

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO
SUBDIRECCIÓN DE POSTGRADO



EFFECTO DE LA APLICACIÓN DE NANOPARTÍCULAS DE SILICIO Y UN
RECUBRIMIENTO EN LA CALIDAD POSTCOSECHA Y VITAMINA C DE
PIMIENTO MORRÓN

Tesis

Que presenta PAOLA JAZMIN ROBLERO RAMÍREZ
como requisito parcial para obtener el Grado de
MAESTRO EN CIENCIAS EN HORTICULTURA

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO
SUBDIRECCIÓN DE POSGRADO



EFFECTO DE LA APLICACIÓN DE NANOPARTÍCULAS DE SILICIO Y UN
RECUBRIMIENTO EN LA CALIDAD POSTCOSECHA Y VITAMINA C DE
PIMIENTO MORRÓN

Tesis

Que presenta PAOLA JAZMIN ROBLERO RAMÍREZ
como requisito parcial para obtener el Grado de
MAESTRO EN CIENCIAS EN HORTICULTURA

Dr. Álvaro Morelos Moreno
Director UAAAN

Dra. Ileana Vera Reyes
Director Externo

Dr. Antonio Flores Naveda
Subdirector de Postgrado
UAAAN

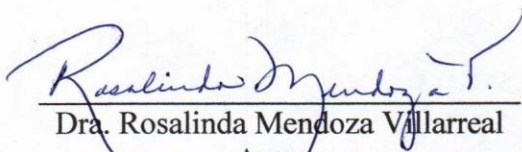
EFFECTO DE LA APLICACIÓN DE NANOPARTÍCULAS DE SILICIO Y UN
RECUBRIMIENTO EN LA CALIDAD POSTCOSECHA Y VITAMINA C DE
PIMIENTO MORRÓN

Tesis

Elaborada por PAOLA JAZMÍN ROBLERO RAMÍREZ como requisito parcial para
obtener el grado de Maestro en Ciencias en Horticultura con la supervisión y aprobación
del Comité de Asesoría



Dr. Álvaro Morelos Moreno
Director de Tesis




Dra. Rosalinda Mendoza Villarreal
Asesor



Dra. Xóchitl Ruelas Chacón
Asesor



Dra. Susana González Morales
Asesor



Dra. Ileana Vera Reyes
Asesor



Dr. Antonio Flores Naveda
Subdirector de Postgrado
UAAAN

Saltillo, Coahuila

Noviembre 2024

AGRADECIMIENTOS

Desde lo más profundo de mi corazón a **Dios** por la vida, y darme la oportunidad de estar en este mundo, por brindándome todas las oportunidades, por poner en mi camino a las personas correctas que me han brindado su amistad y cariño, por darme una familia maravillosa e increíble.

A la **Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro**, por abrirme sus puertas y haberme dado la oportunidad de formarme como profesionista.

Al **Consejo Nacional de Humanidades, Ciencias y Tecnologías (CONAHCYT)** por la beca que me fue otorgada para la realización de mis estudios de Maestría.

A la **Dra. Ileana Vera Reyes** del Centro de Investigación en Química Aplicada (CIQA) por su colaboración en la preparación y síntesis de las nanopartículas de dióxido de silicio (nSiO_2) para su aplicación foliar en el cultivo de pimiento morrón.

A la **Dra. Xóchitl Ruelas Chacón** del Departamento de Alimentos por su colaboración en la preparación del recubrimiento comestible a base de aceite esencial de citronela para su aplicación en los frutos de pimiento morrón.

Al programa docente de la Maestría en Ciencias en Horticultura y profesores de otros departamentos que me apoyaron, por su paciencia, por su tiempo, por haber influido en mi formación y compartirme sus conocimientos.

A los profesores que hicieron posible este trabajo, al Dr. Álvaro Morelos Moreno, Dra. Rosalinda Mendoza Villarreal, Dra. Xóchitl Ruelas Chacón, Dra. Susana González Morales y Dra. Ileana Vera Reyes, por su apoyo, confianza y valioso tiempo invertido.

A Melisa Martínez, Zaida Ramírez, Roció Bartolón, Karla Treviño, Gerardo Anastacio, Raúl Ramos, Omar Tucuch, Raúl Morales y Diego por ser mis compañeros y amigos; y por su apoyo en estos años.

DEDICATORIA

A mis padres **Saúl Roblero** y **Elvira Ramírez** por todo su amor y apoyo incondicional en todo momento, agradezco sus regaños, pláticas y sobre todo sus consejos, además por los sacrificios que han realizado para que pudiera llevar a cabo cada uno de mis logros.

A mi esposo **Luis Alberto Cerda Morales** por formar parte de mi vida y por su apoyo incondicional.

A mis hermanos por estar presentes en cada momento y por el amor que todos me brindan.

A mis cuñados y sobrinos por sus consejos y cariño incondicional.

A mis mejores amigos Osiel Chávez, Mariana Hernández, Adilene Rodríguez y Omar Valente que siempre están para escucharme y darme ánimos.

ÍNDICE GENERAL

| | |
|--|------|
| ÍNDICE GENERAL..... | vi |
| ÍNDICE DE TABLAS | viii |
| ÍNDICE DE FIGURAS..... | ix |
| RESUMEN..... | x |
| ABSTRACT | xii |
| INTRODUCCIÓN | 1 |
| OBJETIVOS..... | 3 |
| HIPÓTESIS | 3 |
| REVISIÓN DE LITERATURA..... | 4 |
| Nanotecnología en la agricultura..... | 4 |
| Nanopartículas | 5 |
| Recubrimientos comestibles | 6 |
| Composición de los recubrimientos comestibles | 6 |
| Caracterización del recubrimiento a base de citronela | 8 |
| Taxonomía del chile morrón | 8 |
| Descripción botánica y morfología del chile morrón | 9 |
| Importancia económica del chile morrón | 10 |
| MATERIALES Y MÉTODOS | 12 |
| Fase 1 - Establecimiento del cultivo y aplicación foliar de nanopartículas de dióxido de silicio | 12 |
| Tratamientos de la 1ra fase..... | 12 |
| Muestreo y medición de variables de calidad..... | 13 |
| Fase 2 - Aplicación del recubrimiento comestible | 13 |
| Tratamientos de la 2da fase | 14 |
| Muestreo y medición de variables de calidad..... | 14 |
| Diseño del experimento | 16 |
| Análisis estadístico | 16 |

| | |
|---|----|
| RESULTADOS Y DISCUSIÓN | 17 |
| Influencia de las nanopartículas de silicio en la calidad de fruto: | 17 |
| Respuesta a la aplicación de nanopartículas de silicio además de un recubrimiento comestible:..... | 21 |
| Acidez titulable..... | 21 |
| Color | 22 |
| Parámetro <i>L</i> | 23 |
| Coordenada <i>a</i> | 24 |
| Coordenada <i>b</i> | 25 |
| Firmeza | 26 |
| Sólidos solubles totales (SST) | 27 |
| Vitamina C | 28 |
| CONCLUSIONES | 30 |
| LITERATURA CITADA..... | 31 |

ÍNDICE DE TABLAS

| | |
|--|----|
| Tabla 1. Distribución de los tratamientos de la 1ra fase. | 13 |
| Tabla 2. Distribución de los tratamientos de la 2da fase..... | 14 |
| Tabla 3. Calidad de frutos de pimiento morrón en la primera cosecha influenciados por la aplicación de nSiO ₂ | 17 |
| Tabla 4. Calidad de frutos de pimiento morrón en la segunda cosecha influenciados por la aplicación de nSiO ₂ | 18 |
| Tabla 5. Calidad de frutos de pimiento morrón en la tercera cosecha influenciados por la aplicación de nSiO ₂ | 18 |
| Tabla 6. Medias de acidez titulable, firmeza de fruto, sólidos solubles totales y vitamina C de pimiento morrón, influenciados por la aplicación de nSiO ₂ | 19 |
| Tabla 7. Medias del parámetro <i>L</i> , coordenada <i>a</i> y coordenada <i>b</i> del color de fruto de pimiento morrón influenciados por la aplicación de nSiO ₂ | 20 |
| Tabla 8. Medias del comportamiento postcosecha de la firmeza (N) de fruto de pimiento morrón influenciado por la aplicación de nSiO ₂ más un recubrimiento comestible..... | 26 |
| Tabla 9. Medias del comportamiento poscosecha de los sólidos solubles totales (°Brix) de fruto de pimiento morrón influenciado por la aplicación de nSiO ₂ más un recubrimiento comestible. | 27 |
| Tabla 10. Medias del contenido postcosecha de vitamina C (mg/100 g) de fruto de pimiento morrón influenciado por la aplicación de nSiO ₂ más un recubrimiento comestible. | 28 |

ÍNDICE DE FIGURAS

| | |
|--|----|
| Figura 1. Planta y fruto de chile morrón amarillo..... | 9 |
| Figura 2. Elaboración del recubrimiento comestible. | 13 |
| Figura 3. Aplicación del recubrimiento comestible en los frutos de chile morrón..... | 14 |
| Figura 4. Esquema cromático de la coloración del pimiento morrón influenciado por la aplicación de $nSiO_2$ | 21 |
| Figura 5. Prueba de comparación de medias del comportamiento postcosecha de la acidez titulable en los frutos de chile morrón con recubrimiento comestible.. | 22 |
| Figura 6. Prueba de comparación de medias del comportamiento poscosecha del parámetro L en los frutos de chile morrón con recubrimiento comestible.. | 23 |
| Figura 7. Prueba de comparación de medias del comportamiento poscosecha de la coordenada a en los frutos de chile morrón con recubrimiento comestible.. | 24 |
| Figura 8. Prueba de comparación de medias del comportamiento poscosecha de la coordenada b en los frutos de chile morrón con recubrimiento comestible..... | 26 |

RESUMEN

**EFFECTO DE LA APLICACIÓN DE NANOPARTÍCULAS DE SILICIO Y UN
RECUBRIMIENTO EN LA CALIDAD POSTCOSECHA Y VITAMINA C DE
PIMIENTO MORRÓN**

POR

PAOLA JAZMIN ROBLERO RAMÍREZ

**MAESTRÍA EN CIENCIAS EN HORTICULTURA
UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO**

DR. ÁLVARO MORELOS MORENO - ASESOR

El chile morrón es un cultivo de gran importancia a nivel nacional ya que su producción se destina principalmente al mercado de exportación. México es el principal exportador y la industria de esta hortaliza exige un alto control en cuanto a la posibilidad de ofrecer productos frescos y de la mejor calidad durante todo el año. Las nanopartículas se presentan como una herramienta para la elaboración de fertilizantes que gracias a su nanoestructura puedan ser mejor aprovechados por las plantas, obteniendo como resultados frutos de la mejor calidad. Una vez que se obtienen los frutos con calidad óptima la preocupación recurrente es mantener todos los nutrientes dentro del fruto y también alargar la vida de anaquel de los productos. Una respuesta a esta problemática es la aplicación de películas o cubiertas comestibles, que debido a su naturaleza impiden la exposición de los frutos y verduras con el entorno retardando los efectos que hacen que la calidad disminuya. Este trabajo se realizó en dos fases, a decir, (Fase 1) se aplicaron nanopartículas de dióxido de silicio (nSiO_2) en concentraciones de 0, 150, 300 y 450 mg/L por aspersión foliar en un cultivo de pimiento en contenedores con sustrato de turba-perlita 1:1 (v/v), y (Fase 2) se aplicó un recubrimiento comestible a base de aceite esencial de citronela en los frutos maduros. Se evaluó la calidad postcosecha a los 1, 6, 12 y 18 días después de la aplicación del recubrimiento, a partir de la determinación de la firmeza, sólidos solubles totales y vitamina C en los frutos de pimiento. La aplicación de nSiO_2 afectó significativamente la calidad de los frutos. La firmeza de los frutos disminuyó 25% en la primera cosecha y 27.5% en la segunda cosecha, la acidez titulable disminuyó entre 20 y 30%, y los sólidos solubles totales disminuyeron 24.2%, en relación a los tratamientos control respectivos. La aplicación del recubrimiento comestible benefició significativamente la calidad postcosecha. La firmeza incrementó 35.6% el día 6, y los sólidos solubles totales incrementaron entre 16.4 y 26.4% en los días 12 y 18, en relación al tratamiento sin recubrimiento. La vitamina C incrementó significativamente 17.9 y 29.5% en los días 6 y 12, en relación al tratamiento sin recubrimiento. La aplicación de nSiO_2 es innecesaria para el cultivo de pimiento morrón, y el recubrimiento comestible de citronela si ayuda a conservar los atributos de calidad en el chile morrón.

Palabras clave: Nanopartículas, Silicio, recubrimiento, calidad postcosecha, *Capsicum annuum* L.

ABSTRACT

**EFFECT OF THE APPLICATION OF SILICON NANOPARTICLES AND A
COATING ON THE POST-HARVEST QUALITY AND VITAMIN C OF BELL
PEPPER**

BY

PAOLA JAZMIN ROBLERO RAMÍREZ

**MASTER OF SCIENCES IN HORTICULTURE
AGRICULTURAL UNIVERSITY ANTONIO NARRO**

DR. ÁLVARO MORELOS MORENO - ADVISOR

Saltillo, Coahuila

November 2024

Bell pepper is a crop of great importance since its production is mainly destined for the export market. Mexico is the main exporter and this vegetable industry requires a high control related to the possibility of offer fresh and high quality products during all the year. Nanoparticles imply a tool to make fertilizers that by its nanostructure can be profit by the plants, obtaining fruits of high quality. Once obtained high quality fruits, the recurring concern is to maintain said quality and the nutrients within the fruit, and also to extend the shelf life of the products. A response to this problem implies the applying of edible films or covers, which due to its nature, the coating prevents the exposure of the fruits and vegetables to the environment, delaying the effects that they cause that the quality decreases. This research was carried out in two phases, that is, (Phase 1) nanoparticles of silicon dioxide (nSiO_2) in concentrations of 0, 150, 300 and 450 mg/L were applied by foliar spray in a pepper crop in containers with peat-perlite substrate 1:1 (v/v), and (Phase 2) an edible coating based on citronella essential oil was applied to the ripen fruits. Postharvest quality was evaluated at 1, 6, 12 and 18 days after application of the coating, based on the determination of firmness, total soluble solids and vitamin C in the bell pepper fruits. The application of nSiO_2 significantly affected the quality of the fruits. Fruits firmness decreased by 25% in the first harvest and 27.5% in the second harvest, tritable acidity decreased between 20 and 30%, and total soluble solids decreased by 24.2%, compared to the respective control treatments. Applying of the edible coating significantly benefited the postharvest quality. Firmness increased by 35.6% on day 6th, and total soluble solids increased by 16.4 and 26.4% on days 12th and 18th, in relation to the uncoated treatment. Vitamin C increased significantly by 17.9 and 29.5% on days 6th and 12th, in relation to the uncoated treatment. nSiO_2 applying on bell pepper crop it is innecessary, and the citronella-based edible coating helps to preserve the quality attributes of bell pepper.

Keywords: Nanoparticles, Silicon, coating, postharvest quality, *Capsicum annuum* L.

INTRODUCCIÓN

Las hortalizas constituyen un alimento fundamental debido a su alto contenido nutricional que se conforma por agua, fibra, minerales y vitaminas, además de tener una baja densidad de calorías y carecen de grasas, lo cual contribuye a que formen parte indispensable de la dieta humana (Arrollo *et al.*, 2018). Las hortalizas forman parte de una actividad económica muy importante dentro de la agricultura, y son consideradas por la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura como el séptimo producto de mayor producción en el mundo, con más de 275 millones de toneladas anuales (CEDRSSA, 2020).

La naturaleza perecedera y características propias de las frutas y verduras frescas, justifican la atención a las técnicas de cultivo, producción, manejo agronómico, control de plagas y enfermedades, cosecha y manejo postcosecha (FAO, 2020). Las pérdidas postcosecha de frutas y hortalizas frescas a nivel mundial oscilan entre el 30 y 50% de la producción total, siendo las principales causas la pudrición, daño físico, desórdenes fisiológicos y la falta o uso de tecnología inadecuada para el manejo de la maduración y senescencia de los productos hortofrutícolas (Herrera *et al.*, 2022).

Diversas tecnologías han sido desarrolladas e implementadas para minimizar los efectos adversos de los factores mencionados y así extender la vida postcosecha de los productos hortofrutícolas, a decir, almacenamiento a bajas temperaturas, aplicación de radiaciones gamma y ultravioleta, control biológico, conservación con atmósfera controlada, utilización de empaques plásticos, uso de películas y la aplicación de recubrimientos comestibles, entre otras. Los biorecubrimientos representan un papel significativo en la vida de anaquel de los alimentos hortofrutícolas, ya que reducen la pérdida de agua, regulan la tasa de respiración, retrasan el envejecimiento y mejoran la calidad y valor comercial, manteniendo sus atributos de calidad y valor nutritivo (Fernández *et al.*, 2015). A los recubrimientos comestibles se les pueden añadir aditivos como agentes antimicrobianos, antipardeantes, extractos de plantas, aceites esenciales y especias, con el objetivo de extender el tiempo de vida útil de los productos, mantener su calidad, mejorar su seguridad, y estabilidad de los alimentos recubiertos. Los recubrimientos también modifican las propiedades mecánicas de los productos ya que forman una barrera

semipermeable a gases y vapores entre el alimento recubierto y la atmósfera que los rodea (Valencia *et al.*, 2016).

La aplicación de las nanopartículas en la agricultura es de gran importancia en la producción de fertilizantes, estimulantes del crecimiento y plaguicidas sistémicos, y en el manejo postcosecha, y su uso puede ayudar a incrementar la especificidad y eficiencia de herbicidas, o prolongar el periodo de actividad de los principios activos por liberación prolongada (Carrillo, 2021).

El silicio (Si) en las plantas reduce la incidencia de las enfermedades, modulando y sincronizando mejor la respuesta de la planta a los patógenos (Raya, 2012). Las plantas que crecen en ausencia de silicio frecuentemente son más débiles estructuralmente, y tienen un tamaño menor; también se ve afectado su desarrollo, viabilidad y reproducción; son más susceptibles a estrés abiótico, así como a la toxicidad por metales, son más susceptibles al ataque de organismos patógenos, insectos fitófagos y mamíferos herbívoros (Raya, 2012). El silicio en forma de nanopartículas tiene diversas funciones en las plantas, a decir, aumenta la fotosíntesis en presencia de cadmio, facilita el transporte de nutrientes a través del xilema, aumenta la eficiencia en el uso de agua y nutrientes, y reduce el efecto tóxico del arsénico (González *et al.*, 2021).

El chile y el tomate son las hortalizas de mayor importancia económica en México. El chile aporta el 20.2% en la producción de hortalizas a nivel nacional, siendo los de mayor importancia económica según el valor de su producción el morrón, jalapeño, poblano, serrano, anaheim y chilaca. La producción de chile morrón se destina principalmente al mercado de exportación, representando el 86% del volumen exportado de chiles en 2019 (INTAGRI, 2020).

OBJETIVOS

Objetivo General

- Evaluar la calidad postcosecha en respuesta a la aplicación de nanopartículas de dióxido de Silicio (nSiO_2) y un recubrimiento comestible en los frutos de chile morrón.

Objetivos Específicos

- Evaluar el efecto de la aplicación foliar de nSiO_2 en la calidad postcosecha.
- Evaluar el efecto de la aplicación de un recubrimiento comestible en la calidad postcosecha.
- Determinar el color, firmeza, sólidos solubles totales, acidez titulable y vitamina C en el día 1, 6, 12 y 18 después de la cosecha.

HIPÓTESIS

Al menos un tratamiento tendrá un efecto positivo en la calidad postcosecha de pimiento morrón.

REVISIÓN DE LITERATURA

Nanotecnología en la agricultura

La nanotecnología es un término que comprende el desarrollo de muchos productos y procesos, con la característica común de la escala nanométrica, la cual comprende desde 1 hasta 100 nm (Medina *et al.*, 2015). La nanoagricultura es la aplicación de la nanotecnología en la agricultura, y representa un fuerte potencial para incrementar la producción mundial de alimentos a través de los avances tecnológicos (Cásarez *et al.*, 2019). Actualmente diversos nanomateriales son objeto de investigación en la producción de alimentos (Lira *et al.*, 2016).

Se han propuesto nanomateriales de base inorgánica para ser usados en la agricultura, con potencial para 1) producir nano partículas para la liberación de ingredientes activos en el tratamiento de enfermedades en las plantas y disminuir el efecto contaminante al medio ambiente, y para su uso como nutrimentos o biofortificación; 2) usar biosensores que permiten la detección segura y oportuna de microorganismos fitopatógenos, o de contaminantes orgánicos e inorgánicos que puedan poner en riesgo la salud de los cultivos, 3) tratar las aguas de riego y disminuir componentes tóxicos para los cultivos. (Baker *et al.*, 2017).

Los nanomateriales han evidenciado ser una alternativa para la fabricación de nanofertilizantes, los cuales son más efectivos y eficientes que los fertilizantes tradicionales. La aplicación de nanofertilizantes ha incrementado considerablemente debido principalmente a su alto impacto en la calidad nutricional de los cultivos y la inducción de tolerancia al estrés de las plantas (Morales, 2017). Los nanomateriales actualmente tienen múltiples aplicaciones en las plantas, a decir, manejo de nutrientes, mejoramiento genético, tratamiento de enfermedades y promoción del crecimiento de las plantas, con efecto positivos de estimulación para inducir una germinación rápida, inducir tolerancia de las plantas al estrés biótico y abiótico, mejorar la eficiencia de los nutrientes y favorecer el crecimiento de las plantas, y reducir el impacto ambiental en relación a los métodos tradicionales (López *et al.*, 2018).

Nanopartículas

Las nanopartículas miden de 1 a 100 nm en sus tres dimensiones, y las hay de tres tipos, 1) naturales como las producidas en erupciones volcánicas; 2) incidentales como las producidas en las emisiones de la combustión de motores; y 3) fabricadas a propósito con una finalidad (Medina *et al.*, 2015). El efecto de las nanopartículas en las plantas depende de diversos factores, como la composición, la concentración, el tamaño, las propiedades físicas y químicas, y la especie vegetal (López *et al.*, 2018). Los nanomateriales en concentraciones específicas se consideran bioestimulantes, generalmente en cantidades bajas estimulan el crecimiento de las plantas (Juárez *et al.*, 2018).

Los minerales en forma de nanopartículas presentan propiedades distintas a las que se expresan en la escala micro o macroscópica, o bien cuando se encuentran en forma iónica. El cociente superficie/volumen de una partícula es inversamente proporcional al tamaño de partícula, por lo cual las nanopartículas presentan un elevado cociente superficie/volumen, lo que permite tener una grande área de contacto y una mayor acción en el material aplicado (Morales *et al.*, 2016).

Aplicación de silicio en las plantas

El silicio (Si) no está reconocido como un nutriente esencial para el crecimiento y desarrollo de las plantas, sin embargo, presenta efectos benéficos, a decir, mejora la tasa de crecimiento, induce resistencia ante el estrés biótico y abiótico (Farhangi *et al.*, 2018), favorece la absorción de nutrientes en las plantas y mejora las condiciones del suelo (González *et al.*, 2021). En condiciones de estrés hídrico el Si mejora los niveles de osmolitos como la prolina, proteínas solubles, azúcares y compuestos fenólicos, los cuales son importantes en la regulación osmótica y el sistema antioxidante. El Si en las hojas facilita el flujo de solutos, lo cual es reflejado en valores bajos de potencial hídrico, y favorece la captación y retención de agua en los tejidos. El Si funciona como protector del cloroplasto, aumenta la tasa de fotosíntesis a partir del incremento de la concentración de pigmentos relacionados con la absorción de la luz (Cabezas *et al.*, 2022). La aplicación exógena de Si en varias especies vegetales ha demostrado aumentar la resistencia al ataque de insectos y patógenos, ya que forma una barrera mecánica a partir de la deposición por la acumulación de residuos. La absorción de Si en los cultivos tiene efectos benéficos, a

decir, aumenta la tasa fotosintética, la resistencia a plagas, la tolerancia a la toxicidad por metales pesados y al estrés hídrico y salino, favorece el crecimiento y nodulación en leguminosas, mejora la actividad de enzimas y la composición mineral, fortalece los tallos y reduce el acame de los cultivos por efecto del aire (Castellanos *et al.*, 2015). El Si en las plantas permite que en las hojas y tallos se incremente la cantidad de oxígeno, el Si es impulsado hacia el parénquima de las raíces, oxida la rizosfera, y logra que el hierro y el magnesio reducidos se oxiden, impidiendo que las plantas los tomen en exceso (Furcal *et al.*, 2013).

Recubrimientos comestibles

Las frutas y hortalizas son alimentos altamente perecederos con una vida de anaquel muy corta. Diversas tecnologías como el uso de bajas temperaturas, inmersión en aditivos químicos, atmósfera modificada, envasado al vacío y recubrimientos comestibles, se han utilizado para prolongar la vida de anaquel y minimizar las pérdidas derivadas de la cosecha, procesamiento, transporte y almacenamiento de alimentos (Herrera *et al.*, 2022). Los recubrimientos comestibles cumplen un papel muy importante en mejorar la calidad sensorial y nutricional, generar valor agregado y prolongar la vida de anaquel de los alimentos, ya que regulan la transferencia de humedad, oxígeno, dióxido de carbono, aroma y componentes de sabor (Fernández *et al.*, 2015). Los recubrimientos y las películas comestibles se diferencian en la forma de elaboración y la aplicación en los alimentos, las películas comestibles son una capa fina de material comestible que ha sido preformada y es colocada posteriormente al alimento, mientras que los recubrimientos se encuentran en forma líquida y se aplican directamente por aspersión o por inmersión sobre la superficie del alimento para una o varias capas del material polimérico comestible (Solano *et al.*, 2018).

Composición de los recubrimientos comestibles

Los recubrimientos y las películas comestibles son biopolímeros que dependiendo de su formulación se pueden agrupar en las siguientes categorías:

1. Hidrocoloides. Son recubrimientos que cuentan con propiedades mecánicas y funcionan como barrera a gases como el O₂ y CO₂ pero no impiden del todo la transmisión

de vapor de agua. Ejemplos de recubrimientos hidrocoloides son los polisacáridos derivados de celulosa, almidón, quitosano, alginatos, carragenanos, gelanos, pectinas de fruta; y proteínas de origen animal, como gelatinas, caseínas y albúminas o proteínas de suero de leche; o de origen vegetal, como soja y zeína de maíz.

2. Lípidos. Tienen la característica de ser compuestos hidrofóbicos no poliméricos con buenas propiedades barrera para la humedad, pero su capacidad para la formación de películas es reducida. Minimizan la transpiración, la deshidratación, la abrasión en la manipulación posterior y mejoran el brillo y el sabor. Algunos ejemplos son las ceras de carnauba y de abeja, y los ácidos grasos y glicerol. Los lípidos se combinan con polisacáridos y proteínas (hidrocoloides) de origen vegetal mínimamente procesados para formar películas.

3. Compuestos. Son formulados a partir de mezclas de lípidos e hidrocoloides, donde los lípidos aportan resistencia al vapor de agua y los hidrocoloides dan permeabilidad selectiva al O₂ y CO₂ y buena adherencia estructural, integridad y duración de la película.

4. Polisacáridos. En su mayoría provienen de algas marinas, de origen vegetal y de biopolímeros producidos por microorganismos, siendo los más utilizados la celulosa, el almidón y el quitosano (De Ancos *et al.*, 2015).

Aditivos alimentarios

La función de los aditivos de los recubrimientos comestibles es resaltar el sabor, color, textura, controlar el crecimiento microbiano y mejorar el comportamiento del producto recubierto (Robles *et al.*, 2013). De acuerdo a la acción que ejercen los aditivos sobre el alimento aplicado existen tres tipos de recubrimientos (Solano *et al.*, 2018):

1. Recubrimientos bioactivos. Son recubrimientos que tienen la capacidad de cambiar las condiciones del alimento, extender la vida de anaquel, mejorar la seguridad microbiológica y las propiedades sensoriales, y también se pueden agregar ingredientes con actividades funcionales como antioxidantes, vitaminas, prebióticos y probióticos.

2. Recubrimientos con propiedades antimicrobianas. Son recubrimientos que contribuyen al control y liberación de agentes antimicrobianos para neutralizar las reacciones en los alimentos, para extender la vida de anaquel, y prevenir el crecimiento y la diseminación fúngica y bacteriana. Algunas de los ingredientes antimicrobianos de los

recubrimientos son las sales de sorbato de potasio, ácidos orgánicos (cinámico), aceites esenciales (canela), extractos de plantas (orégano y tomillo), enzimas (lisozima), bacteriocinas (nisina y pediocina) y antibióticos (natamicina), y cationes metálicos (plata).

3. Recubrimientos inteligentes. Son recubrimientos que se adhieren al alimento como etiquetas con bio-sensores o como parte del empaque que incluyen un sistema de monitoreo para realizar el seguimiento de la trazabilidad, las propiedades y el estado del producto alimenticio.

Caracterización del recubrimiento a base de citronela

La citronela (*Cymbopogon nardus* L.) es un arbusto aromático perenne de la familia Poaceae originaria de Sri Lanka que puede alcanzar una altura de 1.3 m, y dentro de sus propiedades curativas se utiliza en el tratamiento del reumatismo, problemas menstruales e intestinales (Rodríguez *et al.*, 2012). En presentación de aceite esencial funciona como acaricida y repelente de insectos (Aragon, *et al.*, 2014), en perfumería, cosmética y en la industria de los alimentos como saborizante y conservante, además presenta actividad antiinflamatoria, hipoglucemiante e inmunoestimulante (Caughey *et al.*, 2020).

La citronela también presenta actividad antimicrobiana, actividad inhibitoria del crecimiento de *Aspergillus niger* y tiene actividad antioxidante. Los componentes del aceite esencial de citronela son el citronelal (34-41%), geraniol (16-24%) y citronelol (7-9%), aunque investigaciones realizadas en India y en Costa de Marfil reportaron que los principales componentes son geraniol (36-46%) e isopulegol (71%), respectivamente. El rendimiento en aceite esencial de citronela es de 0.6 a 1.2% (Rodríguez *et al.*, 2012).

Taxonomía del chile morrón

Todas las formas de chile conocidas corresponden al género *Capsicum*, el cual se incluye en la familia de las Solanáceas. A excepción de *Capsicum annuum*, todas las especies del género *Capsicum* tienen su origen en América. La distribución del género *Capsicum* se extendió desde el borde más meridional de Estados Unidos hasta la zona templada cálida de América del Sur. El chile morrón o pimiento pertenecen al grupo *Capsicum annuum* el cual es de flores blancas, se desarrollan en hábitats húmedos, el cual tuvo una distribución originalmente a través de tierras bajas tropicales de América del Sur y América Central

(Figura 1). La expansión de esta especie se ha hecho universal, siendo difícil encontrar algún lugar del mundo donde no se utilice. Su cultivo se extendió con gran rapidez debido a su uso como especia (Staller, 2012).



Figura 1. Planta y fruto de chile morrón amarillo.



Reino: Plantae.



Clase: Dicotiledóneas (cuyas semillas contienen un embrión con dos cotiledones).



Subclase: Metaclamídeas, flores con periantio doble y estambres insertos en ella.



Orden: Tubifloras (gamopétalas) por tener sus pétalos soldados por la base.



Familia: Solanáceas al igual que la berenjena y tomate.



Género: *Capsicum*.



Especie: *annuum* (Reche, 2010).

Descripción botánica y morfología del chile morrón

Planta. La planta normalmente es erecta de 60 a 152 cm de altura, aunque hay algunas especies que presentan características rastreras, con tallos angulosos que se transforman en cilíndricos según maduran, y con base leñosa. Su crecimiento es semi-indeterminado y con bastantes ramificaciones (Fornaris, 2005).

Tallo. El tallo principal produce de 8 a 15 hojas antes de la primera flor y posteriormente se ramifica, dividiéndose su ápice en dos o tres ramas. Cada rama produce una o dos hojas, terminando en una flor y entonces se divide otra vez en dos ramas de segundo orden, y este patrón de ramificación se repite continuamente (Fornaris, 2005).

Hojas. Las hojas son alternadas, simples y de forma ovalada, o algunas veces casi lanceoladas, y con su punta ahusada o gradualmente estrecha y puntiaguda. Tienen una base en forma de cuña o aguda, y pecíolos de 0.6 a 2.54 cm de largo. La lámina varía en tamaño de 2.54 a 12.7 cm de largo, con mínima vellosoidad (Fornaris, 2005).

Flor. Las flores son hermafroditas o con fecundación autógena, y presentan alogamia menor al 10%. En plantas domesticadas las flores aparecen solitarias en cada nudo, y en *C. annuum* hay poblaciones con las flores producidas en pares o en racimos más numerosos que individualmente. El crecimiento longitudinal de las ramas termina con una flor, por lo que la planta puede producir varios cientos de flores. Las flores están unidas al tallo por un pedúnculo o pedicelo de 10 a 20 mm de longitud, el cual puede ser erecto, intermedio o colgante (Staller, 2012).

Fruto. El fruto del chile morrón se define botánicamente como una baya y es de una estructura hueca con forma de cápsula. Se distingue una región capsular externa, correspondiente al pericarpio y un eje, el cual está formado por el pedúnculo rematado por el cáliz y su prolongación o corazón dentro del fruto. El corazón está formado por el tejido placentario y las semillas. La sección longitudinal del fruto presenta una gran diversidad de formas, a decir, plana, circular, acorazonada, cuadrada, rectangular, trapezoidal, triangular, o en forma de cuerno (Staller, 2012).

Importancia económica del chile morrón

México es el mayor exportador de chile morrón con 1'138,288 ton de chiles, pimientos picantes y verdes a los diferentes mercados del mundo en 2020, representando el 28.4% del volumen total de pimientos comercializados en el mercado internacional. La industria de esta hortaliza ha experimentado un amplio auge en los últimos años debido al aumento de la demanda de Estados Unidos, y al desarrollo de la agricultura protegida, que ha permitido una mayor eficiencia y control de la producción, así como la posibilidad de ofrecer un producto fresco y de calidad en todo el año (FreshPlaza, 2022).

En el 2018 en México se registró una superficie sembrada mayor a 9200 ha de pimiento Morrón. El 50.3% de la superficie sembrada bajo algún tipo de producción a cielo abierto, mientras que el 49.6% mediante agricultura protegida con producción en invernadero, macro túnel y malla sombra. Los rendimientos promedio fueron de 44.85 ton/ha en

producción a cielo abierto, 113 ton/ha en producción en invernadero, y 61-88 ton/ha en producción con malla sombra. El precio medio rural oscila de 6239 a 10374 MXN/ha. El valor de pimienta morrón es mayor en malla sombra bajo condiciones de producción de agricultura orgánica, destinada para exportación, y es menor en producción a cielo abierto. Bajo condiciones de producción en invernadero el valor de pimienta morrón está entre \$7000 y \$13000 MXN/ha (Agroproductores, 2018).

MATERIALES Y MÉTODOS

El experimento se realizó en dos fases, fase 1: establecimiento de cultivo de pimiento morrón y aplicación foliar de nanopartículas de dióxido de silicio (nSiO_2), y fase 2: aplicación del recubrimiento comestible.

Fase 1 - Establecimiento del cultivo y aplicación foliar de nanopartículas de dióxido de silicio

El cultivo fue establecido en un invernadero tipo túnel con plástico semitransparente y ventilación natural, del Departamento de Horticultura de la Universidad Autónoma Agraria Antonio, en Saltillo Coah., México ($25^\circ 21'$ Latitud Norte, $101^\circ 02'$ Longitud Oeste, altitud 1743 m). Se sembraron semillas de chile morrón híbrido Deseo F1 (HM Clause, Davis, CA, USA) en charolas de poliestireno, y el trasplante en bolsas de polietileno con 8 L de sustrato turba/perlita 1:1 (v/v) a los 30 días después de la siembra. El cultivo se manejó a dos tallos y el ciclo de cultivo fue de 167 días. La fertilización consistió en solución nutritiva tipo Steiner (Steiner, 1961) aplicada en el agua del sistema de riego dirigido.

Nanopartículas de dióxido de silicio

Se utilizaron nanopartículas de dióxido de silicio (nSiO_2), esféricas de 20 nm, caracterizadas por difracción de rayos x en el Centro de Investigación en Química Aplicada, Campus Saltillo (CIQA).

Tratamientos de la 1ra fase

La primera fase experimental consistió de tres tratamientos con nanopartículas de dióxido de silicio (nSiO_2) y un control (Tabla 1), con seis aplicaciones cada semana por aspersión en el dosel de la planta a partir de los 7 días después del trasplante.

Tabla 1. Distribución de los tratamientos de la 1ra fase.

| | |
|----|----------------------------------|
| T1 | Control (sin nSiO ₂) |
| T2 | nSiO ₂ 150 mg/L |
| T3 | nSiO ₂ 300 mg/L |
| T4 | nSiO ₂ 450 mg/L |

Para la preparación de los tratamientos se tomaron 0.15, 0.30 y 0.45 g de nanopartículas de dióxido de silicio (nSiO₂) y se colocaron en vasos de precipitado y se aforaron a 1 L con agua destilada para obtener las concentraciones de 150, 300 y 450 mg/L, respectivamente.

Muestreo y medición de variables de calidad

Para la Fase 1, se realizaron cortes de frutos maduros a los 167, 174 y 181 DDT, y se cuantificaron las variables de firmeza, peso del fruto, diámetro ecuatorial y diámetro polar.

Fase 2 - Aplicación del recubrimiento comestible

En la Fase 2 se aplicó el recubrimiento comestible a base de aceite esencial de citronela en los frutos maduros de pimiento morrón.

Preparación del recubrimiento

En una parrilla de agitación se colocó un vaso de precipitado y se agregaron 100 mL de agua, se agitó de forma constante y con calor, se adicionaron 0.45 mL de glicerol y 0.02 mL de tween-80. Cuando el líquido alcanzó una temperatura de 50-55 °C se agregaron 0.02 mL de aceite esencial de citronela y se agitó hasta que no se vieran micelas, se agregaron 6 g de alginato y se agitó hasta que se disolvió por completo (Figura 2).

**Figura 2.** Elaboración del recubrimiento comestible.

Tratamientos de la 2da fase

La segunda fase experimental consistió de los tratamientos de la 1ra fase (nanopartículas de dióxido de silicio) con la aplicación del recubrimiento comestible, y un control absoluto (Tabla 2).

Tabla 2. Distribución de los tratamientos de la 2da fase.

| | |
|----|--|
| T1 | Control absoluto (sin nSiO ₂ y sin recubrimiento) |
| T2 | Control (sin nSiO ₂) + recubrimiento |
| T3 | nSiO ₂ 150 mg/L + recubrimiento |
| T4 | nSiO ₂ 300 mg/L + recubrimiento |
| T5 | nSiO ₂ 450 mg/L + recubrimiento |

Aplicación del recubrimiento y almacenamiento de las muestras

Los frutos maduros de chile morrón se recolectaron a los 181 DDT, se lavaron con agua y jabón, se secaron a temperatura ambiente en un escurridor, se aplicó el recubrimiento comestible con una brocha de silicón (Figura 3), las muestras se colocaron en recipientes de plástico transparente y se almacenaron a una temperatura de 4 °C.



Figura 3. Aplicación del recubrimiento comestible en los frutos de chile morrón.

Muestreo y medición de variables de calidad

A los 1, 6, 12 y 18 días después de la aplicación del recubrimiento se cuantificaron las variables de color, firmeza, peso del fruto, diámetro ecuatorial y diámetro polar.

Variables determinadas

Color. La coloración del fruto fue medida con un colorímetro Minolta CR-400 (Minolta Co., Ramsey, E.U.A.), se realizó la calibración con una placa estándar ($L = 97.75$, $a = 0.49$, $b = 1.96$ (Minolta Co., Ramsey, E.U.A.) con tres repeticiones. Las mediciones se hicieron en los lados derecho e izquierdo de las muestras. Los valores de Hunter L , a y b fueron determinados, donde L es el componente negro-blanco (luminosidad), a es la coordenada rojo/verde (+ indica rojo, – indica verde), b es la coordenada amarillo/azul (+ indica amarillo, – indica azul).

Firmeza. La firmeza de los frutos se midió con un penetrómetro digital FR-5120 (QA Supplies, Norfolk, VA, USA), con tres repeticiones. Los resultados fueron reportados como la firmeza en kg cm^{-2} .

Para la extracción de jugo del fruto las muestras de chile morrón se cortaron en pedazos pequeños en una tabla y se molieron en un mortero, y se agregaron 3 mL de agua destilada. El extracto se colocó en un matraz Erlenmeyer de 250 mL y se filtró con un embudo con una gasa para obtener el jugo.

Sólidos solubles totales (SST). En un refractómetro digital HI 96801 (HANNA Inc.) calibrado previamente con agua destilada (la lectura debe ser cero), se colocó una gota de jugo del extracto cuidando que cubriera completamente el orificio del refractómetro y se tomó la lectura por triplicado. Los resultados se expresaron en °Brix (AOAC, 1984).

Acidez titulable. Se tomó una alícuota de 10 mL de jugo del extracto y se colocó en un matraz Erlenmeyer de 125 mL y se le agregaron 3 gotas de fenolftaleína (1%). En una bureta se colocó un volumen conocido de NaOH (0.1 N) y se tituló la muestra hasta obtener una coloración rosa (AOAC, 2000). La acidez titulable se calculó con la Ecuación (1):

$$AT = \frac{V * N * Meq * 100}{\text{Alícuota valorada}} \quad (1)$$

donde AT es la acidez titulable (% ácido cítrico), V es el volumen de NaOH gastado (mL), N es la normalidad del NaOH, Meq es el miliequivalente del ácido que se encuentra en

mayor proporción de la muestra (0.064 para ácido cítrico, 0.067 para ácido málico y 0.75 para ácido tartárico), *Alícuota valorada* es el peso de la muestra (g) o el volumen (mL).

Vitamina C. En una tabla se procedieron a picar 20 g de la muestra de chile morrón de cada uno de los diferentes tratamientos, se colocaron en un mortero para la extracción del jugo, se agregó 10 mL de HCl (2%) y se trituro cuidadosamente hasta obtener una consistencia de papilla, se aforó a 100 mL con agua destilada y se homogenizó. El contenido del mortero se filtró a través de un embudo con una gasa para obtener el jugo en un matraz Erlenmeyer de 250 mL y se midió el volumen del jugo con una probeta graduada. Se tomó una alícuota de 10 mL del filtrado y se colocó en un matraz Erlenmeyer de 125 mL. Se agregó un volumen conocido de reactivo de Thielmann y se titularon las muestras hasta la aparición de una coloración rosa constante durante 30 s (Jo, 2014). El contenido de vitamina C (mg/100 g) se calculó con la Ecuación (2):

$$Vitamina\ C = \frac{VTR * 0.088 * VT * 100}{VA * P} \quad (2)$$

donde *VTR* es el volumen gastado en mL de reactivo de Thielmann, 0.088 es la masa en mg de ácido ascórbico equivalente a 1 mL de reactivo de Thielmann, *VT* es el volumen total en mL del filtrado de vitamina C en HCL, *VA* es el volumen de la alícuota valorada en mL, *P* es el peso de muestra en gramos.

Diseño del experimento

El cultivo se estableció usando un diseño experimental completamente al azar, con 10 unidades experimentales por tratamiento. Para las variables evaluadas se usó un diseño completamente al azar con 3 repeticiones por tratamiento.

Análisis estadístico

Se realizaron análisis de varianza y pruebas de medias Fisher LSD ($p \leq 0.05$) para todas las variables evaluadas, en el programa estadístico InfoStat (2020).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Influencia de las nanopartículas de silicio en la calidad de fruto:

CORTE 1. La aplicación de nSiO₂ no modificó significativamente el peso del fruto, diámetro ecuatorial y diámetro polar de pimiento morrón en la primera cosecha. La firmeza del fruto disminuyó significativamente 24.12 y 24.94% para los tratamientos de 150 y 450 mg/L, respectivamente, en relación al control (Tabla 3).

Tabla 3. Calidad de frutos de pimiento morrón en la primera cosecha influenciados por la aplicación de nSiO₂.

| Tratamiento | Peso de fruto (g) | Diámetro ecuatorial (cm) | Diámetro polar (cm) | Firmeza (kg/cm ²) |
|-------------|-------------------|--------------------------|---------------------|-------------------------------|
| Control | 165.67 <i>a</i> | 7.79 <i>a</i> | 7.41 <i>a</i> | 3.69 <i>a</i> |
| 150 mg/L | 155.17 <i>a</i> | 7.64 <i>a</i> | 8.14 <i>a</i> | 2.80 <i>b</i> |
| 300 mg/L | 151.17 <i>a</i> | 7.58 <i>a</i> | 7.39 <i>a</i> | 3.14 <i>ab</i> |
| 450 mg/L | 139.17 <i>a</i> | 7.52 <i>a</i> | 7.69 <i>a</i> | 2.77 <i>b</i> |

Letras diferentes por columna indican diferencias significativas de acuerdo con Fisher LSD Test ($p < 0.05$). Valores promedio, $n = 5$.

CORTE 2. La aplicación de nSiO₂ no modificó significativamente el peso del fruto, diámetro ecuatorial y diámetro polar de pimiento morrón en la segunda cosecha. La firmeza del fruto disminuyó 27.47% en el tratamiento de 450 mg/L en relación al control (Tabla 4).

Tabla 4. Calidad de frutos de pimiento morrón en la segunda cosecha influenciados por la aplicación de nSiO₂.

| Tratamiento | Peso de fruto (g) | Diámetro ecuatorial (cm) | Diámetro polar (cm) | Firmeza (kg/cm ²) |
|-------------|-------------------|--------------------------|---------------------|-------------------------------|
| Control | 166.78 <i>a</i> | 8.08 <i>a</i> | 7.42 <i>a</i> | 4.15 <i>a</i> |
| 150 mg/L | 164.71 <i>a</i> | 7.53 <i>a</i> | 8.49 <i>a</i> | 3.32 <i>ab</i> |
| 300 mg/L | 130.48 <i>a</i> | 7.27 <i>a</i> | 7.40 <i>a</i> | 3.88 <i>ab</i> |
| 450 mg/L | 127.19 <i>a</i> | 7.45 <i>a</i> | 7.59 <i>a</i> | 3.01 <i>b</i> |

Letras diferentes por columna indican diferencias significativas de acuerdo con Fisher LSD Test ($p < 0.05$).

Valores promedio, $n = 5$.

CORTE 3. La aplicación de las nSiO₂ no modificó significativamente el peso del fruto, diámetro ecuatorial y diámetro polar, y la firmeza del fruto de pimiento morrón en la tercera cosecha en relación al control (Tabla 5).

Tabla 5. Calidad de frutos de pimiento morrón en la tercera cosecha influenciados por la aplicación de nSiO₂.

| Tratamiento | Peso de fruto (g) | Diámetro ecuatorial (cm) | Diámetro polar (cm) | Firmeza (kg/cm ²) |
|-------------|-------------------|--------------------------|---------------------|-------------------------------|
| Control | 148.00 <i>ab</i> | 7.95 <i>ab</i> | 7.33 <i>a</i> | 3.58 <i>ab</i> |
| 150 mg/L | 168.33 <i>a</i> | 8.43 <i>a</i> | 8.13 <i>a</i> | 3.00 <i>b</i> |
| 300 mg/L | 124.67 <i>b</i> | 7.46 <i>b</i> | 8.06 <i>a</i> | 3.18 <i>ab</i> |
| 450 mg/L | 153.33 <i>ab</i> | 8.35 <i>a</i> | 7.38 <i>a</i> | 3.86 <i>a</i> |

Letras diferentes por columna indican diferencias significativas de acuerdo con Fisher LSD Test ($p < 0.05$).

Valores promedio, $n = 5$.

Aunque el silicio tiene un efecto positivo en la promoción del crecimiento y desarrollo de las plantas, y por consiguiente también en los frutos, es considerado como un elemento no esencial para las plantas ya que su presencia en exceso puede causar competencia con la absorción de otros nutrientes como lo son el N, P y K lo que provoca un desarrollo más

lento en la etapa de crecimiento y en la etapa de floración, lo cual puede verse reflejado en los frutos (Castellanos *et al.*, 2015). La alta superficie de contacto de las nanopartículas es mejor absorbido y aprovechado por las plantas (Rivas *et al.*, 2021). El exceso de silicio puede estar limitando el desarrollo de los frutos y por ello en las tres cosechas el control tiene valores estadísticamente similares o incluso más altos que los tratamientos con nanopartículas.

La acidez titulable disminuyó significativamente ante la aplicación de las nSi en relación al control, el cual es el único que se encuentra en el rango reportado por García *et al.* (2014), que es de 0.1 a 0.4% de ácido málico.

La concentración de sólidos solubles totales disminuyó significativamente en el tratamiento de 300 mg/L en relación al control, aunque dichos valores son ligeramente superiores a los reportados por Hernández *et al.* (2010) que van de 3.70 a 5.93% en un estudio en el cual utilizó lombrihumos y fertilización química de N, P y K. La aplicación de las nSiO₂ no modificó significativamente la firmeza de fruto y la vitamina C (Tabla 6). Parra *et al.* (2008) tampoco hallaron diferencias significativas en la calidad de los frutos de pepino con la aplicación de Si en la solución nutritiva.

Tabla 6. Medias de acidez titulable, firmeza de fruto, sólidos solubles totales y vitamina C de pimiento morrón, influenciados por la aplicación de nSiO₂.

| Tratamiento | Acidez titulable (% AC) | Firmeza (N) | SST (°Brix) | Vitamina C (mg/100 g) |
|-------------|----------------------------|----------------|---------------|--------------------------|
| Control | 0.10 <i>a</i> | 9.91 <i>a</i> | 7.72 <i>a</i> | 114.12 <i>a</i> |
| 150 mg/L | 0.07 <i>b</i> | 10.65 <i>a</i> | 7.50 <i>a</i> | 115.84 <i>a</i> |
| 300 mg/L | 0.08 <i>b</i> | 10.84 <i>a</i> | 5.85 <i>b</i> | 104.64 <i>a</i> |
| 450 mg/L | 0.08 <i>b</i> | 9.68 <i>ab</i> | 7.22 <i>a</i> | 103.87 <i>a</i> |

Letras diferentes por columna indican diferencias significativas de acuerdo con Fisher LSD Test ($p < 0.05$).

Valores promedio, $n = 5$.

La Tabla 7 y Figura 4 muestran el comportamiento de la colorimetría del pimiento morrón, el cual es de color amarillo.

Tabla 7. Medias del parámetro L , coordenada a y coordenada b del color de fruto de pimiento morrón influenciados por la aplicación de nSiO_2 .

| Tratamiento | Parámetro L | Coordenada a | Coordenada b |
|-------------|-----------------|----------------|-----------------|
| Control | 59.63 <i>ab</i> | 0.76 <i>ab</i> | 44.57 <i>a</i> |
| 150 mg/L | 57.96 <i>bc</i> | 2.33 <i>a</i> | 43.27 <i>ab</i> |
| 300 mg/L | 60.02 <i>a</i> | 0.78 <i>ab</i> | 44.55 <i>a</i> |
| 450 mg/L | 60.02 <i>a</i> | -0.33 <i>b</i> | 44.46 <i>a</i> |

Letras diferentes por columna indican diferencias significativas de acuerdo con Fisher LSD Test ($p < 0.05$).

Valores promedio, $n = 5$.

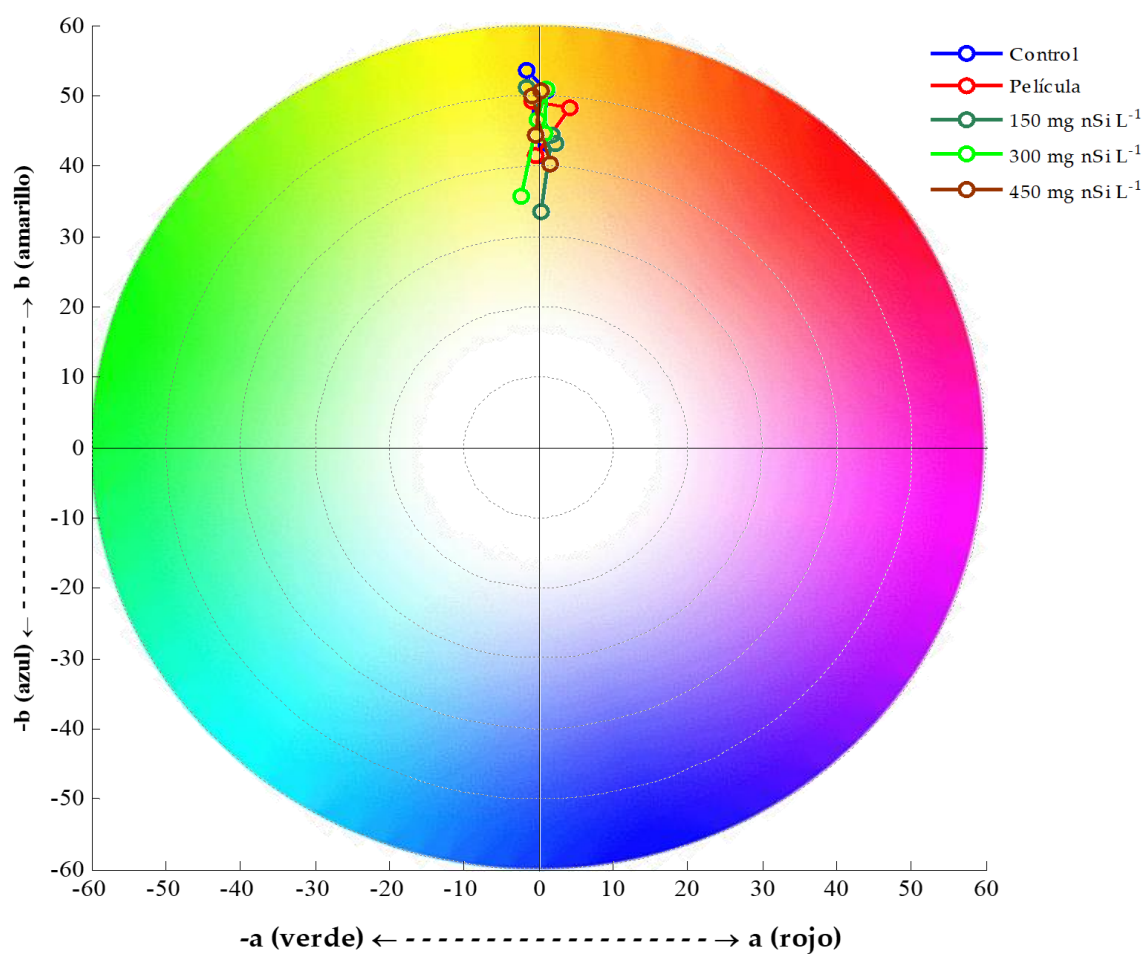


Figura 4. Esquema cromático de la coloración del pimiento morrón influenciado por la aplicación de nSiO₂.

Para los tres parámetros de color (*L*, *a* y *b*), la aplicación de nSiO₂ en las tres dosis no presentó diferencia significativa respecto al control, esto coincide con lo reportado por Carbajal et al. (2019), quienes estudiaron plantas de tomate sometidas a estrés salino y tratadas Silicio para mejorar el color, y observaron que dicha aplicación no afectó el ángulo Hue (el cual representa la tonalidad o matiz de los colores primarios: rojo, verde y azul), y la luminosidad disminuyó 7.5% respecto al control.

Respuesta a la aplicación de nanopartículas de silicio además de un recubrimiento comestible:

Acidez titulable

Generalmente la acidez titulable aumenta con la maduración (Torres *et al.*, 2013), sin embargo en frutos de chile morrón la acidez titulable se atribuye principalmente al contenido de ácido málico que es el más abundante en pimiento morrón (Palacio *et al.*, 2017) y al ácido ascórbico por ser un fruto rico en vitamina C, y a medida que el fruto se vuelve senescente la degradación de este ácido es más alta. Es probable que los pigmentos protejan al ácido ascórbico al evitar su oxidación ya que estos pueden tener función antioxidante (Hernández *et al.*, 2010). Los recubrimientos comestibles son mecanismos de barrera entre los frutos y el ambiente que los rodea. El aplicar estos recubrimientos ayuda a alargar la vida de anaquel de los productos al reducir las pérdidas de humedad y retardar la maduración, ya que su forma de actuar es como barrera al intercambio de gases protegiendo la integridad física y química de los frutos (Madera *et al.*, 2023). Como se observa en la figura 5 se puede comprobar que al primer día de aplicación del recubrimiento los valores más altos de acidez titulable lo tenían los controles, al día 6 y 12 no se observan diferencias estadísticas entre los tratamientos, sin embargo, los valores más altos fueron la dosis de 450 mg/L el día 6, y las dosis de 150 a 450 mg/L el día 12, y el control sin recubrimiento fue el más bajo el día 18. Esta variación entre los días posiblemente se deba a que el recubrimiento comestible está protegiendo los componentes

del fruto y evitando la pérdida de color lo cual se traduce en una degradación más lenta y como el control carece de recubrimiento la degradación es mayor.

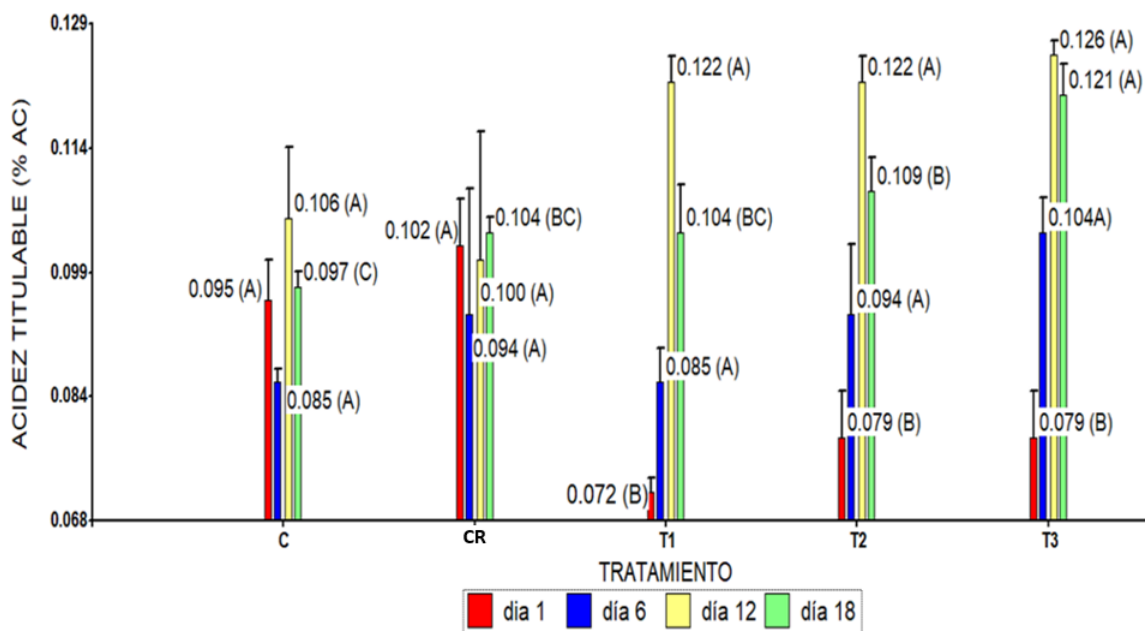


Figura 5. Prueba de comparación de medias del comportamiento postcosecha de la acidez titulable en los frutos de chile morrón con recubrimiento comestible. C es el control; CR es el control con recubrimiento; T1, T2 y T3 es nSiO₂ 150, 300 y 450 mg/L con recubrimiento. Medias con una letra diferente por día indican diferencias significativas de acuerdo con Fisher LSD Test ($p < 0.05$). Valores promedio, $n = 5$.

Color

Las clorofilas, antocianinas y carotenoides son tres familias de pigmentos que dan color a las frutas y vegetales, y proporcionan la coloración verde, de azul a violeta y de rojo a amarillo, respectivamente. La concentración inicial de esos pigmentos se relaciona con el estado de madurez del fruto (Paredes *et al.*, 2019). Para la investigación del ramo alimentario, el color es representado utilizando el CIELAB o también llamado el espacio de color $L^*a^*b^*$, ya que los resultados se ajustan con los de la percepción humana. L^* es el componente de luminosidad que abarca de 0 (negro) a 100 (blanco); los parámetros a^* (de verde a rojo) y b^* (de azul a amarillo) son los dos componentes cromáticos, que van desde -120 a +120 (Mendoza *et al.*, 2015).

Parámetro *L*

A mayor valor numérico obtenido del parámetro *L* se determina que la muestra tiene mayor intensidad de brillo y a menor valor numérico menor la muestras es más opaca (Paredes *et al.*, 2019). En un estudio realizado por Palacio *et al.* (2017) se reportaron valores de entre 53 a 57 para el parámetro *L* en chile morrón amarillo de la variedad Jeannette, la mayoría de los valores obtenidos (figura 6) en este trabajo caen dentro de ese rango, a excepción del día 1 donde todos los frutos tienen valores mayores a 57.88 (siendo T2 y T3 los más altos). García *et al.* (2019) señalan que, en el caso de recubrimientos, estos pueden presentar diferencias en cuanto a la luminosidad y esto se explica debido a la combinación de sustancias con índice de refracción distintos y cambios en la estructura interna durante el secado; pero también señalan que especialmente en los recubrimientos hechos a base de 100% alginato son más opacas que si le adicionan algún otro componente como el *Aloe vera* (en su caso). La adición del aceite de citronela mejoró la luminosidad del recubrimiento en los días 1 (con T2 y T3) y en el día 18 (con CP).

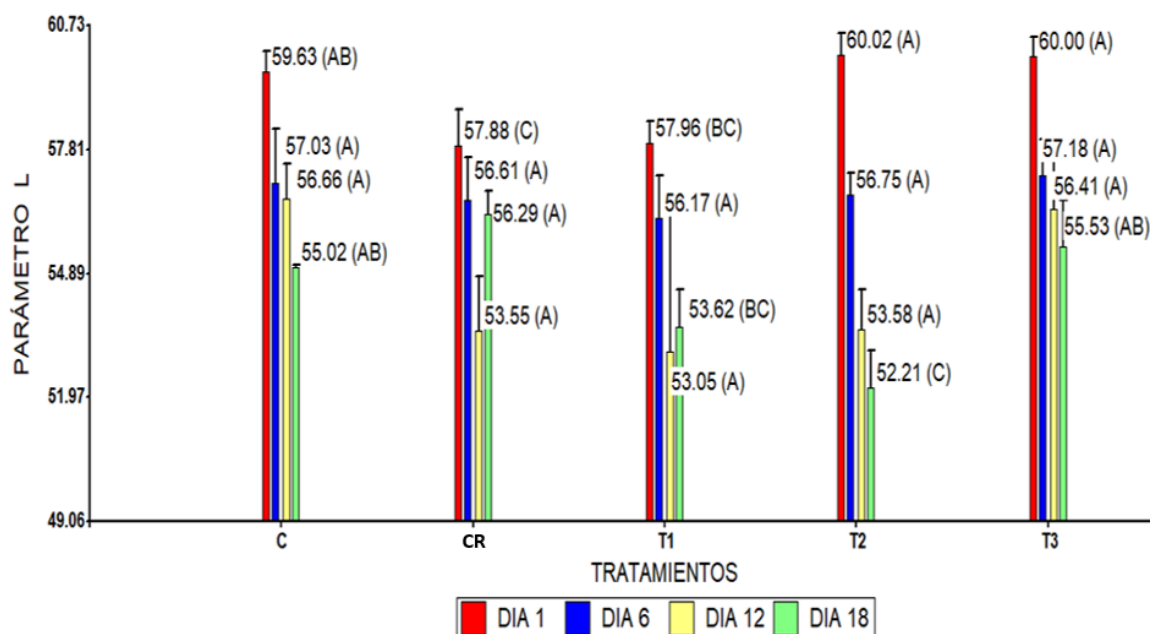


Figura 6. Prueba de comparación de medias del comportamiento poscosecha del parámetro *L* en los frutos de chile morrón con recubrimiento comestible. C es el control; CR es el control con recubrimiento; T1, T2 y T3 es nSiO₂ 150, 300 y 450 mg/L con recubrimiento. Medias con una letra diferente por día indican diferencias significativas de acuerdo con Fisher LSD Test ($p < 0.05$). Valores promedio, $n = 5$.

Coordenada *a*

El color es una de las principales características de calidad que se ve reflejada en la preferencia de los consumidores induciendo expectativa de sabor, a la vez esta variable se utiliza en la mayoría de los vegetales como indicador de estado de madurez y/o deterioro de calidad (Zaccari *et al.*, 2017). En la etapa inicial de crecimiento de frutas y verduras se presenta una pigmentación de color verde. Esto se debe a la clorofila presente en las células de la fruta. A medida que la fruta comienza a madurar, la clorofila se descompone y otros pigmentos empiezan a desarrollarse (Bautista *et al.*, 2016). Tomando en cuenta lo anterior podemos decir que en el primer día de aplicación del recubrimiento todos los tratamientos presentaron un grado de madurez estadísticamente igual en comparación con el control. Para el día 6 se observa que CP es el único tratamiento que presenta diferencias estadísticas comparándolo con el control, en este caso la madurez de CP incrementó al estar más alejado de la coloración verde. En la figura 7 se observa que en el día 12 todos los tratamientos presentaron similitudes estadísticas entre sí. Por último, en el día 18 la dosis de 150 mg/L presentó diferencias significativas respecto al control, comprobando con ello que el recubrimiento comestible ayudó a tener una maduración más lenta.

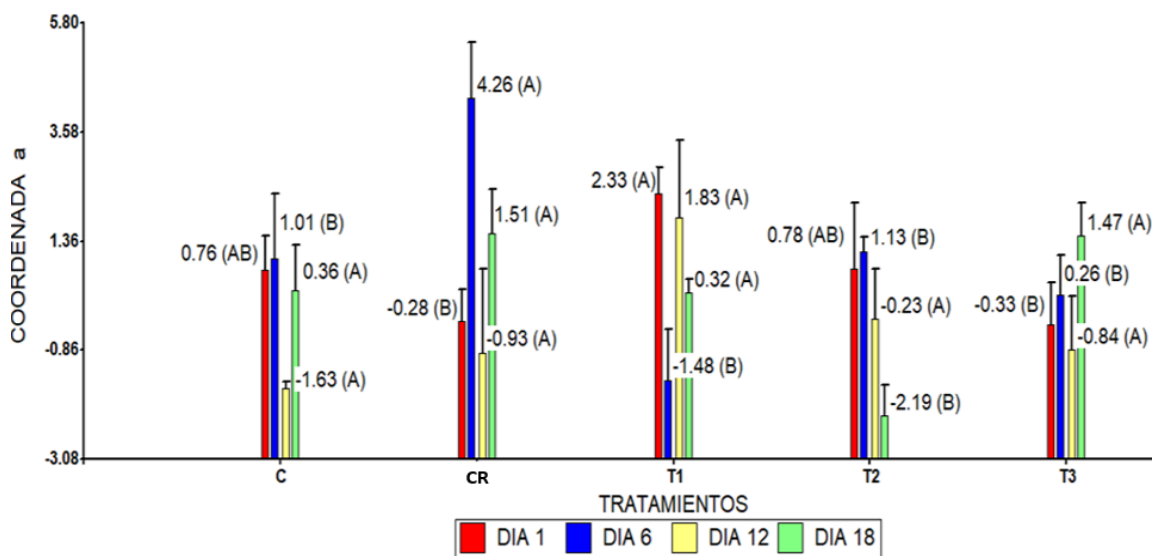


Figura 7. Prueba de comparación de medias del comportamiento poscosecha de la coordenada *a* en los frutos de chile morrón con recubrimiento comestible. C es el control; CR es el control con recubrimiento; T1, T2 y T3 es nSiO₂ 150, 300 y 450 mg/L con recubrimiento. Medias con una letra diferente por día indican diferencias significativas de acuerdo con Fisher LSD Test ($p < 0.05$). Valores promedio, $n = 5$.

Coordenada *b*

En el día 1 el tratamiento CP fue el único que tuvo diferencias respecto al control presentando una coloración ligeramente menos amarilla. Para los días 6 y 12 no se presentaron diferencias entre tratamientos. Para el día 18 las dosis de 150 y 300 mg/L disminuyeron significativamente la coloración amarilla respecto al control (Figura 8). En este caso la coloración que presentan los chiles morrones se debe a los carotenoides los cuales son pigmentos responsables de la mayoría de los colores amarillos, naranjas y rojos en frutas y vegetales (Figuerola *et al.*, 2015). Estos carotenoides se encuentran presentes en todos los tejidos fotosintéticos, junto con las clorofilas, así como en tejidos vegetales no fotosintéticos, como componentes de cromoplastos. Las degradaciones de los carotenoides ocurren de manera fundamental por la reacción de oxidación, ya sean no enzimáticas o debido a enzimas como las lipoxigenasas, y se presenta generalmente durante el secado de frutas y vegetales. En su ambiente natural los carotenoides son estables, son insolubles en agua y por lo tanto las pérdidas por lixiviación durante el lavado y procesamiento de frutos son mínimas; los tratamientos a alta presión no afectan los niveles de carotenoides en diversos productos vegetales y las temperaturas de conservación de frutas y verduras de hasta 4 °C tampoco tienen efecto en su degradación (Meléndez *et al.*, 2004).

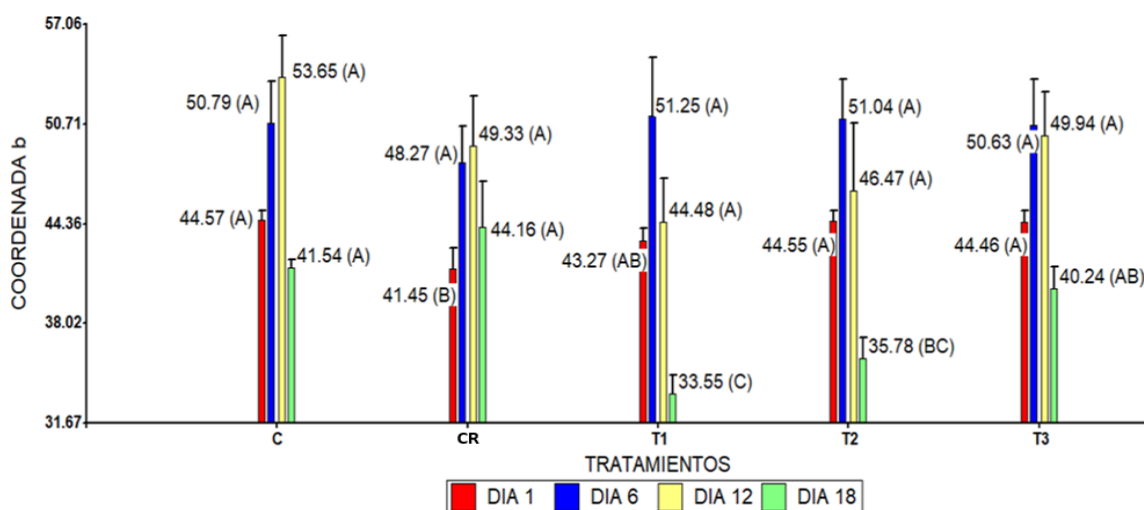


Figura 8. Prueba de comparación de medias del comportamiento poscosecha de la coordenada b en los frutos de chile morrón con recubrimiento comestible. C es el control; CR es el control con recubrimiento; T1, T2 y T3 es nSiO₂ 150, 300 y 450 mg/L con recubrimiento. Medias con una letra diferente por día indican diferencias significativas de acuerdo con Fisher LSD Test ($p < 0.05$). Valores promedio, $n = 5$.

Firmeza

En la Tabla 8 se presentan los resultados de la cinética de firmeza, donde se observan diferencias significativas entre los tratamientos, con excepción del día 12 de evaluación. En el día 1, el tratamiento CR presentó un valor de firmeza inferior respecto al control y los demás tratamientos fueron estadísticamente iguales al control. En el día 6 la dosis de 300 mg/L obtuvo mejores resultados a comparación del control, mientras que la dosis de 300 mg/L disminuyó en relación con el control. En el día 12 todos los tratamientos son significativamente iguales al control. Finalmente, en el día 18, la dosis de 150 mg/L presentó diferencias con el control. Esto se debe a que los recubrimientos comestibles ayudan a cambiar las condiciones de los frutos ayudando entre otras cosas a extender su vida de anaquel y evitar la pérdida o aumento de humedad que modifica su textura, retardar cambios químicos (color, aroma, valor nutricional) (Mora *et al.*, 2021). Sellamuthu *et al.* (2013) reportaron que el uso de aceites esenciales como el de tomillo reducen la incidencia de hongos, reduciendo con ello la pérdida de peso y firmeza en aguacate después de 18 días de almacenamiento (Tabla 8).

Tabla 8. Medias del comportamiento poscosecha de la firmeza (N) de fruto de pimiento morrón influenciado por la aplicación de nSiO₂ más un recubrimiento comestible.

| Tratamiento | Día 1 | Día 6 | Día 12 | Día 18 |
|--------------|---------|----------|--------|----------|
| Control | 9.91 a | 9.73 bc | 8.82 a | 11.21 ab |
| CR | 6.91 b | 9.66 bc | 7.23 a | 13.56 a |
| 150 mg/L + R | 10.65 a | 11.33 ab | 6.61 a | 5.97 c |
| 300 mg/L + R | 10.84 a | 13.19 a | 9.42 a | 8.66 bc |

| | | | | |
|--------------|---------|--------|--------|----------|
| 450 mg/L + R | 9.68 ab | 8.68 c | 8.27 a | 11.08 ab |
|--------------|---------|--------|--------|----------|

Letras diferentes por columna indican diferencias significativas de acuerdo con Fisher LSD Test ($p < 0.05$).
CR es el control con recubrimiento; R es el recubrimiento. Valores promedio, $n = 5$.

Sólidos solubles totales (SST)

En la Tabla 9 se presentan los resultados de la cinética de SST, donde se observan diferencias significativas entre los tratamientos, con excepción del día 12 de evaluación. En el día 1 el control junto con T1 y T3 muestran los valores más altos. En el día 6 los mejores resultados los presenta T2, el cual muestra un incremento considerable respecto al control. El día 12 el T1 supera al control y finalmente en el día 18 CP y T3 presenta los valores más altos.

La concentración de sólidos solubles totales depende del tamaño del fruto, a la concentración de azúcares y al grado de madurez de los frutos (Palacio *et al.*, 2017). Dussán *et al.* (2015) mencionan que los sólidos solubles totales miden el contenido de carbohidratos, ácidos orgánicos, proteínas, grasas y minerales en los frutos y que los valores altos representan frutos más dulces. En este trabajo se obtuvieron un comportamiento distinto a lo reportado por Dussán *et al.* (2015), ya que en su trabajo realizado en cubos de piña con recubrimientos comestibles y evaluados en los días 0, 2, 8, 12, 16 y 20, encontraron incrementos de SST en los días 2 al 8. El recubrimiento está actuando como una barrera física retardando la pérdida de los compuestos del fruto (Fernández *et al.*, 2015) con resultados favorables incluso para el día 18 de almacenamiento.

Los valores obtenidos de SST se encuentran dentro de los rangos reportados por Cortés *et al.* (2020) para diferentes variedades de chile morrón que van desde los 5.2 hasta los 8.4 °Brix, y por Penchaiya *et al.* (2009), quienes reportaron valores de 3.6 a 8.9 °Brix.

Tabla 9. Medias del comportamiento poscosecha de los sólidos solubles totales (°Brix) de fruto de pimiento morrón influenciado por la aplicación de $n\text{SiO}_2$ más un recubrimiento comestible.

| Tratamiento | Día 1 | Día 6 | Día 12 | Día 18 |
|-------------|--------|--------|--------|---------|
| Control | 7.72 a | 5.32 b | 6.52 b | 6.90 cd |

| | | | | |
|--------------|--------|---------|---------|---------|
| CR | 5.62 b | 6.05 ab | 6.73 b | 8.72 a |
| 150 mg/L + R | 7.50 a | 5.48 ab | 8.22 a | 7.58 bc |
| 300 mg/L + R | 5.85 b | 6.32 a | 6.77 b | 6.55 d |
| 450 mg/L + R | 7.22 a | 6.10 ab | 7.42 ab | 8.03 ab |

Letras diferentes por columna indican diferencias significativas de acuerdo con Fisher LSD Test ($p < 0.05$).

CR es el control con recubrimiento; R es el recubrimiento. Valores promedio, $n = 5$.

Vitamina C

En la Tabla 10 se presentan los resultados de la cinética de contenido de vitamina C, donde se observa diferencias significativas entre los tratamientos, con excepción del día 1 de evaluación. En el día 6 el tratamiento CP tuvo valores más altos para vitamina C, en el día 12 los tratamientos CP y 150 mg/L presentaron los valores más altos y en el día 18 tampoco existió diferencia significativa en relación al control, pero la tendencia de la vitamina C es disminuir con el tiempo postcosecha. La calidad del chile morrón se valora principalmente por el sabor, el color, y su contenido de vitamina C (Quipo *et al.*, 2013). La vitamina C o ácido ascórbico es un monosacárido hidrosoluble presente en alimentos y es degradado por el calor, la oxidación y los álcalis (Estrella *et al.*, 2015). En el procesado de las frutas y hortalizas, este compuesto bioactivo se altera fácilmente por la acción de la temperatura, la luz, los cambios de pH y los iones metálicos (Ordoñez *et al.*, 2013).

De manera general se observa que el recubrimiento influyó positivamente en la protección de la vitamina C hasta el día 12, y al aumentar el tiempo ésta inicia una ligera degradación, lo cual tiene sentido ya que la vitamina C se caracteriza por ser uno de los constituyentes más sensibles en los alimentos y gran parte de su degradación se da durante el almacenamiento (Mendoza *et al.*, 2017).

Tabla 10. Medias del contenido postcosecha de vitamina C (mg/100 g) de fruto de pimienta morrón influenciado por la aplicación de nSiO_2 más un recubrimiento comestible.

| Tratamiento | Día 1 | Día 6 | Día 12 | Día 18 |
|--------------|----------|-----------|----------|----------|
| Control | 114.12 a | 101.86 b | 100.39 b | 98.23 ab |
| CR | 111.08 a | 120.06 a | 129.96 a | 96.11 ab |
| 150 mg/L + R | 115.84 a | 99.83 b | 134.49 a | 93.99 ab |
| 300 mg/L + R | 104.64 a | 108.24 ab | 102.57 b | 86.58 b |
| 450 mg/L + R | 103.87 a | 101.35 b | 93.01 b | 102.94 a |

Letras diferentes por columna indican diferencias significativas de acuerdo con Fisher LSD Test ($p < 0.05$).

CR es el control con recubrimiento; R es el recubrimiento. Valores promedio, $n = 5$.

CONCLUSIONES

La aplicación de nanopartículas de silicio no tuvo cambios favorables para los frutos de chile morrón, ya que indujeron una pérdida de firmeza. Por lo cual sería conveniente realizar más estudios con dosis más bajas para conocer si se puede tener un efecto elicitor de las nSi. Por otro lado, la aplicación del recubrimiento tuvo una contribución positiva para algunas de las variables de calidad ayudando a que se mantuvieran las características ideales para el consumo durante tiempos más prologados. En esta parte también sería recomendable probar distintas formulaciones del recubrimiento para hallar las concentraciones de los ingredientes que actúan mejor en la protección del producto.

LITERATURA CITADA

- Agroproductores, (2018). El cultivo de pimiento morrón en México. Red de agroproductores en México. Recuperado el 16 de octubre de 2022 de: <https://agroproductores.com/pimiento-morron-en-mexico/>
- AOAC. (2000). Vitamin and other nutrient. Official methods of analysis of the Association of Official Analytical Chemists International. (17 ed). Gaithersburg, USA: Hoerwitz, W. Ed.
- Aragón García, Agustín, De Vega Lotzin, José Luis, Pérez-Torres, Betzabeth Cecilia, Damián Huato, Miguel Ángel, Romero Arenas, Omar, & López Olguín, Jesús Francisco. (2014). Aceite de *Cymbopogon nardus* y *Pelargonium citrosum*, como repelentes de *Culex quinquefasciatus*. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 5(4), 591-603.
- Arrollo-Uriarte, P., Mazquiarian-Berera, L., Rodríguez-Alonso, P., Valero-Gaspar, T., Ruíz-Moreno, E., Ávila-Torres., J.M., Varela-Moreiras, G. (2018). Informe de estado de situación sobre “frutas y hortalizas”: nutrición y salud en la España del s. XXI”. Fundación Española de la Nutrición (pp. 3-28).
- Baker, S., Volova, T., Prudnikova, S. V., Satish, S. y Prasad, M. N. N. (2017). Nanoagroparticles emerging trends and future prospect in modern agriculture system. *Environmental Toxicology Pharmacology*, 53, 10-17. <https://doi.org/10.1016/j.etap.2017.04.012>
- Bautista-Villarreal M., Núñez-González A., Amaya-Guerra C., Báez-González Juan, Espinoza-Mata A., Rodríguez-Arzave A., Miranda-Velázquez L., Castañeda-Garza E., Cárdena-Ávila M. (2016). Influencia del tipo y tiempo de cocción en la degradación de clorofila en hortalizas. *Investigación y Desarrollo en Ciencia y Tecnología de Alimentos*, 1(1), 411-416.
- Cabezas Gutiérrez, Andrea, Camus Araya, Fernanda, Condori, Wladimir Esteban, González Vallejos, Francisco Andrés, & Mazuela Águila, Pilar. (2022). El silicio (Si) y su efecto mitigador del estrés salino en cultivos hortícolas. *Idesia (Arica)*, 40(1), 129-133. <https://dx.doi.org/10.4067/S0718-34292022000100129>

- Carbajal-Vázquez, V., Trejo-Téllez, L., Gómez-Merino, F., Alcántar-González, G., Sánchez-García, P., Ramírez-Olvera, S., Buendía-Valverde, S. (2019). Dióxido de silicio mejora el color y la concentración de licopeno en tomates sometidos a estrés salino. *Centro de Investigaciones en Óptica*, pp. 278-282.
- Carrillo, G., González, M. (2021). La nanotecnología en la agricultura y rehabilitación de suelos contaminados. *Mundo nano. Revista Interdisciplinaria en Nanociencias y Nanotecnología*, 2(2), 50-63. Epub 13 de septiembre de 2021.
- Cásarez-Santiago, RG et al. (2019). Nanoagriculture and energy advances. *Plant Nanobionics*. Prasad Ram, Advances in the Understanding of Nanomaterials Research and Applications. (1ed., Vol.1, pp.141-164). Springer Nature Switzerland. https://doi.org/10.1007/978-3-030-12496-0_7
- Castellanos González, L., de Mello Prado, R., & Silva Campos, C.N. (2015). El Silicio en la resistencia de los cultivos. *Cultivos Tropicales* 36(Supl. 1), 16-24. Recuperado en 18 de abril de 2023, de http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0258-59362015000500002&lng=es&tlng=es
- Caughey-Espinoza, D. M., Ayala-Astorga, G. I., Buitimea-Cantúa, G. V., Buitimea-Cantúa, N. E., & Ochoa-Meza, A. (2020). Propagación y establecimiento de citronela (*Pelargonium graveolens*) bajo malla sombra. *Idesia (Arica)*, 38(4), 109-116. <https://dx.doi.org/10.4067/S0718-34292020000400109>
- CEDRSSA. (2020). Análisis de la producción y consumo de hortalizas. Centro de Estudios para el Desarrollo Rural Sustentable y la soberanía Alimentaria (pp. 3-6).
- Cortés, E., Gallardo V., Osorio, R., Castañeda, P., Hernández, M. (2020). Evaluación de la capacidad antioxidante y compuestos bioactivos de pimiento morrón (*Capsicum annuum* L.) de diferentes colores. *Investigación y Desarrollo en Ciencia y Tecnología de Alimentos*, 5, 139-144.
- De Ancos, B., González-Peña, D., Colina-Coca, C., & Sánchez-Moreno, C. (2015). Uso de películas/recubrimientos comestibles en los productos de IV y V gama. *Revista Iberoamericana de Tecnología Postcosecha*, 16(1), 8-17.
- Dussán-Sarria, S., Reyes-Calvache, P. y Hleap-Zapat, J. (2014). Efecto de un recubrimiento comestible y diferentes tipos de empaque en los atributos físico-

- químicos y sensoriales de piña `manzana` mínimamente procesada. *Información Tecnológica*, 25(5), 41-46. <https://doi.org/10.4067/S0718-07642014000500007>
- Estrella, V, Nipotti, J, Orive, M, & Fernández Bussy, R. (2015). La piel y sus nutrientes. *Revista Argentina de Dermatología* 96(2), 117-133.
- FAO. (2020). Frutas y verduras – esenciales en tu dieta. Año Internacional de las Frutas y Verduras, 2021. pp. 1-8. Documento de antecedentes. Roma. <https://doi.org/10.4060/cb2395es>
- Farhangi-Abriz S, Torabian S. (2018). Nano-silicon alters antioxidant activities of soybean seedlings under salt toxicity. *Protoplasma* 255(3): 953-962. <https://doi.org/10.1007/s00709-017-1202-0>.
- Fernández Valdés, D., Bautista Baños, S., Fernández Valdés, D., Ocampo Ramírez, A., García Pereira, A., & Falcón Rodríguez, A. (2015). Películas y recubrimientos comestibles: una alternativa favorable en la conservación poscosecha de frutas y hortalizas. *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias* 24(3), 52-57.
- Figueroa Cares, I. E., Martínez Damián, M. T., Rodríguez Pérez, J. E., Cruz Álvarez, O., Colinas León, M. T., Valle Guadarrama, S. & Ramírez Ramírez, S. P. (2015), Capacidad antioxidante en variedades de pimiento morrón (*Capsicum annum* L.). *Interciencia*, 40(10), 696-703.
- Fornaris, G. (2005). Conjunto Tecnológico para la Producción de Pimiento: Características de la Planta. Universidad de Puerto Rico Recinto Universitario de Mayagüez Colegio de Ciencias Agrícolas Estación Experimental Agrícola. <https://www.upr.edu/eea/wp-content/uploads/sites/17/2016/03/PIMIENTO-Character%C3%ADsticas-de-la-Planta-v2005.pdf>
- FreshPlaza. (2022). Resumen del mercado global del pimiento. Freshpublishers FreshPlaza, <https://www.freshplaza.es/article/9451394/resumen-del-mercado-global-del-pimiento/>
- Furcal-Berigüete, P., Herrera-Barrantes, A. (2013). Efecto del silicio y plaguicidas en la fertilidad del suelo y rendimiento del arroz. *Agronomía Mesoamericana*, 24(2), 365-378.
- García-Figueroa, A., Ayala-Aponte, A., y Sánchez-Tamayo, M. I. (2019). Efecto de recubrimientos comestibles de Aloe vera y alginato de sodio sobre la calidad

- poscosecha de fresa. *Revista U.D.C.A Actualidad & Divulgación Científica* 22(2): e1320.. <https://doi.org/10.31910/rudca.v22.n2.2019.1320>
- García-García, M., Toledo-Martín EM., González, A., Moya. M., Font, R., Gómez, P., Moreno-Rojas, J.M., Del Río-Celestino, M. (2014). Perfil físico-químico y nutricional de distintas tipologías de pimiento. Almería. Consejería de Agricultura, Pesca y Desarrollo Rural. Instituto de Investigación y Formación Agraria y Pesquera, pp. 1-28 p.
- González, M., Martínez, N., Meza, D., Rivera, M., Cadenas, G., Juárez, A. (2021). Las nanopartículas de SiO₂ mejoran la absorción de nutrientes en plantas de tomate desarrolladas en presencia de arsénico. *Revista Bio Ciencias*, 8. <https://doi.org/10.15741/revbio.08.e1084>
- Hernández-Fuentes, A. D., Campos Montiel, R., & Pinedo-Espinoza, J. M. (2010). Comportamiento poscosecha de pimiento morrón (*Capsicum annum* L.) var. california por efecto de la fertilización química y aplicación de lombrihumus. *Revista Iberoamericana de Tecnología Postcosecha* 11(1),82-91.
- Herrera Cebreros, J. M., Preciado Rodríguez, J. M., & Robles Parra, J. M. (2022). Impacto económico de las pérdidas poscosecha en los sistemas agrícolas: El sistema de uva de mesa. *Revista Iberoamericana de Tecnología Postcosecha*, 23(1), 2-17.
- INTAGRI. 2020. Cultivo de Chile en México. Serie Hortalizas, Núm. 21. Artículos Técnicos de INTAGRI. México. 6 p.
- Jo W. S., Hye Y. S., Song N. B., Lee J. H., Min S. C., Song K. B. (2014). Calidad y seguridad microbiana de las mazanas ‘Fuji’ recubiertas con carnauba cera laca que contiene aceite de hierba de limón. *LWT- Food Science and Technology*. 55:490-497.
- Juárez-Maldonado, A., Ortega-Ortiz, H., Morales-Díaz, B., González-Morales, S., Morelos-Moreno, A., Cabrera-De la Fuente, M., Sandoval-Rangel, A., Cardenas-Pliego, G., Benavidez-Mendoza, A. (2019). Nanopartículas y nanomateriales como bioestimulantes vegetales. *J. Mol. Sci*, 20 (1), 162. <https://doi.org/10.3390/ijms20010162>
- Lira Saldivar, R. H., Méndez Argüello, B., Santos Villarreal, G., & Vera Reyes, I. (2018). Potencial de la nanotecnología en la agricultura. *Acta Universitaria* 28 (2), 9-24. <https://doi.org/10.15174/au.2018.1575>

- Lira, R., Méndez, B., Vera, I., De los Santos I. (2017). Agronanotecnología: una nueva herramienta para la agricultura moderna. *Revista FCA UNCUYO*. 50 (2), 395-411. <https://doi.org/10.5555/20193435227>
- Lira-Saldivar, H., Méndez-Argüello, B., Vera-Reyes, I., de los Santos-Villareal, G. (2016). Potencial de la nanotecnología para el desarrollo de la agricultura sustentable. 2° Mini simposio-taller de agronano tecnología. Centro de Investigación en Química Aplicada (CIQA), Saltillo, Coahuila, México, pp. 20-41.
- López, R., Ortega, H., Cárdenas, G., De Alba, K., Cabrera, M., Benavides, A., Juárez, A. (2018). La aplicación foliar de nanopartículas de cobre aumenta la calidad del fruto y el contenido de compuestos bioactivos en tomate. *Ciencias Aplicadas* 8 (7), 1020. <https://doi.org/10.3390/app8071020>
- Madera-Santana, T. J., Toledo-López, V. M., Martinez-Robison, K., Rejón-Moo, V., & Fortiz-Hernández, J. (2023). Evaluación de películas comestibles de quitosano, agar y tomillo para mantener la calidad de frutos de aguacate ‘Hass’ durante su almacenamiento. *Biotechnia* 25(1), 116-125. <https://doi.org/10.18633/biotechnia.v25i1.1728>
- Medina M, Miguel E, Galván R, Luis E, & Reyes G, Rosa E. (2015). Las nanopartículas y el medio ambiente. *Universidad, Ciencia y Tecnología* 19(74), 49-58.
- Meléndez-Martínez, A. J., Vicario, I. M., & Heredia, F. J. (2004). Estabilidad de los pigmentos carotenoides en los alimentos. *Archivos Latinoamericanos de Nutrición* 54(2), 209-215.
- Mendoza, F., Lu, R. (2015). Conceptos básicos del análisis de imágenes. En: Park, B., Lu, R. (eds) *Tecnología de imágenes hiperespectrales en la alimentación y la agricultura*. Serie Ingeniería de Alimentos, pp 9-56. Springer, Nueva York, Nueva York. https://doi.org/10.1007/978-1-4939-2836-1_2
- Mendoza-Corvis, F. A., Arteaga-Márquez, M. R., & Pérez-Sierra, O. A. (2017). Degradación de la vitamina C en un producto de mango (*Mangifera indica* L.) y lactosuero. *Ciencia y Tecnología Agropecuaria* 18(1), 125-137. https://doi.org/10.21930/rcta.vol18_num1_art:563
- Mora Palma, R. M., Feregrino Pérez, A. A., & Contreras Padilla, M. (2021). Recubrimientos comestibles para extender la vida de anaquel de productos

- hortofrutícolas. *Ciencia Latina Revista Científica Multidisciplinar* 5(4), 4605-4625. https://doi.org/10.37811/cl_rcm.v5i4.644
- Morales-Díaz, A. B., Ortega-Ortiz, H., Juárez-Maldonado, A., Cardenas-Pliego, G., González-Morales, S., Benavides-Mendoza, A. (2017). Application of nanoelements in plant nutrition and its impact in ecosystems. *Vietnam Academy of Science & Technology* 8,1. <https://doi.org/10.1088/2043-6254/8/1/013001>
- Morales-Díaz, A. B., Juárez-Maldonado, A., Morelos-Moreno, Á., González-Morales, S., & Benavides-Mendoza, A. (2016). Biofabricación de nanopartículas de metales usando células vegetales o extractos de plantas. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas* 7(5), 1211-1224.
- Ordóñez-Santos, L. E., Ospina Portilla, M. A., & Rodríguez Rodríguez, D. X. (2013). Cinética de degradación térmica de vitamina C en frutos de guayaba (*Psidium guajava* L.). *Revista Lasallista de Investigación*, 10 (2),44-51.
- Palacio, A., Sánchez, E. (2017). Influencia de la variedad, portainjerto y época de cosecha en la calidad e índices de madurez en pimiento morrón. *Revista Electrónica Nova Scientia* 9 (2), 1-23.
- Paredes O, Adamary C., Peche B, Jennifer Y., & León R, Noemí. (2019). Índice de carotenoides de pimiento morrón (*Capsicum annuum*) basado en la medición de color, utilizando imágenes hiperespectrales y digitales. *Scientia Agropecuaria*, 10(4), 531-539. <https://dx.doi.org/10.17268/sci.agropecu.2019.04.10>
- Parra Terraza, S., Baca Castillo, G. A., Tirado Torres, J. L., Villarreal Romero, M., Sánchez Peña, P., & Hernández Verdugo, S. (2009). Calidad del fruto, composición y distribución de elementos minerales en pepino en respuesta a silicio y al potencial osmótico de la solución nutritiva. *Terra Latinoamericana* 27(2), 123-131.
- Penchaiya, P., Bobelyn, E., Verlinden, B. E., Nicolaï, B. M., Saeys, W. (2009). Non-destructive measurement of firmness and soluble solids content in bell pepper using NIR spectroscopy. *Journal of Food Engineering* 94(3 y 4), 267-273. <https://dx.doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2009.03.018>
- Pinedo-Guerrero Z. H., Hernández-Fuentes A. D., Ortega-Ortiz H., Benavides-Mendoza A, Cadenas-Pliego G., Juárez-Maldonado A. A. (2017). Cu nanoparticles in hydrogels of chitosan-PVA affects the characteristics of post-harvest and bioactive

- compounds of jalapeño pepper. *Molecules* 22(6):926.
<https://dx.doi.org/10.3390/molecules22060926>
- Quipo-Muñoz, F. E., Ramírez-Muñoz, Á. M., Rojas-Pérez, J. A., & Ordoñez-Santos, L. E. (2013). Cambios en la vitamina C y el color durante la cocción del pimentón verde (*Capsicum annuum* L). *TecnoLógicas* (31), 141-150.
- Raya Pérez, J. C., Aguirre Mancilla, C. L. (2012). El papel del silicio en los organismos y ecosistemas. *Conciencia Tecnológica*, (43), 42-46.
- Reche-Mármol, J. (2010). Cultivo del Pimiento Dulce en Invernadero. Junta de Andalucía. Consejería de Agricultura y Pesca, Servicio de Publicaciones y Divulgación. Sevilla, España. pp. 27-28.
- Rivas-Ramírez L. k., Torres-Pacheco, I. (2021). Nanopartículas: nuevas aliadas de la agricultura. *Digital Ciencia@UAQRO*, 14 (2), 19-27.
- Robles-Sánchez, R. M., Rojas-Graü, M. A., Odriozola-Serrano, I., González-Aguilar, G., & Martín-Belloso, O. (2013). Influence of alginate-based edible coating as carrier of antibrowning agents on bioactive compounds and antioxidant activity in fresh-cut Kent mangoes. *LWT-Food Science and Technology* 50(1), 240-246.
<https://doi.org/10.1016/j.lwt.2012.05.021>
- Rodríguez Quintanilla, R., Ruiz Nova, C., Arias Moyano, G., Castro Salazar, H., Martínez, J., & Stashenko, E. (2012). Estudio comparativo de la composición de los aceites esenciales de cuatro especies del género *Cymbopogon* (Poaceae) cultivadas en Colombia. *Boletín Latinoamericano y del Caribe de Plantas Medicinales y Aromáticas* 11 (1),77-85.
- Sellamuthu, P. S., Mafune, M, Sivakumar, D, Soundy, P. (2013). Thyme oil vapour and modified atmosphere packaging reduce anthracnose incidence and maintain fruit quality in avocado. *J Sci Food Agric.* 93(12): 3024-31.
<https://doi.org/10.1002/jsfa.6135>
- Solano-Doblado, L. G., Alamilla-Beltrán, L., & Jiménez-Martínez, C. (2018). Películas y recubrimientos comestibles funcionalizados. *TIP. Revista Especializada en Ciencias Químico-Biológicas*, 21(Supl. 2), 30-42, e20180153.
<https://doi.org/10.22201/fesz.23958723e.2018.0.153>

- Staller Gränicher, M. (2012) Caracterización morfológica, agronómica y de calidad delpimiento y pimentón de la variedad Tap de Cortí. Universidad de Islas Baleares-Consejería de Agricultura, Pesca y Medio Natural. Isla Baleares, España. pp. 15-22.
- Steiner A. A. 1961. A universal method for preparing nutrient solutions of a certain desired composition. *Plant Soil* 15, 134-154
- Torres, R., Montes, E. J, Pérez, O. A, & Andrade, R. D. (2013). Relación del color y del estado de madurez con las propiedades fisicoquímicas de frutas tropicales. *Información Tecnológica* 24(3), 51-56. <https://dx.doi.org/10.4067/S0718-07642013000300007>
- Valencia-Chamorro, S., & Torres-Morales, J. (2016). Recubrimientos comestibles aplicados en productos de IV y V gamma. *Revista Iberoamericana de Tecnología Postcosecha* 17 (2), 162-174.
- Yang J, Cao W, Rui Y. 2017. Interactions between nanoparticles and plants: phytotoxicity and defense mechanisms. *Journal of Plant Interactions*, 12(1), 158-169.
- Zaccari, F., Puerto, M., Vignale, B., & Pritsch, C.. (2017). Parámetros colorimétricos y contenido de pigmentos en cinco colores de cáscara de fruto de guayabo [*Acca sellowiana* (Berg) Burret]. *Agrociencia (Uruguay)* 21(2), 23-30.