las características biométricas de los frutos durante el almacenamiento refrigerado.

En otros estudios se observó una menor pérdida de peso en fresas tratadas con OA y OQ (Bose *et al.*, 2019; He *et al.*, 2019), sin embargo, dichas pérdidas no fueron significativas. La pérdida de peso se debe a la actividad metabólica, la respiración y la transpiración.

En fresas, la aplicación de recubrimientos comestibles a base de carboximetilcelulosa e hidroxipropilmetilcelulosa combinadas con quitosano redujeron significativamente el porcentaje de pérdida de peso durante el almacenamiento a 1 °C por 12 días. Estos recubrimientos actúan como una barrera semipermeable contra el oxígeno, el dióxido de carbono y la humedad, reduciendo así la respiración, la pérdida de agua y las reacciones de oxidación (Gol *et al.*, 2013).

Los oligosacáridos no tienen propiedades formadoras de película debido a su bajo peso molecular (He *et al.*, 2019). Sin embargo, en el presente estudio la dosis más alta de POS promovió una menor reducción de las características biométricas. Los POS podrían disminuir la tasa de respiración y la pérdida de peso de la fruta al cerrar los estomas de los frutos (Shafiee *et al.*, 2010), generando un efecto de protección de los frutos de manera similar a los recubrimientos.

6.2. Humedad

El porcentaje de humedad de las fresas analizadas se encontró dentro del rango anteriormente informado (87.5 – 94.7 %) (Ornelas-Paz *et al.*, 2013). En general, el porcentaje de humedad disminuyó durante el almacenamiento (Cuadro 1). La pérdida de humedad fue similar en todos los tratamientos durante la mayor parte del experimento, sin embargo, al final del experimento las fresas tratadas con POS a una concentración de 2 g/L presentaron el menor contenido de humedad (89.9 %). La pérdida de agua acelera la senescencia provocando la degradación celular (Sinha *et al.*, 2012). Las frutas tratadas con POS a 2 g/L también presentaron la mayor reducción de longitud (6 %), por lo que la humedad del fruto podría estar relacionada con la reducción poscosecha de la longitud del fruto. Se espera que los frutos más grandes tengan una menor tasa de pérdida de humedad en comparación con los pequeños, debido a la mayor relación superficie / volumen para los últimos (Lufu *et al.*, 2020). No obstante, los frutos de los 4 grupos experimentales presentaban tamaños simlares y fueron almacenadas bajo las mismas condiciones, por lo que sólo se deduce que la menor dosis de POS causó un incremento en la respiración. Además podrían haberse generado especies reactivas de oxígeno que causaron estrés oxidativo afectando la integridad de la pared celular, promoviendo una disminución de la humedad para las fresas sometidas a este tratamiento.

Cuadro 1. Efecto de la aplicación poscosecha de oligosacáridos pécticos sobre las características biométricas (peso, diámetro y longitud) y el porcentaje de humedad en fresas.

	Tratamiento	Tiempo de almacenamiento (días)			
		0	4	8	14
Peso (g)	CONTROL	13.70 ± 0.26 a, A	13.21 ± 0.42 a, A	12.82 ± 0.24 a, A	11.18 ± 0.33 b, B
	2 g/L	13.70 ± 0.26 a, A	13.02 ± 0.39 a, AB	12.42 ± 0.10 a, BC	11.96 ± 0.32 ab, C
	5 g/L	13.70 ± 0.26 a, A	11.64 ± 0.38 b, B	11.48 ± 0.33 b, B	11.26 ± 0.57 b, B
	9 g/L	13.70 ± 0.26 a, A	13.24 ± 0.65 a, A	13.06 ± 0.44 a, A	12.80 ± 0.37 a, A
Diámetro (mm)	CONTROL	30.53 ± 0.33 a, A	30.06 ± 0.60 a, A	29.83 ± 0.40 a, A	28.11 ± 0.51 b, B
	2 g/L	30.53 ± 0.33 a, A	30.46 ± 0.65 a, A	29.91 ± 0.54 a, A	29.89 ± 0.61 a, A
	5 g/L	30.53 ± 0.33 a, A	28.51 ± 0.68 b, B	28.03 ± 0.41 b, B	27.98 ± 0.72 b, B
	9 g/L	30.53 ± 0.33 a, A	30.02 ± 0.64 a, A	29.80 ± 0.51 a, A	29.59 ± 0.51 a, A
Longitud (mm)	CONTROL	39.86 ± 0.34 a, A	39.86 ± 0.75 a, A	39.41 ± 0.39 a, AB	38.04 ± 0.62 a, B
	2 g/L	39.86 ± 0.34 a, A	38.60 ± 0.66 a, AB	38.48 ± 0.49 a, AB	37.51 ± 0.58 a, B
	5 g/L	39.86 ± 0.34 a, A	38.67 ± 0.75 a, AB	38.25 ± 0.58 a, B	38.15 ± 0.81 a, B
	9 g/L	39.86 ± 0.34 a, A	39.58 ± 0.61 a, A	39.34 ± 0.71 a, A	38.68 ± 0.39 a, A
Humedad (%)	CONTROL	92.37 ± 0.03 a, A	92.20 ± 0.01 a, A	91.60 ± 0.04 ab, B	91.30 ± 0.10 a, C
	2 g/L	92.37 ± 0.03 a, A	92.01 ± 0.11 ab, B	91.38 ± 0.10 b, C	89.86 ± 0.03 b, D
	5 g/L	92.37 ± 0.03 a, A	91.98 ± 0.04 bc, B	91.68 ± 0.18 a, C	91.24 ± 0.04 a, D
	9 g/L	92.37 ± 0.03 a, A	91.77 ± 0.11 c, B	91.56 ± 0.04 ab, C	91.15 ± 0.07 a, D

Las fresas fueron cosechadas en punto rosa y almacenadas a 2 °C y 90 % de humedad relativa por 14 días. Cada valor representa la media de 17 mediciones independientes ± el error estándar. Las medias en la misma columna (tratamiento) que no comparten las mismas letras minúsculas son significativamente diferentes (P <0.05, prueba de Tukey-Kramer). Los valores en la misma línea (tiempo de muestreo) que tienen las mismas letras mayúsculas no son significativamente diferentes (P <0.05, prueba de Tukey- Kramer).

6.3. Contenido de Sólidos Solubles Totales y Azúcares

6.3.1. Contenido de Sólidos Solubles Totales

El contenido de SST es un buen predictor del dulzor de las frutas. El contenido de SST mostró un valor inicial de 7.9, el cual tras 8 días de almacenamiento aumentó a 9.27 en la fruta control, a 9.33 en la fruta tratada con POS a 2g/L y a 9.00 y 9.20 en frutas tratadas con POS a 5 y 9 g/L (Cuadro 2). Estos valores sugieren un efecto retardante de la maduración de los POS. No obstante, al día 14 este efecto se perdió, puesto que la fruta tratada con POS mostró valores mayores de SST (9.17-

10.93 %) que la fruta no tratada (9.73 %). El contenido de SST representa principalmente la presencia de azúcares y AOs. Las fresas no tratadas y las tratadas con POS a 2, 5 y 9 g/L presentaron un aumento en el contenido de SST del 23, 38, 16 y 25 %, respectivamente, tras el almacenamiento, mientras que el contenido total de azúcares y AOs, como sumatoria, aumentó 19, 41, 18 y 27 %, respectivamente (Cuadro 2). Las pequeñas diferencias entre el contenido de SST y la sumatoria de azúcares y AOs pueden deberse a la presencia de pectinas solubles y otros componentes no considerados en el contenido de SST (Holcroft y Kader, 1999).

El incremento de SST por efecto de oligosacáridos ha sido previamente reportado en tomates y fresas (García-Sahagún *et al.*, 2009; He *et al.*, 2018; Bose *et al.*, 2019), sin embargo, en kiwi y en uvas no fue reportado un efecto significativo (Villegas *et al.*, 2016; Liu *et al.*, 2020).

El aumento en el contenido de SST de las fresas sin tratar puede ser consecuencia de la degradación de la pared celular, la cual podría ser una fuente alternativa de carbono para la síntesis de azúcares y AOs (Cordenunsi *et al.*, 2003). Las fresas tratadas con POS probablemente aumentaron su contenido de SST debido a un incremento en la fuente de carbono proporcionada por la degradación de la propia pared celular y la adición de los oligosacáridos. En particular, las fresas tratadas con POS a 2 g/L mostraron el mayor incremento de SST, principalmente por la significante pérdida de humedad presentada.

6.3.2. Contenido de Azúcares

El contenido de azúcares determina el sabor de las fresas. La sacarosa es el principal carbohidrato de transporte en las plantas superiores. Actúa como metabolito y como molécula de señalización durante el crecimiento de las plantas y la maduración de los frutos (Li *et al.*, 2019). La sacarosa acumulada en los tejidos de la fruta inmadura se hidroliza en monosacáridos (fructosa y glucosa) conforme transcurre la maduración. Estos tres carbohidratos son el componente principal de los azúcares solubles de las fresas completamente maduras (Holcroft y Kader, 1999; Azam *et al.*, 2019). Las concentraciones de azúcares en las fresas analizadas (Cuadro 2) fueron similares a las reportadas previamente para sacarosa (0.12 – 22.75 g/Kg), glucosa (13 – 30 g/Kg) y fructosa (16 – 42 g/Kg) (Pérez *et al.*, 1997; Sturm *et al.*, 2003; Ménager *et al.*, 2004; Davik *et al.*, 2006; Kafkas

et al., 2007; Zhao, 2007; Ornelas-Paz *et al.*, 2013; Liu *et al.*, 2016). El contenido de sacarosa se redujo drásticamente al inicio del almacenamiento, excepto en las frutas tratadas con POS a una concentración de 5g/L en donde dicho descenso se retrasó 4 días en comparación con lo observado con el resto de los grupos experimentales. Al día 8 se observó que las fresas tratadas con POS a 5 y 9 g/L tuvieron concentraciones de sacarosa mayores (0.35 y 0.38 g/Kg, respectivamente) que los grupos control y tratados con POS a 2 g/L (0.31 y 0.22 g/Kg). El contenido de sacarosa fue similar en todos los grupos experimentales al final del almacenamiento refrigerado. El contenido de glucosa y fructosa incrementó continuamente en todos los grupos experimentales durante el almacenamiento. Las fresas tratadas con POS a una concentración de 2 g/L tuvieron el mayor contenido de estos azúcares al final del almacenamiento (19.36 y 22.66 g/Kg), seguido por las fresas tratadas con POS a 9 g/L (17.42 y 21.22 g/Kg), el grupo control (16.50 y 19.16 g/Kg) y por último las fresas tratadas con POS a 5 g/L (15.49 y 18.36 g/Kg). El efecto de la concentración de POS no mostró una clara relación en función de la dosis ya que se observaron fluctuaciones en el contenido de los azúcares en las fresas tratadas a diferentes dosis a lo largo del almacenamiento.

La disminución de sacarosa y el aumento de fructosa y glucosa tras el almacenamiento refrigerado ha sido reportado previamente en fresas (Cordenunsi *et al.*, 2005; Del Olmo *et al.*, 2020).

En frutos de fresas, los OQ (50 mg/L) aplicados en precosecha causaron un aumento en el contenido total de azúcares en las fresas cosechadas (He *et al.*, 2018).

De forma similar a los resultados obtenidos en el presente estudio, Bose *et al.* (2019) observaron que tras el almacenamiento las fresas mostraron un aumento en el contenido total de azúcares, en donde las fresas tratadas con OA tuvieron un mayor aumento con la dosis más alta de OA (100 mg/L). Mientras que He *et al.* (2019) observaron una disminución del contenido total de azúcares en fresas almacenadas. No obstante, la aplicación de OQ (50 y 100 mg/L) redujo esta pérdida. Al final del almacenamiento las fresas tratadas con 100 mg/L mostraron la menor reducción en el contenido de azúcares, sin embargo, también se observaron fluctuaciones conforme transcurria el tiempo de almacenamiento entre el contenido de azúcares de las fresas tratadas con las diferentes dosis. En los estudios anteriormente mencionados, las fresas fueron cosechadas en la misma ciudad y fueron almacenadas bajo las mismas condiciones (20 °C y 80 % de HR por 6 días). Sin embargo mientras en un estudio se informa un aumento general del contenido de azúcares en otro se informa una reducción general en todos los grupos experimentales. La diferencia del comportamiento en el contenido de azúcares tras el almacenamiento, en ambos estudios, podría ser explicada por los

cultivares empleados para el experimento, lamentablemente no se especifica que cultivares fueron utilizados. Además, las fresas se cosecharon en el mismo mes pero en diferentes años (2015 y 2017) por lo que también podrían haber diferencias en las condiciones climáticas en cada año de cultivo. Sin embargo el incremento del contenido final de azúcares por efecto de los oligosacáridos es confirmado.

La acumulación de azúcares resulta de la maduración de la fruta y a su vez puede promover cambios asociados a la maduración (Han *et al.*, 2019) como en el caso de la glucosa, la cual parece ser el azúcar de sustitución más común en las antocianinas de fresa (Giampieri *et al.*, 2012). Un aumento en el contenido de glucosa podría favorecer la acumulación de antocianinas.

La disminución del contenido de sacarosa podría explicar, en menor medida el aumento de los contenidos de glucosa y fructosa. Sin embargo, los cambios de sacarosa fueron mínimos y dado que la fresa no tiene suficiente almidón, las posibles fuentes más probables de carbono para la síntesis de azúcares solubles después de la cosecha son los AOs y los productos que resultan de la degradación de la pared celular (Cordenunsi *et al.*, 2005). En el caso de las fresas no tratadas, se observó la mayor disminucion de la firmeza y un menor contenido de AOs en comparación con las fresas tratadas con POS (Cuadros 4 y 5). En las fresas tratadas, los POS podrían haber fungido como sustrato, en reemplazo de aquel no proporcionado por una menor degradación de la pared celular. En fresas rojas oscuras, la disminución del contenido de fructooligosacáridos fue concomitante con una acumulación prominente de azúcares y un aumento del contenido de SST (Del Olmo *et al.*, 2020).

Cuadro 2. Efecto de la aplicación poscosecha de oligosacáridos pécticos sobre el contenido de sólidos solubles totales (SST), contenido individual de azúcares y la suma de azúcares y ácidos orgánicos en fresas.

	Tratamiento	Tiempo de almacenamiento (días)			
		0	4	8	14
SST	CONTROL	7.90 ± 0.06 $^{a, D}$	8.07 ± 0.03 $^{c, C}$	9.27 ± 0.03 $^{ab, B}$	9.73 ± 0.03 $^{c, A}$
	2 g/L	7.90 ± 0.06 $^{a, D}$	8.33 ± 0.03 $^{b, C}$	9.33 ± 0.03 $^{a, B}$	10.93 ± 0.07 $^{a, A}$
	5 g/L	7.90 ± 0.06 $^{a, D}$	8.57 ± 0.03 $^{a, C}$	9.00 ± 0.06 $^{c, B}$	9.17 ± 0.03 $^{d, A}$
	9 g/L	7.90 ± 0.06 $^{a, D}$	8.13 ± 0.03 $^{c, C}$	9.20 ± 0.06 $^{b, B}$	9.87 ± 0.03 $^{b, A}$
Azúcares + ácidos	CONTROL	43.34 ± 0.18 $^{a, D}$	45.88 ± 0.48 $^{b, C}$	49.46 ± 0.43 $^{b, B}$	51.60 ± 0.32 $^{c, A}$
	2 g/L	43.34 ± 0.18 $^{a, D}$	45.25 ± 0.27 $^{b, C}$	50.33 ± 0.08 $^{a, B}$	60.96 ± 0.22 $^{a, A}$
	5 g/L	43.34 ± 0.18 $^{a, C}$	48.73 ± 0.37 $^{a, B}$	50.67 ± 0.22 $^{a, A}$	51.21 ± 0.16 $^{c, A}$
	9 g/L	43.34 ± 0.18 $^{a, D}$	45.73 ± 0.40 $^{b, C}$	50.50 ± 0.41 $^{a, B}$	55.10 ± 0.41 $^{b, A}$

Sacarosa	CONTROL	1.03 ± 0.01	a, A	0.14 ± 0.00	b, C	0.31 ± 0.01	ab, B	0.23 ± 0.02	a, BC
	2 g/L	1.03 ± 0.01	a, A	0.18 ± 0.01	b, B	0.22 ± 0.01	b, B	0.27 ± 0.01	a, B
	5 g/L	1.03 ± 0.01	a, A	1.00 ± 0.12	a, A	0.35 ± 0.06	a, B	0.23 ± 0.02	a, B
	9 g/L	1.03 ± 0.01	a, A	0.23 ± 0.01	b, C	0.38 ± 0.11	a, B	0.21 ± 0.01	a, C
Glucosa	CONTROL	14.28 ± 0.11	a, B	14.43 ± 0.13	bc, B	16.18 ± 0.07	bc, A	16.50 ± 0.21	c, A
	2 g/L	14.28 ± 0.11	a, D	14.68 ± 0.14	ab, C	16.36 ± 0.06	ab, B	19.36 ± 0.12	a, A
	5 g/L	14.28 ± 0.11	a, D	15.03 ± 0.10	a, C	16.56 ± 0.09	a, A	15.49 ± 0.19	d, B
	9 g/L	14.28 ± 0.11	a, C	14.15 ± 0.12	c, D	15.86 ± 0.14	c, B	17.42 ± 0.06	b, A
Fructosa	CONTROL	14.33 ± 0.03	a, D	16.83 ± 0.37	a, C	18.03 ± 0.28	ab, B	19.16 ± 0.23	c, A
	2 g/L	14.33 ± 0.03	a, D	16.21 ± 0.16	bc, C	18.39 ± 0.06	a, B	22.66 ± 0.16	a, A
	5 g/L	14.33 ± 0.03	a, D	16.45 ± 0.05	ab, C	17.70 ± 0.06	b, B	18.63 ± 0.07	c, A
	9 g/L	14.33 ± 0.03	a, D	15.87 ± 0.38	c, C	18.00 ± 0.15	ab, B	21.22 ± 0.40	b, A

Las fresas fueron cosechadas en punto rosa y almacenadas a 2 °C y 90 % de humedad relativa por 14 días. Los contenidos de sacarosa, glucosa y fructosa y la suma de azúcares y ácidos orgánicos están expresados en g/Kg de peso fresco. Cada valor representa la media de 3 mediciones independientes ± el error estándar. Las medias en la misma columna (tratamiento) que no comparten las mismas letras minúsculas son significativamente diferentes (P <0.05, prueba de Tukey-Kramer). Los valores en la misma línea (tiempo de muestreo) que tienen las mismas letras mayúsculas no son significativamente diferentes (P <0.05, prueba de Tukey- Kramer).

6.4. Acidez Titulable, pH y Contenido de Ácidos Orgánicos

6.4.1. Acidez Titulable y pH

La acidez de una fruta depende en gran medida de las cantidades relativas de AOs y azúcares presentes (Walker y Famiani, 2018). El pH y la TA son buenos predictores del dulzor, acidez e intensidad del sabor de los frutos (Gunness *et al.*, 2009).

En el presente trabajo, el pH y la TA mostraron incrementos durante el almacenamiento. Las fresas tratadas con POS mostraron los mayores incrementos (Cuadro 3). Al final del almacenamiento los frutos tratados con POS a 2 y 5 g/L tuvieron un pH de 3.92 y 3.91, respectivamente, mostrando ambos una acidez de 0.89, mientras que las frutas sin tratar presentaron un pH de 3.64 y una acidez de 0.87 y finalmente las frutas tratadas con 9 g/L de POS presentaron un pH de 3.67 y una acidez de 0.84. Estos valores de acidez son consistentes con los valores finales de AC en las fresas analizadas (r = 0.835) como se verá mas adelante (Cuadro 4).

Los OQ aplicados a fresas en precosecha causaron una mayor TA, mientras que cuando fueron aplicados en poscosecha no se observó un efecto significativo (He *et al.*, 2018 y 2019). Bose *et al.* (2019) observaron una menor disminución de la TA y un menor aumento del pH por efecto de OA en poscosecha, dicho efecto fue muy similar entre las dosis utilizadas (50 y 100 mg/L). Las diferencias observadas entre los estudios citados y el presente estudio podrían ser debido al efecto de las condiciones de almacenamiento, sin embargo, se conicide con una mayor contenido de AOs por efecto de oligosacáridos, los cuales podrían desacelerar la respiración y la actividad metabólica de la fresa, retrasando la reacción de oxidación deteriorante de la fruta durante el almacenamiento (Gol *et al.*, 2013; Bose, *et al.*, 2019; He, *et al.*, 2019). Por otra parte el aumento de azúcares podría ofrecer mas sustrato, promoviendo una mayor acumulacion de AOs (Walker y Famiani, 2018).

6.4.2. Contenido de Ácidos Orgánicos

Los AOs juegan un papel importante en el sabor de la fruta junto con los azúcares. También indican el estado fisiológico de las fresas. Los AOs presentes en las fresas pueden ayudar a estabilizar algunas vitaminas y prevenir la oxidación de compuestos fenólicos durante el procesamiento (Vincente *et al.*, 2014). Los AOs se utilizan como sustrato respiratorio, por lo que al igual que la sacarosa tienden a disminuir durante la maduración y almacenamiento (Koyuncu y Dilmaçünal, 2010; Ornelas-Paz *et al.*, 2013). En el presente trabajo se determinó el contenido de siete AOs (Cuadro 4) y se observó que las concentraciones obtenidas para AA, AC, AF, AO, AM, AS y AT fueron semejantes a las reportadas previamente en fresas (AA, 150-1100 mg/Kg; AC, 3.21-18.5 g/Kg; AF, 6.30-19.00 mg/Kg; AO, 70-150 mg/Kg; AM, 1.1-5.4 g/Kg; AS, 0.2-6.5 g/Kg; AT, 0.5-1.8 g/Kg) (Pérez *et al.*, 1997; Holcroft y Kader, 1999; Sturm *et al.*, 2003; Moing *et al.*, 2001; Davik *et al.*, 2006; Koyuncu y Dilmaçünal, 2010; Ornelas-Paz *et al.*, 2013; Liu *et al.*, 2016; Hong *et al.*, 2018; Ikegaya *et al.*, 2019; Fecka *et al.*, 2020).

El AA es uno de los componentes nutricionales más importante en fresas, principalmente por su potencial antioxidante (Liu *et al.*, 2018). El AA es un cofactor importante para varias enzimas en plantas y animales. En plantas, las reacciones metabólicas dependientes del AA influyen en muchos procesos como la división celular, la expresión génica y las reacciones de defensa (Walker y

Famiani, 2018).

El AC es el ácido orgánico más abundante en la fresa, seguido del AM (Holcroft y Kader, 1999), ambos son los principales ácidos intermediarios en el ciclo de Krebs, el cual genera energía en forma de ATP durante la fosforilación oxidativa del metabolismo aeróbico de carbohidratos y crea precursores de otros ciclos metabólicos (Muñoz-Villa *et al.,* 2014). El AT parece tener un efecto contra el ataque de patógenos y el AO puede participar en el almacenamiento de calcio y como sustrato para la producción de peróxido de hidrógeno en la matriz extracelular, que se utiliza tanto por peroxidasas para reticular polímeros y en respuestas de defensa a ataques fúngicos (Walker y Famiani, 2018). El AF posee actividad antimicrobiana (Kim *et al.*, 2010).

Durante el almacenamiento, tanto las frutas sin tratar como las frutas tratadas con POS a 2, 5 y 9 g/L mostraron incrementos en los contenidos de AC, AS, AF, mientras que el AT y AO sólo mostraron incrementos en las fresas tratadas con POS. Los contenidos de AC, AS y AF en las fresas sin tratar incrementaron 10, 27 y 83 % y las fresas tratadas con POS a 2, 5 y 9 g/L incrementaron 8 – 22 %, 37 – 58 % y 63 – 123 %, respectivamente. Los contenidos de AT y AO disminuyeron 6 % y 47 %, en las fresas no tratadas, mientras que las frutas tratadas aumentaron 52 – 78 % y 2 – 21 % respectivamente. El contenido de AM aumentó en las fresas sin tratar y en las fresas tratadas con 2 g/L de POS (16 y 32 % respectivamente). Los POS a 5 y 9 g/L no causaron grandes variaciones a lo largo del almacenamiento y al final de éste, el contenido de AM en fresas tratadas con estas dosis de POS fue similar al contenido inicial. Las fresas no tratadas y las fresas tratadas con 2 g/L de POS mostraron incrementos del contenido de AA del 35 y 22 %, respectivamente en el día 8 y para el día 14 los incrementos fueron de 13 y 70 %, respectivamente. Las fresas tratadas con 5 y 9 g/L mostraron una reducción del contenido de AA con base al valor inicial (13 – 17 %).

En resumen, al final del almacenamiento, las frutas tratadas con 2 g/L de POS causaron los mayores contenidos de los siete AOs identificados en el presente estudio. En general las fresas tratadas con POS mostraron los más altos contenidos de AC, AS, AT, AF y AO y los más bajos contenidos de AA, AM. El retraso en la disminución de los AOs indica una menor velocidad de maduración y senescencia, debido a un menor uso de AOs en la respiración de la fruta. Como mencionamos anteriormente, el ABA es una hormona clave en la maduración de frutos no climatéricos. Bose *et al.* (2019), observaron que los OA causaron la supresión de la síntesis de ABA (FaNCED1), lo cual causó una disminución del contenido de ABA en las fresas tratadas. Dicha disminución se reflejó en una disminución de la transducción de señales (FaASR) y percepción de ABA (FaPYR y

FaCHLH). Todo lo anterior causó un retraso en la maduración de los frutos de fresa. Es posible que los POS también tengan un efecto en el contenido de ABA y, por lo tanto, también causaran una disminución del proceso de maduración de las fresas.

Por otra parte, Sarkar *et al.* (2013) evaluaron el efecto de OQ en manzanas almacenadas y observaron una alta actividad de la enzima succinato deshidrogenasa (SDH), sugiriendo un mayor flujo de carbono a través de las vías glicolíticas que proporcionan el PEP necesario para la formación de AOs. Es probable que también los POS causaran un incremento en el contenido de AOs, debido a una mayor disponibilidad de azúcares.

La aplicación de OQ en etapa precosecha causó incrementos de vitamina C en los frutos tratados (He *et al.*, 2018). En fresas tratadas en poscosecha con OA y OQ, almacenadas a 20 °C y 80 % de HR, se observó una disminución del contenido de vitamina C, sin embargo, la reducción fue menor en comparación a las fresas sin tratar. La menor reducción fue observada en fresas tratadas con la mayor dosis (100 g/L) para ambos estudios y fue asociada a la actividad de inhibición de la reacción de oxidación de vitamina C y la pérdida de peso de las frutas causada por los oligosacáridos (Bose *et al.*, 2019; He *et al.*, 2019). Los estudios mencionados reportaron el contenido total de vitamina C (ácido ascórbico más ácido dehidroascórbico). Cordenunsi *et al.* (2005) informaron que las fresas mostraron una disminución en el contenido de ácido ascórbico, pero hasta un 30 % de aumento en el contenido de ácido deshidroascórbico (DHA) durante el almacenamiento en frío. Octavia y Choo (2017) sugieren una subestimación del contenido total de vitamina C en las fresas en donde no se mide el contenido de DHA, como es el caso del presente estudio. Por otra parte, se ha observado que, en fresas tratadas con melatonina, la integridad de la pared celular de las frutas tratadas fue mantenida y el contenido de AA fue más bajo que el de la fruta sin tratar al final del almacenamiento. Los investigadores mencionaron que la reducción en la síntesis de AA puede ser debida a una menor liberación de Agal de las paredes celulares (Liu *et al.*, 2018). La síntesis de AA *in situ* ocurre en fresas a partir del Agal, durante la maduración del fruto y la concentración final en los frutos depende de la expresión del gen GalUR así como de la disponibilidad del sustrato Agal (Crespo *et al.*, 2010). Las fresas tratadas con 5 y 9 g/L de POS mantuvieron una mayor firmeza, en comparación a las fresas tratadas con 2 g/L de POS y las fresas sin tratar, por lo que es posible que se haya disminuido la síntesis de AA por una menor disponibilidad de Agal en los frutos.

La biosíntesis de AT y el AO representan destinos catabólicos para el AA (Debolt *et al.*, 2007; Famiani *et al.*, 2015; Walker y Famiani, 2018), por lo que una menor cantidad de AA en las fresas

tratadas con 5 y 9 g/L de POS podría ser explicada por un aumento de AT y AO, de igual forma las frutas sin tratar presentaron un mayor contenido de AA y los menores contenidos de AT y AO. Sin embargo, este patrón no es observado para las fresas tratadas con 2 g/L de POS, el cual presenta los mayores contenidos de AA, AT y AO, debido a su marcada pérdida de humedad.

La disminución de AM y el aumento de AS han sido observados en fresas almacenadas en atmósferas ricas en CO_2 (20 kPa), esto posiblemente debido a un menor uso de AS para su conversión a AM (Fernández-Trujillo *et al.*, 1999). En el presente estudio se observó que las fresas no tratadas presentaron el mayor contenido de AM y un menor contenido de AS en relación a las fresas tratadas con 5 y 9 g/L de POS, sin embargo, nuevamente las fresas tratadas con 2 g/L de POS mostraron un comportamiento diferente pues estas tuvieron los valores más altos de AM y AS.

Por otra parte, se ha indicado un incremento de AS por un aumento en la actividad de derivación del ácido γ-aminobutírico (GABA), un aminoácido no proteico (Li *et al.*, 2018). La actividad de derivación de GABA durante el almacenamiento en frío se ha descrito como fundamental para mantener los atributos de calidad de la fresa, al proporcionar ATP intracelular y esqueletos de carbono y, por lo tanto, retrasar la senescencia (Pott *et al.*, 2020).

Como se mencionó anteriormente, los POS pueden mejorar la capacidad de unión a cationes y se ha propuesto que un aumento en el contenido de K^+ podría reducir la acumulación de AM y alterar la actividad enzimática málica a través de un mecanismo de homeostasis del pH (Etienne *et al.*, 2013; Zhang *et al.*, 2018). También se sugiere que la acumulación de AO está involucrada en la regulación de los niveles de Ca^+ (Debolt *et al.*, 2007).

Los incrementos de AF presentados pueden ser debidos a la oxidacion de AS (Fernández-Trujillo *et al.*, 1999), pero no se distingue un efecto claro de los POS sobre los frutos, puesto que las fresas sin tratar presentaron valores similares a las frutas tratadas con 9 g/L de POS, mientras que las tratadas con 5 g/L presentaron valores inferiores y nuevamente las fresas tratadas con 2 g/L presentaron los más altos valores.

6.4.3. Relación de Azúcares Individuales/Ácidos Orgánicos

La relación entre el contenido de azúcares y AOs es un parámetro importante del sabor y puede ser

más importante para la calidad y el dulzor percibido por un panel sensorial que el contenido de SST (Kafkas *et al.*, 2007).

El alto contenido de ácidos con un bajo contenido de azúcares da como resultado una fresa agria, mientras que el alto contenido de azúcar y el bajo contenido de ácido dan como resultado un sabor suave. Cuando ambos están bajos, la fruta no tiene sabor (Zhao, 2007).

Una mayor relación entre ácidos y azúcares indica un mejor sabor y calidad de las frutas (He *et al.*, 2018; Hong *et al.*, 2018). Durante los días 4 y 8 de almacenamiento las fresas sin tratar y las tratadas con 2 g/L de POS mantuvieron la más alta relación entre estos compuestos, sin embargo, en el día 14 las frutas tratadas con 9 g/L de POS presentaron el mayor valor (2.39), seguido del grupo control y las fresas tratadas con 2 g/L de POS (2.28 y 2.27, respectivamente) y finalmente las fresas tratadas con 5 g/L de POS (2.04) (Cuadro 3). Kafkas *et al.* (2007) evaluaron la relación azúcares / AOs en dos cultivares y siete genotipos de fresas e informaron un valor en un rango de 2 a 4 aproximadamente en fresas maduras, mientras que Crespo *et al.* (2010) observaron valores de 5.7 a 8.6 en cuatro cultivares de fresa y notaron que los valores más altos eran causados por menores contenidos de ácidos totales. En tomate no se encontró un efecto significativo en la relación SST/TA con la aplicación de POS (García Sahagún *et al.*, 2009). En fresas se observó un mayor contenido de SST y una mayor TA por efecto de OQ, lo cual incrementó la relación SST/TA (He *et al.*, 2018). En estos estudios no se evaluó la composición individual de los azúcares y los AOs presentes en los frutos como es el caso del presente estudio.

Cuadro 3. Efecto de la aplicación poscosecha de oligosacáridos pécticos sobre el pH, porcentaje de acidez y la relación de azúcares y ácidos orgánicos en fresas.

	Tratamiento	Tiempo de almacenamiento (días)			
		0	4	8	14
pH	CONTROL	3.57 ± 0.00 a, D	3.81 ± 0.00 b, B	3.88 ± 0.00 a, A	3.64 ± 0.02 c, C
	2 g/L	3.57 ± 0.00 a, D	3.83 ± 0.00 a, B	3.63 ± 0.00 c, C	3.92 ± 0.00 a, A
	5 g/L	3.57 ± 0.00 a, C	3.83 ± 0.00 a, B	3.84 ± 0.00 b, B	3.91 ± 0.00 a, A
	9 g/L	3.57 ± 0.00 a, B	3.46 ± 0.00 c, D	3.54 ± 0.00 d, C	3.67 ± 0.00 b, A
% Acidez	CONTROL	0.78 ± 0.00 a, C	0.81 ± 0.01 b, B	0.83 ± 0.00 a, B	0.87 ± 0.01 ab, A
	2 g/L	0.78 ± 0.00 a, B	0.78 ± 0.00 b, B	0.78 ± 0.00 b, B	0.89 ± 0.01 a, A
	5 g/L	0.78 ± 0.00 a, C	0.88 ± 0.01 a, A	0.82 ± 0.02 a, B	0.89 ± 0.00 a, A
	9 g/L	0.78 ± 0.00 a, C	0.88 ± 0.02 a, A	0.84 ± 0.01 a, B	0.84 ± 0.04 b, B
Azúcares /ácidos	CONTROL	2.16 ± 0.01 a, B	2.17 ± 0.04 a, B	2.31 ± 0.00 a, A	2.28 ± 0.02 b, A
	2 g/L	2.16 ± 0.01 a, B	2.19 ± 0.03 a, B	2.28 ± 0.02 a, A	2.27 ± 0.03 b, A
	5 g/L	2.16 ± 0.01 a, A	2.00 ± 0.01 b, B	2.16 ± 0.02 b, A	2.04 ± 0.02 c, B
	9 g/L	2.16 ± 0.01 a, B	1.95 ± 0.02 b, C	2.11 ± 0.02 b, B	2.39 ± 0.04 a, A

Las fresas fueron cosechadas en punto rosa y almacenadas a 2 °C y 90 % de humedad relativa por 14 días. Cada valor representa la media de 3 mediciones independientes ± el error estándar. Las medias en la misma columna (tratamiento) que no comparten las mismas letras minúsculas son significativamente diferentes (P <0.05, prueba de Tukey-Kramer). Los valores en la misma línea (tiempo de muestreo) que tienen las mismas letras mayúsculas no son significativamente diferentes (P <0.05, prueba de Tukey- Kramer).

Cuadro 4. Efecto de la aplicación poscosecha de oligosacáridos pécticos sobre el contenido de ácidos orgánicos en fresas.

	Tratamiento	Tiempo de almacenamiento (días)			
		0	4	8	14
Ac. Cítrico	CONTROL	6.89 ± 0.05 a, C	7.22 ± 0.06 d, B	7.09 ± 0.12 c, B	7.58 ± 0.01 c, A
	2 g/L	6.89 ± 0.05 a, C	7.02 ± 0.03 c, BC	7.15 ± 0.07 c, B	8.39 ± 0.03 a, A
	5 g/L	6.89 ± 0.05 a, B	8.15 ± 0.04 a, A	8.19 ± 0.06 a, A	8.24 ± 0.03 b, A
	9 g/L	6.89 ± 0.05 a, C	7.90 ± 0.03 b, B	8.01 ± 0.06 b, B	7.43 ± 0.02 d, A
Ac. Succínico	CONTROL	3.90 ± 0.03 a, D	4.25 ± 0.03 c, C	4.48 ± 0.05 c, B	4.95 ± 0.03 d, A
	2 g/L	3.90 ± 0.03 a, D	4.09 ± 0.02 c, C	4.88 ± 0.10 b, B	6.15 ± 0.12 a, A
	5 g/L	3.90 ± 0.03 a, C	4.73 ± 0.14 a, B	4.57 ± 0.05 c, B	5.34 ± 0.05 c, A
	9 g/L	3.90 ± 0.03 a, D	4.50 ± 0.04 b, C	5.18 ± 0.04 a, B	5.72 ± 0.08 b, A
Ac. Málico	CONTROL	2.05 ± 0.01 a, D	2.24 ± 0.00 a, C	2.46 ± 0.03 a, B	2.37 ± 0.02 b, A
	2 g/L	2.05 ± 0.01 a, C	2.27 ± 0.02 a, B	2.26 ± 0.02 b, B	2.70 ± 0.01 a, A
	5 g/L	2.05 ± 0.01 a, B	2.17 ± 0.01 b, A	2.00 ± 0.01 d, C	2.07 ± 0.02 c, B
	9 g/L	2.05 ± 0.01 a, A	2.04 ± 0.02 c, A	2.06 ± 0.04 c, A	2.03 ± 0.04 c, A
Ac. Tartárico	CONTROL	0.50 ± 0.01 a, A	0.44 ± 0.01 c, B	0.50 ± 0.01 c, A	0.47 ± 0.02 c, AB
	2 g/L	0.50 ± 0.01 a, C	0.41 ± 0.00 c, D	0.66 ± 0.02 b, B	0.89 ± 0.01 a, A
	5 g/L	0.50 ± 0.01 a, C	0.86 ± 0.03 a, B	0.94 ± 0.01 a, A	0.88 ± 0.04 a, B

	9 g/L	0.50 ± 0.01	a, C	0.72 ± 0.01	b, AB	0.68 ± 0.02	b, B	0.76 ± 0.01	b, A
Ac. Ascórbico	CONTROL	0.23 ± 0.00	a, C	0.26 ± 0.02	b, BC	0.31 ± 0.01	a, A	0.26 ± 0.01	b, B
	2 g/L	0.23 ± 0.00	a, C	0.31 ± 0.02	a, B	0.28 ± 0.03	b, C	0.39 ± 0.00	a, A
	5 g/L	0.23 ± 0.00	a, A	0.17 ± 0.01	d, B	0.19 ± 0.01	c, B	0.20 ± 0.00	c, B
	9 g/L	0.23 ± 0.00	a, A	0.21 ± 0.01	c, AB	0.20 ± 0.01	c, B	0.19 ± 0.00	c, B
Ac. Oxálico	CONTROL	0.10 ± 0.00	a, A	0.06 ± 0.00	c, BC	0.07 ± 0.00	c, B	0.05 ± 0.00	c, C
	2 g/L	0.10 ± 0.00	a, B	0.06 ± 0.00	c, C	0.11 ± 0.00	b, B	0.12 ± 0.01	a, A
	5 g/L	0.10 ± 0.00	a, C	0.16 ± 0.00	a, A	0.14 ± 0.00	a, B	0.10 ± 0.01	b, C
	9 g/L	0.10 ± 0.00	a, B	0.13 ± 0.01	b, A	0.10 ± 0.00	b, B	0.11 ± 0.00	b, B
Ac. Fumárico	CONTROL	0.01 ± 0.00	a, D	0.01 ± 0.00	a, C	0.01 ± 0.00	b, B	0.02 ± 0.00	b, A
	2 g/L	0.01 ± 0.00	a, D	0.01 ± 0.00	a, C	0.02 ± 0.00	a, B	0.02 ± 0.00	a, A
	5 g/L	0.01 ± 0.00	a, C	0.01 ± 0.00	b, B	0.01 ± 0.00	c, B	0.02 ± 0.00	c, A
	9 g/L	0.01 ± 0.00	a, C	0.01 ± 0.00	b, C	0.01 ± 0.00	b, B	0.02 ± 0.00	b, A

Las fresas fueron cosechadas en punto rosa y almacenadas a 2 °C y 90 % de humedad relativa por 14 días. Los contenidos de los diferentes ácidos orgánicos están expresados en g/Kg de peso fresco. Cada valor representa la media de 3 mediciones independientes ± el error estándar. Las medias en la misma columna (tratamiento) que no comparten las mismas letras minúsculas son significativamente diferentes (P <0.05, prueba de Tukey-Kramer). Los valores en la misma línea (tiempo de muestreo) que tienen las mismas letras mayúsculas no son significativamente diferentes (P <0.05, prueba de Tukey- Kramer).

6.5. Firmeza

La firmeza es una propiedad textural que proporciona información sobre la capacidad de almacenamiento y resistencia a las lesiones de los productos (Gunness *et al.*, 2009). La firmeza de los frutos control y los tratados con POS disminuyó durante el almacenamiento. Este ablandamiento podría estar relacionado con la desintegración y despolimerización de la pared celular mediado por diferentes enzimas, así como por la deshidratación poscosecha. Al final del almacenamiento, los frutos tratados con POS presentaron una menor disminución de firmeza en comparación con la fruta control, la cual perdió el 53 % de su firmeza inicial, mientras que los frutos tratados con POS a concentraciones de 2, 5 y 9 g/L perdieron el 35, 33 y 20 % de su firmeza, respectivamente (Cuadro 5). Bose *et al.* (2019) obtuvieron resultados similares con una disminución en las frutas control del 45 % y una disminución en las frutas tratadas con OA del 33 y 35 %, así mismo He *et al.* (2018 y 2019) observaron un aumento de un 20 % en la firmeza de fresas tratadas con OQ aplicados en etapa precosecha y notaron una disminución de la pérdida de

firmeza en etapa poscosecha. En dichos estudios observaron que este retraso en la degradación de la pared celular se vio relacionado con la inhibición de la expresión génica de las enzimas PME, PL y EG (FaPL, FaPE y FaEG). Los investigadores observaron que los frutos tratados exhibieron un menor contenido de la fracción péctica soluble en agua en comparación con el control, así como un mayor contenido en la proporción de pectina iónica, hemicelulosa y celulosa, influyendo en el aumento de la firmeza de la fresa. Además, observaron un mayor contenido de lignina en los frutos tratados, lo cual indica que los OQ podrían inducir la biosíntesis de lignina, la cual también es responsable de proporcionar dureza y estabilidad a la estructura de la pared celular.

En tomate y kiwi también ha sido reportada una disminución de la pérdida de firmeza por acción de POS y de OA, respectivamente (García Sahagún *et al.*, 2009; Liu *et al.*, 2020).

La enzima PME cataliza la hidrólisis de éster metílico en las cadenas de homogalacturano de la pectina, produciendo grupos carboxilo libres y metanol. Tras la desesterificación los residuos de AGal en las pectinas parcialmente desmetoxiladas se cargan negativamente y pueden interactuar iónicamente con cationes divalentes (p. Ej., Ca^{++}, Mg^{++}), produciendo enlaces y reticulación de moléculas que forman geles de pectatos (Salas-Tovar *et al.*, 2017). La coordinación de diez o más residuos de AGal desmetoxilados consecutivos genera una estructura de "caja de huevo" que contribuye al endurecimiento de la pared celular (Osorio *et al.*, 2008).

Osorio *et al.* (2008) modificaron genéticamente frutos de *Fragaria vesca* para que expresara una PME específica (FaPE1) de *Fragaria ananassa* y observaron cambios en el patrón de esterificación de pectina en las líneas transgénicas dando como resultado oligogalacturónidos de menor tamaño en comparación al control, lo cual mejoró su capacidad de unión a cationes, sugiriendo que dicho cambio en la pectina podría limitar la acción de otras enzimas hidrolíticas como la PG y la PL.

6.6. Color

El color es el atributo de calidad más importante en fresas, puesto que permite determinar el estado de madurez y la vida poscosecha, y además influye en la decisión de compra por parte de los consumidores (Corrêa *et al.*, 2014). La aparición de cualquier pigmento implica fenómenos de absorción y emisión de luz que inducen cambios de color (Fernández-Lara *et al.*, 2015). Los datos

de color obtenidos con los diferentes grupos experimentales se muestran en el cuadro 5. En los cuatro grupos experimentales se observó una disminución de los valores de luminosidad (*L**) durante el almacenamiento, sin embargo, las fresas tratadas presentaron una menor disminución. Al día 8 se observó una diferencia significativa de todas los frutas tratadas con POS con respecto a la fruta control, mientras que en el día 14 se encontró que las frutas tratadas con 9 g/L de POS mostraron el valor más bajo de *L**, el cual fue significativamente diferente al de la fruta control. Al final del almacenamiento, el porcentaje de disminución de *L** fue de 5, 8, 7 y 10 % para la fruta control y la tratada con POS a concentraciones de 2, 5 y 9 g/L, respectivamente.

La variable *a** presentó incrementos, respecto al valor inicial, en todos los grupos experimentales durante el almacenamiento. Los frutos sin tratar presentaron los mayores aumentos durante el transcuro del almacenamiento y al final de éste (10 %), seguido de las fresas tratadas con 5 g/L de POS (4 %). Los frutas tratadas con 2 y 9 g/L mostraron los menores incrementos (1-3 %), los cuales fueron significativamente diferentes a las fresas sin tratar.

La variable *b** incrementó durante los primeros 4 días de almacenamiento en todos los grupos experimentales, pero luego disminuyó gradualmente durante el resto del almacenamiento. Al día 14, el grupo control presentó la menor disminucion (6 %) de *b** en comparación con los grupos tratados con POS (12 – 23 %), tomando como referencia el valor inicial de *b**.

Al calcular *C** se observó que al final del almacenamiento las frutas sin tratar presentaron un incremento del 5 % mientras que las frutas tratadas con POS mostraron una disminución (1- 6 %) significativamente diferente al control. Liu *et al.* (2018) indicaron que un valor de *C** más bajo significa una coloración más brillante de la fruta. En cuanto a el °*h*, se observó una disminución tanto en los frutos sin tratar como en los tratados con POS durante el transcurso del almacenamiento. En el día 14 la disminución total fue del 11 % para la fruta control y de 14 – 20% para los grupos tratados con POS, en donde solo las fresas tratadas con 9 g/L de POS fueron diferentes del grupo control.

Carreño *et al.* (1995), observaron una disminución de *L**, *b**, *C** y °*h*, asi como un aumentó de *a** en uvas, a medida que aumentaba el desarrollo de color.

Se ha informado que, durante el almacenamiento a 11 °C, la fresa se vuelve más roja y oscura debido a la síntesis de antocianinas, los pigmentos que confieren el color rojo a las fresas (Gol *et al.*, 2013). Durante el almacenamiento de fresas a 4 °C se observó que no se presentó la biosíntesis de antocianinas, pues éstas disminuyeron. También se observó que *L** continuó disminuyendo,

mientras que a* y *b** no presentaron cambios significativos (Octavia y Choo, 2017).

En el presente estudio los cambios en las variables de color en las fresas tratadas con POS resultaron en frutos con una tonalidad más intensa lo que se relaciona con un mayor contenido de antocianinas en los frutos, por lo tanto, estos podrían tener una mejor aceptación por parte de los consumidores. Crecente-Campo *et al*. (2012) observaron que las fresas orgánicas presentaban valores más bajos de *L**, *C** y °*h* y una mayor aceptación sensorial que las cultivadas convencionalmente.

Para evaluar el efecto de los POS sobre el color superficial de las fresas se calculó el ΔE_{ab}, el cual indica diferencias de color que son detectables para el ojo humano cuando dichas diferencias tienen valores mayores a 3 unidades (Fernández-Lara *et al.*, 2015). El ΔE_{ab} aumentó durante el almacenamiento en todos los grupos experimentales. Sin embargo, al final del almacenamiento los frutos tratados con POS a 2 y 9 g/L mostraron los mayores incrementos (6.08 y 8.22 unidades) en comparación con las frutas sin tratar (5.35 unidades) y las tratadas con 5 g/L de POS (4.67 unidades). Los POS a 9 g/L causaron el mayor ΔE_{ab} (38 %). Los POS también han demostrado mejorar el color en uvas hasta en un 30 % (índice CIRG) (Ochoa-Villarreal *et al.*, 2011).

Para evaluar el efecto de los POS sobre el color interno de los frutos se obtuvo el %CTI, el cual es una medición propuesta en el presente estudio como una opción para evaluar el color interno de los frutos de fresa. Este indica la proporción de la sección transversal de los frutos que se ha tornado roja, teniendo presente que durante la maduración del fruto el desarrollo de color inicia en la superficie y se extiende, posteriormente, hacia el centro del fruto. El %CTI incrementó durante el almacenamiento en los 4 grupos experimentales. Sin embargo, los frutos sin tratar mostraron el menor incremento (57.09 %) en comparación con los frutos tratados con POS (62.9 - 68.03 %). El efecto de los POS sobre el ΔE_{ab} y %CTI, indica que los POS promovieron la biosíntesis de pigmentos, no solo en el exterior de las fresas sino también hacia el interior de ellas, como se verá más adelante al informar el efecto de los POS sobre el contenido de antocianinas (Cuadro 6). Kelly (2018) evaluó el contenido de compuestos fenólicos en la proporción coloreada de las fresas (corteza) y en la proporción blanca (médula) y observó que la corteza tenía una mayor concentración de compuestos fenólicos que la médula. Estos resultados sugieren que un mayor avance del %CTI indica en general un mayor contenido de compuestos fenólicos, incluyendo antocianinas.

Cuadro 5. Efecto de la aplicación poscosecha de oligosacáridos pécticos sobre la firmeza y las variables de color CIELab, incremento de color (ΔEab) y porcentaje de coloración interna (%CTI) en fresas.

	Tratamiento	Tiempo de almacenamiento (días)			
		0	4	8	14
Firmeza (N)	CONTROL	7.55 ± 0.30 a, A	7.15 ± 0.29 a, AB	6.08 ± 0.28 ab, B	3.57 ± 0.28 b, C
	2 g/L	7.55 ± 0.30 a, A	7.63 ± 0.38 a, A	5.34 ± 1.04 b, B	4.89 ± 0.24 a, B
	5 g/L	7.55 ± 0.30 a, A	6.85 ± 0.76 a, AB	5.76 ± 0.31 b, BC	5.06 ± 0.43 a, C
	9 g/L	7.55 ± 0.30 a, A	8.07 ± 0.51 a, A	7.16 ± 0.31 a, AB	6.07 ± 0.44 a, B
*L**	CONTROL	37.05 ± 0.26 a, A	37.47 ± 0.52 a, A	35.66 ± 0.55 a, B	35.23 ± 0.34 a, B
	2 g/L	37.05 ± 0.26 a, A	36.34 ± 0.43 bc, A	32.74 ± 0.36 b, C	34.15 ± 0.47 ab, B
	5 g/L	37.05 ± 0.26 a, A	37.00 ± 0.41 ab, A	33.28 ± 0.39 b, C	34.53 ± 0.27 a, B
	9 g/L	37.05 ± 0.26 a, A	35.42 ± 0.38 c, B	33.65 ± 0.54 b, C	33.33 ± 0.42 b, C
*a**	CONTROL	24.88 ± 0.25 a, B	27.13 ± 0.50 a, A	27.54 ± 0.65 a, A	27.31 ± 0.41 a, A
	2 g/L	24.88 ± 0.25 a, C	27.23 ± 0.44 a, A	26.75 ± 0.55 ab, AB	25.55 ± 0.52 b, BC
	5 g/L	24.88 ± 0.25 a, B	27.30 ± 0.50 a, A	25.80 ± 0.55 b, B	26.00 ± 0.37 b, B
	9 g/L	24.88 ± 0.25 a, B	26.63 ± 0.59 a, A	27.00 ± 0.47 ab, A	25.22 ± 0.57 b, B
*b**	CONTROL	17.00 ± 0.38 a, B	20.13 ± 0.63 a, A	16.95 ± 0.76 a, B	16.00 ± 0.46 a, B
	2 g/L	17.00 ± 0.38 a, B	18.98 ± 0.52 a, A	14.77 ± 0.63 b, C	14.92 ± 0.76 a, C
	5 g/L	17.00 ± 0.38 a, B	18.90 ± 0.58 ab, A	14.42 ± 0.55 b, C	14.65 ± 0.39 a, C
	9 g/L	17.00 ± 0.38 a, A	17.42 ± 0.55 b, A	15.14 ± 0.62 b, B	13.04 ± 0.65 b, C
*C**	CONTROL	30.31 ± 0.41 a, C	33.83 ± 0.67 a, A	32.40 ± 0.89 a, AB	31.70 ± 0.51 a, BC
	2 g/L	30.31 ± 0.41 a, B	33.23 ± 0.57 ab, A	30.60 ± 0.75 b, B	29.67 ± 0.76 b, B
	5 g/L	30.31 ± 0.41 a, B	33.25 ± 0.64 ab, A	29.59 ± 0.72 b, B	29.87 ± 0.47 b, B
	9 g/L	30.31 ± 0.41 a, A	31.87 ± 0.73 b, A	31.00 ± 0.66 ab, A	28.46 ± 0.76 b, B
°h	CONTROL	33.90 ± 0.49 a, B	36.48 ± 0.75 a, A	31.37 ± 0.79 a, C	30.24 ± 0.63 a, C
	2 g/L	33.90 ± 0.49 a, A	34.80 ± 0.69 ab, A	28.70 ± 0.71 b, B	29.97 ± 1.06 a, B
	5 g/L	33.90 ± 0.49 a, A	34.63 ± 0.75 ab, A	29.02 ± 0.60 b, B	29.32 ± 0.52 a, B
	9 g/L	33.90 ± 0.49 a, A	33.12 ± 0.65 b, A	29.09 ± 0.77 b, B	27.08 ± 0.88 b, C
ΔE_{ab}	CONTROL		5.43 ± 0.29 a, A	5.98 ± 0.23 bc, A	5.35 ± 0.20 bc, A
	2 g/L		5.79 ± 0.35 a, A	6.58 ± 0.37 b, A	6.08 ± 0.38 b, A
	5 g/L		5.97 ± 0.22 a, A	5.19 ± 0.28 c, AB	4.67 ± 0.42 c, B
	9 g/L		5.96 ± 0.48 a, B	7.89 ± 0.46 a, A	8.22 ± 0.55 a, A
%CTI	CONTROL	54.85 ± 0.80 a, A	56.56 ± 1.06 b, A	56.70 ± 1.14 c, A	57.09 ± 2.52 c, A
	2 g/L	54.85 ± 0.80 a, C	56.81 ± 1.56 b, C	60.65 ± 1.40 b, B	68.03 ± 1.05 b, A
	5 g/L	54.85 ± 0.80 a, B	56.60 ± 1.05 b, B	64.65 ± 1.27 a, A	63.02 ± 1.06 a, A
	9 g/L	54.85 ± 0.80 a, B	61.22 ± 1.49 a, A	61.81 ± 1.31 ab, A	62.90 ± 1.40 a, A

Las fresas fueron cosechadas en punto rosa y almacenadas a 2 °C y 90 % de humedad relativa por 14 días. Cada valor representa la media de 4 (firmeza) y 17 (variables de color) mediciones independientes ± el error estándar. Las medias en la misma columna (tratamiento) que no comparten las mismas letras minúsculas son significativamente diferentes (P <0.05, prueba de Tukey-Kramer). Los valores en la misma línea (tiempo de muestreo) que tienen las mismas letras mayúsculas no son significativamente diferentes (P <0.05, prueba de Tukey- Kramer).

6.7. Antocianinas Totales e Individuales

Las antocianinas son compuestos fenólicos responsables del color rojo brillante de las fresas, por lo que influyen en la calidad sensorial de esta fruta. Además, poseen funciones biológicas, como actividad antioxidante, protección contra la luz ultravioleta y patógenos, y ofrecen beneficios en la salud humana, como efectos anticancerígenos, antiinflamatorios y cardioprotectores (Aaby *et al.*, 2012; Barbieri *et al.*, 2017). Las principales antocianinas en fresas son pelargonidina-3-glucósido, cianidina-3-glucósido y pelargonidina-3-rutinósido (Nunes *et al.*, 1995; Crecente-Campo *et al.*, 2012; Giampieri *et al.*, 2012).

En el presente estudio dichas antocianinas fueron cuantificadas individualmente por CLAR y adicionalmente fueron evaluadas de forma total mediante el método de pH diferencial, que se basa en la capacidad de la antocianina monomérica de cambiar de color con un cambio de pH. Estos compuestos muestran el color máximo cuando están en pH de 1 y la forma incolora predomina a un pH de 4.5 (Chaves *et al.*, 2017).

6.7.1 Contenido de Antocianinas Totales

En todos los grupos experimentales se observó un incremento en el CAT conforme transcurrió el tiempo de almacenamiento (Cuadro 6). Sin embargo, las frutas sin tratar fueron significativamente menores a las frutas tratadas con POS. Por otra parte, las frutas tratadas con POS a concentraciones de 2 y 9 g/L presentaron incrementos significativos en esta variable en comparación con las frutas tratadas con 5 g/L de POS. Este incremento en el CAT mediado por oligosacáridos se ha atribuido a que los oligosacáridos influencian los niveles de la PAL, una de las enzimas clave en la biosíntesis de antocianinas (Ochoa-Villarreal *et al.*, 2011; Villegas *et al.*, 2016; Virgen-Ortiz *et al.*, 2020).

He *et al.* (2018) también observaron un incremento en el CAT en fresas mediante la aplicación precosecha de OQ (236 mg/Kg), comparado con las frutas sin tratar (211 mg/Kg). Bose *et al.* (2019) observaron que los OA causaron un incremento en el CAT (200 mg/Kg), a los 6 días de almacenamiento, con la menor dosis (50 mg/L), en comparación con la fruta control (160 mg/Kg).

He *et al.* (2019) observaron que la aplicación poscosecha de la mayor dosis de OQ (100 mg/L) causó un incremento en el CAT en fresas durante el almacenamiento por 6 días. Virgen-Ortiz *et al.* (2020) observaron que los POS incrementaron el CAT en fresas durante el almacenamiento en refrigeración por 14 días. El incremento fue mayor conforme aumentaba la dosis (2, 5 y 9 g/L).

Como se observó anteriormente en el presente estudio, los POS promovieron una mayor cantidad de azúcares simples, lo cual causó una mayor disponibilidad de metabolitos primarios que inician flujos de carbono en vías biosintéticas de metabolitos secundarios, como la vía del shikimato, promoviendo una mayor acumulación de antocianinas (Macheix, 2018; Azam *et al.*, 2019).

Villegas *et al.* (2016) informaron un aumento en la expresión de la enzima UFGT que resultó en un aumento de antocianinas en uvas de vino. Una mayor disposición de glucosa podría aumentar la actividad de la UFGT. De acuerdo a los resultados obtenidos en el presente estudio y a los estudios citados, no queda claro si hay un efecto dosis dependiente para la acumulación de antocianinas. Sin embargo, la razón del porque las fresas tratadas con 5 g/L de POS resultaran en un menor CAT en comparación con las frutas tratadas con 2 y 9 g/L, puede ser debido a que las fresas tratadas con 5 g/L de POS mostraron los menores contenidos de glucosa al final del almacenamiento, lo cual pudo disminuir la actividad de la enzima UFGT, mientras que las fresas tratadas con 2 y 9 g/L mostraron mayores contenidos de glucosa que posiblemente causarían una mayor actividad de la UFGT para una mayor acumulación de antocianinas.

6.7.2 Contenido de Antocianinas Individuales

En el presente estudio se identificaron y cuantificaron las antocianinas cianidina-3-glucósido, pelargonidina-3-glucósido y pelargonidina-3-rutinósido (Cuadro 6).

En general, el comportamiento creciente del CAT fue similar al observado en el contenido de antocianinas individuales. La pelargonidina-3-glucósido es la antocianina más abundante en fresa (Aaby *et al*., 2012). Ésta mostró una alta correlación con el contenido de CAT (0.96), Chaves *et al.* (2017) también observaron una fuerte correlación (0.82) entre ambas variables.

La presencia de estas tres antocianinas ha sido ampliamente reportada en diferentes estudios realizados en fresas de diferentes cultivares (Buendia *et al.*, 2009; Aaby *et al.*, 2012; Fernández-

Lara *et al.*, 2015; Chaves *et al.*, 2017; Enomoto *et al.*, 2018), en donde se ha observado que estas aumentan conforme aumenta la maduración (Ornelas-Paz *et al.*, 2013) y que además factores como el método de cultivo (orgánico) y la inducción de estrés (sequia leve y estrés salino) pueden aumentar el contenido de éstas en los frutos (Crecente-Campo *et al.*, 2012; Perin *et al.*, 2019). Las tecnologías de preservación, como la aplicación de altas presiones, no tiene un efecto sobre estos compuestos (Cao *et al.*, 2011).

Las tres antocianinas identificadas mostraron incrementos tras el almacenamiento. Al día 14 los POS a 2, 5 y 9 g/L causaron un mayor contenido de estas tres antocianinas en comparación con las fresas sin tratar, siendo el tratamiento de 9 g/L el que causara los más altos incrementos.

Li *et al.* (2019) observaron que la adición exógena de sacarosa (50mM), en fresas, aumentó el contenido de los derivados de pelargonidina, mientras que los derivados de cianidina no mostraron diferencias significativas indicando que la sacarosa puede regular específicamente la síntesis de derivados de pelargonidina. En uvas de mesa se reportó un efecto significativo de POS (1.5, 2.0 y 2.5 mg/mL) en el contenido de antocianinas individuales, en particular, se informó un aumento significativo de cianidinia-3-glucósido por efecto de POS a una dosis de 1.5 mg/mL (Castañeda-Vázquez, 2010). Por lo tanto, los POS podrían tener un mejor efecto comparado a la sola adición de sacarosa en la biosíntesis de las diferentes antocianinas contenidas en las fresas.

La pelargonidina-3-glucósido proporciona un color rojo brillante a las fresas, mientras que la cianidina-3-glucósido proporciona un color rojo más oscuro (Cao *et al.*, 2011; Dzhanfezova *et al.*, 2020). El incremento en las antocianinas individuales de las fresas tratadas con POS podría explicar los resultados obtenidos en las variables de color anteriormente presentadas, principalmente para el tratamiento de 9 g/L, el cual causó los más altos contenidos de antocianinas y los mayores cambios de color, tanto externos como internos.

Cuadro 6. Efecto de la aplicación poscosecha de oligosacáridos pécticos sobre el contenido de antocianinas totales e individuales en fresas.

	Tratamiento	Tiempo de almacenamiento (días)			
		0	4	8	14
Antocianinas totales	CONTROL	59.5 ± 1.7 $^{a, D}$	103.9 ± 5.4 $^{b, C}$	241.2 ± 1.9 $^{d, B}$	353.4 ± 6.4 $^{c, A}$
	2 g/L	59.5 ± 1.7 $^{a, D}$	114.6 ± 9.8 $^{b, C}$	272.5 ± 7.8 $^{c, B}$	422.2 ± 5.9 $^{a, A}$
	5 g/L	59.5 ± 1.7 $^{a, D}$	82.1 ± 6.5 $^{c, C}$	306.3 ± 6.0 $^{b, B}$	391.4 ± 4.3 $^{b, A}$
	9 g/L	59.5 ± 1.7 $^{a, C}$	137.8 ± 4.5 $^{a, B}$	414.4 ± 17.0 $^{a, A}$	417.8 ± 10.1 $^{a, A}$

Cianidina-3-glucósido	CONTROL	21.5 ± 0.7 a, B	21.3 ± 1.1 b, B	24.4 ± 0.3 b, A	24.2 ± 0.6 c, A
	2 g/L	21.5 ± 0.7 a, C	22.3 ± 0.5 ab, C	24.1 ± 0.4 b, B	27.4 ± 1.1 b, A
	5 g/L	21.5 ± 0.7 a, C	23.5 ± 0.6 a, B	24.3 ± 0.4 b, B	29.3 ± 0.8 ab, A
	9 g/L	21.5 ± 0.7 a, D	23.7 ± 0.2 a, C	26.6 ± 0.6 a, B	31.4 ± 1.7 a, A
Pelargonidina-3-glucósido	CONTROL	128.3 ± 3.6 a, C	129.6 ± 3.1 c, C	196.7 ± 5.0 d, B	251.8 ± 5.7 c, A
	2 g/L	128.3 ± 3.3 a, D	165.3 ± 5.3 b, C	208.6 ± 1.6 c, B	281.3 ± 3.3 b, A
	5 g/L	128.3 ± 3.6 a, D	194.4 ± 1.4 a, C	231.0 ± 6.3 b, B	281.7 ± 0.9 b, A
	9 g/L	128.3 ± 3.6 a, D	187.4 ± 4.0 a, C	285.4 ± 4.1 a, B	301.4 ± 4.7 a, A
Pelargonidina-3-rutinósido	CONTROL	33.0 ± 0.4 a, C	33.7 ± 0.6 b, C	38.1 ± 0.8 c, B	59.1 ± 0.0 c, A
	2 g/L	33.0 ± 0.4 a, D	50.3 ± 2.3 a, C	58.6 ± 3.9 b, B	72.0 ± 2.2 a, A
	5 g/L	33.0 ± 0.4 a, D	47.8 ± 0.2 a, C	55.8 ± 0.5 b, B	64.6 ± 1.0 b, A
	9 g/L	33.0 ± 0.4 a, D	51.9 ± 0.8 a, C	66.7 ± 0.4 a, B	74.2 ± 0.4 a, A

Las fresas fueron cosechadas en punto rosa y almacenadas a 2 °C y 90 % de humedad relativa por 14 días. Los contenidos de las antocianinas totales e individuales están expresados en mg/Kg de peso fresco. Cada valor representa la media de 3 mediciones independientes ± el error estándar. Las medias en la misma columna (tratamiento) que no comparten las mismas letras minúsculas son significativamente diferentes (P <0.05, prueba de Tukey-Kramer). Los valores en la misma línea (tiempo de muestreo) que tienen las mismas letras mayúsculas no son significativamente diferentes (P <0.05, prueba de Tukey- Kramer).

6.8. Compuestos Fenólicos Totales e Individuales

6.8.1. Contenido de Fenoles Totales

El contenido de fenoles totales se muestra en el cuadro 7. Las fresas tratadas con POS a concentraciones de 5 y 9 g/L presentaron el mayor contenido de compuestos fenólicos totales a lo largo del almacenamiento. El contenido de dichos compuestos tendió a incrementar durante la mayor parte del almacenamiento, pero disminuyó en todos los grupos experimentales al final. La fresa no tratada con POS presentó el mayor descenso en el contenido de compuestos fenólicos totales (Cuadro 8). Los fenoles sufren procesos de degradación por enzimas como la PFO, la POD, lacasa y lipoxigenasa (De la Rosa *et al.*, 2019). La disminución del contenido de fenoles podría deberse a la ruptura del ensamblaje y la estructura celular (Bose *et al.*, 2019). La PFO se puede encontrar tanto en formas solubles como unidas a la membrana en los cloroplastos, mitocondrias, microsomas, peroxisomas y citoplasma. La POD se puede encontrar soluble en el citoplasma o

unida a la pared celular. La rotura celular que conduce a la descompartimentación implica una cascada de eventos, incluida la activación de la PFO latente, así como una inducción de POD (Tomás-Barberán y Espín, 2001). El colapso de las membranas celulares permite que la PFO entre en contacto con los polifenoles. (Kelly, 2018; Muley y Singhal, 2020). Además, determinadas enzimas implicadas en el metabolismo fenólico se localizan en las membranas (Macheix, 2018).

El contenido final de compuestos fenólicos en la fruta control y en la tratada con POS a concentraciones de 2, 5 y 9 g/L fue de 790, 1039, 1624 y 1398 mg GAE/Kg, respectivamente. Un mayor contenido de fenoles totales por acción de OQ ha sido reportado en orégano, durazno, fresa y manzana (Yin *et al.*, 2012; Chen *et al.*, 2018; He *et al.*, 2018; He *et al.*, 2019; Sarkar *et al.*, 2018). Los OA también mejoraron el contenido de compuestos fenólicos en fresa y kiwi (Bose *et al.*, 2019; Liu *et al.*, 2020). Las fresas tratadas con 5 y 9 g/L de POS tuvieron un efecto inhibidor contra la solubilización de la pared celular, lo cual podría retrasar significativamente la reducción del contenido de fenoles en comparación con los frutos sin tratar. Además, los oligosacáridos podrían aumentar la respuesta sistémica adquirida activando enzimas como SOD, CATA y APX del metabolismo antioxidante y las enzimas PAL y CHS del metabolismo fenilpropanoide (Yin *et al.*, 2012; Chen *et al.*, 2018; Liu *et al.*, 2020) influyendo en el aumento del contenido de fenoles (De la Rosa *et al.*, 2019). En la siguiente sección se discutirá con más profundidad el efecto de los oligosacáridos sobre el contenido de fenoles en los frutos.

6.8.2. Contenido de Compuestos Fenólicos Individuales

Las fresas han sido incluidas entre las 100 fuentes más ricas de polifenoles dietarios (Basu *et al.*, 2014; Fernández-Lara *et al.*, 2015) debido a que contienen altas cantidades de estos compuestos, como el AE, ácido *p*-cumárico, ácido cafeico, y flavonoides como quercetina y kaempferol y sus derivados, cuya distribución difiere entre variedades (Aaby *et al.*, 2012; Fernández-Lara *et al.*, 2015). Por lo tanto, la caracterización de los compuestos fenólicos individuales es fundamental, ya que tienen diferentes biodisponibilidades y, por tanto, efectos beneficiosos diferentes para la salud (Buendia *et al.*, 2009). Los compuestos identificados y su contenido en las fresas analizadas en el presente estudio se muestran en los cuadros 8 y 9.

Los taninos condensados o proantocianidinas son polímeros de flavanoles con actividad antimicrobiana (Barbieri *et al.*, 2017). Se encuentran comúnmente en la pulpa de la fresa y en los aquenios. Su actividad biológica puede ser directa o indirecta e incluye propiedades antioxidantes, antimicrobianas, antialérgicas, antihipertensivas e inhiben la actividad de algunas enzimas y receptores fisiológicos (Giampieri *et al.*, 2012). El contenido de procianidinas B1 y B2 en las fresas incrementó continuamente durante el almacenamiento en todos los grupos experimentales, siendo las fresas tratadas con la mayor concentración de POS las que tuvieron el mayor contenido de procianidina B1 y las fresas tratadas con la menor dosis de POS las que presentaron el mayor contenido de procianidina B2.

La catequina es un flavanol perteneciente al grupo de los flavonoides que ofrece beneficios para la salud humana ya que exhibe capacidad antioxidante y actividad antimicrobiana (Barbieri *et al.*, 2017). Además, puede influir en el metabolismo energético, el peso corporal y el contenido de grasa corporal (Wang *et al.*, 2010). El consumo de catequina se asocia con la inhibición de la trombosis arterial, la actividad antiinflamatoria, la reducción del colesterol total y lipoproteína de baja densidad (Peñarrieta *et al.*, 2014). En las plantas, la catequina es importante en la tolerancia al estrés de las plantas. El contenido de catequina tendió a incrementar durante el almacenamiento en todos los grupos experimentales, tomando como referencia el contenido inicial de este compuesto, aunque las fresas tratadas con POS a 5g/L mostraron un mayor incremento (65 %) en comparación con el grupo control y los grupos tratados con POS a 2 y 9g/L (28 – 39 %).

Los ácidos fenólicos tienen diversas funciones en las plantas, incluyendo el fungir como precursores de la síntesis de muchos otros compuestos fenólicos, como antocianinas, y compuestos como la lignina, ubiquinona (cofactor respiratorio) y el ácido fólico (vitamina B9) (Walker y Famiani, 2018). Los ácidos fenólicos poseen actividad antimicrobiana, antifúngica, antitumoral y antioxidante (Garrait *et al.*, 2006). Los ácidos cafeico y *p*-cumárico son ácidos hidroxicinámicos que están presentes casi en todas las plantas. Estos tienen un papel importante en la absorción de nutrientes, la síntesis de proteínas, la actividad enzimática y la fotosíntesis (Stojković *et al.*, 2013). El ácido cafeico es el principal representante de los ácidos hidroxicinámicos en varios frutos (Macheix, 2018). Ha sido asociado a una mejora de la salud ya que puede mejorar la patología e inflamación del colon (Cong-Cong *et al.*, 2017). El ácido *p*-cumárico, está presente en la mayoría de las frutas, aunque frecuentemente es menos abundante que el ácido cafeico (Macheix, 2018), posee efectos antioxidantes y antiinflamatorios, presenta una buena actividad antiplaquetaria,

sugiriendo su posible aplicación para la prevención de enfermedades vasculares (Vega *et al.*, 2018). Los contenidos de ácido cafeico y *p*-cumárico aumentaron gradualmente en todos los grupos experimentales a partir del día 4 y hasta el final del almacenamiento. Las fresas no tratadas presentaron el menor incremento de ácido *p*-cumárico (22 %) con respecto a las fresas tratadas con POS (37 - 49 %). Las fresas no tratadas y las tratadas con POS a 5 g/L mostraron el menor incremento del contenido de ácido cafeico (2 - 16 %), seguido de las fresas tratadas con POS a 9 g/L (34 %) mientras que las fresas tratadas con 2 g/L aumentaron considerablemente (96 %).

En fresas tratadas con CO_2 (20 %) se observó un incremento de antocianinas, catequina y procianidinas en comparación con las fresas sin tratar, las cuales sólo incrementaron su contenido de antocianinas y disminuyeron su contenido de catequina y procianidinas. Se sugirió que las fresas sin tratar mostraron una competencia del flujo metabólico hacia la acumulación de antocianinas, mientras que las fresas tratadas no mostraron competencia.

En el presente estudio se observa que tanto en las fresas sin tratar como en las tratadas con POS no se mostró una competencia en la producción de los metabolitos, puesto que todos los grupos incrementaron su contenido de antocianinas, catequina y procianidinas tras el almacenamiento. Sin embargo, los POS incrementaron la actividad metabólica. El incremento de ácido *p*-cumárico tras el almacenamiento puede indicar que las fresas continúan sintetizando compuestos fenólicos, puesto que este es precursor de otros derivados entre ellos los taninos y los flavonoides (Odriozola-Serrano *et al.*, 2010). Los mayores incrementos de ácido *p*-cumárico observados para las fresas tratadas indican un mayor actividad de biosíntesis causada por efecto de los POS, lo cual explicaría el aumento del contenido de antocianinas, catequina y procianidinas.

No obstante, no se observa un efecto claro en cuanto a la dosis de POS y la formación de compuestos fenólicos. Por ejemplo, las fresas tratadas con 2 y 9 g/L mostraron un mayor contenido de ácido cafeico en comparación con las fresas tratadas con 5 g/L, sin embargo, éstas presentaron un mayor contenido de catequina. El ácido cafeíco resulta de la hidroxilación del ácido *p*-cumárico (Macheix, 2018). Es posible que las fresas tratadas con 5 g/L de POS se orientaran por un mayor consumo de ácido *p*-cumárico para la formación de un mayor contenido de catequina. Por otra parte, las fresas tratadas con 2 g/L de POS mostraron un mayor contenido de procianidina B2 significativamente diferente al resto de los grupos, mientras que las fresas tratadas con 9 g/L de POS tuvieron un mayor contenido de procianidina B1, que también resultó significativamente diferente al resto de los grupos. Un mayor contenido de catequina en el tratamiento de 5 g/L podría

indicar una menor polimerización para la formación de procianidinas mientras que los tratamientos de 2 y 9 g/L podrían haber causado una mayor actividad de polimerización de catequina, resultando en un aumento de procianidinas.

El AE es un ácido hidroxibenzóico que posee gran actividad contra especies fisiológicas reactivas (Cruz-Atonio *et al.*, 2010). El AE ejerce efectos anti proliferativos a través de la apoptosis mediante la inhibición de NF-kB (Nuclear Factor κB, por sus siglas en inglés) y suprime las expresiones génicas inflamatorias inducidas por lipopolisacáridos en modelos celulares y animales de carcinogénesis (Basu *et al.*, 2014). Las fresas no tratadas presentaron una disminución de AE durante el transcurso del almacenamiento, mientras que las fresas tratadas con 2g/L de POS incrementaron su contenido hasta el día 8 pero presentaron un drástico descenso en el día 14. Las fresas tratadas con 5 y 9 g/L de POS mostraron incrementos durante el transcurso y hasta el final del almacenamiento (46 y 17%).

Los conjugados de AE son los componentes principales de las bayas, incluidas las fresas, frambuesas, arándanos y uvas (Vattem y Shetty, 2005; Barbieri *et al.*, 2017). Estos compuestos pertenecen al grupo de los taninos hidrolizables o elagitaninos y se han identificado a menudo como los principios activos en las plantas medicinales (Giampieri *et al.*, 2012). Los taninos hidrolizables tienen en su estructura una molécula de azúcar, normalmente glucosa, a la que se unen varias moléculas de ácido gálico o AE (Márquez-López *et al.*, 2019). El contenido de conjugados de AE aumentó durante el almacenamiento. En el día 14 las fresas tratadas con 2 g/L exhibieron el mayor incremento (698 %), seguido de las fresas tratadas con 9 g/L (343 %) y finalmente las fresas no tratadas y las tratadas con 5g/L de POS (290 y 265 %).

La pérdida de AE en las frutas sin tratar puede deberse a las reacciones de oxidación que aumentan cuando se pierde la integridad de la membrana de las células (Häkkinen *et al.*, 2000). Los POS promovieron una menor pérdida de la integridad de la pared celular, principalmente las frutas tratadas con 5 y 9 g/L de POS que a su vez mostraron los mayores contenidos de AE.

El mayor aumento de conjugados de AE en las fresas tratadas con 2 y 9 g/L mostrado al final del almacenamiento puede ser debido a que, como observamos anteriormente, estas mostraron mayores contenidos de glucosa que podrían promover una mayor acumulación de conjugados de AE. Por otra parte, las fresas tratadas con 5 g/L mostraron un menor contenido de glucosa y en consecuencia un menor contenido de conjugados de AE.

Los flavonoles ubicados dentro del grupo de los flavonoides suelen ser antioxidantes más potentes

que las antocianinas y además se ha informado que las agliconas de quercetina poseen una fuerte actividad antimicrobiana (Vincente *et al.*, 2014; Barbieri *et al.*, 2017). En el presente estudio se identificaron cinco flavonoles. El contenido de quercetina-3-galactósido disminuyó durante el transcurso del almacenamiento en todos los grupos experimentales. Las fresas no tratadas y las tratadas con 9 g/L de POS presentaron la mayor disminución (34 – 36 %), con respecto a las fresas tratadas con 2 y 5 g/L de POS (13 – 16 %). De igual forma el contenido de quercetina-3-glucurónido disminuyó con el transcurso del almacenamiento. Sin embargo, las fresas tratadas con 9 g/L de POS presentaron la mayor disminución (44 %), mientras que las fresas no tratadas y las tratadas con 2 y 5 g/L de POS mostraron una menor disminución (17 – 24 %). El contenido de quercetina-3-glucósido mostró incrementos en las fresas sin tratar y en las tratadas con 5 g/L (16 – 20 %), mientras que el tratamiento de 2 g/L causó un ligero incremento (2 %) y el tratamiento de 9 g/L causó una ligera disminución (5 %). Los contenidos de kaempferol-3-glucurónido y kaempferol-3-glucósido aumentaron ligeramente tras el almacenamiento en todos los grupos experimentales, sin embargo, no se presentaron diferencias significativas entre ellos al final del almacenamiento.

La naringenina es una flavanona que se ha asociado a actividades antimicrobianas (Barbieri *et al.*, 2017). Tras el almacenamiento no se observaron cambios relevantes en el contenido de naringenina en todos los grupos experimentales, tampoco se presentaron diferencias estadísticamente significativas entre ellos al final del almacenamiento.

El contenido de flavonoles en las fresas es bajo, probablemente debido a la orientación del metabolismo fenólico hacia la acumulación de otras clases de flavonoides como las antocianinas, o porque estos monómeros se utilizan para la condensación en taninos (Macheix, 2018). Se ha observado que las fresas maduradas en campo presentan una disminución de naringenina y de derivados de kaempferol y quercetina (Ornelas-Paz *et al.*, 2013). Además, se ha reportado que el contenido de flavonoles no aumenta tras el almacenamiento a 6 °C en fresas, indicando que no hay síntesis de flavonoles después de la recolección (Cordenunsi *et al.*, 2005). Los resultados en el presente estudio confirman que no hay biosintesis de naringenina y de derivados de kaempferol, así como de las quercetinas 3-galactósido y 3-glucurónido por el almacenamiento en frío y tampoco por efecto de la adición de POS. Sin embargo, la quercetina-3-glucósido parece incrementar ligeramente en el almacenamiento en frío. La quercetina-3-glucósido, la cianidina y la catequina se derivan del mismo precursor, la dihidroquercetina (Kelly, 2018). Es posible que la actividad metabólica de las fresas tratadas con POS se haya orientado a incrementos del contenido de

cianidina y catequina, limitando el incremento de quercetina-3-glucósido. No obstante, las fresas tratadas con 5 g/L de POS mantuvieron incrementos en los tres compuestos.

Como se ha mencionado anteriormente, los oligosacáridos han sido propuestos como elicitores que pueden inducir reacciones de defensa de las plantas a patógenos y pueden resultar en la producción de metabolitos secundarios relacionados con la defensa. En la literatura ha sido ampliamente demostrado que su aplicación mejora el contenido de polifenoles, sin embargo, dentro de la literatura estudiada solo se encontró un estudio que evaluó el contenido individual de compuestos fenólicos en orégano griego con la aplicación de OQ y se observó que las dosis más bajas (50 y 200 ppm) incrementaron el contenido de ácidos fenólicos y flavonoides (Yin *et al.*, 2012). Hasta donde se sabe este es el primer estudio que evaluó el efecto de POS en los compuestos fenólicos individuales en fresas.

El aumento en el contenido de compuestos fenólicos y antocianinas (de la vía metabólica fenilpropanoide) ha sido asociado a una respuesta ante algún tipo de estrés (Perin *et al.*, 2019) el cual se define como cualquier factor (biótico y abiótico) que modifica (positiva o negativamente) el funcionamiento, el crecimiento o la reproducción de las plantas desviando cantidades sustanciales de sustratos del metabolismo primario a la formación de metabolitos secundarios (Cheynier *et al.*, 2013). Dichos aumentos han sido directamente relacionados con la regulación positiva de genes clave asociados con su acumulación en la fruta como es el caso de una mayor transcripción de las enzimas PAL y CHS (Yin *et al.*, 2012). Perin y colaboradores (2019), observaron un aumento en la transcripción de PAL en respuesta a un estrés inducido, así como aumentos en las transcripciones de las enzimas 4CL y C4H, relacionadas con la síntesis de ácido *p*-cumárico y *p*-cumaroil CoA, la DFR relacionada con las síntesis de leucoantocianidinas y flavonol sintasa relacionada con la síntesis de flavonoles.

Tanto el estrés biótico como el abiótico estimulan los flujos de carbono desde las vías metabólicas primarias a las secundarias, induciendo así un cambio de los recursos disponibles a favor de la síntesis de productos secundarios (Lattanzio, 2013). Se ha mencionado anteriormente que los oligosacáridos propician un mayor contenido de fenoles influyendo positivamente en la calidad de los frutos. Se ha informado que los OQ podrían proporcionar un mayor flujo de carbono a través de las vías glucolíticas, debido a una alta actividad de SDH y glucosa-6-fosfato deshidrogenasa (G6PDH). Este aumento en el flujo de carbono puede proporcionar PEP y eritrosa-4-fosfato, así como estimular las actividades de las enzimas PAL, 4CL y C4H para la biosíntesis fenólica (Sarkar

et al., 2018). Recientemente, Virgen-Ortiz *et al.* (2020) demostraron que, en fresas, los POS estimularon la actividad de la enzima PAL y que, además, estos pueden actuar como elicitores para inducir mecanismos de defensa en frutas, observando un aumento de la actividad de las enzimas quitinasa y la GLU asociadas con la resistencia a las enfermedades en las plantas. Por otra parte, se ha sugerido que los OQ pueden promover la acumulación de compuestos antifúngicos mediante la activación de la vía dependiente de ASA, influyendo en la mejora de la resistencia a las enfermedades (Macheix, 2018; Chen *et al.*, 2018). Se ha sugerido que la acumulación de procianidinas y catequina podría ser uno de los factores que explican la reducción de la incidencia y la gravedad de la descomposición por hongos patógenos, debido a que poseen propiedades inhibidoras y antifúngicas frente a diferentes hongos, incluido *Botrytis cinerea* (Blanch-Rojo *et al.*, 2012).

6.9. Capacidad Antioxidante

Las fresas poseen una capacidad antioxidante alta y, por lo tanto, tienen un efecto beneficioso en la salud del consumidor (Gol *et al.*, 2013).

La capacidad antioxidante de la fresa se debe al efecto combinado de diferentes moléculas como fenoles, flavonoides, carotenoides y vitaminas (Muley y Singhal, 2020).

Los resultados obtenidos en la capacidad antioxidante de los 4 grupos experimentales se muestran en el cuadro 7. La capacidad antioxidante incrementó al día 4 en todos los grupos experimentales, sin embargo, solo las fresas tratadas con POS a 5 g/L presentaron un valor significativamente mayor (8054 µmol TE/Kg). El grupo control presentó el menor valor (6812 µmol TE/Kg). La capacidad antioxidante disminuyó o presentó pocos cambios durante el resto del almacenamiento, excepto en las fresas tratadas con POS a una concentración de 9 g/L, en las cuales la capacidad antioxidante siempre incrementó, sugiriendo que esta dosis promovió la síntesis de otros compuestos antioxidantes. La capacidad antioxidante al final del experimento fue de 5394, 6784, 7309 y 8184 µmol TE/Kg en los grupos control y los tratados con POS a concentraciones de 2, 5 y 9 g/L, respectivamente.

La reducción de la capacidad antioxidante después de un almacenamiento prolongado podría

atribuirse a una cascada de reacciones que provocan cambios fisiológicos y bioquímicos en el almacenamiento y descomposición de moléculas biológicamente activas por reacción de oxidación (Muley y Singhal, 2020).

Un aumento en la capacidad antioxidante de las fresas fue reportado por efecto de la aplicación de OA y OQ en fresa (He *et al.*, 2018; Bose *et al.*, 2019; He *et al.*, 2019).

La capacidad antioxidante está asociada al contenido de AA y fenoles, principalmente antocianinas y elagitaninos (Giampieri *et al.*, 2012; Basu *et al.*, 2014). En el presente estudio se encontró una mayor capacidad antioxidante en las frutas tratadas con 5 y 9 g/L de POS a pesar de que estos exhibieron menores contenidos de AA, mientras que exhibieron mayores contenidos de antocianinas totales, principalmente en las frutas tratadas con 9 g/L, el cual también presentó mejores contenidos de AE y conjugados de AE, procianidinas, ácidos fenólicos y catequina. Se ha informado que los elagitaninos y antocianinas, principalmente los derivados de la pelargonidina, contribuyen en mayor medida a la actividad antioxidante total (Dzhanfezova *et al.*, 2020). Se observó que los POS influyeron positivamente en el contenido de compuestos fenólicos y subsecuentemente en la capacidad antioxidante de los extractos evaluados ($r = 0.84$).

Adicionalmente se ha informado que los OQ mostraron un aumento en las actividades de las enzimas SOD, CATA, POD y APX sugiriendo un sistema de defensa antioxidante más eficaz y un retraso de la senescencia en la fruta (Chen *et al.*, 2018). Los compuestos fenólicos como el AE pueden ayudar en la respuesta de defensa antioxidante celular activando la expresión de enzimas involucradas en la defensa antioxidante y reprimiendo la expresión de vías productoras de estrés oxidativo (Vattem y Shetty, 2005). El aumento en las actividades de las enzimas de defensa antioxidante observado por acción de oligosacaridos puede ser, en parte, debido al incremento de AE observado en el presente estudio.

Cuadro 7. Efecto de la aplicación poscosecha de oligosacáridos pécticos sobre el contenido de fenoles totales y la actividad antioxidante en fresas.

	Tratamiento	Tiempo de almacenamiento (días)			
		0	4	8	14
Fenoles totales (mg GAE/Kg)	CONTROL	706 ± 33 a, C	1068 ± 47 b, A	908 ± 49 b, B	790 ± 40 b, C
	2 g/L	706 ± 33 a, B	1040 ± 48 b, A	1102 ± 32 b, A	1039 ± 32 b, A
	5 g/L	706 ± 33 a, D	1454 ± 50 a, C	1783 ± 92 a, A	1624 ± 70 a, B
	9 g/L	706 ± 33 a, C	1431 ± 81 a, B	1733 ± 124 a, A	1398 ± 67 a, B
Capacidad antioxidante (µmol TE/Kg)	CONTROL	4823 ± 161 a, D	6812 ± 196 a, A	5823 ± 149 c, B	5394 ± 187 c, C
	2 g/L	4823 ± 161 a, C	7079 ± 303 a, A	6722 ± 131 b, B	6784 ± 68 b, AB
	5 g/L	4823 ± 161 a, C	6952 ± 148 a, B	6887 ± 214 ab, B	7309 ± 301 ab, A
	9 g/L	4823 ± 161 a, D	7209 ± 223 a, C	7750 ± 175 a, B	8148 ± 141 a, A

Las fresas fueron cosechadas en punto rosa y almacenadas a 2 °C y 90 % de humedad relativa por 14 días. Los valores se calcularon en base al peso fresco. Cada valor representa la media de 9 mediciones independientes ± el error estándar. Las medias en la misma columna (tratamiento) que no comparten las mismas letras minúsculas son significativamente diferentes ($P < 0.05$, prueba de Tukey-Kramer). Los valores en la misma línea (tiempo de muestreo) que tienen las mismas letras mayúsculas no son significativamente diferentes ($P < 0.05$, prueba de Tukey- Kramer).

Cuadro 8. Identificación de compuestos fenólicos individuales en fresas por cromatografía líquida de alta resolución.

Pico	TR (min)	λmax (nm)	Compuesto	λmax (nm) Estándar de referencia	Concentración reportada en la literatura (mg/Kg)	Referencia	λmax (nm) reportada en la literatura	Referencia
1	10.7	225, 281	Procianidina B1	234, 279	43-161	2, 6, 7, 9	280	6, 9
2	12.5	236, 278	Catequina	232, 279	20-81	3, 4, 6, 7, 9, 10, 11, 13, 17	279	6, 9, 10
3	13.9	246, 317	Ácido cafeico	240, 322	35-110	4, 11	240, 326	1
4	15.3	233, 316	Procianidina B2	231, 280	43-161	2, 6, 7, 9	282	6
5	18.7	270, 500	Cianidina-3-glucósido	280, 514	2-43	2, 4, 5, 6, 8, 9, 10, 12, 14, 15, 16, 17	515	6, 10
6	20.9	250, 357	Ácido *p*-cumárico	232, 309	3-45	2, 3, 10, 11, 13, 17	311	10
7	21	269, 501	Pelargonidina-3-glucósido	277, 502	69-710	2, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 12, 14, 15, 16, 17	501	6, 9, 10
8	22.7	247, 502	Pelargonidina-3-rutinósido*	277, 502	1-129	2, 4, 6, 7, 9, 10, 12, 14, 15, 17	502	6, 10
9	28.6	247, 275, 305	Conjugado de Ácido elágico**	253, 367	18-520	2, 6	254, 361	6
10	32.1	247, 272	Ácido elágico	253, 367	18-520	3, 4, 6, 10, 11, 13, 15, 17	253, 369	6, 10
11	29.9	236, 279	Quercetina-3-galactósido	256, 355	ND	18	360	18
12	30.1	236, 279	Quercetina-3-glucurónido	256, 353	2.7- 30	2, 7, 15	256, 355	6
13	31.6	236, 279, 317	Quercetina-3-glucósido	256, 353	0.1-5.8	3, 6, 9, 10, 13, 15	258, 374	9, 10
14	39.2	251, 316	Kaempferol-3-glucurónido	265, 347	0.2-4.9	2, 7, 15	266, 347	6
15	39.4	250, 317	Kaempferol-3-glucósido	254, 356	0.2-3.0	2, 3, 6, 9, 13, 15	266, 348	9
17	53.6	248, 275	Naringenina	246, 289	25	9	285	9

*Se cuantificó con estándar de pelargonidina-3-glucósido. ** Se cuantificó con estándar de ácido elágico. ND, no detectado. 1) Mertz *et al*., 2007; 2) Buendia *et al*., 2009; 3) Voca *et al*., 2009; 4) Cao *et al*., 2011; 5) Pineli *et al*., 2011; 6) Aaby *et al*., 2012; 7) Blanch-Rojo *et al*., 2012; 8) Crecente-Campo *et al*., 2012; 9) Ornelas-Paz *et al*., 2013; 10) Fernández-Lara et al., 2015; 11) Galli et al., 2016; 12) Chaves *et al*., 2017; 13) Perin *et al*., 2019; 14) Li *et al*., 2019; 15) Xu *et al*., 2019; 16) Dzhanfezova *et al*., 2020; 17) Fecka *et al*, 2020; 18) Jiyun Liu *et al*., 2020.

Cuadro 9. Efecto de la aplicación poscosecha de oligosacáridos pécticos sobre el contenido de compuestos fenólicos individuales en fresas.

	Tratamiento	Tiempo de almacenamiento (días)			
		0	4	8	14
Ac. Elágico	CONTROL	129.5 ± 19.2 a, A	119.1 ± 9.2 b, A	109.8 ± 1.3 b, AB	89.3 ± 3.5 b, B
	2 g/L	129.5 ± 19.2 a, B	203.7 ± 14.9 a, A	204.4 ± 9.1 a, A	116.7 ± 8.3 b, B
	5 g/L	129.5 ± 19.2 a, B	203.4 ± 12.0 a, A	209.1 ± 9.0 a, A	188.8 ± 20.8 a, A
	9 g/L	129.5 ± 19.2 a, B	197.0 ± 6.0 a, A	189.7 ± 7.6 a, A	151.8 ± 30.6 a, B
Procianidina B1	CONTROL	69.7 ± 5.7 a, D	69.2 ± 3.8 b, C	84.9 ± 4.7 c, B	121.0 ± 1.4 b, A
	2 g/L	69.7 ± 5.7 a, C	83.9 ± 4.2 a, B	112.2 ± 3.0 b, A	112.4 ± 4.0 b, A
	5 g/L	69.7 ± 5.7 a, C	75.5 ± 2.3 ab, B	118.2 ± 2.4 b, A	119.0 ± 3.4 b, A
	9 g/L	69.7 ± 5.7 a, D	81.1 ± 6.5 ab, C	134.4 ± 2.4 a, B	140.3 ± 4.2 a, A
Conjugado de Ac. Elágico	CONTROL	50.8 ± 10.2 a, D	104.6 ± 9.4 b, C	171.7 ± 3.3 c, B	198.3 ± 5.3 c, A
	2 g/L	50.8 ± 10.2 a, D	172.1 ± 3.3 a, C	343.2 ± 9.7 a, B	405.4 ± 9.1 a, A
	5 g/L	50.8 ± 10.2 a, D	114.2 ± 0.3 b, C	172.9 ± 3.0 c, B	185.6 ± 1.9 c, A
	9 g/L	50.8 ± 10.2 a, D	104.5 ± 1.2 b, C	199.6 ± 2.5 b, B	225.2 ± 5.8 b, A
Catequina	CONTROL	54.4 ± 2.5 a, C	65.1 ± 4.3 b, B	75.5 ± 0.4 a, A	69.5 ± 3.6 b, AB
	2 g/L	54.4 ± 2.5 a, C	66.3 ± 2.1 b, B	64.0 ± 2.6 b, B	73.1 ± 4.6 b, A
	5 g/L	54.4 ± 2.5 a, C	60.8 ± 2.6 b, C	82.7 ± 3.2 a, B	90.0 ± 7.8 a, A
	9 g/L	54.4 ± 2.5 a, B	80.0 ± 4.4 a, A	76.9 ± 2.0 a, A	75.5 ± 5.6 b, A
Ac. Cafeico	CONTROL	22.7 ± 0.2 a, C	21.0 ± 0.4 b, D	23.9 ± 0.5 d, B	26.4 ± 0.2 c, A
	2 g/L	22.7 ± 0.2 a, D	24.3 ± 0.2 a, C	42.9 ± 0.5 a, B	44.5 ± 0.5 a, A
	5 g/L	22.7 ± 0.2 a, C	15.8 ± 0.6 d, D	27.0 ± 0.5 c, A	23.2 ± 0.9 d, B
	9 g/L	22.7 ± 0.2 a, C	17.9 ± 0.1 c, D	31.9 ± 0.6 b, A	30.4 ± 0.4 b, B
Procianidina B2	CONTROL	21.2 ± 0.9 a, C	26.0 ± 1.4 ab, BC	27.8 ± 0.9 b, B	49.9 ± 4.3 b, A
	2 g/L	21.2 ± 0.9 a, D	29.2 ± 1.9 a, C	45.2 ± 0.8 a, B	79.4 ± 7.6 a, A
	5 g/L	21.2 ± 0.9 a, C	20.1 ± 4.1 b, C	29.6 ± 1.3 b, B	52.0 ± 1.9 b, A
	9 g/L	21.2 ± 0.9 a, C	21.4 ± 0.3 b, C	32.5 ± 1.0 b, B	47.3 ± 2.2 b, A
Quercetina-3-galactósido	CONTROL	1.1 ± 0.1 a, A	1.0 ± 0.1 a, A	0.7 ± 0.0 b, B	0.7 ± 0.0 b, B
	2 g/L	1.1 ± 0.1 a, A	1.0 ± 0.1 a, A	0.8 ± 0.0 ab, C	0.9 ± 0.0 a, B
	5 g/L	1.1 ± 0.1 a, A	0.8 ± 0.0 b, C	0.9 ± 0.1 a, BC	0.9 ± 0.0 a, B
	9 g/L	1.1 ± 0.1 a, A	1.0 ± 0.0 ab, B	0.8 ± 0.0 ab, C	0.7 ± 0.1 b, D
Quercetina-3-glucurónido	CONTROL	2.7 ± 0.1 a, A	2.7 ± 0.1 a, A	1.7 ± 0.1 b, C	2.1 ± 0.1 a, B
	2 g/L	2.7 ± 0.1 a, A	2.2 ± 0.1 b, B	2.1 ± 0.1 a, C	2.1 ± 0.2 a, BC
	5 g/L	2.7 ± 0.1 a, A	2.5 ± 0.0 ab, B	2.1 ± 0.0 a, D	2.2 ± 0.0 a, C
	9 g/L	2.7 ± 0.1 a, A	2.5 ± 0.1 ab, B	1.9 ± 0.0 a, C	1.5 ± 0.1 b, D
Quercetina-3-glucósido	CONTROL	2.7 ± 0.1 a, B	2.4 ± 0.0 c, C	2.4 ± 0.1 b, C	3.1 ± 0.2 a, A
	2 g/L	2.7 ± 0.1 a, AB	2.8 ± 0.0 ab, A	2.5 ± 0.1 ab, B	2.7 ± 0.1 b, AB
	5 g/L	2.7 ± 0.1 a, C	2.9 ± 0.1 a, B	2.5 ± 0.0 ab, C	3.2 ± 0.1 a, A
	9 g/L	2.7 ± 0.1 a, A	2.5 ± 0.1 bc, A	2.7 ± 0.0 a, A	2.5 ± 0.1 b, A

Kaempferol-3-glucósido	CONTROL	0.6 ± 0.1 a, B	0.5 ± 0.0 a, B	0.5 ± 0.1 a, B	0.7 ± 0.0 a, A
	2 g/L	0.6 ± 0.1 a, B	0.6 ± 0.1 a, B	0.7 ± 0.1 a, A	0.7 ± 0.1 a, A
	5 g/L	0.6 ± 0.1 a, B	0.6 ± 0.0 a, B	0.6 ± 0.1 a, B	0.8 ± 0.0 a, A
	9 g/L	0.6 ± 0.1 a, B	0.5 ± 0.1 a, B	0.6 ± 0.0 a, AB	0.7 ± 0.1 a, A
Kaempferol-3-glucurónido	CONTROL	0.5 ± 0.0 a, B	0.5 ± 0.0 a, B	0.5 ± 0.0 a, B	0.6 ± 0.0 a, A
	2 g/L	0.5 ± 0.0 a, B	0.5 ± 0.0 a, A	0.6 ± 0.0 a, A	0.6 ± 0.0 a, A
	5 g/L	0.5 ± 0.0 a, B	0.5 ± 0.0 a, B	0.5 ± 0.0 a, B	0.5 ± 0.0 a, A
	9 g/L	0.5 ± 0.0 a, B	0.5 ± 0.0 a, B	0.6 ± 0.0 a, A	0.6 ± 0.0 a, A
Ac. p-coumárico	CONTROL	3.0 ± 0.1 a, C	2.3 ± 0.2 a, D	3.9 ± 0.2 b, A	3.6 ± 0.2 b, B
	2 g/L	3.0 ± 0.1 a, B	1.9 ± 0.2 ab, C	2.8 ± 0.2 c, B	4.1 ± 0.2 ab, A
	5 g/L	3.0 ± 0.1 a, C	1.4 ± 0.0 c, D	3.6 ± 0.1 b, B	4.1 ± 0.1 a, A
	9 g/L	3.0 ± 0.1 a, C	1.9 ± 0.0 b, D	5.3 ± 0.3 a, A	4.4 ± 0.2 a, B
Naringenina	CONTROL	0.2 ± 0.0 a, AB	0.2 ± 0.1 a, AB	0.2 ± 0.0 a, B	0.2 ± 0.0 a, A
	2 g/L	0.2 ± 0.0 a, A	0.2 ± 0.0 a, A	0.2 ± 0.0 a, A	0.2 ± 0.0 a, A
	5 g/L	0.2 ± 0.0 a, A	0.2 ± 0.0 a, A	0.2 ± 0.0 a, A	0.2 ± 0.0 a, A
	9 g/L	0.2 ± 0.0 a, A	0.1 ± 0.0 a, A	0.1 ± 0.0 a, A	0.1 ± 0.0 a, A

Las fresas fueron cosechadas en punto rosa y almacenadas a 2 °C y 90 % de humedad relativa por 14 días. Los contenidos de los diferentes compuestos fenólicos están expresados en mg/Kg de peso fresco. Cada valor representa la media de 3 mediciones independientes ± el error estándar. Las medias en la misma columna (tratamiento) que no comparten las mismas letras minúsculas son significativamente diferentes (P <0.05, prueba de Tukey-Kramer). Los valores en la misma línea (tiempo de muestreo) que tienen las mismas letras mayúsculas no son significativamente diferentes (P <0.05, prueba de Tukey- Kramer).

7. CONCLUSIONES

Los POS son capaces de mejorar atributos de calidad en los frutos de fresa incrementando la presencia de metabolitos primarios y secundarios.

Al final del almacenamiento, el tratamiento más efectivo fue el de 9 g/L de POS, con la aplicación de este tratamiento se observó una menor disminución de la firmeza y un mantenimiento de los valores de SST, humedad, pH y TA, siendo este tratamiento el que exhibiera la más alta relación de azúcares individuales / AOs.

Los POS a dosis de 2 y 9 g/L de POS causaron un incremento en el contenido de glucosa y fructosa en las fresas, lo cual proporcionó el incremento de fuentes de carbono para la síntesis de AOs y compuestos fenólicos. El mantenimiento de AOs y compuestos fenólicos puede jugar un papel importante en la extensión de la vida útil durante el almacenamiento poscosecha.

Los POS causaron una mayor disminución de las variables de color L^*, C^* y $°h$ de las fresas, especialmente a la dosis de 9 g/L, lo cual generó que este tratamiento presentara los mayores incrementos de color y un mayor avance del %CTI con respecto al control, esto asociado a un mayor incremento en el contenido de antocianinas totales e individuales.

El aumento del contenido de fenoles totales se relacionó a una mayor capacidad antioxidante en las fresas tratadas con POS a dosis de 5 y 9 g/L. En la identificación y cuantificación individual se observó que el tratamiento de 9 g/L presentó mayores contenidos de compuestos fenólicos asociados a un alto poder antioxidante.

Dada la disminución de la pérdida de firmeza y los aumentos de compuestos fenólicos, tales como antocianinas, AE y conjugados de AE, procianidinas y catequina, así como de AOs tales como el AT, AF y el AO, se puede sugerir que los POS pueden favorecer un aumento de la vida poscosecha en los frutos de fresa al reducir la susceptibilidad al ataque por patógenos.

Un efecto negativo en términos de nutrición es la disminución del AA encontrada en los tratamientos de 5 y 9 g/L. Sin embargo, esto puede ser contrarrestado por una mayor presencia de compuestos fenólicos.

8. RECOMENDACIONES

Los resultados de este estudio sugieren que la aplicación de POS en la fresa puede aumentar su calidad y su vida poscosecha. Para reforzar estos hallazgos se recomienda:
Evaluar el efecto de los POS en el contenido de compuestos aromáticos de la fresa.
Evaluar el efecto de los POS en la calidad microbiológica de las fresas.

9. REFERENCIAS

Aaby, K., Mazur, S., Nes, A., y Skrede, G. (2012). Phenolic compounds in strawberry (*Fragaria x ananassa* Duch.) fruits: Composition in 27 cultivars and changes during ripening. Food Chemistry. 132(1): 86-97.

Abbott, J. A. (1999). Quality measurement of fruits and vegetables. Postharvest Biology and Technology. 15(3): 207-225.

Albán, Á. B., Ramos, M., y Nuñez, M. A. (2010). Estudio de la vida útil de fresas (*Fragaria vesca*) mediante tratamiento con radiación ultravioleta de onda corta (UV-C). Revista Tecnológica-ESPOL. 23(2): 17-24.

Azam, M., Ejaz, S., Rehman, R. N. U., Khan, M., y Qadri, R. (2019). Postharvest Quality Management of Strawberries. En Strawberry-Pre-and Post-Harvest Management Techniques for Higher Fruit Quality (pp. 1-21): IntechOpen.

Babalar, M., Asghari, M., Talaei, A., y Khosroshahi, A. (2007). Effect of pre-and postharvest salicylic acid treatment on ethylene production, fungal decay and overall quality of Selva strawberry fruit. Food Chemistry. 105(2): 449-453.

Babbar, N., Dejonghe, W., Gatti, M., Sforza, S., y Elst, K. (2016). Pectic oligosaccharides from agricultural by-products: production, characterization and health benefits. Critical Reviews in Biotechnology. 36(4): 594-606.

Barbieri, R., Coppo, E., Marchese, A., Daglia, M., Sobarzo-Sánchez, E., Nabavi, S. F., y Nabavi, S. M. (2017). Phytochemicals for human disease: An update on plant-derived compounds antibacterial activity. Microbiological Research. 196: 44-68.

Basson, C., Groenewald, J., Kossmann, J., Cronjé, C., y Bauer, R. (2010). Sugar and acid-related quality attributes and enzyme activities in strawberry fruits: Invertase is the main sucrose hydrolysing enzyme. Food Chemistry. 121(4): 1156-1162.

Basu, A., Nguyen, A., Betts, N. M., y Lyons, T. J. (2014). Strawberry as a functional food: an evidence-based review. Critical Reviews in Food Science and Nutrition. 54(6): 790-806.

Bhat, R., Geppert, J., Funken, E., y Stamminger, R. (2015). Consumers perceptions and preference for strawberries—a case study from Germany. International Journal of Fruit Science. 15(4): 405-424.

Blanch-Rojo, M., Álvarez-Acero, I., Sánchez-Ballesta, M. T., Escribano, M. I., y Merodio, C. (2012). Increasing catechin and procyanindin accumulation in high-CO 2-treated *Fragaria vesca* strawberries. Journal of Agricultural and Food Chemistry. 60: 7489−7496.

Bose, S. K., Howlader, P., Jia, X., Wang, W., y Yin, H. (2019). Alginate oligosaccharide postharvest treatment preserve fruit quality and increase storage life via Abscisic acid signaling in strawberry. Food Chemistry. 283: 665-674.

Bose, S. K., Howlader, P., Wang, W., y Yin, H. (2020). Oligosaccharide is a Promising Natural Preservative for Improving Postharvest Preservation of Fruit: A Review. Food Chemistry. 341: 128178.

Brasil, I. M., y Siddiqui, M. W. (2018). Postharvest quality of fruits and vegetables: An overview Preharvest. En Modulation of Postharvest Fruit and Vegetable Quality (pp. 1-40): Elsevier.

Buendia, B., Gil, M. I., Tudela, J. A., Gady, A. L., Medina, J. J., Soria, C., López J.M., y Tomás-Barberán, F. A. (2009). HPLC-MS analysis of proanthocyanidin oligomers and other phenolics in 15 strawberry cultivars. Journal of Agricultural and Food Chemistry. 58(7): 3916-3926.

Cao, X., Zhang, Y., Zhang, F., Wang, Y., Yi, J., y Liao, X. (2011). Effects of high hydrostatic pressure on enzymes, phenolic compounds, anthocyanins, polymeric color and color of strawberry pulps. Journal of the Science of Food and Agriculture. 91(5): 877-885.

Carreño, J., Martinez, A., Almela, L., y Fernández-López, J. (1995). Proposal of an index for the objective evaluation of the colour of red table grapes. Food Research International. 28(4): 373-377.

Castañeda-Vázquez, B. I. (2010). Inducción de antocianinas y capacidad antioxidante por oligogalacturónidos en uvas de mesa cv.'Flame Seedless'. Centro de Investigación en Alimentación y Desarrollo, A.C. Hermosillo, Sonora.

Céline, M., Valérie, G., Karine, G., Sandrine, C., Nathalie, G., Stéphane, G., y Sébastien, G. (2020). Consumer behaviour in the prediction of postharvest losses reduction for fresh strawberries packed in modified atmosphere packaging. Postharvest Biology and Technology. 163: 111119.

Cervantes-Paz, B., Yahia, E. M., Ornelas-Paz, J. d. J., Victoria-Campos, C. I., Ibarra-Junquera, V., Pérez-Martínez, J. D., y Escalante-Minakata, P. (2014). Antioxidant activity and content of chlorophylls and carotenoids in raw and heat-processed Jalapeño peppers at intermediate stages of ripening. Food Chemistry. 146: 188-196.

Chai, L., y Shen, Y.-Y. (2016). FaABI4 is involved in strawberry fruit ripening. Scientia Horticulturae. 210: 34-40.

Chandler, C. K., Legard, D., Dunigan, D., Crocker, T., y Sims, C. (2000). 'Strawberry festival'strawberry. Hortscience. 35(7):1366–1367.

Chaves, V. C., Calvete, E., y Reginatto, F. H. (2017). Quality properties and antioxidant activity of seven strawberry (*Fragaria x ananassa* Duch) cultivars. Scientia Horticulturae. 225: 293-298.

Chen, C., Hu, W., Zhang, R., y Jiang, A. (2018). Effects of postharvest oligochitosan treatment on fungal diseases and defence responses in Dongxue peach fruit. Food Science and Technology International. 24(2): 161-171.

Cheynier, V., Comte, G., Davies, K. M., Lattanzio, V., y Martens, S. (2013). Plant phenolics: recent advances on their biosynthesis, genetics, and ecophysiology. Plant Physiology and Biochemistry. 72: 1-20.

Collins, J., y Perkins-Veazie, P. (1993). Postharvest changes in strawberry fruit stored under simulated retail display conditions. Journal of Food Quality. 16(2): 133-143.

CONAFRE, A. C. (2019). Sistema producto fresa plan rector nacional 2012. Comité Nacional del sistema Producto Fresa Disponible en línea en: http://www.conafresa.com.mx/#plan-rector. Fecha de consulta: 19/09/2020.

Cong-Cong, X., Bing, W., Yi-Qiong, P., Jian-Sheng, T., y Zhang, T. (2017). Advances in extraction and analysis of phenolic compounds from plant materials. Chinese Journal of Natural Medicines. 15(10): 721-731.

Contigiani, E. V., Kronberg, M. F., Sánchez, G. J., Gómez, P. L., García-Loredo, A. B., Munarriz, E., y Alzamora, S. M. (2020). Ozone washing decreases strawberry susceptibility to *Botrytis cinerea* while maintaining antioxidant, optical and sensory quality. Heliyon. 6(11): e05416.

Cordenunsi, B. R., do Nascimento, J. R. O., y Lajolo, F. (2003). Physico-chemical changes related to quality of five strawberry fruit cultivars during cool-storage. Food Chemistry. 83(2): 167-173.

Cordenunsi, B. R., Genovese, M. I., do Nascimento, J. R. O., Hassimotto, N. M. A., dos Santos, R. J., y Lajolo, F. M. (2005). Effects of temperature on the chemical composition and antioxidant activity of three strawberry cultivars. Food Chemistry. 91(1): 113-121.

Corrêa, S. C., Pinheiro, A. C. M., Siqueira, H. E., Carvalho, E. M., Nunes, C. A., y Boas, E. V. d. B. V. (2014). Prediction of the sensory acceptance of fruits by physical and physical–chemical parameters using multivariate models. LWT-Food Science and Technology. 59(2): 666-672.

Crecente-Campo, J., Nunes-Damaceno, M., Romero-Rodríguez, M., y Vázquez-Odériz, M. (2012). Color, anthocyanin pigment, ascorbic acid and total phenolic compound determination in organic versus conventional strawberries (*Fragaria× ananassa* Duch, cv. Selva). Journal of Food Composition and Analysis. 28(1): 23-30.

Crespo, P., Bordonaba, J. G., Terry, L. A., y Carlen, C. (2010). Characterisation of major taste and health-related compounds of four strawberry genotypes grown at different Swiss production sites. Food Chemistry. 122(1): 16-24.

Cruz-Atonio, F., Saucedo-Pompa, S., Martinez-Vázquez, G., Aguilera, A., Rodríguez, R., y Aguilar, C. N. (2010). Propiedades químicas e industriales del ácido elágico. Revista Científica de la Universidad Autónoma de Coahuila. 2(3): 1-12.

Lopes da Silva, F., Escribano-Bailón, M. T., Alonso, J. J. P., Rivas-Gonzalo, J. C., y Santos-Buelga, C. (2007). Anthocyanin pigments in strawberry. LWT-Food Science and Technology. 40(2): 374-382.

Davik, J., Kjersti Bakken, A., Holte, K., y Blomhoff, R. (2006). Effects of genotype and environment on total anti-oxidant capacity and the content of sugars and acids in strawberries (*Fragaria* × *ananassa* Duch.). The Journal of Horticultural Science and Biotechnology. 81(6): 1057-1063.

Debolt, S., Melino, V., y Ford, C. M. (2007). Ascorbate as a biosynthetic precursor in plants. Annals of botany. 99(1): 3-8.

De la Rosa, L. A., Moreno-Escamilla, J. O., Rodrigo-García, J., y Alvarez-Parrilla, E. (2019). Phenolic compounds. En Postharvest Physiology and Biochemistry of Fruits and Vegetables (pp. 253-271): Elsevier.

Del Olmo, I., Blanch, M., Romero, I., Vazquez-Hernandez, M., Sanchez-Ballesta, M. T., Escribano, M. I., y Merodio, C. (2020). Involvement of oligosaccharides and sucrose-related genes on sucrose retention in strawberries from ripening to shelf-life. Postharvest Biology

and Technology. 169: 111301.

Døving, A., y Måge, F. (2002). Methods of testing strawberry fruit firmness. Acta Agriculturae Scandinavica, Section B-Plant Soil Science. 52(1): 43-51.

Draye, M., y Van Cutsem, P. (2008). Pectin methylesterases induce an abrupt increase of acidic pectin during strawberry fruit ripening. Journal of Plant Physiology. 165(11): 1152-1160.

Dumville, J. C., y Fry, S. C. (2000). Uronic acid-containing oligosaccharins: their biosynthesis, degradation and signalling roles in non-diseased plant tissues. Plant Physiology and Biochemistry. 38(1-2): 125-140.

Dzhanfezova, T., Barba-Espín, G., Müller, R., Joernsgaard, B., Hegelund, J. N., Madsen, B., Larsen, D.H., Martínez, V. M., y Toldam-Andersen, T. B. (2020). Anthocyanin profile, antioxidant activity and total phenolic content of a strawberry (*Fragaria* × *ananassa* Duch) genetic resource collection. Food Bioscience. 36: 100620.

Enomoto, H., Sato, K., Miyamoto, K., Ohtsuka, A., y Yamane, H. (2018). Distribution analysis of anthocyanins, sugars, and organic acids in strawberry fruits using matrix-assisted laser desorption/ionization-imaging mass spectrometry. Journal of Agricultural and Food Chemistry. 66(19): 4958-4965.

Enríquez-Guevara, E. A., Aispuro-Hernández, E., Vargas-Arispuro, I., y Martínez-Téllez, M. Á. (2010). Oligosacarinas derivadas de pared celular: Actividad biológica y participación en la respuesta de defensa de plantas. Revista Mexicana de Fitopatología. 28(2): 144-155.

Etienne, A., Génard, M., Lobit, P., Mbeguié-A-Mbéguié, D., y Bugaud, C. (2013). What controls fleshy fruit acidity? A review of malate and citrate accumulation in fruit cells. Journal of Experimental Botany. 64(6): 1451-1469.

Fait, A., Hanhineva, K., Beleggia, R., Dai, N., Rogachev, I., Nikiforova, V. J., Fernie, A. R., y Aharoni, A. (2008). Reconfiguration of the achene and receptacle metabolic networks during strawberry fruit development. Plant Physiology. 148(2): 730-750.

Falcón Rodríguez, A. B., Costales Mené, D., González-Peña Fundora, D., y Nápoles García, M. C. (2015). Nuevos productos naturales para la agricultura: las oligosacarinas. Cultivos Tropicales. 36: 111-129.

Famiani, F., Battistelli, A., Moscatello, S., Cruz-Castillo, J. G., y Walker, R. P. (2015). The organic acids that are accumulated in the flesh of fruits: occurrence, metabolism and factors affecting their contents-a review. Revista Chapingo Serie Horticultura. 21(2): 97-128.

Fecka, I., Nowicka, A., Kucharska, A. Z., y Sokół-Łętowska, A. (2020). The effect of strawberry ripeness on the content of polyphenols, cinnamates, L-ascorbic and carboxylic acids. Journal of Food Composition and Analysis. 95: 103669.

Fernández-Lara, R., Gordillo, B., Rodríguez-Pulido, F. J., González-Miret, M. L., del Villar-Martínez, A. A., Dávila-Ortiz, G., y Heredia, F. J. (2015). Assessment of the differences in the phenolic composition and color characteristics of new strawberry (*Fragaria x ananassa* Duch.) cultivars by HPLC–MS and Imaging Tristimulus Colorimetry. Food Research International. 76: 645-653.

Fernández-Trujillo, J. P., Nock, J. F., y Watkins, C. B. (1999). Fermentative metabolism and organic acid concentrations in fruit of selected strawberry cultivars with different tolerances

to carbon dioxide. Journal of the American Society for Horticultural Science. 124(6): 696-701.

Ferreira, A. (2015). Obtención de pectooligosacáridos derivados de pectinas de cítricos y de manzana utilizando extractos enzimáticos comerciales. Instituto de Investigación en Ciencias de Alimentación. Madrid, España.

Figueroa, C. R., Rosli, H. G., Civello, P. M., Martínez, G. A., Herrera, R., y Moya-León, M. A. (2010). Changes in cell wall polysaccharides and cell wall degrading enzymes during ripening of *Fragaria chiloensis* and *Fragaria× ananassa* fruits. Scientia Horticulturae. 124(4): 454-462.

Forney, C. F. (2017). Tratamiento post cosecha de fresa. Tecno Agro. 118.

Fry, S. C., Aldington, S., Hetherington, P. R., y Aitken, J. (1993). Oligosaccharides as signals and substrates in the plant cell wall. Plant Physiology. 103(1): 1-5.

Galli, V., da Silva Messias, R., Perin, E. C., Borowski, J. M., Bamberg, A. L., y Rombaldi, C. V. (2016). Mild salt stress improves strawberry fruit quality. LWT. 73: 693-699.

Gan, R.-Y., Chan, C.-L., Yang, Q.-Q., Li, H.-B., Zhang, D., Ge, Y.-Y., Gunaratne, A., Ge, J., y Corke, H. (2019). Bioactive compounds and beneficial functions of sprouted grains. En Sprouted grains (pp. 191-246): Elsevier.

García, A. Á., y Pérez-Urria, C. E. (2011). Metabolismo secundario de plantas. Reduca (biología). 2(3): 119-145.

García Espejel, F., Saucedo Veloz, C., Saucedo Reyes, D., y Chávez Franco, S. H. (2017). Calidad de frutos de dos variedades de fresa mexicana y una introducida frigoconservados en alto CO 2. Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas. 8(4): 747-757.

García Sahagún, M., Martínez Juárez, V., Avendaño López, A. N., Padilla Sahagún, M., y Izquierdo Oviedo, H. (2009). Acción de oligosacáridos en el rendimiento y calidad de tomate. Revista Fitotecnia Mexicana. 32(4): 295-301.

Garrait, G., Jarrige, J.-F., Blanquet, S., Beyssac, E., Cardot, J.-M., y Alric, M. (2006). Gastrointestinal absorption and urinary excretion of trans-cinnamic and p-coumaric acids in rats. Journal of Agricultural and Food Chemistry. 54(8): 2944-2950.

Garzón, G. A. (2008). Las antocianinas como colorantes naturales y compuestos bioactivos: revisión. Acta Biológica Colombiana. 13(3): 27-36.

Giampieri, F., Tulipani, S., Alvarez-Suarez, J. M., Quiles, J. L., Mezzetti, B., y Battino, M. (2012). The strawberry: composition, nutritional quality, and impact on human health. Nutrition. 28(1): 9-19.

Giusti M.M. (2001). Characterization and measurement of anthocyanins with uv-visible spectroscopy. En: Wrolstad R.E. (ed). Current Protocols in Food Analytical Chemistry. John Wiley and Sons, New York, 1-13 pp.

Gol, N. B., Patel, P. R., y Rao, T. R. (2013). Improvement of quality and shelf-life of strawberries with edible coatings enriched with chitosan. Postharvest Biology and Technology. 85: 185-195.

Gunness, P., Kravchuk, O., Nottingham, S. M., D'Arcy, B. R., & Gidley, M. J. (2009). Sensory

analysis of individual strawberry fruit and comparison with instrumental analysis. Postharvest Biology and Technology. 52(2): 164-172.

Häkkinen, S. H., Kärenlampi, S. O., Mykkänen, H. M., Heinonen, I. M., y Törrönen, A. R. (2000). Ellagic acid content in berries: Influence of domestic processing and storage. European Food Research and Technology. 212(1): 75-80.

Han, Y., Chen, C., Yan, Z., Li, J., y Wang, Y. (2019). The methyl jasmonate accelerates the strawberry fruits ripening process. Scientia Horticulturae. 249: 250-256.

He, Y., Bose, S., Wang, W., Jia, X., Lu, H., y Yin, H. (2018). Pre-Harvest treatment of chitosan oligosaccharides improved strawberry fruit quality. International Journal of Molecular Sciences. 19(8): 2194.

He, Y., Bose, S. K., Wang, M., Liu, T., Wang, W., Lu, H., y Yin, H. (2019). Effects of chitosan oligosaccharides postharvest treatment on the quality and ripening related gene expression of cultivated strawberry fruits. Journal of Berry Research. 9(1): 11-25.

Holcroft, D. M., y Kader, A. A. (1999). Controlled atmosphere-induced changes in pH and organic acid metabolism may affect color of stored strawberry fruit. Postharvest Biology and Technology. 17(1): 19-32.

Hong, S. J., Yeoung, Y. R., y Eum, H. L. (2018). Phytochemical composition of everbearing strawberries and storage quality of strawberry fruit treated by precooling. Food Science and Biotechnology. 27(6): 1675-1683.

Ikegaya, A., Toyoizumi, T., Ohba, S., Nakajima, T., Kawata, T., Ito, S., y Arai, E. (2019). Effects of distribution of sugars and organic acids on the taste of strawberries. Food Science & Nutrition. 7(7): 2419-2426.

Jiang, Y., Joyce, D. C., y Terry, L. A. (2001). 1-Methylcyclopropene treatment affects strawberry fruit decay. Postharvest Biology and Technology. 23(3): 227-232.

Johnson, J., Dzendolet, E., y Clydesdale, F. (1983). Psychophysical relationship between sweetness and redness in strawberry-flavored drinks. Journal of Food Protection. 46(1): 21-25.

Kader, A. A. (1991). Quality and its maintenance in relation to the postharvest physiology of strawberry. En The strawberry into the 21st century (pp. 145-152): Timber Press.

Kafkas, E., Koşar, M., Paydaş, S., Kafkas, S., y Başer, K. (2007). Quality characteristics of strawberry genotypes at different maturation stages. Food Chemistry. 100(3): 1229-1236.

Kallio, H., Hakala, M., Pelkkikangas, A.-M., y Lapveteläinen, A. (2000). Sugars and acids of strawberry varieties. European Food Research and Technology. 212(1): 81-85.

Kelly, K., Madden, R., Emond, J. P., y do Nascimento Nunes, M. C. (2019). A novel approach to determine the impact level of each step along the supply chain on strawberry quality. Postharvest Biology and Technology. 147: 78-88.

Kelly, K. E. (2018). Synthesis, Oxidation, and Distribution of Polyphenols in Strawberry Fruit During Cold Storage. Universidad del sur de Florida. Tampa, Florida.

Kim, J., Lee, J. G., Hong, Y., y Lee, E. J. (2019). Analysis of eight phytohormone concentrations, expression levels of ABA biosynthesis genes, and ripening-related transcription factors during fruit development in strawberry. Journal of Plant Physiology. 239: 52-60.

Kim, J. Y., Kim, H. J., Lim, G. O., Jang, S. A., y Song, K. B. (2010). The effects of aqueous chlorine dioxide or fumaric acid treatment combined with UV-C on postharvest quality of 'Maehyang'strawberries. Postharvest Biology and Technology. 56(3): 254-256.

Koyuncu, M. A., y Dilmaçünal, T. (2010). Determination of vitamin C and organic acid changes in strawberry by HPLC during cold storage. Notulae Botanicae Horti Agrobotanici Cluj-Napoca. 38(3): 95-98.

Kuchi, V. S., y Sharavani, C. S. R. (2019). Fruit physiology and postharvest management of strawberry. En Strawberry-Pre-and Post-Harvest Management Techniques for Higher Fruit Quality (pp. 1-20): IntechOpen.

Kumar, R., Khurana, A., y Sharma, A. K. (2014). Role of plant hormones and their interplay in development and ripening of fleshy fruits. Journal of Experimental Botany. 65(16): 4561-4575.

Lado, J., Vicente, E., Manzzioni, A., Ghelfi, B., y Ares, G. (2012). Evaluación de calidad de fruta y aceptabilidad de diferentes cultivares de frutilla. Agrociencia Uruguay. 16(1): 51-58.

Lattanzio, V. (2013). Phenolic Compounds: Introduction. En Handbook of Natural Products (pp. 1543–1580): Springer-Verlag.

Li, D., Li, L., Xiao, G., Limwachiranon, J., Xu, Y., Lu, H., Yang, D., y Luo, Z. (2018). Effects of elevated CO2 on energy metabolism and γ-aminobutyric acid shunt pathway in postharvest strawberry fruit. Food Chemistry. 265: 281-289.

Li, D., Zhang, X., Xu, Y., Li, L., Aghdam, M. S., y Luo, Z. (2019). Effect of exogenous sucrose on anthocyanin synthesis in postharvest strawberry fruit. Food Chemistry. 289: 112-120.

Liu, C., Zheng, H., Sheng, K., Liu, W., y Zheng, L. (2018). Effects of melatonin treatment on the postharvest quality of strawberry fruit. Postharvest Biology and Technology. 139: 47-55.

Liu, J., Hefni, M. E., y Witthöft, C. M. (2020). Characterization of Flavonoid Compounds in Common Swedish Berry Species. Foods. 9(3): 358.

Liu, J., Kennedy, J. F., Zhang, X., Heng, Y., Chen, W., Chen, Z., Wu, X., y Wu, X. (2020). Preparation of alginate oligosaccharide and its effects on decay control and quality maintenance of harvested kiwifruit. Carbohydrate Polymers. 242: 116462.

Liu, L., Ji, M. L., Chen, M., Sun, M. y., Fu, X-l., Li, L., Gao D-S., y Zhu, C. Y. (2016). The flavor and nutritional characteristic of four strawberry varieties cultured in soilless system. Food Science & Nutrition. 4(6): 858-868.

Lufu, R., Ambaw, A., y Opara, U. L. (2020). Water loss of fresh fruit: Influencing pre-harvest, harvest and postharvest factors. Scientia Horticulturae. 272: 109519.

Macheix, J.-J. (2018). Fruit phenolics. CRC press. Segunda edición. Boca Raton. 378 pp.

Márquez-López, A., del Carmen Chavéz-Parga, M., y Hernández, J. C. G. (2019). Aspectos generales sobre los elagitaninos y su conversión a ácido elágico. Ciencia Nicolaita. 77: 36-58.

Martínez-González, M. E., Balois-Morales, R., Alia-Tejacal, I., Cortes-Cruz, M. A., Palomino-Hermosillo, Y. A., y López-Gúzman, G. G. (2017). Poscosecha de frutos: maduración, ablandamiento y control transcripcional* Postharvest fruits: maturation, softening and

transcriptional control. Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas. Pub. Esp. Núm. 19: 4075-4087.

Maya-Meraz, I., Pérez-Leal, R., Ornelas-Paz, J. d. J., Jacobo-Cuéllar, J., Rodríguez-Roque, M., Yañez-Muñoz, R., y Cabello-Pasini, A. (2020). Effect of Calcium Carbonate Residues from Cement Industries on the Phenolic Composition and Yield of Shiraz Grapes. South African Journal of Enology and Viticulture. 41(1): 1-11.

Mazur, S. P., Nes, A., Wold, A.-B., Remberg, S. F., Martinsen, B. K., y Aaby, K. (2014). Effects of ripeness and cultivar on chemical composition of strawberry (*Fragaria* × *ananassa* Duch.) fruits and their suitability for jam production as a stable product at different storage temperatures. Food Chemistry. 146: 412-422.

Ménager, I., Jost, M., y Aubert, C. (2004). Changes in physicochemical characteristics and volatile constituents of strawberry (Cv. Cigaline) during maturation. Journal of Agricultural and Food Chemistry. 52(5): 1248-1254.

Mertz, C., Cheynier, V., Günata, Z., y Brat, P. (2007). Analysis of phenolic compounds in two blackberry species (*Rubus glaucus* and *Rubus adenotrichus*) by high-performance liquid chromatography with diode array detection and electrospray ion trap mass spectrometry. Journal of Agricultural and Food Chemistry. 55(21): 8616-8624.

Montero, T. M., Mollá, E. M., Esteban, R. M., y López-Andréu, F. J. (1996). Quality attributes of strawberry during ripening. Scientia Horticulturae. 65(4): 239-250.

Moreno-Escamilla, J. O., Alvarez-Parrilla, E., Laura, A., Núñez-Gastélum, J. A., González-Aguilar, G. A., y Rodrigo-García, J. (2018). Effect of Elicitors in the Nutritional and Sensorial Quality of Fruits and Vegetables. En Preharvest Modulation of Postharvest Fruit and Vegetable Quality (pp. 71-91): Elsevier.

Muley, A. B., y Singhal, R. S. (2020). Extension of post harvest shelf life of strawberries (*Fragaria ananassa*) using a coating of chitosan-whey protein isolate conjugate. Food Chemistry. 329: 127213.

Muñoz-Villa, A., Sáenz-Galindo, A., López-López, L., Cantú-Sifuentes, L., y Barajas-Bermúdez, L. (2014). Ácido Cítrico: Compuesto Interesante Citric Acid: Interesting Compound. Revista Científica de la Universidad Autónoma de Coahuila. 6(12): 18-23.

NMX-FF-062-2002. Productos alimenticios no industrializados para consumo humano. Fruta fresca. Fresa (*Fragaria x ananassa*, Dutch). (2002).

Nowicka, A., Kucharska, A. Z., Sokół-Łętowska, A., y Fecka, I. (2019). Comparison of polyphenol content and antioxidant capacity of strawberry fruit from 90 cultivars of *Fragaria*× *ananassa* Duch. Food Chemistry. 270: 32-46.

Nunes, M., Brecht, J., Sargent, S., y Morais, A. (1995). Effects of delays to cooling and wrapping on strawberry quality (cv. Sweet Charlie). Food Control. 6(6): 323-328.

Nunes, M. C. N., Brecht, J. K., Morais, A. M., y Sargent, S. A. (2006). Physicochemical changes during strawberry development in the field compared with those that occur in harvested fruit during storage. Journal of the Science of Food and Agriculture. 86(2): 180-190.

Ochoa-Villarreal, M., Vargas-Arispuro, I., Islas-Osuna, M. A., González-Aguilar, G., y Martínez-Téllez, M. Á. (2011). Pectin-derived oligosaccharides increase color and anthocyanin content

in Flame Seedless grapes. Journal of the Science of Food and Agriculture. 91(10): 1928-1930.

Octavia, L., y Choo, W. S. (2017). Folate, ascorbic acid, anthocyanin and colour changes in strawberry (*Fragaria× annanasa*) during refrigerated storage. LWT. 86: 652-659.

Odriozola-Serrano, I., Soliva-Fortuny, R., y Martín-Belloso, O. (2010). Changes in bioactive composition of fresh-cut strawberries stored under superatmospheric oxygen, low-oxygen or passive atmospheres. Journal of Food Composition and Analysis. 23(1): 37-43.

OIV-MA-AS2-11. (2006). Determination of chromatic characteristics according to CIELab. Compendium of international analysis of methods - OIV chromatic characteristics (pp. 1-16): Organización Internacional de la Viña y el Vino.

Ornelas-Paz, J. d. J., Yahia, E. M., Ramírez-Bustamante, N., Pérez-Martínez, J. D., del Pilar Escalante-Minakata, M., Ibarra-Junquera, V., Ibarra-Junquera, V., Acosta-Muñiz, C., Guerrero-Prieto, V., y Ochoa-Reyes, E. (2013). Physical attributes and chemical composition of organic strawberry fruit (*Fragaria x ananassa* Duch, Cv. Albion) at six stages of ripening. Food Chemistry. 138(1): 372-381.

Osorio, S., Castillejo, C., Quesada, M. A., Medina-Escobar, N., Brownsey, G. J., Suau, R., Heredia, A., Botella, M.A., y Valpuesta, V. (2008). Partial demethylation of oligogalacturonides by pectin methyl esterase 1 is required for eliciting defence responses in wild strawberry (*Fragaria vesca*). The Plant Journal. 54(1): 43-55.

Peñarrieta, J. M., Tejeda, L., Mollinedo, P., Vila, J. L., y Bravo, J. A. (2014). Phenolic compounds in food. Revista Boliviana de Química. 31(2): 68-81.

Pérez, A. G., Olías, R., Espada, J., Olías, J. M., y Sanz, C. (1997). Rapid determination of sugars, nonvolatile acids, and ascorbic acid in strawberry and other fruits. Journal of Agricultural and Food Chemistry. 45(9): 3545-3549.

Perin, E. C., da Silva Messias, R., Borowski, J. M., Crizel, R. L., Schott, I. B., Carvalho, I. R., Rombaldi, C. V., y Galli, V. (2019). ABA-dependent salt and drought stress improve strawberry fruit quality. Food Chemistry. 271: 516-526.

Perkins-Veazie, P., y Huber, D. (1988). Growth and ripening of strawberry fruit under field conditions. En Horticultural Reviews: Volume 17 (pp. 267-297) : John Wiley & Sons.

Pineli, L. d. L. d. O., Moretti, C. L., dos Santos, M. S., Campos, A. B., Brasileiro, A. V., Córdova, A. C., y Chiarello, M. D. (2011). Antioxidants and other chemical and physical characteristics of two strawberry cultivars at different ripeness stages. Journal of Food Composition and Analysis. 24(1): 11-16.

Pott, D. M., e Lima, F. d. A., Soria, C., Willmitzer, L., Fernie, A. R., Nikoloski, Z., Osorio, S., y Vallarino, J. G. (2020). Metabolic reconfiguration of strawberry physiology in response to postharvest practices. Food Chemistry. 321: 126747.

Ramírez, A., Cruz, N., y Franchialfaro, O. (2003). Uso de bioestimuladores en la reproducción de guayaba (*Psidium guajava* L.) mediante el enraizamiento de esquejes. Cultivos Tropicales. 24(1): 59-63.

Ramos-Aguilar, A. L., Victoria-Campos, C. I., Ochoa-Reyes, E., Ornelas-Paz, J de J., Zamudio-Flores, P. B., Rios-Velasco, C., Reyes-Hernadez, J., Pérez-Martínez, J. D., e Ibarra-Junquera,

V. (2017). Physicochemical properties of apple juice during sequential steps of the industrial processing and functional properties of pectin fractions from the generated pomace. LWT. 86: 465-472.

SAGARPA. (2017). Planeación agrícola nacional 2017-2030. Disponible en línea en: https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/257075/Potencial-Fresa.pdf. Fecha de consulta: 23/04/2019.

Salami, P., Ahmadi, H., Keyhani, A., y Sarsaifee, M. (2010). Strawberry post-harvest energy losses in Iran. Researcher. 4: 67-73.

Salas-Tovar, J. A., Flores-Gallegos, A. C., Contreras-Esquivel, J. C., Escobedo-García, S., Morlett-Chávez, J. A., y Rodríguez-Herrera, R. (2017). Analytical methods for pectin methylesterase activity determination: A review. Food Analytical Methods. 10(11): 3634-3646.

Sarkar, D., Ankolekar, C., Greene, D., y Shetty, K. (2018). Natural preservatives for superficial scald reduction and enhancement of protective phenolic-linked antioxidant responses in apple during post-harvest storage. Journal of Food Science and Technology. 55(5): 1767-1780.

SAS. (2000). The SAS system for Windows. Versión 9.0 SAS Inst. Cary, NC. USA.

Schwab, W., y Raab, T. (2004). Developmental changes during strawberry fruit ripening and physico-chemical changes during postharvest storage. En Production practices and quality assessment of food crops (pp. 341-369): Springer.

Seigler, D. S. (2012). Plant secondary metabolism. Springer Science & Business Media. Primera edición. Nueva York. 759 pp.

Shafiee, M., Taghavi, T., y Babalar, M. (2010). Addition of salicylic acid to nutrient solution combined with postharvest treatments (hot water, salicylic acid, and calcium dipping) improved postharvest fruit quality of strawberry. Scientia Horticulturae. 124(1): 40-45.

SIAP. (2019). Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera. Disponible en línea en: https://nube.siap.gob.mx/cierreagricola/ Fecha de consulta: 19/09/2020.

Siebeneichler, T. J., Crizel, R. L., Camozatto, G. H., Paim, B. T., da Silva Messias, R., Rombaldi, C. V., y Galli, V. (2020). The postharvest ripening of strawberry fruits induced by abscisic acid and sucrose differs from their *in vivo* ripening. Food Chemistry. 317: 126407.

Simpson, S., Ashford, D., Harvey, D., y Bowles, D. (1998). Short chain oligogalacturonides induce ethylene production and expression of the gene encoding aminocyclopropane 1-carboxylic acid oxidase in tomato plants. Glycobiology. 8(6): 579-583.

Sinha, N., Sidhu, J., Barta, J., Wu, J., y Cano, M. P. (2012). Handbook of fruits and fruit processing. John Wiley & Sons. Segunda edición. Iowa. 693 pp.

Souleyre, E. J., Iannetta, P. P., Ross, H. A., Hancock, R. D., Shepherd, L. V., Viola, R., Taylor, M. A., y Davies, H. V. (2004). Starch metabolism in developing strawberry (*Fragaria*× *ananassa*) fruits. Physiologia Plantarum. 121(3): 369-376.

Stein, O., y Granot, D. (2019). An overview of sucrose synthases in plants. Frontiers in plant science. 10: 95.

Stojković, D., Petrović, J., Soković, M., Glamočlija, J., Kukić-Marković, J., y Petrović, S. (2013).

In situ antioxidant and antimicrobial activities of naturally occurring caffeic acid, p-coumaric acid and rutin, using food systems. Journal of the Science of Food and Agriculture. 93(13): 3205-3208.

Sturm, K., Koron, D., y Stampar, F. (2003). The composition of fruit of different strawberry varieties depending on maturity stage. Food Chemistry. 83(3): 417-422.

Symons, G., Chua, Y.-J., Ross, J., Quittenden, L., Davies, N., y Reid, J. (2012). Hormonal changes during non-climacteric ripening in strawberry. Journal of Experimental Botany. 63(13): 4741-4750.

Tellez, M. A. M., y Aispuro, I. d. C. V. (2011). Method for controlling coloration in table grapes based on oligogalacturonides: Google Patents.

Tomás-Barberán, F. A., y Espín, J. C. (2001). Phenolic compounds and related enzymes as determinants of quality in fruits and vegetables. Journal of the Science of Food and Agriculture. 81(9): 853-876.

Tudor, V., Manole, C. G., Teodorescu, R., Asanica, A., y Barbulescu, I. D. (2015). Analysis of some phenolic compounds and free radical scavenging activity of strawberry fruits during storage period. Agriculture and Agricultural Science Procedia. 6: 157-164.

Van Cutsem, P., y Messiaen, J. (1994). Biological effects of pectic fragments in plant cells. Acta Botanica Neerlandica. 43(3): 231-245.

Van de Poel, B., Vandendriessche, T., Hertog, M. L., Nicolai, B. M., y Geeraerd, A. (2014). Detached ripening of non-climacteric strawberry impairs aroma profile and fruit quality. Postharvest Biology and Technology. 95: 70-80.

Vattem, D., y Shetty, K. (2005). Biological functionality of ellagic acid: a review. Journal of Food Biochemistry. 29(3): 234-266.

Vega, A., De León, J. A., Reyes, S. M., y Miranda, S. Y. (2018). Componentes Bioactivos de Diferentes Marcas de Café Comerciales de Panamá. Relación entre Ácidos Clorogénicos y Cafeína. Información Tecnológica. 29(4): 43-54.

Vera-Guzman, A. M., Lafuente, M. T., Aispuro-Hernandez, E., Vargas-Arispuro, I., y Martinez-Tellez, M. A. (2017). Pectic and galacturonic acid oligosaccharides on the postharvest performance of Citrus fruits. Hortscience. 52(2): 264-270.

Villegas, D., Handford, M., Alcalde, J. A., y Perez-Donoso, A. (2016). Exogenous application of pectin-derived oligosaccharides to grape berries modifies anthocyanin accumulation, composition and gene expression. Plant Physiology and Biochemistry. 104: 125-133.

Vincente, A. R., Manganaris, G. A., Ortiz, C. M., Sozzi, G. O., y Crisosto, C. H. (2014). Nutritional quality of fruits and vegetables. En Postharvest handling (pp. 69-122): Elsevier.

Virgen-Ortiz, J. J., Morales-Ventura, J. M., Colín-Chávez, C., Esquivel-Chávez, F., Vargas-Arispuro, I., Aispuro-Hernández, E., y Martínez-Téllez, M. A. (2020). Postharvest application of pectic-oligosaccharides on quality attributes, activities of defense-related enzymes, and anthocyanin accumulation in strawberry. Journal of the Science of Food and Agriculture. 100(5): 1949-1961.

Voca, S., Jakobek, L., Druzic, J., Sindrak, Z., Dobricevic, N., Seruga, M., y Kovac, A. (2009). Quality of strawberries produced applying two different growing systems Calidad de fresas

producidas aplicando dos diferentes sistemas de cultivo. CyTA-Journal of Food. 7(3): 201-207.

Walker, R. P., y Famiani, F. (2018). Organic acids in fruits: metabolism, functions and contents. Horticultural Reviews. 45: 371-430.

Wang, H., Wen, Y., Du, Y., Yan, X., Guo, H., Rycroft, J. A., Boon, N., Kovacs. E. M. R., y Mela, D. J. (2010). Effects of catechin enriched green tea on body composition. Obesity. 18(4): 773-779.

Xu, Y., Charles, M. T., Luo, Z., Mimee, B., Tong, Z., Roussel, D., Rolland, D., y Véronneau, P.-Y. (2019). Preharvest UV-C treatment affected postharvest senescence and phytochemicals alternation of strawberry fruit with the possible involvement of abscisic acid regulation. Food Chemistry. 299: 125138.

Yan, J., Cao, J., Jiang, W., y Zhao, Y. (2012). Effects of preharvest oligochitosan sprays on postharvest fungal diseases, storage quality, and defense responses in jujube (*Zizyphus jujuba* Mill. cv. Dongzao) fruit. Scientia Horticulturae. 142: 196-204.

Yin, H., Fretté, X. C., Christensen, L. P., y Grevsen, K. (2012). Chitosan oligosaccharides promote the content of polyphenols in Greek oregano (*Origanum vulgare* ssp. hirtum). Journal of Agricultural and Food Chemistry. 60(1): 136-143.

Zampini, M., Sanabria, D., Phillips, N., y Spence, C. (2007). The multisensory perception of flavor: Assessing the influence of color cues on flavor discrimination responses. Food Quality and Preference. 18(7): 975-984.

Zhang, C., Li, W., Zhu, B., Chen, H., Chi, H., Li, L., Qin, Y., y Xue, J. (2018). The quality evaluation of postharvest strawberries stored in Nano-Ag packages at refrigeration temperature. Polymers. 10(8): 894.

Zhao, Y. (Ed.) (2007). Berry fruit: value-added products for health promotion. CRC press. Primera edición. Boca Raton. 430 pp.

10. ANEXOS

10.1. Información de las Curvas de Calibración Utilizadas para la Cuantificación de Compuestos Identificados por Cromatografía Líquida de Alta Resolución.

Compuesto	Intervalo de concentración de la curva (mg/mL)	R^2 ajustado	Coeficiente de correlación múltiple	Límite de detección (mg/mL)	Límite de cuantificación (mg/mL)
Sacarosa	0 - 0.05	0.993	0.997	0.002	0.006
Glucosa	0 - 1.00	0.982	0.991	0.047	0.157
Fructosa	0 - 1.00	0.967	0.984	0.064	0.212
Ácido cítrico	0 - 0.80	0.997	0.999	0.013	0.042
Ácido succínico	0 - 5.00	0.992	0.996	0.111	0.370
Ácido málico	0 - 0.80	0.999	0.999	0.009	0.031
Ácido tartárico	0 - 0.80	0.999	1.000	0.008	0.027
Ácido ascórbico	0 - 0.10	0.994	0.997	0.003	0.009
Ácido oxálico	0 - 0.02	0.994	0.997	0.001	0.002
Ácido fumárico	0 - 0.50	0.974	0.988	0.018	0.061
Procianidina B1	0 - 0.25	0.999	0.999	0.004	0.012
Catequina	0 - 0.03	0.964	0.983	0.002	0.007
Ac. Cafeico	0 - 0.10	0.998	0.999	0.002	0.005
Procianidina B2	0 - 0.05	0.994	0.997	0.002	0.005
Ac. *p*-coumárico	0 - 0.001	0.986	0.993	6.677	22.257
Ácido elágico	0.025 - 0.80	0.925	0.964	0.112	0.373
Cianidina-3-glucósido	0 - 0.25	0.982	0.991	0.014	0.045
Pelargonidina-3-glucósido	0 - 0.20	0.998	0.999	0.003	0.012
Quercetina-3-galactósido	0 - 0.10	0.996	0.998	0.001	0.005
Quercetina-3-glucurónido	0 - 0.24	0.997	0.999	0.005	0.018
Quercetina-3-glucósido	0 - 0.30	0.995	0.998	0.007	0.024
Kaempferol-3-glucurónido	0 - 0.045	0.994	0.997	0.002	0.006
Kaempferol-3-glucósido	0 - 0.30	0.995	0.998	0.008	0.027
Naringenina	0.0002 - 0.015	0.982	0.992	0.001	0.003

10.2. Análisis Estadístico.

VARIABLE	R^2	POS	DIAS	POS * DIAS	REPETICION (POS)
Peso	0.4623	0.0001	<.0001	0.0926	0.2757
Diámetro	0.3692	0.0007	0.0002	0.3305	0.5019
Longitud	0.2602	0.1773	0.006	0.9463	0.9805
Firmeza	0.7548	0.0125	<.0001	0.2397	0.892
SST	0.9975	0.0007	<.0001	0.0001	0.6385
% humedad	0.9802	<.0001	<.0001	<.0001	0.3465
pH	0.9983	<.0001	<.0001	<.0001	0.249
% acidez	0.9177	0.0008	<.0001	<.0001	0.0389
*L**	0.6373	<.0001	<.0001	0.0033	0.2599
*a**	0.3866	0.0828	<.0001	0.1968	0.8473
*b**	0.5409	<.0001	<.0001	0.1089	0.7474
*C**	0.4169	0.0026	<.0001	0.1679	0.8106
°h	0.5771	<.0001	<.0001	0.0125	0.3512
%CTI	0.5550	<.0001	<.0001	<.0001	0.1612
ΔE_{ab}	0.5488	<.0001	0.0563	0.0004	0.4418
Antocianinas totales	0.9963	<.0001	<.0001	<.0001	0.5950
Cianidina-3-glucósido	0.9713	<.0001	<.0001	<.0001	<.0001
Pelargonidina-3-glucósido	0.9986	<.0001	<.0001	<.0001	<.0001
Pelargonidina-3-rutinósido	0.9952	<.0001	<.0001	<.0001	<.0001
Fenoles Totales	0.9572	<.0001	<.0001	<.0001	<.0001
Capacidad antioxidante	0.9325	<.0001	<.0001	<.0001	<.0001
Sacarosa	0.9771	<.0001	<.0001	<.0001	0.6061
Glucosa	0.9879	<.0001	<.0001	<.0001	0.6834
Fructosa	0.9883	<.0001	<.0001	<.0001	0.6845
Azúcares + ácidos	0.9926	<.0001	<.0001	<.0001	0.9504
Azúcares/ácidos	0.9371	<.0001	<.0001	<.0001	0.8562
Ácido cítrico	0.9823	<.0001	<.0001	<.0001	0.9611
Ácido succínico	0.9824	<.0001	<.0001	<.0001	0.9972
Ácido málico	0.9819	<.0001	<.0001	<.0001	0.8344
Ácido tartárico	0.9871	<.0001	<.0001	<.0001	0.2203
Ácido ascórbico	0.9542	<.0001	0.0071	<.0001	0.0297
Ácido oxálico	0.9710	<.0001	0.0077	<.0001	0.8585
Ácido fumárico	0.9885	<.0001	<.0001	<.0001	0.5852
Procianidina B1	0.9925	<.0001	<.0001	<.0001	<.0001
Catequina	0.9471	<.0001	<.0001	<.0001	<.0001
Ac. Cafeico	0.9978	<.0001	<.0001	<.0001	0.0004
Procianidina B2	0.9729	<.0001	<.0001	<.0001	<.0002
Ac. *p*-coumárico	0.9922	<.0001	<.0001	<.0001	<.0001
Conjugado de ácido elágico	0.9973	<.0001	<.0001	<.0001	<.0001
Ácido elágico	0.9474	<.0001	<.0001	<.0001	<.0001
Quercetina-3-galactósido	0.9354	0.0267	<.0001	<.0001	<.0001
Quercetina-3-glucurónido	0.9785	<.0001	<.0001	<.0001	<.0001
Quercetina-3-glucósido	0.9417	<.0001	<.0001	<.0001	<.0001
Kaempferol-3-glucurónido	0.7091	0.6144	0.0006	0.2043	0.0518
Kaempferol-3-glucósido	0.9061	0.1302	<.0001	0.3000	<.0001
Naringenina	0.8237	0.0058	0.7681	0.1658	<.0001

POS, oligosacáridos pécticos. POS * DIAS, interacción oligosacáridos pécticos y días de almacenamiento. REPETICION (POS), repetición anidada en oligosacáridos pécticos.