

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO
SUBDIRECCIÓN DE POSTGRADO



EFFECTO DE LA APLICACIÓN PRE Y POSCOSECHA DE NANOPARTÍCULAS
DE SILICIO Y SILICATO DE POTASIO EN LOS COMPUESTOS BIOACTIVOS
DE FRUTOS DE PEPINO

TESIS

Que presenta VALERIA FLORES ROBLES

Como requisito parcial para obtener el Grado de:

MAESTRO EN CIENCIAS EN HORTICULTURA

Saltillo, Coahuila

Septiembre 2019

EFFECTO DE LA APLICACIÓN PRE Y POSCOSECHA DE NANOPARTÍCULAS
DE SILICIO Y SILICATO DE POTASIO EN LOS COMPUESTOS BIOACTIVOS
DE FRUTOS DE PEPINO

Tesis

Elaborada por VALERIA FLORES ROBLES 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
Asesor Principal

Dr. Antonio Juárez Maldonado
Asesor

Dr. Adalberto Benavides Mendoza
Asesor

Dra. Susana González Morales
Asesor

Dr. Gregorio Cadenas Pliego
Asesor

Dr. Marcelino Cabrera De la Fuente
Subdirector de Postgrado UAAAN

AGRADECIMIENTOS

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología por el apoyo económico para realizar mis estudios de posgrado.

A la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro por haberme abierto sus puertas.

Al programa de la Maestría en Ciencias en Horticultura.

Al Dr. Antonio Juárez Maldonado por brindarme todo su apoyo, asesoría y tiempo para el desarrollo de este trabajo.

Al Dr. Álvaro Morelos Moreno por brindarme todo su apoyo, asesoría y tiempo para el desarrollo de este trabajo.

Al Dr. Adalberto Benavides Mendoza por su tiempo y asesoría.

A la Dr. Gregorio Cadenas Pliego por su apoyo, tiempo y asesoría.

A la Dra. Susana Gonzales Morales por su tiempo y asesoría.

A todos los profesores del programa de la Maestría en Ciencias en Horticultura por sus enseñanzas y orientación durante mi estancia en la Maestría.

A todos los compañeros y trabajadores que colaboraron para el desarrollo de este trabajo.

DEDICATORIAS

A mi esposo Zeus que estuvo a mi lado, apoyándome, enseñándome y dándome la mano cuando el horizonte se tornaba algo oscuro, gracias por enseñarme que en esta vida nada es imposible si lo anhelamos desde lo profundo de nuestro ser y tenemos a nuestro lado a las personas correctas durante este camino.

A mis padres y hermanos por su apoyo incondicional, cariño y amor que a pesar de la distancia me daban la energía para el día a día, por enseñarme a cumplir mis metas en esta vida y no flaquear pesar de lo difícil que las cosas pueden parecer en ocasiones. Gracias por levantarme cuando he caído y por sentarse a mi lado cuando lo único que necesitaba era respirar, gracias por eso y más los amo.

ÍNDICE GENERAL

AGRADECIMIENTOS.....	iii
DEDICATORIAS.....	iv
RESUMEN.....	xi
ABSTRACT.....	xiii
INTRODUCCIÓN.....	1
OBJETIVOS.....	2
Objetivo General.....	2
Objetivos específicos.....	2
HIPÓTESIS.....	3
REVISIÓN DE LITERATURA.....	4
El cultivo de pepino.....	4
Morfología del pepino.....	5
Importancia nutraceutica del pepino.....	6
Silicio.....	6
Silicio en la planta.....	7
Nanotecnología.....	8
Fisiología de la poscosecha.....	10
Radicales libres.....	12
Antioxidantes.....	14
Mecanismos de reacción de los antioxidantes.....	15
MATERIALES Y MÉTODOS.....	16
Desarrollo experimental y almacenamiento de frutos.....	16
Variables de calidad de los frutos de pepino.....	17
Compuestos Bioactivos y Capacidad Antioxidante.....	17
Análisis enzimáticos.....	19
Análisis estadístico.....	23
RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	24
Calidad de frutos.....	24
Compuestos bioactivos y capacidad antioxidante.....	30
Actividad enzimática.....	41

CONCLUSIONES 49
REFERENCIAS 50

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Concentración de sólidos Solubles Totales a los 0, 5 y 10 días de almacenamiento en frutos de pepino tratados con NP's de Si y silicato de K en precosecha (a) y poscosecha (b). Letras iguales sobre las barras dentro del mismo día de almacenamiento son estadísticamente iguales de acuerdo a la prueba de LSD Fisher ($P > 0.05$). Cada dato es la media de seis repeticiones y el error estándar..... 25

Figura 2. Acidez titulable a los 0, 5 y 10 días de almacenamiento en frutos de pepino tratados con NP's de Si y silicato de K en precosecha (a) y poscosecha (b). Letras iguales sobre las barras dentro del mismo día de almacenamiento son estadísticamente iguales de acuerdo a la prueba de LSD Fisher ($P > 0.05$). Cada dato es la media de seis repeticiones y el error estándar. 26

Figura 3. Concentración de Vitamina C a los 0, 5 y 10 días de almacenamiento en frutos de pepino tratados con NP's de Si y silicato de K en precosecha (a) y poscosecha (b). Letras iguales sobre las barras dentro del mismo día de almacenamiento son estadísticamente iguales de acuerdo a la prueba de LSD Fisher ($P > 0.05$). Cada dato es la media de seis repeticiones y el error estándar..... 31

Figura 4. Firmeza a los 0, 5 y 10 días de almacenamiento en frutos de pepino tratados con NP's de Si y silicato de K en precosecha (a) y poscosecha (b). Letras iguales sobre las barras dentro del mismo día de almacenamiento son estadísticamente iguales de acuerdo a la prueba de LSD Fisher ($P > 0.05$). Cada dato es la media de seis repeticiones y el error estándar. 27

Figura 5. pH a los 0, 5 y 10 días de almacenamiento en frutos de pepino tratados con NP's de Si y silicato de K en precosecha (a) y poscosecha (b). Letras iguales sobre las barras dentro del mismo día de almacenamiento son

estadísticamente iguales de acuerdo a la prueba de LSD Fisher ($P > 0.05$). Cada dato es la media de seis repeticiones y el error estándar. 29

Figura 6. Pérdida de peso fresco a los 0, 5 y 10 días de almacenamiento en frutos de pepino tratados con NP's de Si y silicato de K en precosecha (a) y poscosecha (b). Letras iguales sobre las barras dentro del mismo día de almacenamiento son estadísticamente iguales de acuerdo a la prueba de LSD Fisher ($P > 0.05$). Cada dato es la media de seis repeticiones y el error estándar..... 30

Figura 7. Concentración de Fenoles a los 0, 5 y 10 días de almacenamiento en frutos de pepino tratados con NP's de Si y silicato de K en precosecha (a) y poscosecha (b). Letras iguales sobre las barras dentro del mismo día de almacenamiento son estadísticamente iguales de acuerdo a la prueba de LSD Fisher ($P > 0.05$). Cada dato es la media de seis repeticiones y el error estándar..... 33

Figura 8. Concentración de Flavonoides a los 0, 5 y 10 días de almacenamiento en frutos de pepino tratados con NP's de Si y silicato de K en precosecha (a) y poscosecha (b). Letras iguales sobre las barras dentro del mismo día de almacenamiento son estadísticamente iguales de acuerdo a la prueba de LSD Fisher ($P > 0.05$). Cada dato es la media de seis repeticiones y el error estándar..... 34

Figura 9. Capacidad antioxidante ABTS y DPPH de compuestos hidrofílicos (H) y lipofílicos (L) a los 0, 5 y 10 días de almacenamiento en frutos de pepino tratados con NP's de Si y silicato de K en precosecha (a) y poscosecha (b). Letras iguales sobre las barras dentro del mismo día de almacenamiento son

estadísticamente iguales de acuerdo a la prueba de LSD Fisher ($P > 0.05$). Cada dato es la media de seis repeticiones y el error estándar. 41

Figura 10. Concentración de la actividad enzimática Catalasa a los 0, 5 y 10 días de almacenamiento en frutos de pepino tratados con NP's de Si y silicato de K en precosecha (a) y poscosecha (b). Letras iguales sobre las barras dentro del mismo día de almacenamiento son estadísticamente iguales de acuerdo a la prueba de LSD Fisher ($P > 0.05$). Cada dato es la media de seis repeticiones y el error estándar..... 42

Figura 11. Concentración de la actividad enzimática Ascorbato Peroxidasa a los 0, 5 y 10 días de almacenamiento en frutos de pepino tratados con NP's de Si y silicato de K en precosecha (a) y poscosecha (b). Letras iguales sobre las barras dentro del mismo día de almacenamiento son estadísticamente iguales de acuerdo a la prueba de LSD Fisher ($P > 0.05$). Cada dato es la media de seis repeticiones y el error estándar. 44

Figura 12. Concentración de glutatión reducido a los 0, 5 y 10 días de almacenamiento en frutos de pepino tratados con NP's de Si y silicato de K en precosecha (a) y poscosecha (b). Letras iguales sobre las barras dentro del mismo día de almacenamiento son estadísticamente iguales de acuerdo a la prueba de LSD Fisher ($P > 0.05$). Cada dato es la media de seis repeticiones y el error estándar..... 36

Figura 13. Concentración de la actividad enzimática glutatión peroxidasa a los 0, 5 y 10 días de almacenamiento en frutos de pepino tratados con NP's de Si y silicato de K en precosecha (a) y poscosecha (b). Letras iguales sobre las barras dentro del mismo día de almacenamiento son estadísticamente iguales

de acuerdo a la prueba de LSD Fisher ($P > 0.05$). Cada dato es la media de seis repeticiones y el error estándar. 45

Figura 14. Concentración de la actividad enzimática superóxido dismutasa a los 0, 5 y 10 días de almacenamiento en frutos de pepino tratados con NP's de Si y silicato de K en precosecha (a) y poscosecha (b). Letras iguales sobre las barras dentro del mismo día de almacenamiento son estadísticamente iguales de acuerdo a la prueba de LSD Fisher ($P > 0.05$). Cada dato es la media de seis repeticiones y el error estándar. 46

Figura 15. Concentración de la actividad enzimática Fenilalanina Amonio Liasa a los 0, 5 y 10 días de almacenamiento en frutos de pepino tratados con NP's de Si y silicato de K en precosecha (a) y poscosecha (b). Letras iguales sobre las barras dentro del mismo día de almacenamiento son estadísticamente iguales de acuerdo a la prueba de LSD Fisher ($P > 0.05$). Cada dato es la media de seis repeticiones y el error estándar. 48

RESUMEN

EFFECTO DE LA APLICACIÓN PRE Y POSCOSECHA DE NANOPARTÍCULAS
DE SILICIO Y SILICATO DE POTASIO EN LOS COMPUESTOS BIOACTIVOS
DE FRUTOS DE PEPINO

POR

VALERIA FLORES ROBLES
MAESTRÍA EN CIENCIAS EN HORTICULTURA

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO
DR. ALVARO MORELOS MORENO - ASESOR

Saltillo, Coahuila

Septiembre, 2019

El pepino (*Cucumis sativus* L.) es uno de los cultivos más comúnmente producidos bajo agricultura protegida. Sin embargo, después de la cosecha se da un deterioro de la calidad en los frutos. Por ello se contempla el uso de silicio y nanotecnología ya que han mostrado aumentos en la calidad de frutos, actividad antioxidante y el contenido de compuestos bioactivos durante la vida poscosecha. El objetivo de este trabajo fue evaluar la aplicación de Silicato de potasio y nanopartículas de Si a concentraciones de 125, 250 y 500 mg/L, en la pre y poscosecha de frutos de pepino, a partir de las variables de SST, pH, firmeza, AT, Vitamina C, fenoles totales, flavonoides totales, glutatión, actividad antioxidante para compuestos hidrofílicos y lipofílicos por ABTS y DPPH, así como la actividad enzimática de CAT, APX, GPX, SOD y PAL. Encontrándose que en la aplicación poscosecha el tratamiento ASi 500 mostró aumentos en las variables fenoles, flavonoides, GPX (7.5, 7.5 y 118 % respectivamente) mayor que el control así como un aumento en la actividad enzimática de CAT, el tratamiento NP Si 250 también mostró un aumento en la actividad del GSH y un aumento en los SST de 8.6 mayor que el control. Mientras que en la aplicación precosecha el tratamiento NP Si 250 mostró aumentos en la acidez, vitamina C, fenoles y flavonoides un 38.8, 70, 15.1 y 64.5 respectivamente.

Palabras clave: Silicio, nano partículas de silicio, pepino, compuestos bioactivos, poscosecha

ABSTRACT

EFFECT OF THE APPLICATION PRE AND POSTHARVEST OF SILICON
NANOPARTICLES AND POTASSIUM SILICATE IN THE BIOACTIVE
COMPOUNDS OF CUCUMBER FRUITS

BY

VALERIA FLORES ROBLES
MASTER OF SCIENCE OF HORTICULTURE

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO
DR. ALVARO MORELOS MORENO - ADVISOR

Saltillo, Coahuila

September, 2019

The cucumber (*Cucumis sativus* L.) is one of the most commonly grown crops under protected agriculture. However, after harvest there is a deterioration of the quality of the fruits. Therefore, the use of silicon and nanotechnology is contemplated since they have shown increases in fruit quality, antioxidant activity and the content of bioactive compounds during the post-harvest life. The objective of this work was to evaluate the application of potassium silicate and nanoparticles of Si at concentrations of 125, 250 and 500 mg / L, in the pre and post harvest of cucumber fruits, based on the variables of SST, pH, firmness, AT, Vitamin C, total phenols, total flavonoids, GSH, antioxidant activity for hydrophilic and lipophilic compounds by ABTS and DPPH, as well as the enzymatic activity of CAT, APX, GPX, SOD and PAL. Being in the post-harvest application the ASi 500 treatment showed increases in the variables phenols, flavonoids, GPX (7.5, 7.5 and 118% respectively) greater than the control as well as an increase in the enzymatic activity of CAT, the NP Si 250 treatment also showed an increase in GSH activity and an increase in OSH of 8.6 greater than the control. While in the pre-harvest application the NP Si 250 treatment showed increases in acidity, vitamin C, phenols and flavonoids a 38.8, 70, 15.1 and 64.5 respectively.

Keywords:

Silicon, silicon nano particles, cucumber, bioactive compounds, postharvest

INTRODUCCIÓN

México es el segundo exportador mundial de pepino y el primer proveedor del mercado de Estados Unidos, principalmente en la época de invierno, cuando se produce esta hortaliza en invernaderos y se aumenta significativamente el rendimiento, desde 25-50 t·ha⁻¹ (campo abierto) hasta 80-180 t·ha⁻¹ en agricultura protegida (AP) (INTAGRI 2012). El pepino (*Cucumis sativus* L.) es uno de los cultivos más comúnmente producidos bajo AP, ya que las condiciones de ambiente controlado permiten incrementar los rendimientos, la calidad y la seguridad. Además, el valor del pepino también radica en su forma de consumo, ya que puede consumirse fresco como fruto y ensalada o procesado (USDA, 2018). Un uso medicinal del fruto de pepino es que mejora la digestión y elimina el estreñimiento (Rahman y Anisuzzaman 2008). Sin embargo, después de la cosecha se da un deterioro de la calidad ya que los frutos son tejidos vivos y continúan con sus procesos biológicos, como latencia, transpiración y respiración (Romanazzi *et al.*, 2016; Sanzani *et al.*, 2016).

El silicio (Si) es el segundo elemento más abundante tanto en la superficie de la corteza terrestre como en los suelos. El Si está presente como ácido silícico en la solución del suelo en concentraciones entre 0.1 y 0.6 mM, sin embargo, el Si solo puede ser absorbido por la planta en forma de ácido monosilícico (Epstein 2009). El Si puede estar involucrado en la actividad metabólica, fisiológica y/o estructural en plantas superiores expuestas a estrés biótico y abiótico (Shen *et al.*, 2010). Durante la poscosecha se ha encontrado que aumenta la calidad en vegetales como fresa y lechuga (Galati *et al.*, 2015; Silva *et al.*, 2013).

La nanotecnología puede revolucionar la cadena alimentaria, desde la producción hasta el procesamiento y almacenamiento de hortalizas y otros productos durante la poscosecha (He *et al.*, 2011). La nanotecnología permite incrementar el rendimiento en los cultivos, el valor nutricional, la calidad de frutos, la actividad antioxidante y el valor en el mercado de los productos (Fu *et al.*, 2014). La nanociencia se define como la investigación y el desarrollo tecnológico a partir del uso de átomos, moléculas o macromoléculas en una

escala de 1 a 100 nm. Las nanopartículas (NP) tienen efectos estimulantes para inducir compuestos antioxidantes (Fu *et al.* 2014). . Las NP pueden atravesar las paredes celulares (Juárez-Maldonado *et al.*, 2016) de varias maneras: endocitosis, formación de poros, proteínas portadoras o a través de plasmodesmos (Zuverza-Mena *et al.*, 2017). Las NP estimulan la formación de especies reactivas de oxígeno (ROS), que a su vez activa el sistema de defensa de la planta, y genera compuestos antioxidantes enzimáticos y no enzimáticos (Fu *et al.*, 2014). Este estrés puede modificar directamente la calidad de los frutos, especialmente el contenido de compuestos bioactivos durante la vida poscosecha (Hernández-Fuentes *et al.*, 2017). Sin embargo la aplicación convencional de las NP es durante la precosecha, y no se dispone información de aplicaciones después de la cosecha. Por lo tanto el objetivo del trabajo es evaluar el comportamiento poscosecha de frutos de pepino tratados con Si iónico y NP de Si en aplicaciones pre y poscosecha.

OBJETIVOS

Objetivo General

Evaluar el comportamiento poscosecha de frutos de pepino tratados con nanopartículas de silicio y silicato de potasio en aplicaciones pre y poscosecha

Objetivos específicos

- Determinar la calidad de frutos de pepino tratados con Si y NP's de Si pre y pos cosecha.
- Evaluar los compuestos bioactivos de frutos de pepino tratados con Si y NP's de Si pre y pos cosecha.
- Determinar la capacidad antioxidante en frutos de pepino tratados con Si y NP's de Si pre y pos cosecha.
- Evaluar el metabolismo antioxidante enzimático en frutos de pepino tratados con Si y NP's de Si pre y pos cosecha.

HIPÓTESIS

La aplicación de nanopartículas de Silicio y Silicato de Potasio modificará la acumulación de los compuestos bioactivos y su comportamiento poscosecha.

REVISIÓN DE LITERATURA

El cultivo de pepino

El pepino (*Cucumis sativus* L.) es una de las hortalizas cucurbitáceas más conocidas, se cultiva en casi todo el mundo principalmente para consumo de sus frutos no climatéricos en estado inmaduro. El pepino es originario de las regiones tropicales del Sur de Asia, siendo cultivado en la India desde hace más de 3,000 años. Aparecen registros de este cultivo en Norteamérica a mediados del siglo XVI, ya que Cristóbal Colón llevó semillas a América (Gordón, 1992).

Los frutos de pepino por cada 100 g de parte comestible contienen agua (96,7%) y pocas calorías (9); vitamina A (20 UI), vitamina B1 (0.02 mg), vitamina B2 (0.02 mg), vitamina B3 (0.1 mg), vitamina C (8 mg), y minerales como Ca (7 mg), K (147 mg), Fe (0.3 mg), P (30 mg) y Mg (13 mg) (Caicedo, 1993; Tsuchida *et al.*, 2010; Kazemi, 2013).

El consumo del pepino lo ubica como la cuarta hortaliza más importante del mundo, después del tomate (*Solanum lycopersicum* L.), papa (*Solanum tuberosum*), repollo (*Brassica oleracea* L. var. capitata) y cebolla (*Allium cepa* L.). El pepino se consume tanto en estado fresco como procesado (pepinillos o "pickles"), también tiene amplio uso en cosmetología y salud, en la fabricación de jabones, cremas y productos que aprovechan sus propiedades como emoliente, diurético, depurativo, laxante y calmante, así como sus efectos en tratamientos de aclaramiento de la piel y manchas, reducción de ojeras y nutrición del cuero cabelludo (Qureshi *et al.*, 2010; Abu *et al.*, 2013). A nivel mundial Asia provee el 89.7% de la producción mundial de pepino, mientras que América el 2.9 % en la cual destaca México con un área cosechada de 20,180 ha y una producción total de 956,005 toneladas (FAOSTAT, 2017), ubicándose en el octavo lugar en producción mundial de pepino. En los últimos dos años la exportación de pepino creció un 8.1%, principalmente a Canadá, Estados Unidos, y Costa Rica, lo que generó al país ingresos por 243 millones de dólares (Seminis 2018).

La implementación de la producción hortícola en invernadero disminuye el riesgo de pérdida de la producción, incrementa la rentabilidad del sector productivo, disminuye la contaminación ambiental y los daños a la salud, y genera fuentes de trabajo (Grijalva y Robles, 2003).

Morfología del pepino

La planta del pepino (*Cucumis sativus* L.) consta de un sistema radicular muy potente el cual se ramifica muy rápidamente para dar raíces secundarias y una cantidad muy abundante de pelos absorbentes muy finos y alargados de color blanco. Puede alcanzar hasta los 1.2 m de longitud, se ramifica principalmente en los primeros 25 a 30 cm (Ojeda 2011).

El tallo de crecimiento indeterminado es espinoso, flexible, de sección angular, cubierto de pelos, de porte rastrero y trepador. De cada uno de los nudos parte una hoja y un sarcillo en el lado opuesto a la hoja, en la axila de cada una de las hojas se emite un brote lateral y una o varias flores (Zamudio y Félix 2014). Las hojas son pecioladas de bordes suavemente dentadas, recubiertas de una vellosidad fina, de tacto áspero sobre todo en las hojas viejas y con nervios muy pronunciados por el envés. Las hojas son de color verde claro cuando son jóvenes y de un tono más oscuro y quebradizas cuando son viejas (Reche, 2011).

Las flores pueden ser hermafroditas, en la mayoría de los casos son unisexuales. Son gamopétalas y con peciolo corto, con corola de 3-4 cm de diámetro que presenta simetría radial y cinco pétalos de color amarillo. El cáliz es dialisépalo y deciduo, formado por cinco sépalos puntiagudos. Las flores femeninas se presentan en muchos casos solitarias y dispuestas sobre ramas secundarias, aunque en ocasiones pueden aparecer agrupadas u observarse en el tallo principal. Son fácilmente reconocibles por la presencia de un ovario ínfero fusiforme. Las flores masculinas poseen pedúnculos muy delgados. Los estambres, que no se aprecian con claridad, tienen soldadas sus anteras (sinentéreos) y están integrados en la base de la corola. Aparecen solitarias o

en grupos de 2-3 flores, surgiendo inicialmente en el tallo principal y más tarde, a medida que se desarrolla la planta, en las ramificaciones (Reche, 2011).

El fruto es una pepónide áspera o lisa según la variedad, que cambia desde un color verde claro, pasando por un verde oscuro hasta alcanzar un color amarillento cuando está totalmente maduro, aunque su recolección es realizada antes de que este alcance su madurez fisiológica. Su pulpa es acuosa, de color blanquecino, con semillas en su interior que se encuentran a lo largo del fruto. Las semillas son ovales y algo aplastadas de color blanco amarillento (Casaca, 2005).

Importancia nutracéutica del pepino

Boscheco (2008) reportó en el extracto alcohólico de los frutos de (*Cucumis anguria* L.), la presencia de algunos metabolitos secundarios como heterósidos, flavonoides, fenoles, esteroides, triterpenos, y taninos, mientras que en el extracto acuoso encontró actividad antioxidante en un 6% debido a la presencia en los frutos de ácido ascórbico, a una concentración de 43.9 mg L⁻¹ confiriéndole así su actividad eliminadora de radicales libres. Por ello, desempeñan un papel esencial en la protección frente a los fenómenos de daños oxidativos, y tienen efectos terapéuticos en un elevado número de patologías, incluyendo la cardiopatía isquémica, la arteriosclerosis o el cáncer (Pace-Asciak et al., 1995).

Silicio

El silicio (Si) es el segundo elemento más abundante en la litosfera (27.7%), solo detrás del oxígeno (O₂) (47,4%). Los compuestos de Si constituyen más del 60% de los compuestos del suelo y su concentración en forma soluble, como ácido silícico, está entre 35 y 40 mg L⁻¹ (0.1 a 0.6 mM) (Epstein, 1999; Ma et al., 2004; Fauteux et al., 2005). A pesar de ser el segundo elemento más abundante en la litosfera, el Si se combina con el O₂ para formar silicatos insolubles en agua o redes de polímeros de dióxido de Si (cuarzo), y tiende a salir de la circulación en un ambiente aeróbico. La forma más abundante de Si

en la corteza terrestre, se intemperiza tan lentamente que no es una fuente apreciable de ácido silícico para la biota (Exley, 1998). La solubilidad del silicio, está influenciada por varios factores como: pH, temperatura, potencial redox, contenido de materia orgánica, tamaño de partículas y principalmente su composición química (Cotton *et al.*, 1998).

El dióxido de silicio (sílice) (SiO_2) se asocia con otros elementos, por ejemplo con K y Na, formando silicatos de potasio y sodio solubles en agua (Matichenkov, 2004).

En los ecosistemas terrestres, el ciclo biogeoquímico del Si es más intenso que el ciclo del fósforo y del potasio. Las raíces liberan enzimas (“silicazas y silicateinas”) y compuestos orgánicos (ácido cítrico y protones hidrógeno) que solubilizan el Si presente en las arcillas, que provienen de las rocas y minerales cuando son intemperizados por las condiciones del medio ambiente como lluvia, temperatura, viento, y las acciones mecánicas del manejo de suelos. Por lo que las raíces con alta capacidad de extraer Si del suelo promoverán el mejor desarrollo de la planta (Pautot, 1991).

Silicio en la planta

El Si no es considerado como un elemento esencial para las plantas, lo que ha hecho que este elemento no sea incluido en las formulaciones de uso rutinario. Sin embargo existen evidencias de que las plantas en las que existe carencia de Si frecuentemente son más débiles y su crecimiento, desarrollo, viabilidad y reproducción es anormal, son más susceptibles al estrés abióticos, como toxicidad por metales, son fácilmente invadidas por microorganismos patógenos, insectos fitófagos y mamíferos herbívoros, todo esto se puede ver en plantas que crecen en suelos deficientes en Si (Matichenkov, 2004).

El Si forma agregados insolubles (fitolitos) y solubles (polímeros del ácido ortocilísico), entrelazados con la celulosa y componentes de la pared celular, haciéndolas resistentes y flexibles, el tejido epidérmico está recubierto de la cutina o cutícula que es una capa externa impermeable, traslúcida que protege a la planta de las acciones del agua, del aire y de microorganismos (Quero,

2007). Tiene una acción dinámica en la relación suelo-agua-planta, este elemento es removido del suelo en grandes cantidades, se encuentra presente en forma soluble y sólida dentro de los tejidos de las plantas, especialmente en las células que forman el tejido tegumentario. El tejido tegumentario comprende el tejido epidérmico y suberoso (Aguirre *et al.*, 2007). Las funciones fisiológicas del Si incluyen la reducción de la evapotranspiración, aumentando el suministro de oxígeno de la raíz mediante el fortalecimiento de las paredes de canales de aire (Jiménez, 2008).

El Si controla el desarrollo del sistema radicular, la asimilación y distribución de nutrientes minerales, proporciona resistencia contra el estrés biótico (insectos y enfermedades) y abiótico (alta y baja temperatura, viento, alta concentración de sales y metales pesados, hidrocarburos, aluminio, etc.), esta es atribuida a la modificación de las propiedades de la pared celular (Legrand, 1990; Perry, 2000).

Nanotecnología

La nanotecnología es un término usado para identificar la tecnología en el campo nano, donde la escala nano es usualmente de 1 a 100 nm (Bernard-Mantel *et al.*, 2010; Wickson *et al.*, 2010). La primera idea de la nanotecnología apareció en 1959 (donde la tecnología aún no se identificaba con algún nombre en específico). Richard Feynman propuso la idea de que “Hay un montón de espacio en el fondo”, en esta hipótesis Feynman argumenta que en el futuro cercano las moléculas y átomos pueden ser directamente manipulados. La palabra “nanotecnología” primero vino a la existencia por el Profesor Norio Taniguchi en 1974, quien usó la palabra para materiales precisos con alta tolerancia en los límites nanométricos (Quandt y Ozdugan, 2010; Grimes y Kobrin, 2008). Un nanómetro es una mil millonésima parte de un metro (10^{-9} m), alrededor de cien mil veces más pequeño que el diámetro de un pelo humano, mil veces más pequeño que un glóbulo rojo, alrededor de la mitad del diámetro del ADN (Neuman, 2010).

La nanotecnología es un área en crecimiento donde la manufacturación de nano partículas puede ser controlada en el tamaño, forma y distribución (Nadagouda *et al.*, 2009). La investigación de las nano partículas (NP's) es actualmente un área de interés científico intenso impulsada por el deseo de fabricar materiales con propiedades nuevas y mejoradas debido a una amplia variedad de aplicaciones potenciales en las áreas de las ciencias físicas, químicas, biológicas y de la salud y otros campos interdisciplinarios de la ciencia y la ingeniería (Ghosh y Pal, 2007; Taylor *et al.*, 2013). La nanotecnología permite la investigación avanzada en muchas áreas, y los descubrimientos nanotecnológicos podrían abrir nuevas aplicaciones en el campo de la biotecnología y la agricultura. En el campo de la electrónica, la energía, la medicina y las ciencias de la vida, la nanotecnología ofrece una investigación en expansión, como la ciencia y la tecnología reproductiva, la conversión de productos agrícolas y alimentarios. La nanotecnología ha creado grandes expectativas para el desarrollo de nuevos productos y aplicaciones en una amplia gama de sectores industriales y de consumo. Se espera que se revolucione toda la cadena alimentaria, desde la producción hasta el procesamiento y almacenamiento de hortalizas y otros productos durante postcosecha (Carmen *et al.*, 2003; Nair *et al.*, 2010; Lili *et al.*, 2011).

La nanotecnología puede incrementar el rendimiento en los cultivos, el valor nutricional y el valor de los productos (Misra *et al.*, 2013), provee nuevas formas para resolver problemas relacionados a las plantas así como para incrementar la calidad de los alimentos (Sharon *et al.*, 2010).

En la nanotecnología, una partícula es definida como objeto pequeño que se comporta como una unidad entera en cuanto a su transporte y propiedades, sin embargo, el diámetro de la partícula es una variable usada para clasificar esas partículas. Las partículas gruesas son aquellas que cubren un rango de 10,000 a 2,500 nm, partículas finas son aquellas que cubren un rango de 2,500 a 100 nm y nano partículas (NP's) (o partículas ultra finas) son aquellas que van de 1 a 100 nm, que se pueden dispersar en medios gaseosos, líquidos o sólidos (Ghosh y Pal, 2007; Buzea *et al.*, 2007). Debido a sus propiedades físicas y

químicas, los nanomateriales han sido estudio en varios campos de la ciencia y la ingeniería (Ghormade *et al.*, 2011; Cheng y wang, 2011).

Fisiología de la poscosecha

El ablandamiento de los frutos es una serie de eventos genéticamente programados, caracterizados por procesos bioquímicos y fisiológicos que alteran su firmeza, color, sabor y textura (Nishiyama *et al.*, 2007). Los frutos son productos altamente perecederos debido a su arquitectura celular y la intensa actividad metabólica (Dos Santos *et al.*, 2015). Algunos procesos de deterioro causan a los agricultores pérdidas de hasta 40% del valor de la cosecha antes de que lleguen al consumidor (Kitinoja *et al.*, 2011).

El desarrollo del fruto ocurre en tres etapas: crecimiento, desarrollo y maduración, seguidas por el ablandamiento y la senescencia (Alba *et al.*, 2005). En las etapas finales del crecimiento y el desarrollo, ocurre el proceso de maduración en dos pasos: la madurez fisiológica, es cuando el fruto alcanza su máximo tamaño y el mayor vigor de las semillas; y segundo, la madurez de consumo. Aquí los cambios del fruto incluyen 1) la modificación del color a través de la alteración en el contenido de clorofilas, carotenoides y la acumulación de los flavonoides; 2) la modificación de la textura vía alteración de la turgencia celular y de la estructura de la pared celular, por el metabolismo; 3) la modificación de azúcares, ácidos orgánicos y compuestos volátiles que afectan la calidad nutricional, el sabor y el aroma del fruto y 4) aumento en la susceptibilidad al ataque de patógenos oportunistas que están asociados a la pérdida de integridad de la pared celular (Giovannoni, 2004; Seymour *et al.*, 2013; Dos Santos *et al.*, 2015). Los pigmentos son esenciales para que los frutos sean atractivos, se acumulan comúnmente en la cutícula durante el proceso de maduración, aunque muchos frutos climatéricos también acumulan pigmentos en el tejido de la pulpa durante la maduración poscosecha, a diferencia de los frutos no climatéricos (Bouzayen *et al.*, 2010). Los pigmentos más importantes son los carotenoides y las antocianinas (Bartley y Scolnik, 1995). Además de su papel en la pigmentación, son importantes para la salud

humana como fuentes de vitamina A y compuestos antioxidantes, respectivamente (Bartley y Scolnik, 1995). Las antocianinas pertenecen a la subclase flavonoide de los compuestos fenólicos (He y Giusti, 2010).

Uno de los principales factores asociados con el deterioro poscosecha de los frutos es la velocidad de ablandamiento, que reduce la vida de anaquel, reduciendo los tiempos de transporte y distribución y aumenta las pérdidas poscosecha (Bapat *et al.*, 2010). El ablandamiento del fruto es un proceso complejo que involucra tres pasos subsecuentes: 1) relajación de la pared celular mediada por expansinas; 2) despolimerización de hemicelulosas; y 3) despolimerización de poliuronidos por la poligalacturonasa u otras enzimas hidrolíticas (Brummell *et al.*, 1999; Payasi *et al.*, 2009); lo cual contribuye a una pérdida de firmeza y cambios en la calidad de la textura (Brummell y Harpster, 2001; Quiroz-Castañeda y Folch-Mallol 2011)

Al final de la etapa de madurez de consumo, ocurren algunos cambios fisiológicos relacionados con la senescencia que llevan al deterioro de la membrana y a la muerte celular. En este aspecto, la madurez de consumo puede ser considerada como el primer paso de un proceso de muerte celular programada (Bouzayen *et al.*, 2010). Durante la senescencia la síntesis de carbohidratos cesa y tiene lugar la degradación de las proteínas, clorofilas, lípidos y ácidos nucleicos, que requiere la síntesis de enzimas hidrolíticas, así como la síntesis de carotenoides y de compuestos antioxidantes (Gapper *et al.*, 2013).

Los frutos son definidos fisiológicamente con base a la presencia (climatéricos) o ausencia (no climatéricos) de un aumento en la respiración y en la síntesis de etileno al comienzo de la madurez de consumo (Lelièvre *et al.*, 1997). Los frutos climatéricos son aquellos que pueden madurar no sólo adheridos a la planta, sino también después de la cosecha, cuando son cortados en la etapa preclimatérica, como el tomate (*Solanum lycopersicum*), la manzana (*Malus domestica*) y el plátano (*Musa spp.*), este tipo de frutos alcanza más pronto la senescencia (Fernández-Trujillo *et al.*, 2007; Obando-Ulloa *et al.*, 2008). Por otro lado, los frutos no climatéricos como la fresa (*Fragaria spp.*), la uva (*Vitis*

vinifera L.), el pepino (*Cucumis sativus* L.) y los cítricos, solo alcanzan la maduración cuando aún están unidos a la planta, ya que no presentan un aumento en la respiración y en la producción de etileno después de la cosecha (Biale, 1964; Given *et al.*, 1988; Chervin *et al.*, 2004).

Dado que la mayor parte de los atributos de calidad son el resultado del proceso de maduración, se ha considerado esencial comprender los mecanismos regulatorios involucrados en esta etapa de desarrollo de los frutos (Bouzayen *et al.*, 2010).

La aplicación de las tecnologías apropiadas para mantener la calidad depende del conocimiento de la estructura del fruto, la fisiología y las transformaciones metabólicas (Pech *et al.*, 2013).

Radicales libres

Los radicales libres se definen como especies químicas que poseen uno o más electrones desapareados, lo cual las hace altamente inestables y reactivas. Para estabilizarse reaccionarán rápidamente con moléculas adyacentes mediante reacciones de óxido-reducción. El término especies reactivas del oxígeno es un término colectivo que incluye radicales libres y ciertas especies no radicales que son oxidantes y/o se convierten fácilmente en radicales libres, como por ejemplo HClO, HBrO, O₃, ONOO⁻, O₂, o H₂O₂ (Halliwell y Whiteman 2004). Los radicales libres pueden afectar varios sustratos como: lípidos, ácidos nucleicos y las proteínas, siendo los más susceptibles los ácidos grasos poliinsaturados y los ésteres de colesterol (Speisky, 2000).

Bajo condiciones de estrés, el O₂ actúa como un oxidante ya que favorece a que el Fe²⁺ contenido en diversas moléculas quede disponibles para la reacción de Fenton facilitando, finalmente la producción de OH a partir de H₂O₂ (Valko *et al.*, 2005; Leonard *et al.*, 2004).

Otros radicales reactivos derivados del oxígeno que se pueden formar en sistemas vivientes son los radicales peroxilo (ROO), el piróxilo más simple es HOO, llamado radical hidroperoxil o perhidroxil que es la forma protonada del ion superóxido O₂ (De Grey, 2002). Cuando hay un exceso en la producción de

radicales libres, estos pueden afectar a las enzimas protectoras, causando efectos de destrucción y muerte celular por oxidación de la membrana lipídica, proteínas, ADN y enzimas que intervienen en la respiración celular (Hernández-García *et al.*, 2010; Navarrete *et al.*, 2011; Andrade y Assuncao, 2012). Esta serie de efectos está asociada a la aparición de condiciones patológicas como cáncer, aterosclerosis, diabetes, neurodegeneración, degeneración macular y envejecimiento (Curtis *et al.*, 2012; Haque *et al.*, 2012; Matés *et al.*, 2012). La oxidación también afecta a los alimentos, siendo la causa principal del deterioro químico, originando reducción de la calidad nutricional, color, sabor, textura e inocuidad (Laguerre *et al.*, 2007).

El oxígeno es esencial para los organismos vivos. Sin embargo, la generación de especies reactivas del oxígeno (ROS) y radicales libres (RL) es inevitable en el metabolismo aeróbico. Estas especies oxidantes provocan daños acumulativos en moléculas fundamentales para el funcionamiento del organismo, tales como proteínas, lípidos y ADN. No obstante, el organismo tiene sus propios mecanismos de defensa para hacer frente a la acción de las especies oxidantes. En determinadas situaciones las defensas antioxidantes pueden verse desbordadas por la excesiva generación de ROS. Este desequilibrio entre especies oxidantes y antioxidantes se conoce como estrés oxidativo, el cual está asociado a numerosas enfermedades y al proceso normal de envejecimiento (Lee *et al.*, 2004).

La dieta juega un papel importante en la prevención de enfermedades relacionadas con el estrés oxidativo, fundamentalmente a través del aporte de compuestos bioactivos de origen vegetal. Entre ellos, las vitaminas hidrosolubles y liposolubles, carotenoides y una gran variedad de compuestos fenólicos, cuya actividad antioxidante y potenciales efectos beneficiosos están siendo ampliamente investigados en los últimos años (Lampe, 1999; Prior 2003). Hoy en día se asocian el consumo de vegetales y frutas con una menor incidencia de enfermedades crónicas, y existe una mayor preocupación de los consumidores por mantener un estado de salud adecuado, por ello las

industrias alimentarias se han preocupado más por producir alimentos funcionales que supongan un aporte extra de estos antioxidantes naturales.

Antioxidantes

Un antioxidante es una sustancia que, a concentración baja, en comparación con el sustrato oxidable, previene o retrasa significativamente una reacción de oxidación ya iniciada, promovida por un agente oxidante (Prior, 1999; Wiseman and Halliwell, 1996). Por tanto, es posible definir a los antioxidantes como un grupo de moléculas reconocidas por su capacidad para neutralizar los efectos negativos de los radicales libres y el estrés oxidativo (Pinchuk *et al.*, 2012). Pueden ser productos muy diferentes entre sí, en cuanto a origen, estructura química y modo de acción, pero tienen en común su capacidad de inhibir o frenar los mecanismos implicados en la oxidación (Niki, 2010). La actividad antioxidante de un compuesto es un proceso químico que depende de sus propiedades redox, de partición, quelantes, como donador de hidrógeno y como captador de radicales. Idealmente todas esas propiedades deberían medirse en cada componente para valorar la actividad antioxidante total (Laguerre *et al.*, 2007; Williamson *et al.*, 1999).

Los mecanismos de acción de los compuestos antioxidantes incluyen la inhibición/captación de especies reactivas, y la reducción y la acción quelante de metales (Dills y Trochopoulou, 2010; Leonarduzzi *et al.*, 2010).

La exposición de los organismos a factores exógenos y endógenos, genera diversas Especies Reactivas de Oxígeno tales como los radicales superóxido (O_2^-) e hidroxilo (OH) y otras especies radicales no libres como H_2O_2 y el oxígeno singulete (1O_2), que inducen alteraciones en las células, citotoxicidad y/o indirectamente genotoxicidad; favoreciendo la aceleración del envejecimiento y la aparición de cáncer, enfermedades cardiovasculares y degenerativas (Dasgupta y De, 2007; Tripathi *et al.*, 2007).

Mecanismos de reacción de los antioxidantes

Los antioxidantes pueden inactivar los radicales a través de dos vías principales: reacciones de un átomo de H (Hydrogen Atom Transfer, HAT) o de transferencia de un electrón (Single Electron Transfer, SET).

Las reacciones HAT están determinadas por la entalpía de disociación del grupo donador de H en la molécula antioxidante. La capacidad de reacción se basa en una cinética en la que el antioxidante y el sustrato compiten por radicales peróxido térmicamente generados a través de la descomposición de compuestos (Huang *et al.*, 2005). En las reacciones SET el antioxidante transfiere un electrón para reducir un compuesto, incluyendo metales, carbonilos y radicales; serían reacciones como las que se describen (Huang *et al.*, 2005).

El resultado final es el mismo, pero difieren en la cinética y en las reacciones colaterales. Ambos tipos de reacciones pueden ocurrir paralelamente, y el mecanismo dominante tendrá que ser determinado a través de la estructura y propiedades del antioxidante; la solubilidad, el coeficiente de partición, el solvente del sistema, la energía de disociación y el potencial de ionización (Prior *et al.*, 2005).

El estudio de los efectos de los antioxidantes en la salud humana ha sido, y es aún, uno de los temas de estudio más recurrentes en la literatura. Muchos autores han descrito los efectos beneficiosos de los antioxidantes, contenidos en gran diversidad de plantas y productos naturales (Albarracin *et al.*, 2012), en enfermedades neurodegenerativas como el Alzheimer o el Parkinson (Almajano *et al.*, 2011; Dimitrios, 2006; Pacifico *et al.*, 2012) e incluso se ha estudiado su uso como paliativo del cáncer (Du *et al.*, 2012; Loft *et al.*, 2008; Zhang *et al.*, 2008).

MATERIALES Y MÉTODOS

Desarrollo experimental y almacenamiento de frutos

Este trabajo de investigación se llevó a cabo en los laboratorios e invernaderos del Departamento de Horticultura de la UAAAN. Como material vegetal se utilizaron frutos de pepino de la variedad "Vitaly" (Syngenta AG, Suiza). Las plantas para obtener los frutos se establecieron en un invernadero tipo multitunel, con cubierta de polietileno y ventilación natural. Como sustrato se usó una mezcla de peat moss y perlita (50:50, v/v) colocado en bolsas de polietileno color negro de 4 L de capacidad. El sistema de riego fue dirigido aplicando aproximadamente 1.5 L por día en la etapa de mayor demanda, y para la nutrición se utilizó solución nutritiva Steiner (Steiner, 1961).

Se evaluaron frutos tratados con Si en pre y pos cosecha con seis tratamientos con Si y un tratamiento control, a decir: T0= Control, T1=silicato de Potasio 125 mg L⁻¹ (ASi 125), T2= silicato de Potasio 250 mg L⁻¹ (ASi 250), T3= silicato de Potasio 500 mg L⁻¹ (ASi 500), T4= NP's de Si 125 mg L⁻¹ (NSi 125), T5= NP's de Si 250 mg L⁻¹ (NSi 250), T6= NP's de Si 500 mg L⁻¹ (NSi 500). Las nano partículas son de dióxido de silicio, de 20 nm con forma esférica. La aplicación de los tratamientos en pre cosecha fue de forma foliar a las plantas cada 15 días, iniciando a los 15 días después de emergencia, teniendo un total de 5 aplicaciones. La aplicación de los tratamientos en poscosecha se llevó a cabo en frutos obtenidos de plantas sin ningún tratamiento (T0). Fue directamente a los frutos, una sola vez inmediatamente después de la cosecha por medio de atomización. Después de aplicar los tratamientos a los frutos, se dejaron secar a temperatura ambiente y luego fueron procesados.

Los frutos fueron almacenados a temperatura ambiente (20 ± 1°C) y se evaluaron tres tiempos de almacenamiento: al momento de la cosecha, cinco y diez días después de la cosecha.

Variables de calidad de los frutos de pepino

Las variables de calidad de fruto se evaluaron en 6 frutos por tratamiento para conocer el comportamiento de estas variables al momento de la cosecha, a los cinco y diez días de almacenamiento. Se calculó el porcentaje de pérdida de peso por la actividad fisiológica (AOAC, 2000). El pH se determinó utilizando un potenciómetro digital (HANNA®), los sólidos solubles (°Brix) con un refractómetro, el porcentaje de acidez titulable se determinó de acuerdo a la metodología de la AOAC (2000), expresando los datos como porcentaje de ácido cítrico (% AC), contenido de vitamina C se determinó mediante el método de titulación con 2,6 diclorofenolindofenol (Padayatt *et al.*, 2001), expresando los resultados en mg de 100 g⁻¹ de peso fresco. La firmeza de la fruta se determinó con un penetrómetro manual (WAGNER INSTRUMENTS, modelo FDK 20, Greenwich, CT, EE. UU.). Para ello, se realizaron mediciones en tres puntos diferentes de la fruta y se obtuvo el promedio.

Compuestos Bioactivos y Capacidad Antioxidante

Para la preparación de las muestras para los compuestos bioactivos y capacidad antioxidante los frutos se cortaron en rodajas y se almacenaron en un ultracongelador a -80 °C (3003 Ultrafreezer Thermo Scientific, EE. UU.). Después fueron liofilizados por 72 h a -84 °C y 0.060 mbar en un liofilizador (Labconco, FreeZone 2.5 L model, Kansas City, Mo, USA) Una vez liofilizadas las muestras, se molieron de forma manual con la ayuda de un mortero y pistilo de porcelana.

Para la determinación de la actividad antioxidante con el radical ABTS [2,2'-azino-bis (ácido 3-etilbenzotiazolin-6-sulfónico)] que se basa en la decoloración del catión radical ABTS. Este radical se obtuvo de la reacción de ABTS a 7 mM con persulfato de potasio a 2.45 mM (1: 1) en la oscuridad a 26 ° C durante 16 h, y luego se diluyó con etanol al 20% para obtener una absorbancia de 0.7 ± 0.01 a 754 nm. Luego, para determinar la capacidad antioxidante en los compuestos hidrofílicos, se colocaron en una celdilla de cuarzo 40 µL de extracto y 1960 µL de la dilución de radicales ABTS (7 mM) y se agitaron

durante 5 segundos, y luego se dejaron reposar durante 7 minutos en la oscuridad. La absorbancia se midió con espectrofotómetro UV-Vis (JENWAY, 6700, OSA, UK) a una longitud de onda de 750 nm. El blanco se preparó con etanol. Para la determinación del mismo en compuestos lipofílicos, la extracción se realizó con una solución de hexano: acetona. Los resultados se expresan como equivalentes de Trolox en μmol por gramo de peso seco ($\mu\text{mol g}^{-1}$ DW).

Para la determinación de la actividad antioxidante del radical DPPH (2,2-difenil-1-picrilhidrazilo) se realizó de acuerdo a la metodología descrita por Brand-Williams *et al.* (1995), con algunas modificaciones. La solución madre se preparó mezclando 2.5 mg del radical DPPH con 100 ml de metanol. La absorbancia de la solución se ajustó a 0.7 ± 0.02 a 515 nm utilizando un espectrofotómetro UV-Vis (Thermo Fisher Scientific, modelo G10S, Waltham, MA, EE. UU.). Después de esto, para los compuestos hidrofílicos, se tomaron 10 μL de extracto obtenido con tampón fosfato, y se agregaron 390 μL del radical DPPH diluido. El metanol se utilizó como blanco. La disminución de la absorbancia a 515 nm se midió después de 30 min. Para la determinación del mismo en compuestos lipofílicos, la extracción se realizó con una solución de hexano: acetona. Los resultados se expresan como equivalentes de Trolox en μmol por gramo de peso seco ($\mu\text{mol g}^{-1}$ DW)

Para la determinación de fenoles totales, la muestra (0.2 g) se extrajo con 1 mL de una solución de agua: acetona (1: 1). La mezcla se agitó en vórtex durante 30 s. Los tubos se centrifugaron (centrífuga Thermo Scientific Mod. ST 16R, Langensfeld, Alemania) a 17.500 xg durante 10 min a 4 °C. En un tubo de ensayo, se agregaron 50 μL del sobrenadante, 200 μL del reactivo de Folin-Ciocalteu, 500 μL de carbonato de sodio al 20% (Na_2CO_3) y 5 mL de agua destilada y luego se agitaron en vórtex durante 30 s. Las muestras se colocaron en un baño de agua a 45 °C durante 30 min. Finalmente, la lectura se tomó a una absorbancia de 750 nm utilizando una celdilla de plástico en un espectrofotómetro UV-Vis (JENWAY, 6700, OSA, UK). Los resultados se expresaron en miligramos equivalentes de ácido gálico por 100 g de peso seco (mg de EGA 100 g^{-1} DW).

El contenido de flavonoides totales se realizó mediante el método de Dowd, adaptado por (Arvouet-Grand *et al.*, 1994). Para la extracción, se colocaron 100 mg de tejido liofilizado en un tubo de ensayo, donde se agregaron 10 ml de metanol de grado reactivo y se agitó durante 30 s hasta que se homogeneizó la mezcla. La mezcla se filtró usando el papel Whatman No. 1. Para la cuantificación, se agregaron 2 ml del extracto y 2 ml de solución metanólica de tricloruro de aluminio (AlCl_3) al 2% a un tubo de ensayo y se dejó reposar durante 20 minutos en la oscuridad. Luego se tomó la lectura en un espectrofotómetro UV-Vis (JENWAY, 6700, OSA, UK) A una longitud de onda de 415 nm utilizando una celdilla de cuarzo. El contenido de flavonoides se expresó en miligramos equivalentes de quercetina por 100 g de peso seco (mg EQ 100 g⁻¹ DW).

Análisis enzimáticos

Extracto Enzimático: (EE). En un tubo de 2 mL, se colocaron 200 mg de tejido vegetal previamente liofilizado y macerado en mortero de mano, se adicionaron 20 mg de polivinil pirrolidona y 1.5 mL de buffer de fosfatos pH 7-7.2 (0.1 M), se sometió a sonicación durante 5 minutos, y a continuación se centrifugó a 12.000 g por 20 minutos a 4°C en una microcentrífuga (Thermo Scientific Mod. ST 16R, Langensfeld, Alemania). El sobrenadante fue recolectado y filtrado con filtros para jeringa de membrana de PVDF de 0.45 μ de poro (Ramos *et al.*, 2010). Con este extracto enzimático se determinó: catalasa (CAT), superóxido dismutasa (SOD), glutatión peroxidasa (GPX), ascorbato peroxidasa (APX), glutatión reducido (GSH), antioxidantes (A), fenilalanina amonio liasa (PAL).

La actividad enzimática de la catalasa (QE 1.11.1.6) se cuantificó mediante el método espectrofotométrico utilizado por Dhindsa *et al.* (1981) La medición se llevó a cabo en dos pasos (en el tiempo 0 (T0) y en el tiempo 1 (T1)). A T0, 100 μ L de extracto, se agregaron 400 μ L de H_2SO_4 (5%) y 1 mL de H_2O_2 (100 mM) a un tubo de 2 mL y se agitaron durante 30 s. La absorbancia se midió luego en un espectrofotómetro UV-Vis (JENWAY, 6700, OSA, UK) Con una celdilla de cuarzo a 270 nm. En T1, se agregaron 100 μ L de extracto y 1 mL de H_2O_2 (100 μ L) y se agitaron durante 1 min y se midió la absorbancia mediante un

espectrofotómetro UV-Vis (JENWAY, 6700, OSA, UK) Con una celdilla de cuarzo a 270 nm. La determinación de la catalasa se basa en la cuantificación de la tasa de oxidación de H₂O₂ por diferencia de absorbancia (T₀ – T₁). El resultado obtenido se sustituyó en la ecuación 1 para reportarlo como actividad enzimática por gramo de proteína.

$$\text{CAT U g}^{-1} \text{ PT} = \frac{y * V * D * \left(\frac{1}{\text{tr}}\right)}{m} / \text{PT} \quad (1)$$

Dónde:

y= Concentración obtenida de la ecuación de la recta (mol L⁻¹)

V = Volumen (L)

D=Factor de Dilución

tr= Tiempo de reacción (min⁻¹)

m= masa utilizada para la extracción (g)

PT= Contenido de proteínas (mg g⁻¹)

La determinación de la actividad enzimática de la superóxido dismutasa (QE 1.15.1.1) se llevó a cabo utilizando el kit SOD Cayman 706002®. Una mezcla de 20 µL de extracto, 200 µL de detector de radicales (sal de tetrazolio) y 20 µL de solución de xantina oxidasa se colocó en una microplaca. La microplaca se cubrió con una cubierta transparente (kit), se agitó durante 10 segundos y luego se incubó a 26 ° C durante 30 minutos. Luego se midió la absorbancia a una longitud de 450 nm utilizando un lector de placas (BioTek, modelo ELx808, Winooski, VT, EE. UU.). El principio de la prueba se basa en el uso de una sal de tetrazolio para la detección de radicales superóxido generados por la xantina oxidasa y la hipoxantina. Una unidad de SOD se define como la cantidad de enzima necesaria para exhibir un 50% de dismutación del radical superóxido. Los resultados se expresan en U por mililitro (U mL⁻¹) (Ecuación 2).

$$\text{SOD} \left(\frac{\text{UI}}{\text{mg}}\right) = \frac{\left(\left(\frac{\text{UI}}{\text{mL}} \text{ de cada muestra}\right) \times \frac{0.23 \text{ mL}}{0.01 \text{ mL}}\right) \times \text{FD}}{\text{Concentración de proteínas} \left(\frac{\text{mg}}{\text{mL}}\right)} \quad (2)$$

donde:

FD= Factor de dilución.

UI = Actividad enzimática (1 μmol de sustrato convertido $\times \text{min}^{-1}$).

La enzima glutatión peroxidasa (QE 1.11.1.9) se determinó con la metodología propuesta por (Leopold, 1984) modificada por (Xue *et al.*, 2001), utilizando H_2O_2 como sustrato. Una mezcla de 200 μL de extracto, 400 μL de GSH (0.1 mM) y 200 μL de Na_2HPO_4 (0.067 M) se colocó en un tubo de ensayo. La mezcla se precalentó en un baño de agua a 25 ° C durante 5 minutos, luego se agregaron 200 μL de H_2O_2 (1.3 mM) para iniciar la reacción catalítica durante 10 minutos a una temperatura de 26 ° C. La reacción se detuvo mediante la adición de 1 mL de ácido tricloroacético al 1%. La mezcla se colocó en un baño de hielo durante 30 minutos y luego se centrifugó a 1008 g durante 10 minutos a 4 ° C. Para evaluar la actividad de glutatión peroxidasa, se colocaron 320 μL de sobrenadante, 1466 μL de Na_2HPO_4 (0.32 M) y 213 μL de tinte de ácido 5,5-ditio-bis-2-nitrobenzoico (DTNB) a una concentración de 1 mM en un tubo de microcentrifuga. La absorbancia se midió con un espectrofotómetro UV-Vis (JENWAY, 6700, OSA, UK) a 412 nm con una célula de cuarzo. Los resultados se expresan en U por proteínas totales (U TP^{-1}), donde U es igual a mM equivalente de GSH por mililitro por minuto. El resultado obtenido se sustituyó en la ecuación 3 para reportarlo como actividad enzimática por gramo de proteína.

$$\text{GPX U g}^{-1} \text{ PT} = \frac{y * V * D * \left(\frac{1}{\text{tr}}\right)}{m} / \text{PT} \quad (3)$$

Dónde:

y= Concentración obtenida de la ecuación de la recta (mol L^{-1})

V = Volumen (L)

D=Factor de Dilución

tr= Tiempo de reacción (min^{-1})

m= masa utilizada para la extracción (g)

PT= Contenido de proteínas (mg g^{-1})

La medición de la actividad enzimática de la peroxidasa de ascorbato (EC 1.11.1.11), se realizó de acuerdo a (Nakano y Asada, 1987). La medición se realizó en dos momentos. En el tiempo 0 (T0) y en el tiempo 1 (T1). En T0, se colocó en un tubo de 2 mL una mezcla de 100 μL de extracto, 500 μL de ascorbato (10 mg L^{-1}) y 1 mL de H_2O_2 (100 mM). La absorbancia se midió en un espectrofotómetro UV-Vis (JENWAY, 6700, OSA, UK) a 266 nm con una celdilla de cuarzo. En T1, se agregaron 100 μL de extracto, 500 μL de ascorbato (10 mg L^{-1}) y 1 mL de H_2O_2 (100 mM) a la mezcla anterior y se agitaron durante 1 minuto y se midió la absorbancia. La determinación de la peroxidasa de ascorbato se basa en la cuantificación de la velocidad de oxidación del ascorbato por medio de la diferencia de absorbancia (T0 – T1). El resultado obtenido se sustituyó en la ecuación 4 para reportarlo como actividad enzimática por gramo de proteína.

$$\text{APX U g}^{-1} \text{ PT} = \frac{y * V * D * \left(\frac{1}{\text{tr}}\right)}{\frac{m}{\text{PT}}} \quad (4)$$

Dónde:

y= Concentración obtenida de la ecuación de la recta (mol L^{-1})

V = Volumen (L)

D=Factor de Dilución

tr= Tiempo de reacción (min^{-1})

m= masa utilizada para la extracción (g)

PT= Contenido de proteínas (mg g^{-1})

La cuantificación de glutatión se realizó mediante la técnica espectrofotométrica de (Xue *et al.*, 2001), por medio de una reacción del ácido 5,5-ditio-bis-2-nitrobenzoico (DTNB). Se colocó en un tubo de ensayo una mezcla de 0.480 ml del extracto, 2.2 ml de fosfato dibásico de sodio (Na_2HPO_4 a 0.32 M) y 0.32 ml del colorante DTNB (1 mM). Luego, la mezcla se agitó y se leyó en un espectrofotómetro UV-Vis (JENWAY, 6700, OSA, UK) a 412 nm utilizando una celdilla de cuarzo.

La actividad de la fenilalanina amoniaco liasa (PAL) (QE 4.3.1.5) se determinó de acuerdo con (Sykłowska-Baranek *et al.*, 2012), con modificaciones. Se tomó un total de 0.1 mL de extracto enzimático y se agregaron 0,9 mL de L-fenilalanina (6 mM). Después de 30 minutos de incubación a 40 ° C, la reacción se detuvo con 0.25 ml de HCl 5N. Las muestras se colocaron en un baño de hielo y se agregaron 5 ml de agua destilada. La absorbancia se determinó a 290 nm en un espectrofotómetro UV-Vis (JENWAY, 6700, OSA, UK). El resultado obtenido se sustituyó en la ecuación 5 para reportarlo como actividad enzimática por gramo de proteína.

$$\text{PAL U g}^{-1} \text{ PT} = \frac{y * V * D * \left(\frac{1}{\text{tr}}\right)}{m} / \text{PT} \quad (5)$$

Dónde:

y= Concentración obtenida de la ecuación de la recta (mol L⁻¹)

V = Volumen (L)

D=Factor de Dilución

tr= Tiempo de reacción (min⁻¹)

m= masa utilizada para la extracción (g)

PT= Contenido de proteínas (mg g⁻¹)

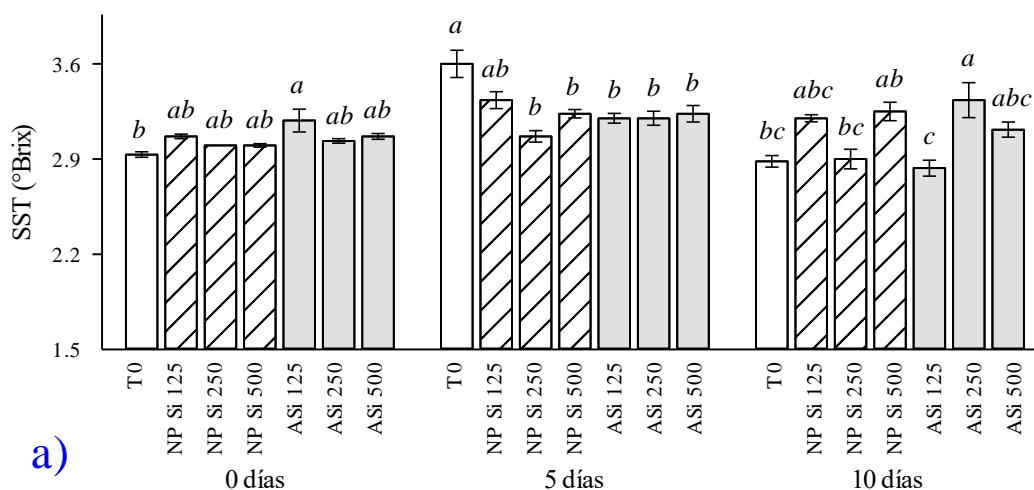
Análisis estadístico

El experimento se estableció usando un diseño experimental completamente al azar. Para el análisis estadístico de cada una de las variables se utilizó el programa estadístico InfoStat (2016) en el que se realizó un análisis de varianza y una prueba de comparación de medias de Fisher LSD (P ≤ 0.05).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Calidad de frutos

Se encontraron diferencias estadísticas en SST en los frutos tratados tanto en aplicación precosecha como poscosecha (figura 1). En la aplicación poscosecha, al momento de la cosecha se observa un aumento del 11.9% en el tratamiento de NP Si 500 sobre el control. Mientras que a los cinco días el control fue el tratamiento con mayor contenido de SST. A los diez días de almacenamiento el mayor contenido se observó en el tratamiento NP Si 250 siendo este un 8.6% superior al control, además, este tratamiento fue el que mantuvo el contenido de SST más estables a lo largo del tiempo de almacenamiento. En precosecha el tratamiento ASi 125 fue el que mostró el mayor contenido de SST al momento de la cosecha, siendo este 8.5% mayor que el control. A los cinco días se observó algo similar a la poscosecha, ya que el control fue el que tuvo el mayor contenido de SST. A los diez días el tratamiento ASi 250 mostro un 15.6% más SST que el control, aumentando conforme pasaron los días de almacenamiento. Esta tendencia de aumento se produce porque los SST aumentan a medida que la fruta madura, debido a la degradación y biosíntesis de los polisacáridos y la acumulación de azúcares simples (Ghasemnezhad *et al.*, 2011). Además, la acumulación de azúcares en frutas no climatéricas se asocia con el desarrollo de una calidad óptima para el consumo (Wills *et al.*, 1998). Por lo que una mayor concentración de SST en los frutos representa una mayor calidad de estos.



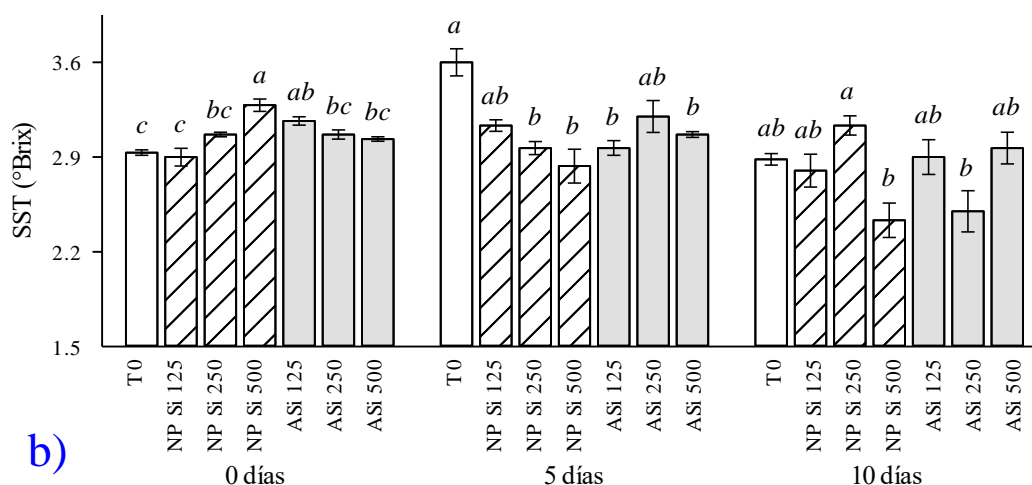


Figura 1. Concentración de sólidos Solubles Totales a los 0, 5 y 10 días de almacenamiento en frutos de pepino tratados con NP's de Si y silicato de K en precosecha (a) y poscosecha (b). Letras iguales sobre las barras dentro del mismo día de almacenamiento son estadísticamente iguales de acuerdo a la prueba de LSD Fisher ($P > 0.05$). Cada dato es la media de seis repeticiones y el error estándar.

Se encontraron diferencias estadísticas en acidez titulable (figura 2). Para la aplicación poscosecha a los diez días de almacenamiento el tratamiento con mayor acidez fue el tratamiento ASI 125 siendo un 38.8% mayor que el control. Mientras que en la aplicación precosecha la mayor acidez al momento de la cosecha se encuentra en el tratamiento NP Si 500 y NP Si 250 siendo mayor un 20% que el control. A los diez días de almacenamiento el tratamiento NP Si 250 mantuvo una mayor acidez 38.8% más que el control. Ambas aplicaciones mostraron una tendencia de aumento de la acidez conforme pasa el tiempo de almacenamiento, siendo esto positivo. Estos ácidos sirven como reserva de energía y participan en reacciones metabólicas para la síntesis de pigmentos, enzimas y otros materiales y la degradación de pectinas y celulosas que son esenciales para los procesos de maduración (Ghasemnezhad *et al.*, 2011). Por lo tanto, se espera que la acidez titulable aumente con el tiempo de almacenamiento (Pinedo-Guerrero *et al.*, 2017).

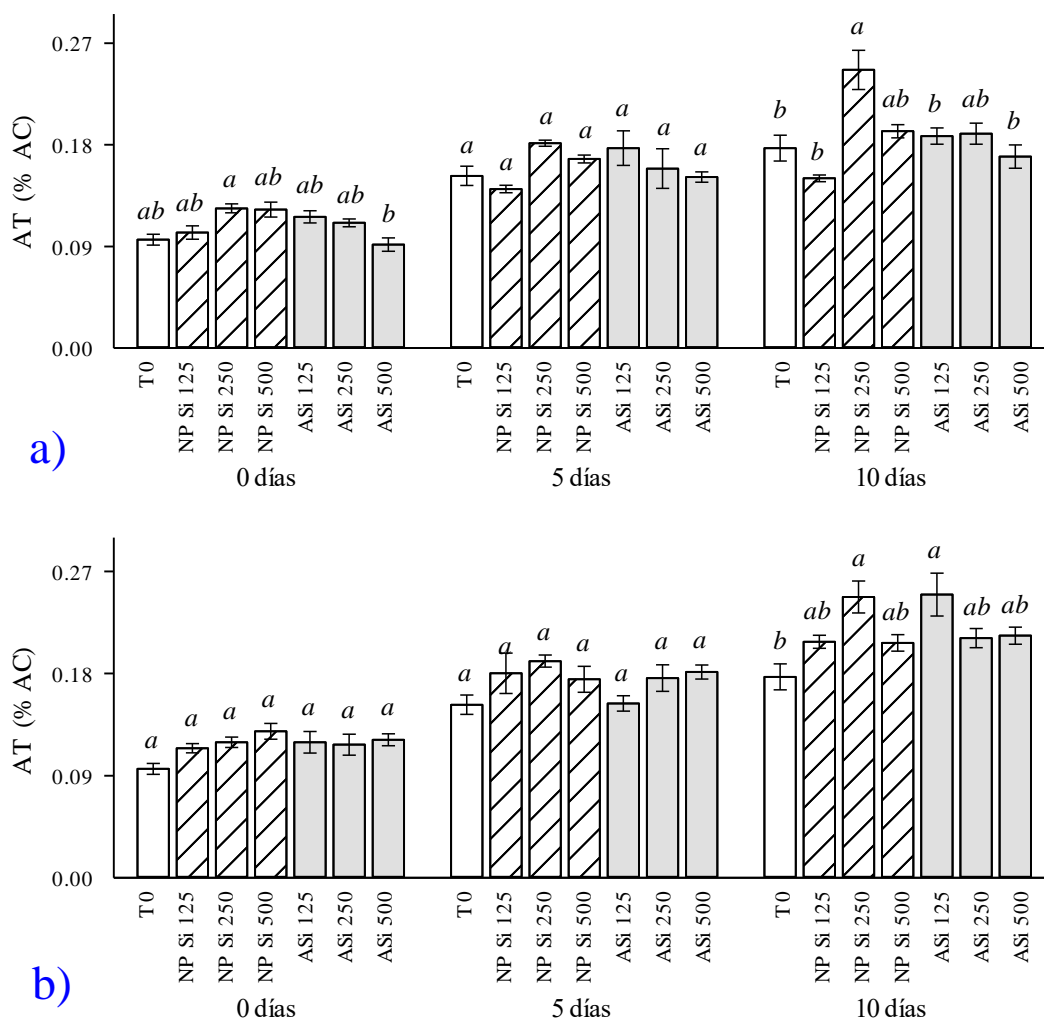


Figura 2. Acidez titulable a los 0, 5 y 10 días de almacenamiento en frutos de pepino tratados con NP's de Si y silicato de K en precosecha (a) y poscosecha (b). Letras iguales sobre las barras dentro del mismo día de almacenamiento son estadísticamente iguales de acuerdo a la prueba de LSD Fisher ($P > 0.05$). Cada dato es la media de seis repeticiones y el error estándar.

Se encontraron diferencias estadísticas en la firmeza (figura 4) en la aplicación poscosecha se observó la mayor firmeza en el tratamiento control en las tres fechas de almacenamiento. Esto nos puede decir que la aplicación del Si y NP's de Si termino causando estrés en los frutos, las NP's pueden causar peroxidación lipídica de las membranas celulares, lo que pudo causar la pérdida de firmeza en los tratamientos. En la aplicación precosecha al día de la cosecha la mayor firmeza se encontró en el tratamiento NP Si 250 siendo este 22.4%

mayor que el control. Al día cinco de almacenamiento el control mostro la mayor firmeza. A los diez días de almacenamiento los tratamientos ASi 250, NP Si 500 y NP Si 250 tuvieron la menor firmeza, la firmeza se pierde conforme el almacenamiento debido a la degradación de las paredes celulares por la senescencia, el tratamiento ASi 500 mostro una menor perdida de firmeza a lo largo del tiempo de almacenamiento esto puede deberse a la estabilidad de las paredes celulares que le confirió el Silicio ya que forma una membrana espesa de silicio-celulosa (Hodson y Sangster 1985) y que puede asociarse con pectina e iones de calcio (Waterkeyn y Bientait 1982), ya que las fluctuaciones durante el almacenamiento suelen deberse a la degradación de las paredes celulares.

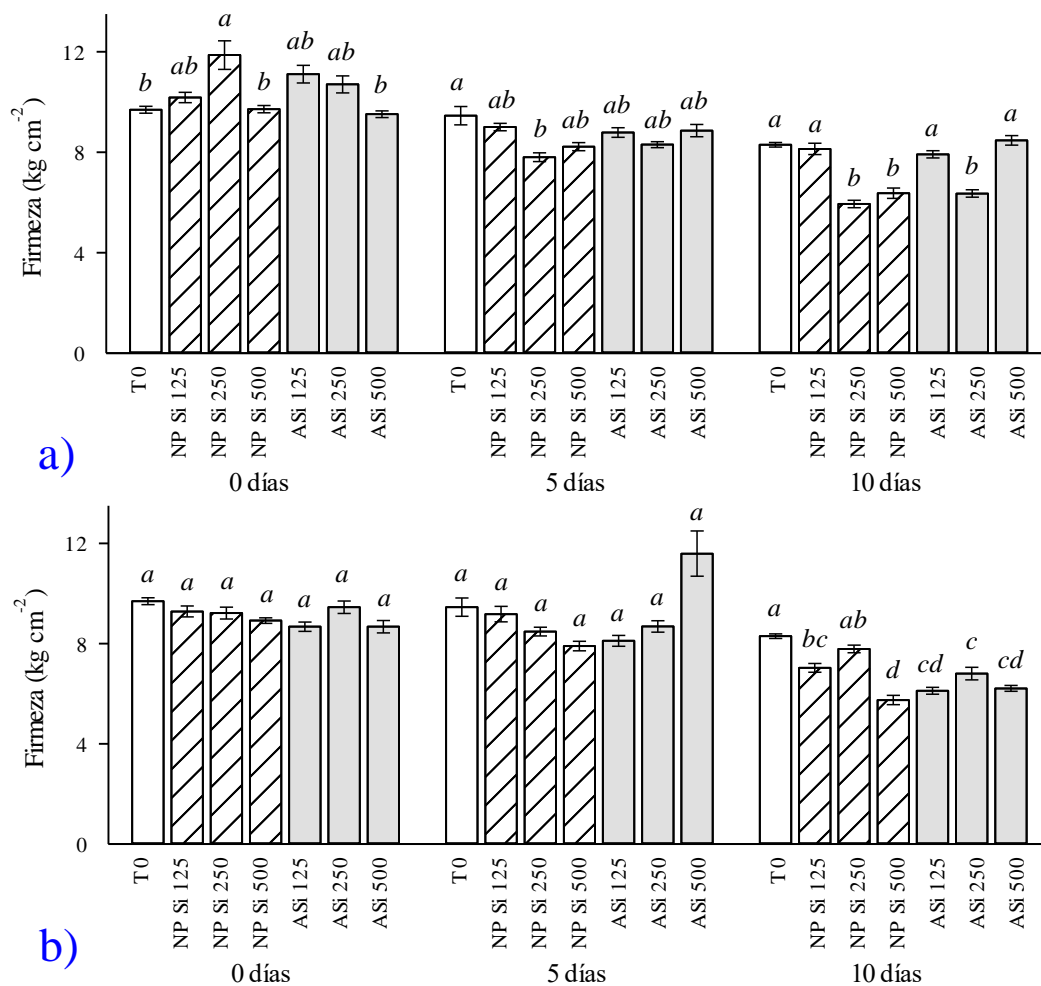
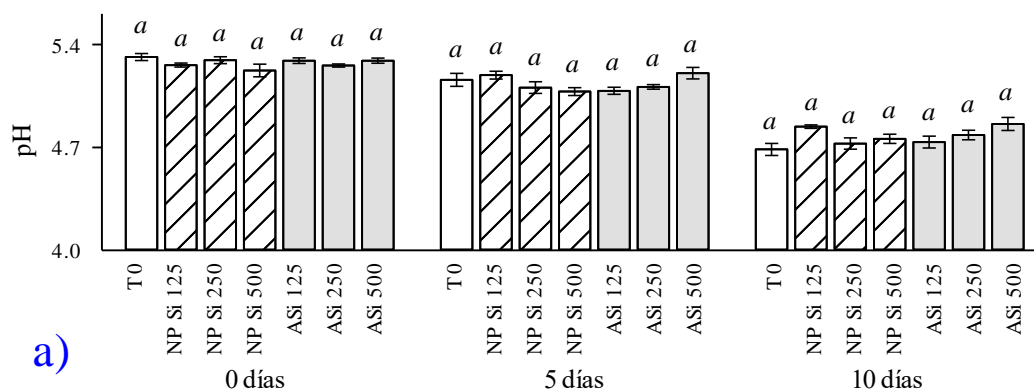


Figura 3. Firmeza a los 0, 5 y 10 días de almacenamiento en frutos de pepino tratados con NP's de Si y silicato de K en precosecha (a) y poscosecha (b). Letras iguales sobre las barras dentro del mismo día de almacenamiento son estadísticamente iguales de acuerdo a la prueba de LSD Fisher ($P > 0.05$). Cada dato es la media de seis repeticiones y el error estándar.

Se encontraron diferencias estadísticas en el potencial de hidrogeno (figura 5) excepto en la aplicación precosecha. En la aplicación poscosecha, al día de la cosecha el tratamiento ASi 500 mostró 11.2 % más pH respecto al control. Al día cinco de almacenamiento el control mostró el pH más alto, mientras que en al día diez el mayor pH se observó en el tratamiento NP Si 125 1.9 % por encima del control. Observándose una tendencia a disminuir durante el almacenamiento. Pinedo-Guerrero *et al.* (2017) encontró tendencias similares en frutos de chile jalapeño, mientras que Juárez-Maldonado *et al.* (2016) encontró resultados contrarios en tomate donde se observa un aumento durante el almacenamiento, por otro lado Seymour *et al.* (1993) reportaron que el pH se comporta de manera inversa a la variación de la acidez titulable, lo que se comprueba en el presente trabajo.



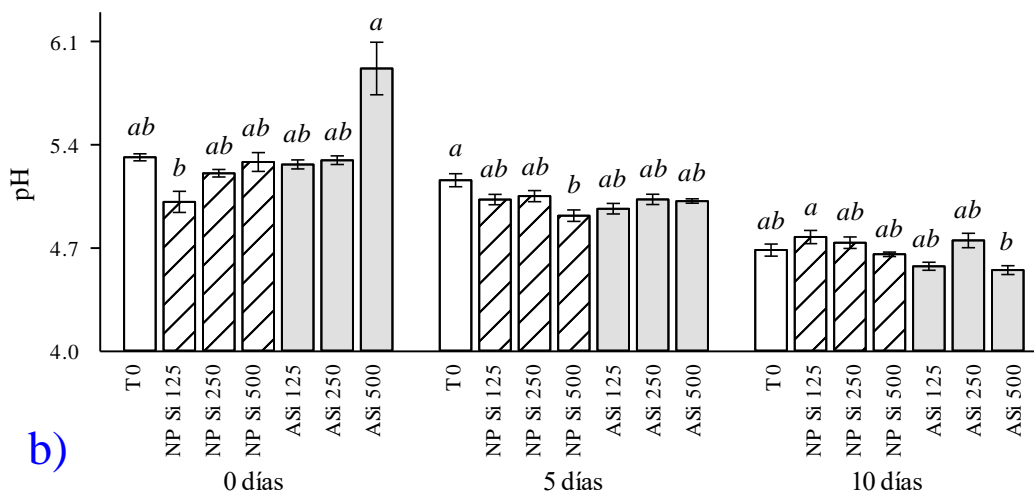
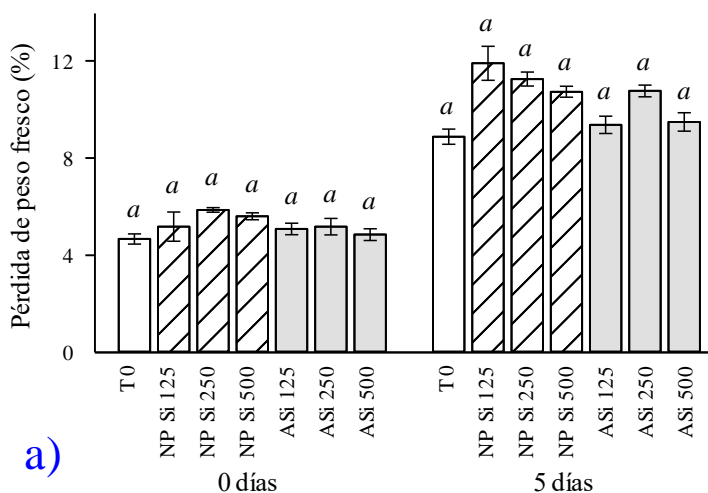


Figura 4. pH a los 0, 5 y 10 días de almacenamiento en frutos de pepino tratados con NP's de Si y silicato de K en precosecha (a) y poscosecha (b). Letras iguales sobre las barras dentro del mismo día de almacenamiento son estadísticamente iguales de acuerdo a la prueba de LSD Fisher ($P > 0.05$). Cada dato es la media de seis repeticiones y el error estándar.

Se observaron diferencias en la pérdida de peso (figura 6) en ambas aplicaciones poscosecha y precosechas el control fue el que tuvo la menor pérdida de peso, los tratamientos tuvieron una mayor pérdida de peso a los cinco y diez días de almacenamiento. Esto debido a que los frutos al ser tejidos vivos continúan con sus procesos biológicos, transpiración y respiración (Romanazzi *et al.*, 2016; Sanzani *et al.*, 2016), por lo que se pierde el peso debido a la pérdida de agua por transpiración, es conocido que las NP causan estrés estimulando la formación de ROS (Fu *et al.*, 2014), por lo que se puede esperar una mayor transpiración y una mayor pérdida de peso.



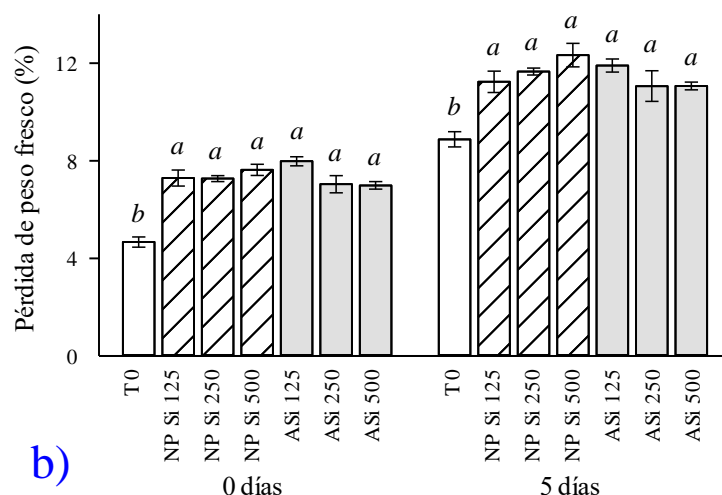


Figura 5. Pérdida de peso fresco a los 0, 5 y 10 días de almacenamiento en frutos de pepino tratados con NP's de Si y silicato de K en precosecha (a) y poscosecha (b). Letras iguales sobre las barras dentro del mismo día de almacenamiento son estadísticamente iguales de acuerdo a la prueba de LSD Fisher ($P > 0.05$). Cada dato es la media de seis repeticiones y el error estándar.

Compuestos bioactivos y capacidad antioxidante

Se encontraron diferencias estadísticas en vitamina C (figura 3) excepto en la aplicación poscosecha al día de la cosecha. En la aplicación poscosecha a los cinco días de almacenamiento el tratamiento NP Si 500 mostró un 16.7% más vitamina C que el control. En la aplicación precosecha al día de cosecha el control tuvo el mayor contenido de vitamina C. A los cinco días el mayor contenido de vitamina C se observó en el tratamiento Así 125 siendo 78.2% mayor que el control. Mientras que a los diez días de almacenamiento el tratamiento NP Si 250 tuvo 70% más de vitamina C respecto al control. El aumento de la vitamina C durante el almacenamiento en la aplicación poscosecha es positivo y de gran importancia ya que los humanos deben ingerir vitamina C a través de fuentes ricas como las frutas porque el cuerpo humano no tiene la capacidad de producirla (Padayatty *et al.* 2003). Mientras que en la aplicación poscosecha no se observa una tendencia a aumentar durante el almacenamiento como con la aplicación precosecha, excepto en el control. Esto puede deberse a que la aplicación de los tratamientos a frutos cosechados, causa estrés por lo que se da una disminución de la vitamina C. Efectos contrarios se reportan en aplicaciones con NP's a las plantas (Pinedo-Guerrero

et al., 2017; Pérez-Labrada *et al.*, 2019), ya que la inducción de este compuesto está más relacionada con las respuestas antioxidantes de las plantas (Pinedo-Guerrero *et al.*, 2017).

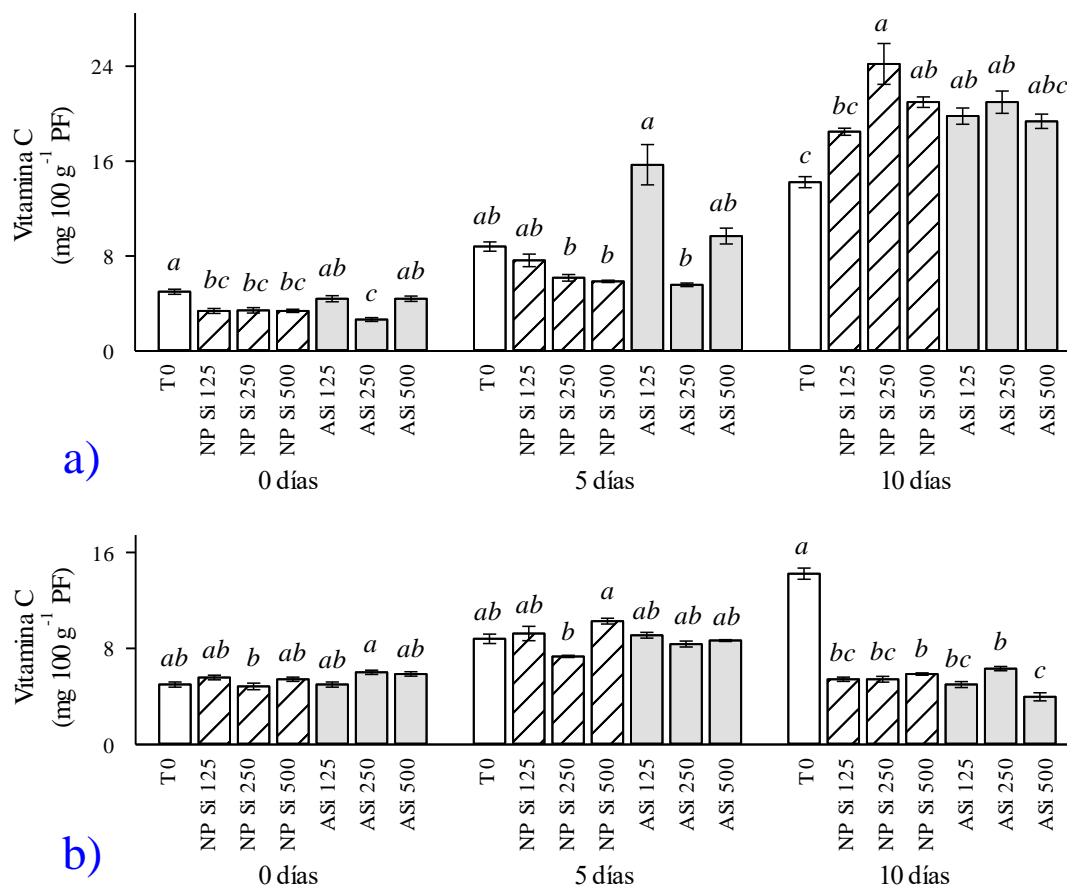
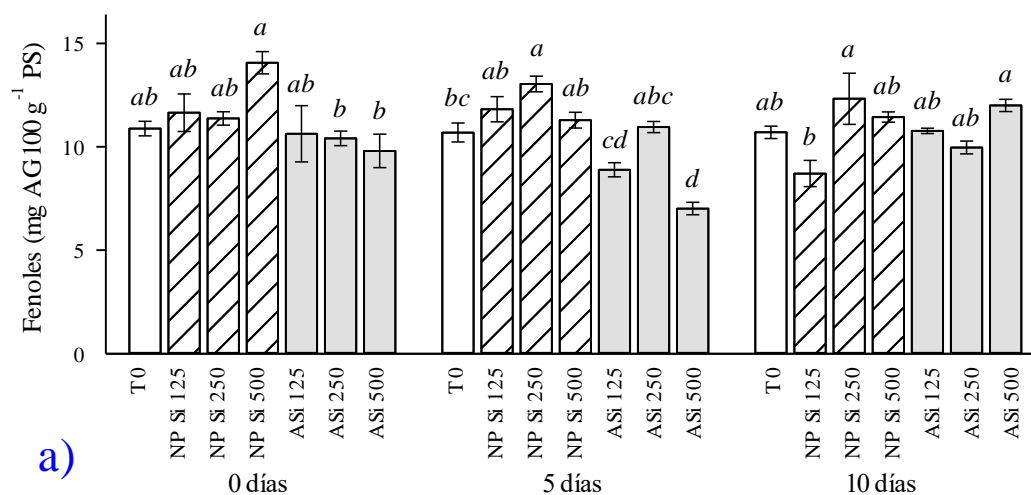


Figura 6. Concentración de Vitamina C a los 0, 5 y 10 días de almacenamiento en frutos de pepino tratados con NP's de Si y silicato de K en precosecha (a) y poscosecha (b). Letras iguales sobre las barras dentro del mismo día de almacenamiento son estadísticamente iguales de acuerdo a la prueba de LSD Fisher ($P > 0.05$). Cada dato es la media de seis repeticiones y el error estándar.

Se observaron diferencia en el contenido de fenoles totales (figura 7) se presentan los resultados del contenido de fenoles totales observándose diferencias significativas. En el día de la cosecha en los tratamientos aplicados poscosecha, ASi 125 y NP Si 125 tuvieron 31.25 y 29.3 % más fenoles respecto al control. Mientras que a los 10 días de almacenamiento el mayor contenido lo tuvo el tratamiento ASi 500 7.5% más que el control. Los frutos tratados

durante la precosecha el tratamiento NP Si 250 mostro el mayor contenido de fenoles a los cinco y diez días de almacenamiento 21.9 y 15.1 % más que el control respectivamente. Los fenoles totales son antioxidantes que activan una serie de metabolitos secundarios sintetizados a través de la vía del ácido shikímico o ácido malónico, que ejercen funciones de señalización celular en condiciones de estrés abiótico (Michalak, 2006). Estos compuestos son un grupo de metabolitos secundarios de plantas estructuralmente diversos que incluyen terpenoides, fenilpropanoides, ácidos cinámicos, precursores de lignina, ácidos hidroxibenzoicos, catecoles, cumarinas, flavanoides, isoflavanoides y taninos (Bennett y Wallsgrove 1994). Estos compuestos dan la capacidad antioxidante en las frutas debido a la reducción de los cambios oxidativos en las células al reducir los niveles de radicales libres (Klunklin *et al.*, 2017). Tanto la aplicación de Si y NP de Si mostraron un aumento en estos compuestos lo que es benéfico ya que se ha encontrado que los compuestos fenólicos mostraron efectos positivos en la salud cardiometabólica, también tienen efectos beneficiosos sobre el funcionamiento cognitivo (Fraga *et al.*, 2019).



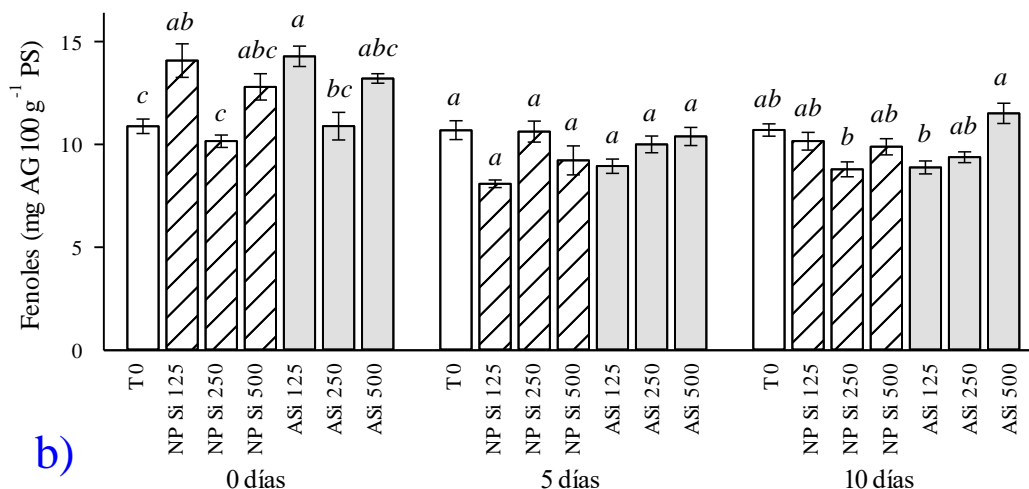


Figura 7. Concentración de Fenoles a los 0, 5 y 10 días de almacenamiento en frutos de pepino tratados con NP's de Si y silicato de K en precosecha (a) y poscosecha (b). Letras iguales sobre las barras dentro del mismo día de almacenamiento son estadísticamente iguales de acuerdo a la prueba de LSD Fisher ($P > 0.05$). Cada dato es la media de seis repeticiones y el error estándar.

Se observaron diferencias en el contenido de flavonoides (figura 8). En la aplicación poscosecha al día de la cosecha y a los cinco días, el tratamiento ASi 250 tuvo un 31.2 y 48.1% (respectivamente) más contenido de flavonoides que el control. Mientras que al día 10 de almacenamiento el tratamiento ASi 500 estuvo 7.5% por encima del control. En la aplicación precosecha al día de la cosecha el tratamiento NP Si 125 tuvo 35.8 % más flavonoides que el control. A los cinco días de almacenamiento los tratamientos NP Si 250 y ASi 125 están 64.5 y 52 % por encima del control. Los flavonoides, se encuentran en frutas y verduras. Estas sustancias se pueden clasificar en flavonas, flavonoles, flavanoles, flavanonas, isoflavonas y antocianinas (Ballard y Maróstica, 2019). Estos tuvieron una tendencia a disminuir durante el almacenamiento, este comportamiento es lo normal ya que los flavonoides tienden a disminuir durante la maduración debido a la conversión metabólica en compuestos fenólicos secundarios. (Howard *et al.*, 2000; Bars y Hoesel, 1977), Los flavonoides son un grupo grande y diverso de metabolitos polifenólicos secundarios de bajo peso molecular en plantas y están relacionados con el estrés (Klunklin *et al.*, 2017), un aumento en estos compuestos es benéfico ya que se ha reportado protegen

el sistema cardiovascular además de tener efectos antidiabéticos, anti obesidad y anticancerígenos (Ballard y Maróstica, 2019).

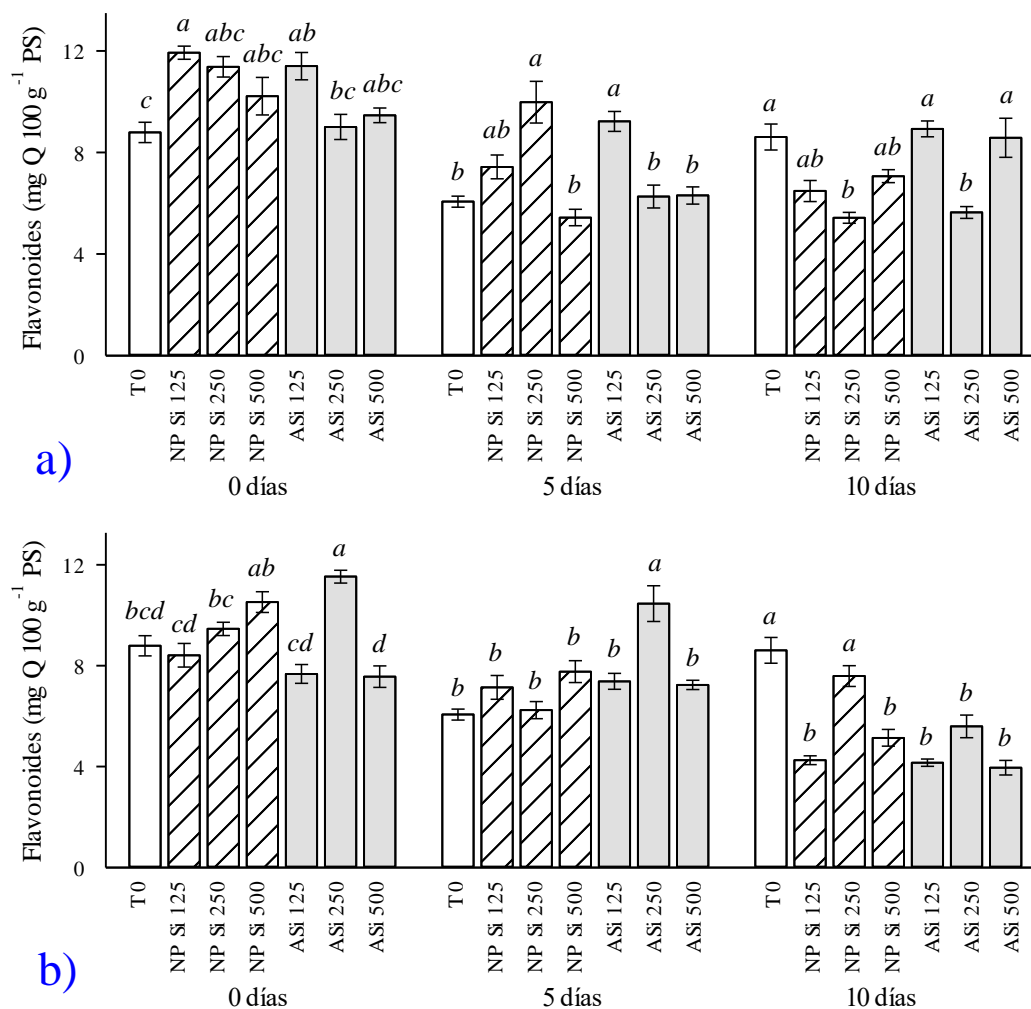
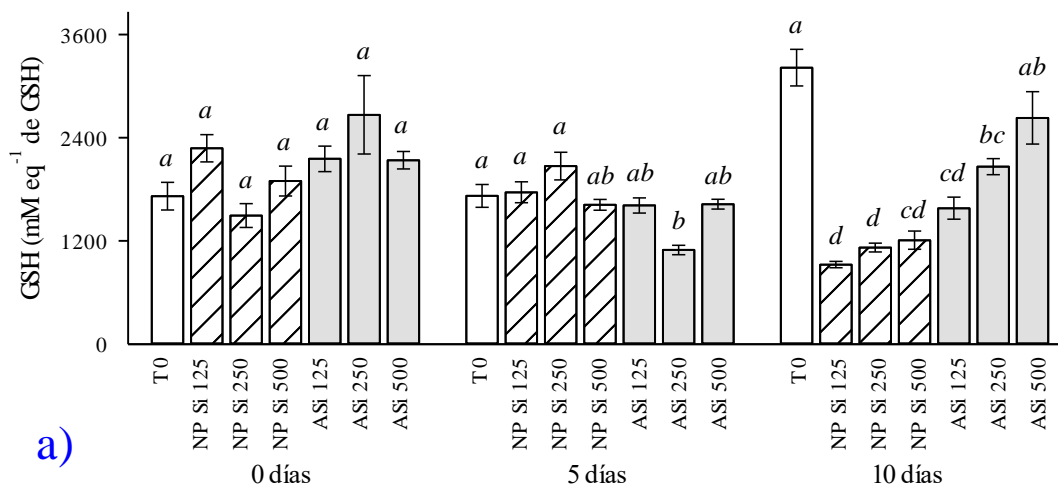


Figura 8. Concentración de Flavonoides a los 0, 5 y 10 días de almacenamiento en frutos de pepino tratados con NP's de Si y silicato de K en precosecha (a) y poscosecha (b). Letras iguales sobre las barras dentro del mismo día de almacenamiento son estadísticamente iguales de acuerdo a la prueba de LSD Fisher ($P > 0.05$). Cada dato es la media de seis repeticiones y el error estándar.

Se observaron diferencias en el contenido de glutatión (GSH) (figura 12). En la aplicación poscosecha al día de la cosecha los tratamientos NP Si 250, ASi 125 y NP Si 125 estuvieron un 100, 90.4 y 88.6 % (respectivamente) sobre el control. Al día cinco de almacenamiento el tratamiento ASi 250 tuvo un 45.4 % más GSH que el control. Mientras que al día diez de almacenamiento los tratamientos NP Si 250 y el control estuvieron por encima de los demás

tratamientos. En la aplicación precosecha, se observaron diferencias hasta los cinco días de almacenamiento donde los tratamientos control, NP Si 125 y NP Si 250 tuvieron más contenido GSH que los demás tratamientos. A los diez días de almacenamiento el control estuvo por encima de los demás tratamientos. El silicio (Si) puede estar involucrado en la actividad metabólica, fisiológica, y está asociado a los componentes de las paredes celulares por lo que puede funcionar como elicitador (Babalar *et al.*, 2016; Bockhaven *et al.*, 2013; Shen *et al.*, 2010). Por otro lado las nanoparticulas interactúan con las estructuras intracelulares (Juárez-Maldonado *et al.*, 2016), estimulando la formación de ROS, que a su vez activa el sistema de defensa de la planta, generando compuestos antioxidantes enzimáticos y no enzimáticos (Fu *et al.*, 2014). Estimulando el GSH ya bien sabido que el glutatión (GSH) es uno de los compuestos cruciales no enzimáticos involucrados en la defensa contra el estrés oxidativo. El GSH se puede encontrar en forma reducida (GSH) o en forma oxidada (GSSG), y se considera importante para una variedad de procesos vitales, como el transporte de aminoácidos a través de intercambio de membranas y disulfuro de tior (Mendoza-Cózatl *et al.*, 2005; Nakamura *et al.*, 2013).



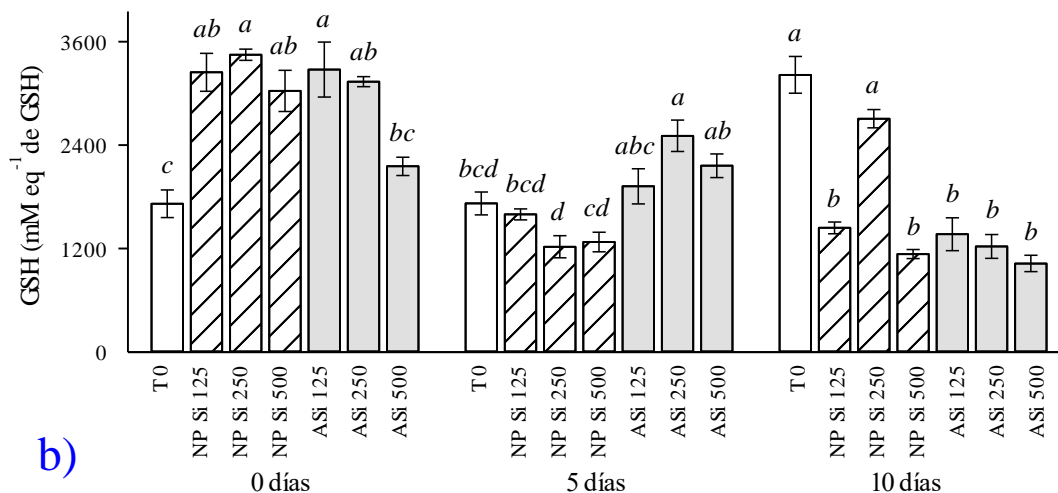


Figura 9. Concentración de glutatión reducido a los 0, 5 y 10 días de almacenamiento en frutos de pepino tratados con NP's de Si y silicato de K en precosecha (a) y poscosecha (b). Letras iguales sobre las barras dentro del mismo día de almacenamiento son estadísticamente iguales de acuerdo a la prueba de LSD Fisher ($P > 0.05$). Cada dato es la media de seis repeticiones y el error estándar.

Se observaron diferencias en la capacidad antioxidante por el radical ABTS (figura 9). En la aplicación poscosecha para los compuestos hidrofílicos al momento de la cosecha el tratamiento A Si 500 mostrando una actividad antioxidante 189.5 % mayor que el control. Al día cinco después de la cosecha el control junto con los tratamientos NP Si 125 Y NP Si 500. En el día diez de almacenamiento el tratamiento control mostro la mayor capacidad antioxidante. Mientras que para los compuestos lipofílicos al día de la cosecha la mayor capacidad antioxidante la mostro el control. Al día cinco de almacenamiento sucedió algo similar ya que el tratamiento control junto con NP Si 125 mostraron la mayor capacidad antioxidante. En el día diez los tratamientos NP Si 125 y A Si 125 mostraron una actividad antioxidante 251.9 y 225.74% mayor que el control.

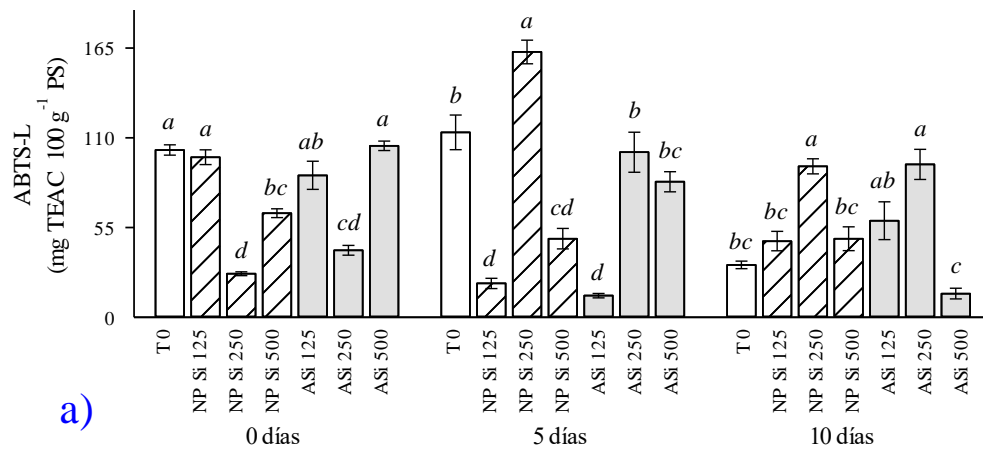
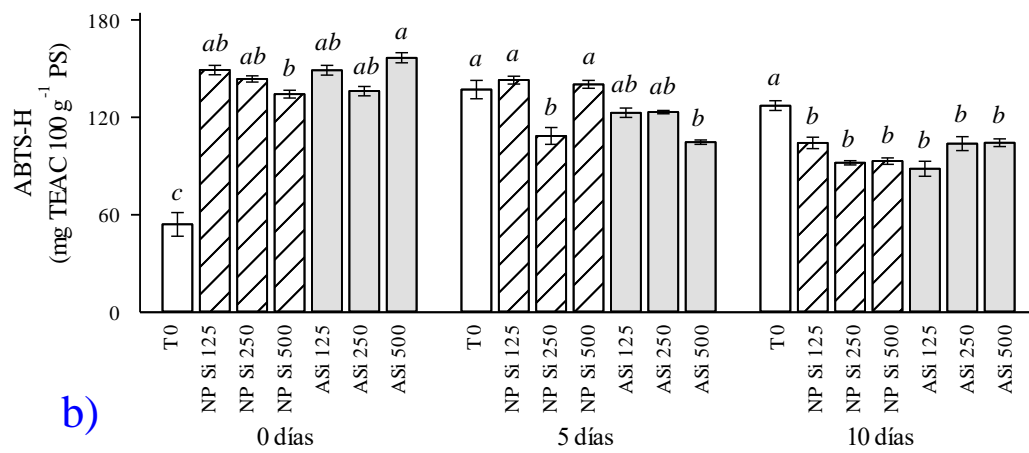
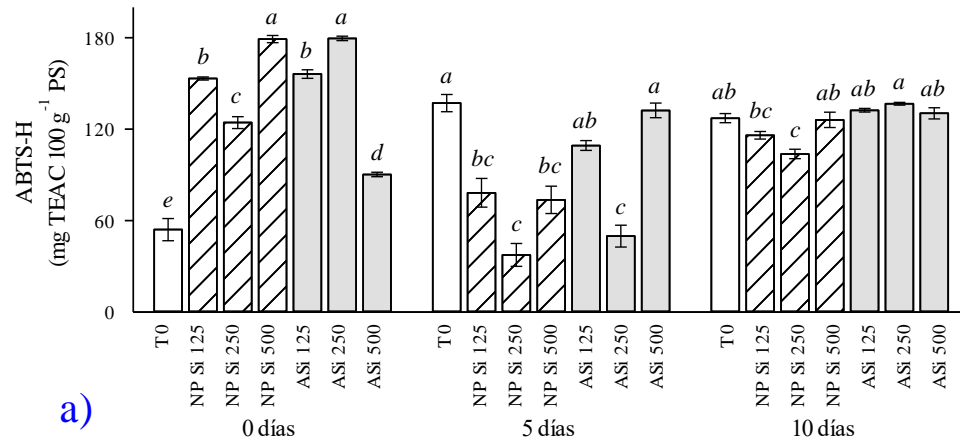
En la aplicación precosecha para los compuestos hidrofílicos, al día de la cosecha se observó una capacidad antioxidante 231.7 y 230.8 % mayor que el control en los tratamientos A Si 250 y NP Si 500 respectivamente. En el día cinco se encontró algo distinto ya que el tratamiento control fue el que mostró la mayor capacidad antioxidante. Al día diez el tratamiento A Si 250 mostro la mayor capacidad antioxidante siendo 7.4 % mayor que el control. Mientras que

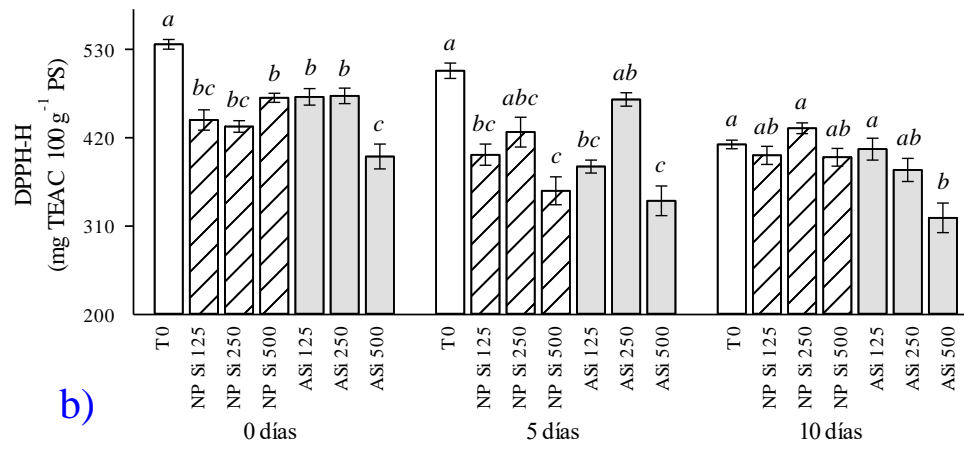
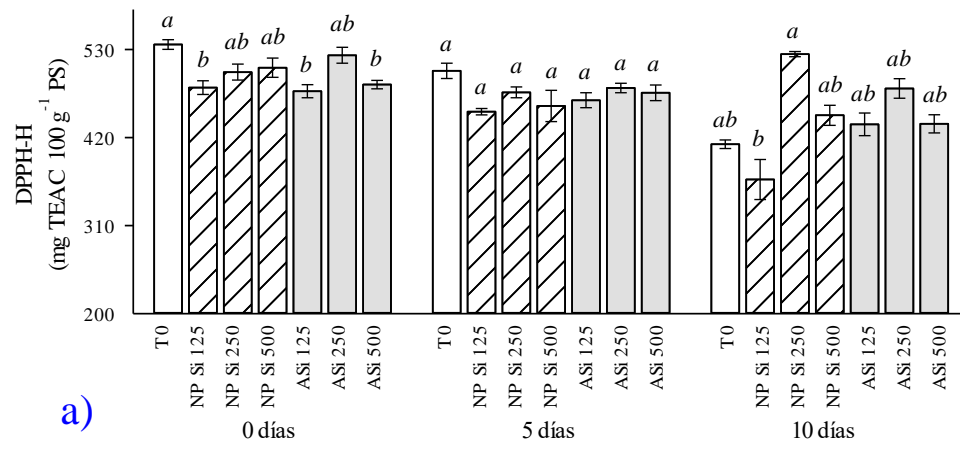
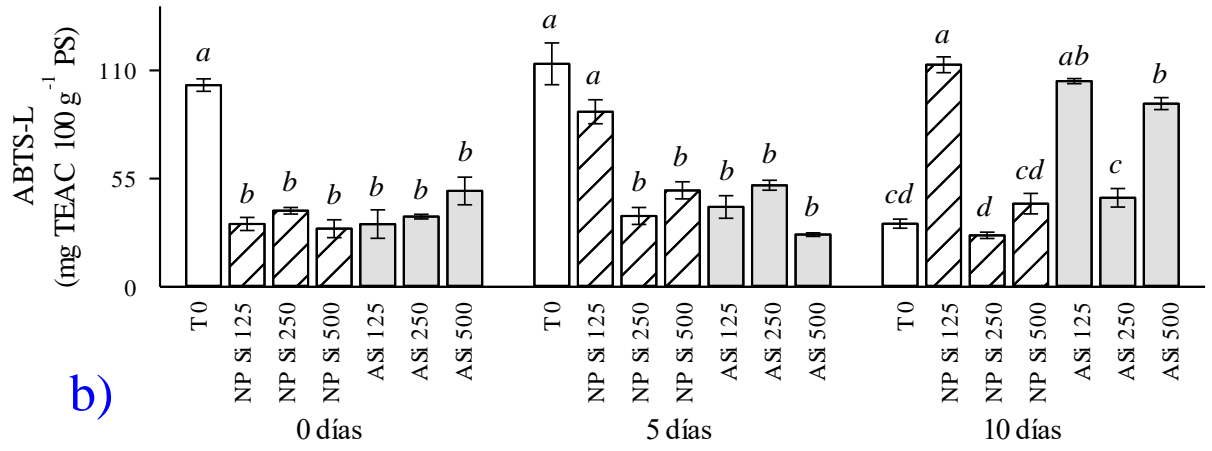
para los compuestos lipofílicos al día de la cosecha los tratamientos Control y ASi 500 fueron los superiores. En el día cinco el tratamiento NP Si 250 mostro un 43.5 % más actividad antioxidante que el Control. Algo similar ocurrió en el día diez de almacenamiento donde el tratamiento NP Si 250 junto al ASi 250 fueron superiores al control por 188.4 y 192.32% respectivamente.

Se observaron diferencias en la capacidad antioxidante por el radical DPPH (Tabla 9). En la aplicación poscosecha para los compuestos hidrofílicos, al día cero y cinco de almacenamiento el tratamiento Control mostro la mayor capacidad antioxidante. Sucediendo algo similar el día diez de almacenamiento a que el Control NP Si 250 mostraron la mayor capacidad antioxidante. Mientras que para los compuesto lipofílicos al día cero y diez no se mostraron diferencias. En el día cinco de almacenamiento la mayor capacidad antioxidante se encontró en los tratamientos NP Si 250 y NP Si 500 siendo 5.1 y 4.7 % superiores al Control. En la aplicación precosecha para los compuestos hidrofílicos el tratamiento control fue el superior al día de la cosecha. Al día diez de almacenamiento el tratamiento NP Si 250 fue 27.3 % mayor que el Control. Mientras que en los compuestos lipofílicos no se encontraron diferencia en el día cero y diez de almacenamiento. En el día cinco la mayor actividad antioxidante en encontró en el tratamiento NP Si 125 con una actividad antioxidante 9 % mayor que el control.

El silicio (Si) puede estar involucrado en la actividad metabólica, fisiológica (Shen *et al.*, 2010). Así como se sabe que las NP tienen la capacidad de incrementar la actividad antioxidante (Fu *et al.*, 2014). Esto puede explicar el aumento de la capacidad antioxidante durante los cero y cinco días de almacenamiento, la disminución a los diez días de almacenamiento se pudo deber a que en condiciones de alto estrés donde la actividad antioxidante disminuye debido a la explosión oxidativa (Rizwan *et al.*, 2017). Los antioxidantes también desempeñan un papel importante en la vida útil de los alimentos. Por ejemplo, inhiben o previenen la oxidación de los lípidos, lo que resulta en la formación de compuestos aromáticos indeseables, y protegen componentes alimenticios valiosos, como proteínas y vitaminas (Rizwan *et al.*,

2017). La capacidad antioxidante está dada por diferentes tipos de antioxidantes ya sea de naturaleza hidrofílica como la Vitamina C o lipofílica como el β -caroteno, siendo los más importantes con actividad antioxidante los compuestos fenólicos, flavonoides y carotenoides (Arnao *et al.*, 2001). La ventaja del radical ABTS es su alta reactividad y, por lo tanto, es probable que reaccione con una gama más amplia de antioxidantes. Por otro lado, la preparación del reactivo ABTS es más difícil y su estabilidad es menor en comparación con el DPPH. Esto puede llevar a resultados imparciales (Pavel *et al.*, 2006). Los métodos ABTS y DPPH se basan en diferentes mecanismos (Mareček *et al.*, 2017), la reactividad de los compuestos fenólicos depende de sus estructuras químicas (Zhao *et al.*, 2008). Por lo tanto, los resultados obtenidos por diferentes métodos pueden estar sesgados. El método DPPH proporciona valores más bajos relacionados con Trolox que el método ABTS debido a una menor reactividad del radical DPPH (Mareček *et al.*, 2017). El radical DPPH reacciona con los polifenoles (catequinas, proantocianidinas), pero no con los ácidos fenólicos y los azúcares (Kaneda *et al.*, 1995). Por lo tanto, los espectros de antioxidantes determinados por DPPH y ABTS son en parte diferentes (Mareček *et al.*, 2017). El Si al estar involucrado en la actividad metabólica y fisiológica (Shen *et al.*, 2010), mientras que las NP tienen la capacidad de estimular la formación de ROS (Fu *et al.*, 2014). En condiciones de estrés la actividad antioxidante disminuye debido a la explosión oxidativa (Rizwan *et al.*, 2017), a esto se le puede atribuir la disminución de la actividad antioxidante en los tratamientos con aplicaciones de Si y NP de Si en las diferentes dosis.





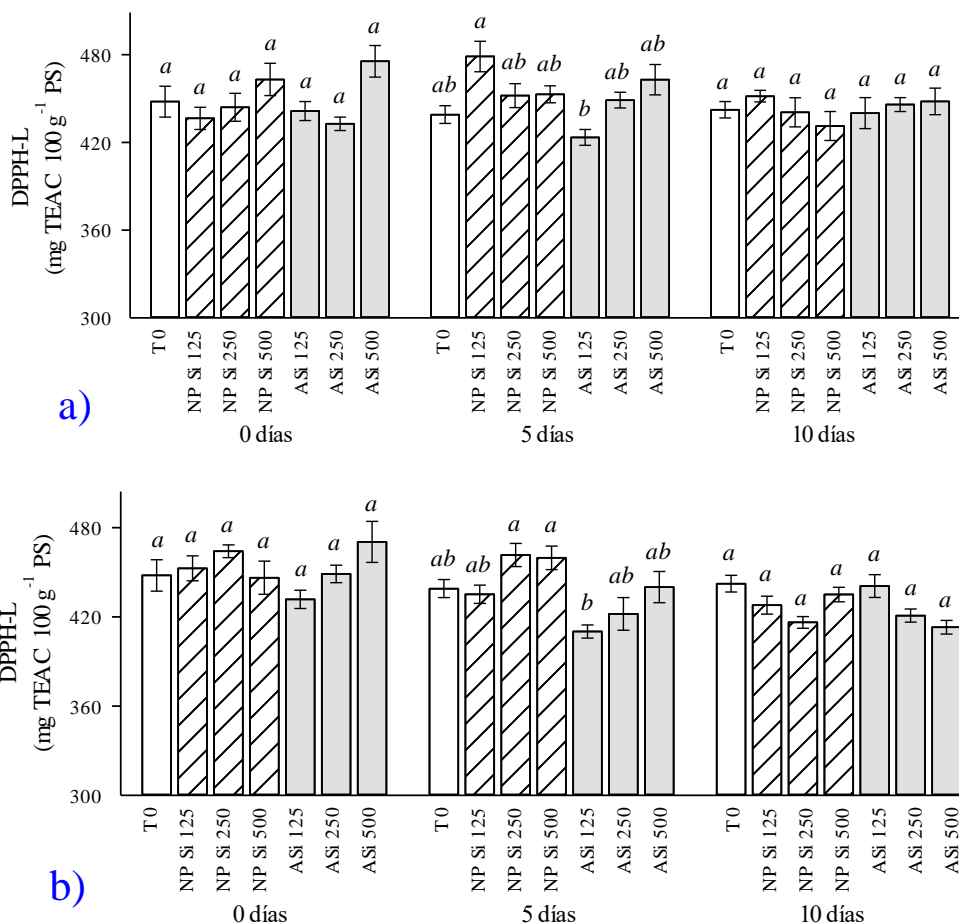


Figura 10. Capacidad antioxidante ABTS y DPPH de compuestos hidrofílicos (H) y lipofílicos (L) a los 0, 5 y 10 días de almacenamiento en frutos de pepino tratados con NP's de Si y silicato de K en precosecha (a) y poscosecha (b). Letras iguales sobre las barras dentro del mismo día de almacenamiento son estadísticamente iguales de acuerdo a la prueba de LSD Fisher ($P > 0.05$). Cada dato es la media de seis repeticiones y el error estándar.

Actividad enzimática

Se observaron diferencias en el contenido de catalasa (figura 10). En la aplicación poscosecha al día de cosecha el control estuvo 50% por encima de los tratamientos, al día diez de almacenamiento ASi 125, ASi 500 y NP Si 500 fueron más altos que el control. En la aplicación precosecha no mostraron diferencias estadísticas, sino solo al día diez de almacenamiento el tratamiento ASi 125 se mantuvo más alto que el control. La principal actividad de la enzima catalasa es descomponer el H_2O_2 ya sea tanto en pequeñas como grandes concentraciones (John *et al.*, 1997). El H_2O_2 se forma por estrés ya sea biótico o abiótico (Foyer y Noctor, 2005), se sabe que el Si disminuye el estrés en

plantas expuestas a estreses abióticos y bióticos (Shen *et al.*, 2010), por qué la aplicación de los tratamientos con Si pudo haber disminuido la formación de H_2O_2 y por esto no se observa un aumento claro de la actividad enzimática de catalasa.

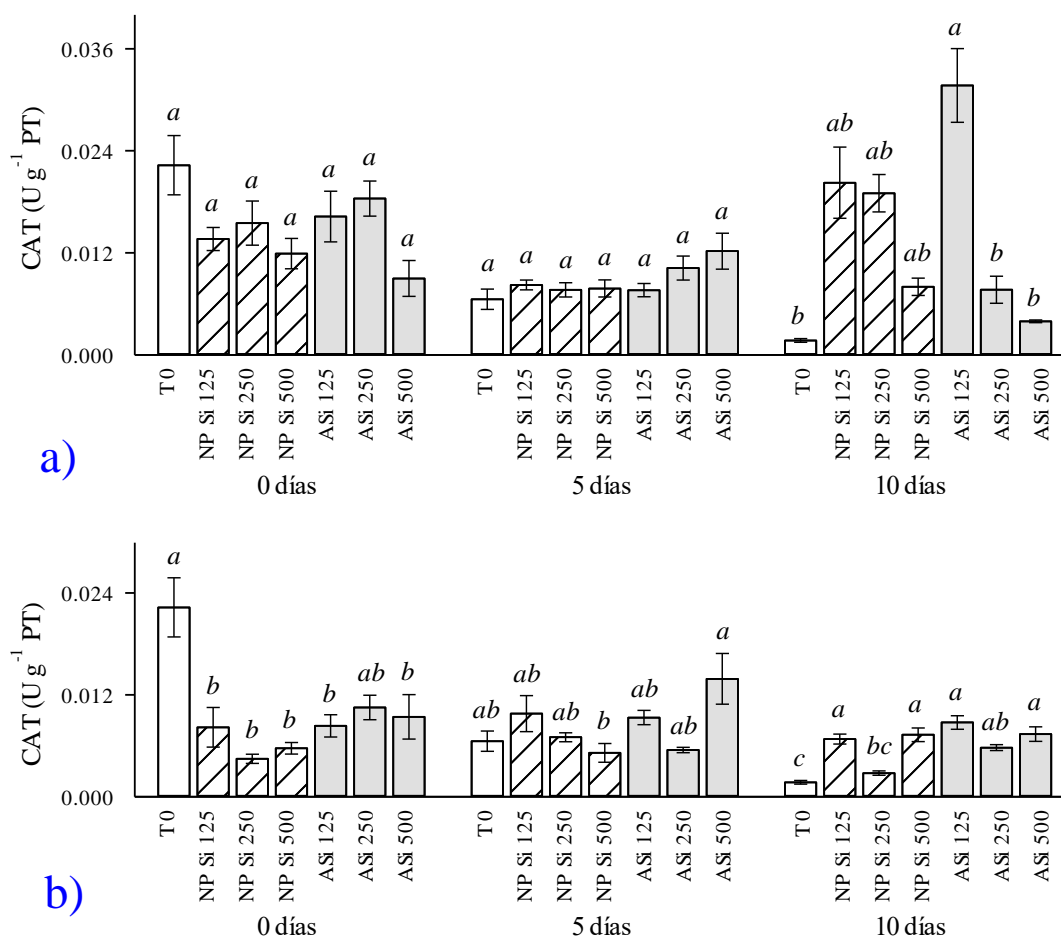
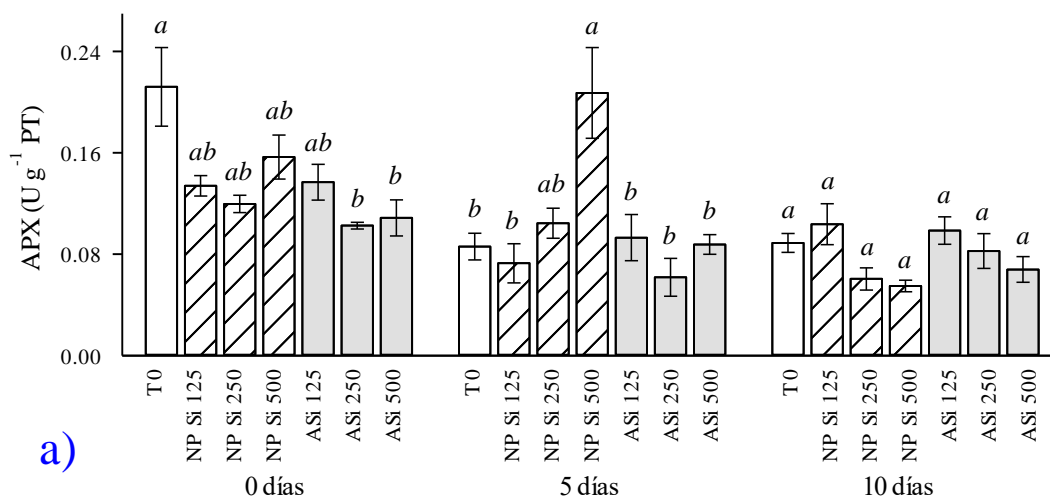


Figura 11. Concentración de la actividad enzimática Catalasa a los 0, 5 y 10 días de almacenamiento en frutos de pepino tratados con NP's de Si y silicato de K en precosecha (a) y poscosecha (b). Letras iguales sobre las barras dentro del mismo día de almacenamiento son estadísticamente iguales de acuerdo a la prueba de LSD Fisher ($P > 0.05$). Cada dato es la media de seis repeticiones y el error estándar.

Se observaron diferencias en la actividad enzimática de ascorbato peroxidasa (figura 11) Al momento de la cosecha en la aplicación poscosecha tratamientos poscosecha, el control se mantuvo por encima de los demás tratamientos. Mientras que al día cinco y diez de almacenamiento no hubo diferencias. En la aplicación precosecha a los cinco días de almacenamiento el tratamiento NP Si 500 mostro un 33.3 % mayor actividad enzimática respecto al control. Al día

diez de almacenamiento no se encontraron diferencias. El aumento en esta enzima es importante ya que el ascorbato peroxidasa es una enzima que elimina el H_2O_2 utilizando el ascorbato como donante de electrones para reducir el H_2O_2 en agua, siendo extremadamente sensible a las concentraciones de ascorbato (Jamsheed *et al.*, 2014). La inducción de APX es un elemento de la respuesta al estrés oxidativo causado en las plantas, desempeña un papel importante en el control de la concentración de ROS que participan en la transducción de señales en muchos procesos fisiológicos y en el manejo de ROS durante el estrés en cultivos hortícolas (Imahori, 2014). Una disminución en la actividad antioxidante enzimática en las frutas podría deberse a la inactivación de más enzimas debido a los efectos tóxicos de las ROS (Jincy *et al.*, 2017). Lo que nos dice que el Si y las NP de Si no son tan reactivas como otros elementos ya que López-Vargas *et al.* (2018) reportan una disminución de la APX con dosis de 50 a 500 mg L⁻¹ de NP de Cu.



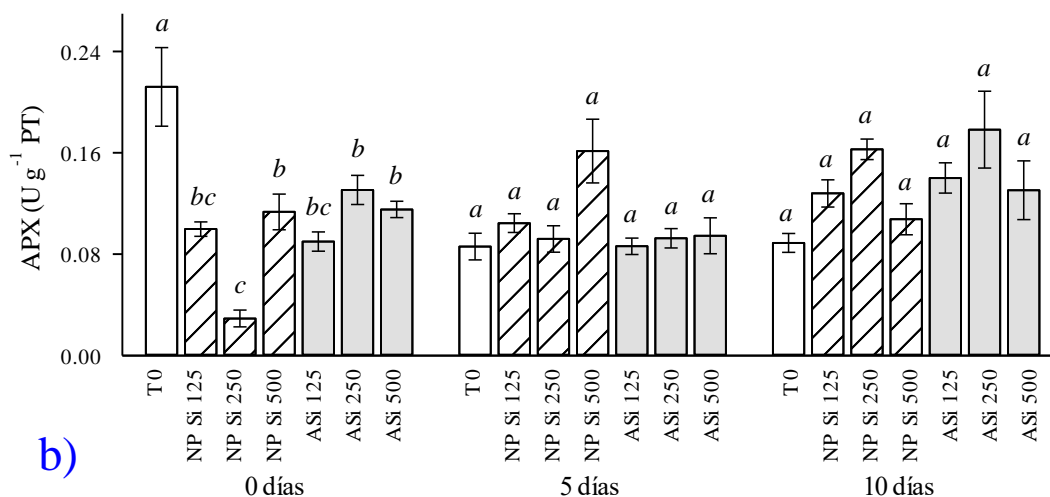


Figura 12. Concentración de la actividad enzimática Ascobato Peroxidasa a los 0, 5 y 10 días de almacenamiento en frutos de pepino tratados con NP's de Si y silicato de K en precosecha (a) y poscosecha (b). Letras iguales sobre las barras dentro del mismo día de almacenamiento son estadísticamente iguales de acuerdo a la prueba de LSD Fisher ($P > 0.05$). Cada dato es la media de seis repeticiones y el error estándar.

Se observaron diferencias en el contenido de gluatión peroxidasa (GPX) (figura 13). La aplicación poscosecha en el día de la cosecha el tratamiento ASi 250 mostro 266% más GPX que el control. Al día cinco de almacenamiento el tratamiento NP Si 250 fue más alto que el control. El control fue el que tuvo el menor contenido GPX en esta fecha de almacenamiento siendo este el de menos contenido de todos los tratamientos. El tratamiento ASi 500 mostro un 118 % más GPX que el control a los diez días de almacenamiento mientras que en la aplicación precosecha al día de la cosecha el tratamiento ASi 125 fue 33.3 % mayor que el control. En el día cinco de almacenamiento los tratamientos ASi 250 y NP Si 125 estuvieron por encima del control. Manteniéndose el tratamiento ASi 250 136.3 % mayor que el control a los diez días de almacenamiento. La enzima GPX desempeña un papel importante en mantener las células saludables bajo estrés ambiental al eliminar los radicales superoxidasa, catalizando su conversión a O_2 , reduce el H_2O_2 y los hidroperóxidos orgánicos al agua y los alcoholes usando glutatión reducido (GSH) (Alharby *et al.*, 2016). Se observa que el Si al participar en la actividad metabólica y estar asociado a los componentes de las paredes celulares (Bockhaven *et al.*, 2013; Shen *et al.*, 2010), así como las NP estimulando la

formación de ROS (Fu *et al.*, 2014), tuvieron un efecto positivo en el aumento de esta enzima.

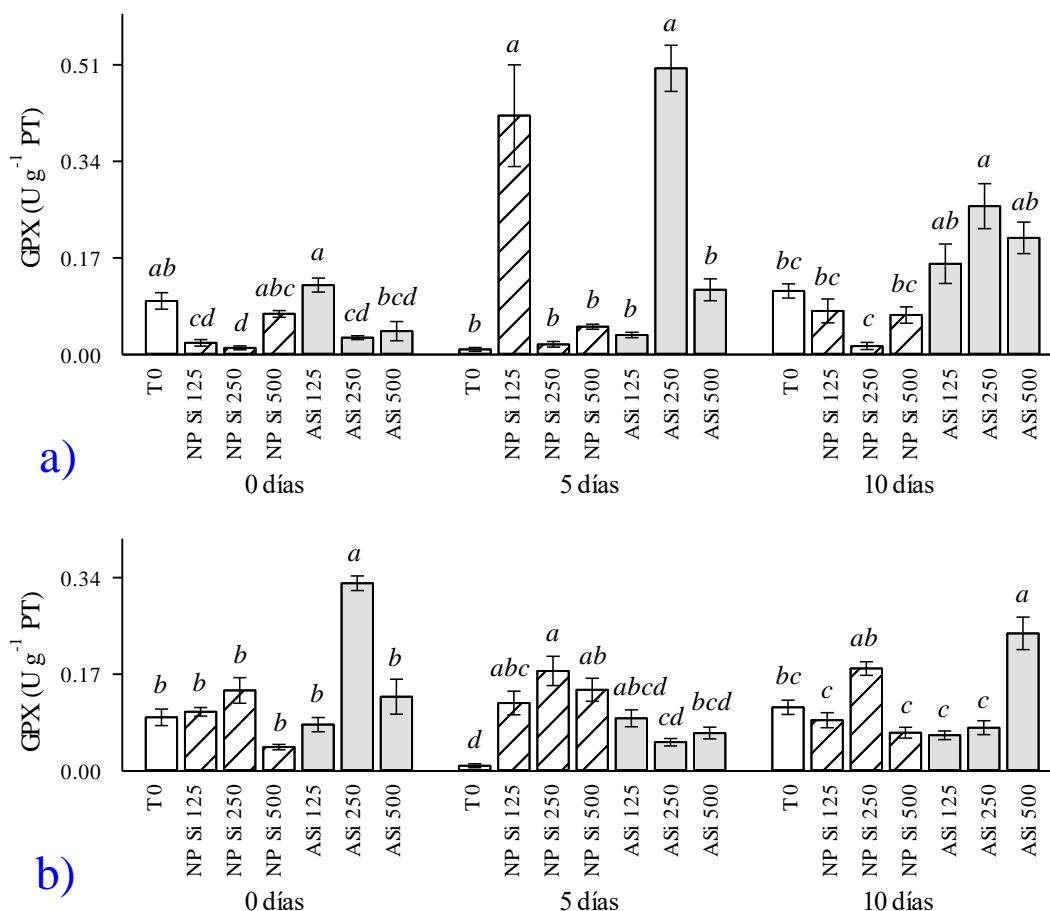


Figura 13. Concentración de la actividad enzimática glutatión peroxidasa a los 0, 5 y 10 días de almacenamiento en frutos de pepino tratados con NP's de Si y silicato de K en precosecha (a) y poscosecha (b). Letras iguales sobre las barras dentro del mismo día de almacenamiento son estadísticamente iguales de acuerdo a la prueba de LSD Fisher ($P > 0.05$). Cada dato es la media de seis repeticiones y el error estándar.

Se observaron diferencias en la actividad enzimática de SOD (figura 14). En la aplicación poscosecha en el día de la cosecha el tratamiento ASi 125 fue 353% superior que el control. Al día cinco los tratamientos NP Si 500 y control mostraron una mayor actividad enzimática. Manteniéndose este último con una mayor actividad a los diez días de almacenamiento. Mientras que en la aplicación precosecha en el día de la cosecha el tratamiento ASi 250 tuvo 513.3 % más actividad enzimática que el control. En el día cinco de almacenamiento el tratamiento ASi 500 y control fueron los que mostraron una mayor actividad enzimática. Mientras que en el día diez se observó algo similar que en la

aplicación poscosecha donde el control mostró una mayor actividad enzimática. La enzima SOD junto con el GPX desempeñan un papel importante en mantener las células saludables bajo estrés ambiental al eliminar los radicales superoxidasa, catalizando su conversión a O_2 , reduce el H_2O_2 y los hidroperóxidos orgánicos al agua y los alcoholes usando glutatión reducido (GSH) (Alharby *et al.*, 2016). Se observa un efecto positivo por el Si y las NP de Si ya que funcionan como elicitores, estos últimos mediante la formación de ROS (Babalar *et al.*, 2016; Fu *et al.*, 2014). El SOD es la primer línea de defensa en contra de los ROS (Kumar y Trivedi, 2016; Dos Santos *et al.*, 2017). Se estimuló por los tratamientos.

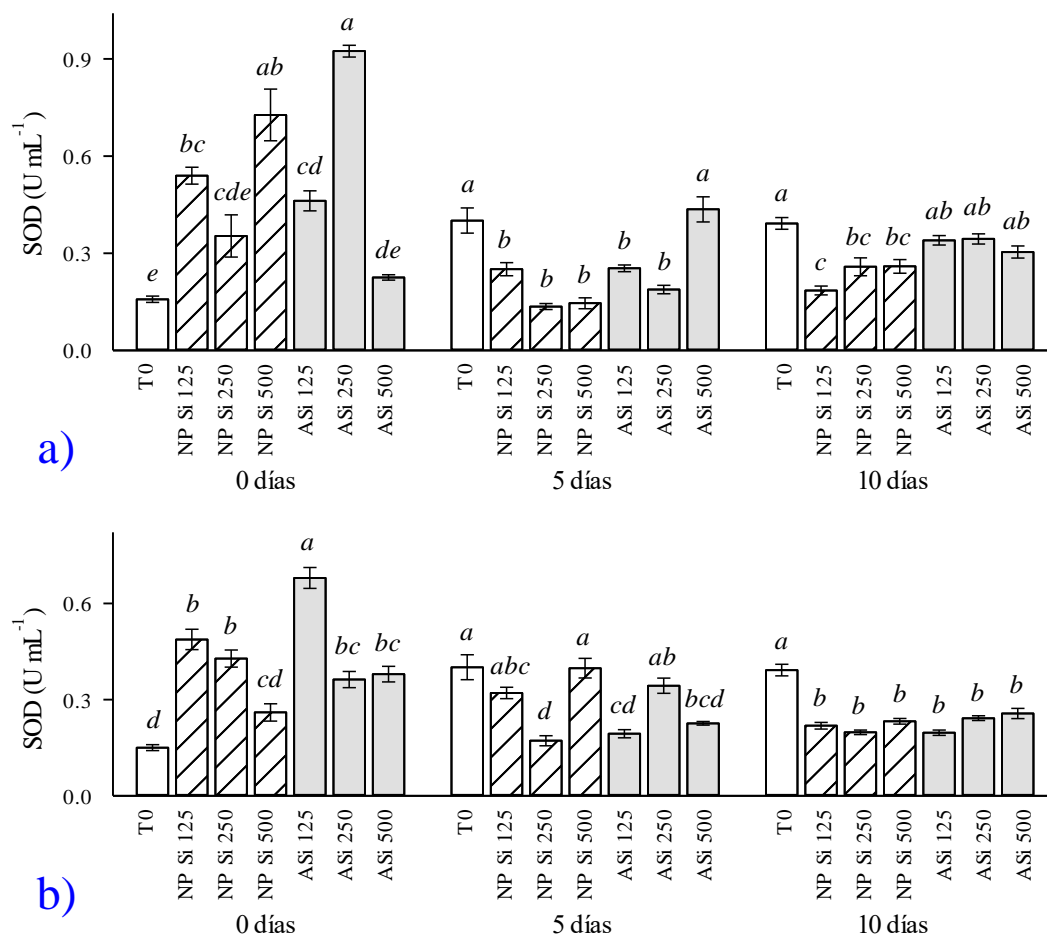
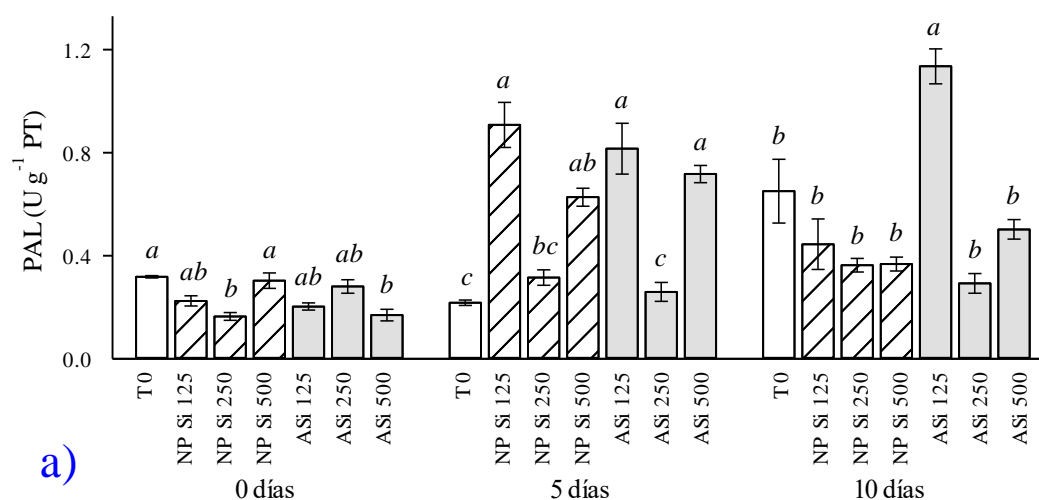


Figura 14. Concentración de la actividad enzimática superóxido dismutasa a los 0, 5 y 10 días de almacenamiento en frutos de pepino tratados con NP's de Si y silicato de K en precosecha (a) y poscosecha (b). Letras iguales sobre las barras dentro del mismo día de almacenamiento son estadísticamente iguales de acuerdo a la prueba de LSD Fisher ($P > 0.05$). Cada dato es la media de seis repeticiones y el error estándar.

Se observaron diferencias en la enzima fenilalanina amonio liasa (PAL) (figura 15). En la aplicación poscosecha al día de la cosecha y al día diez de almacenamiento el tratamiento control fue el que mostró la mayor actividad enzimática. Mientras que al día cinco de almacenamiento el tratamiento ASi 250 mostró una actividad enzimática 31.8 % por encima del control. Por otra parte en la aplicación precosecha al día de la cosecha los tratamientos NP Si 500 y control estuvieron por encima de los demás tratamientos. Al día cinco de almacenamiento los tratamientos NP Si 125, ASi 125 y ASi 500 fueron los que mantuvieron la mayor actividad enzimática un 313, 272 y 227 % (respectivamente) más que el control. En los diez días de almacenamiento el tratamiento ASi 125 tuvo 73.8 % mayor actividad enzimática que el control. Siendo esto altamente benéfico ya que la enzima PAL modula la L-fenilalanina para la fabricación del ácido transcinámico, que a su vez forman fenilpropanoides, causando la producción de metabolitos fenólicos (flavonoides, cumarinas, ésteres de fenol y lignina) (Hajiboland *et al.*, 2017; Weaver y Herrmann, 1997).



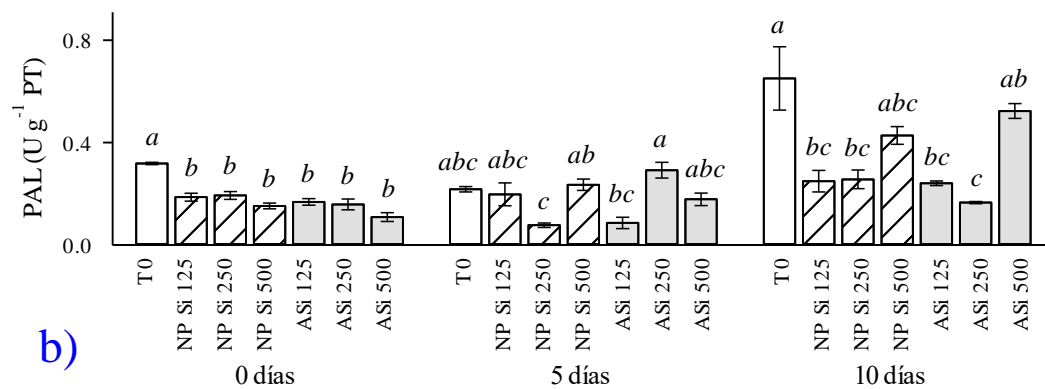


Figura 15. Concentración de la actividad enzimática Fenilalanina Amonio Liasa a los 0, 5 y 10 días de almacenamiento en frutos de pepino tratados con NP's de Si y silicato de K en precosecha (a) y poscosecha (b). Letras iguales sobre las barras dentro del mismo día de almacenamiento son estadísticamente iguales de acuerdo a la prueba de LSD Fisher ($P > 0.05$). Cada dato es la media de seis repeticiones y el error estándar.

CONCLUSIONES

En la calidad del fruto las nano partículas mostraron mejores resultados aumentando el contenido de SST, AT, vit C y pH en ambas aplicaciones pre y poscosecha

En el contenido de fenoles y flavonoides en la aplicación poscosecha se vieron mayormente influenciados por la aplicación de silicio en forma iónica, mientras que en la aplicación precosecha el silicio en forma nano mostró mejores resultados.

La actividad antioxidante se mostró más estimulada por las nano partículas de silicio en ambas aplicaciones pre y pos cosecha.

Las enzimas antioxidantes mostraron una elevada actividad con la aplicación de silicio en forma iónica.

REFERENCIAS

- Aguirre-Mancilla C.L. y Raya-Pérez J.C. 2010. El Silicio en las plantas. Centro de Investigación Aplicada del Instituto Tecnológico Superior de Uruapan (CIA-ITESU).
- Aguirre, C. El Silicio en los organismos vivos. 2007. *Interciencia*, agosto, año/vol. 32, número 008, Asociación Interciencia Caracas Venezuela pp. 504 – 509.
- Ahmad, P., Sumiya, J., Hameed, A., Rasool, S., Sharma, I., Azooz, M. M., Hasanuzzaman M. 2014. Drought Stress Induced Oxidative Damage and Antioxidants in Plants. *Oxidative Damage to Plants*: 345–67.
- Alba, R., Payton, P., Fei, Z., McQuinn, R., Debbie, P., Martin, G. B., Giovannoni, J. J. 2005. Transcriptome and selected metabolite analyses reveal multiple points of ethylene control during tomato fruit development. *The Plant Cell*. 17(11):2954-2965.
- Albarracin, S. L., Stab, B., Casas, Z., Sutachan, J. J., Samudio, I., Gonzalez, J., Barreto, G. E. 2012. Effects of natural antioxidants in neurodegenerative disease. *Nutritional Neuroscience*, 15(1), 1–9.
- Alharby, Hesham F., Ehab M. R. Metwali, Michael P. Fuller, and Amal Y. Aldhebani. 2016. The Alteration of mRNA Expression of SOD and GPX Genes, and Proteins in Tomato (*Lycopersicon Esculentum* Mill) under Stress of NaCl and/or ZnO Nanoparticles. *Saudi Journal of Biological Sciences*. 23(6):773–81.
- Almajano, M. P., Vila, I., Gines, S. 2011. Neuroprotective effects of white tea against oxidative stress-induced toxicity in striatal cells. *Neurotoxicity Research*, 20(4): 372–378.
- 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.
- Arnao, M. B., Cano, A., Acosta, M. 2001. The Hydrophilic and Lipophilic Contribution to Total Antioxidant Activity. *Food Chemistry* 73(2): 239–44.
- Arvouet-Grand, A., Vennat, B., Pourrat, A, Legret, P. 1994. Standardization of Propolis Extract and Identification of Principal Constituents. *Journal de pharmacie de Belgique* 49(6): 462–68.
- Babalar, M., Behzad, E., Roohangiz, N. 2016. Evaluation of the Mechanical Strength of Gerbera Flower Stem in Response to Silicon and Salicylic

- Acid Application. *Journal of Ornamental Plants*, Volume 6, Number 3: 163-171.
- Ballard, C. R., Maróstica, M. R. 2019. Health Benefits of Flavonoids. *Bioactive Compounds: Health Benefits and Potential Applications*. 185–201.
- Bamdad, F., Chen, L. 2013. Antioxidant Capacities of Fractionated Barley Hordein Hydrolysates in Relation to Peptide Structures. *Molecular Nutrition & Food Research* 57(3): 493–503.
- Bando-Ulloa, J. M., Moreno, E., García-Mas, J., Nicolai, B., Lammertyn, J., Monforte, A. J., Fernández-Trujillo, J. P. 2008. Climacteric or non-climacteric behavior in melon fruit: Aroma volatiles. *Postharvest Biol. Technol.* 49(1):27-37.
- Bapat, V. A., Trivedi, P. K., Ghosh, A., Sane, V. A., Ganapathi, T. R., Nath, P. 2010. Ripening of fleshy fruit: molecular insight and the role of ethylene. *Biotechnol. Adv.* 28(1):94-107.
- Bartley, G. E., Scolnik, P. A. 1995. Plant carotenoids: pigments for photoprotection, visual attraction, and human health. *The Plant Cell.* 7(7):1027-1038.
- Barz, W.; Hoesel, W. Metabolism and degradation of phenolic compounds in plants. *Phytochemistry* 1977, 12, 339-369.
- Bennett, R. N., Roger, M. W. 1994. Secondary Metabolites in Plant Defence Mechanisms. 127 *Vm Phytol Tansley Review No. 72*
- Bernard-Mantel, A., Bouzehouane, K., Seneor, P., Fusil, S., Deranlot, C., Brenac, A., Notin, L., Morel, R., Petroff, F., Fert, A. 2010. A versatile nanotechnology to connect individual nanoobjects for the fabrication of hybrid single-electron devices. *Nanotechnology.* 2010 Nov 5;21(44):445201.
- Biale, J. B. 1964. Growth, maturation, and senescence in fruits. *Science.* 146: 880-888.
- Bockhaven, V., Vleeschauwer, J. D., Höfte, M. 2013. Towards Establishing Broad-Spectrum Disease Resistance in Plants: Silicon Leads the Way. *Journal of Experimental Botany* 64(5): 1281–93.
- Boscheco, M. C. 2008. Evaluación fotoquímica y antioxidante, citotóxica e hipoglucemiantes de frutos de *Cucumis anguria* L. (Cucurbitaceae). Tesis de Maestría en Ciencias Farmacéuticas, Universidad Federal de Paraná, Brasil. 91 p.

- Bouzayen, M., Latché, A., Nath, P., Pech, J. C. 2010. Mechanism of fruit ripening. *Plant developmental biology-biotechnological perspectives*. Pua, E. C. y Davey, M. R. (Eds.). Springer-Verlag. Berlin, Germany. Vol. 1. 319-339 pp.
- Brand-Williams, W., Cuvelier, M. E., Berset, C. 1995. Use of a Free Radical Method to Evaluate Antioxidant Activity. *LWT Food Science and Technology* 28(1): 25–30.
- Brummell, D. A. and Harpster, M. H. 2001. Cell wall metabolism in fruit softening and quality and its manipulation in transgenic plants. *Plant cell walls*. Springer Science. Netherlands. 311-340 pp.
- Brummell, D. A., Harpster, M. H., Civello, P. M., Palys, J. M., Bennett, A. B., Dunsmuir, P. 1999. Modification of expansin protein abundance in tomato fruit alters softening and cell wall polymer metabolism during ripening. *The Plant Cell*. 11(11):2203-2216.
- Buzea, C., Pacheco, I.I., Robbie, K. 2007. *Biointerphases 2*: MR17. <https://doi.org/10.1116/1.2815690>
- Casaca, A. D. 2005. El cultivo del pepino. *Guías tecnológicas de frutas y vegetales*.
- Cheng, N., Wang, Y., Gao, H., Yuan, J., Feng, F., Cao, W., Zheng, J. 2013. Protective effect of extract of *Crataegus pinnatifida* pollen on DNA damage response to oxidative stress. *Food and Chemical Toxicology*, 59, 709–714.
- Chervin, C. El-Kereamy, A. Roustan, J. P. Latché, A. Lamon, J. and Bouzayen, M. 2004. Ethylene seems required for the berry development and ripening in grape, a non-climacteric fruit. *Plant Sci*. 167(6):1301-1305.
- Foyer, C. H., Noctor, G. 2005. Redox Homeostasis and Antioxidant Signaling: A Metabolic Interface between Stress Perception and Physiological Responses. *The Plant Cell* 17: 1866–75.
- Curtis, J. M., Hahn, W. S., Long, E. K., Burrill, J. S. Arriaga, E. A., Bernlohr, D. A. 2012. Protein carbonylation and metabolic control systems. *Trends in Endocrinology and Metabolism*. 23(8):399-406.
- De Grey, A. D. N. J. 2002. HO₂ : The forgotten radical. *DNA Cell Biol*. 21:251–257.
- Dhindsa, R. S., Plumb-Dhindsa, P., Thorpe, T. A. 1981. Leaf senescence: Sorrelated with increased levels of membrane permeability and lipid

peroxidation, and decreased levels of superoxide dismutase and catalase. *J. Exp. Bot.*, 32, 93–101.

- Dilis, V., y Trichopoulou, A. 2010. Assessment of antioxidants in foods and biological samples: a short critique. *International Journal of Food Sciences and Nutrition*. 61(5):441–448.
- Dimitrios, B. 2006. Sources of natural phenolic antioxidants. *Trends in Food Science Technology*, 17(9), 505–512.
- Dos Santos. J. O., De Faria. M. E., Da Silva. D. M., De Oliveira. S., Helbert. R., Campos C., Alves J. D. 2017. Copper (Cu) Stress Affects Carbon and Antioxidant Metabolism in 'Coffea Arabica' Seedlings. *Australian Journal of Crop Science* 11 (8): 960–67.
- Dos Santos. R. S., Arge. L. W. P., Costa. S. I., Machado. N. D., De Mello-Farias. P. C., Rombaldi. C. V. and De Oliveira. A. C. 2015. Genetic regulation and the impact of omics in fruit ripening. *Plant Omics*. 8(2):78-88.
- Du, J., Cullen, J. J., Buettner, G. R. 2012. Ascorbic acid: Chemistry, biology and the treatment of cancer. *Biochimica et Biophysica Acta - Reviews on Cancer*, 1826(2), 443–457.
- Epstein, E. 1994. The anomaly of silicon in plant biology. *Proceedings of the National Academy of Sciences USA*, 91: 11-17.
- Epstein, E. 2009. Silicon: Its Manifold Roles in Plants. *Annals of Applied Biology* 155(2): 155–60.
- Exley, C. 1998. Silicon in life: A bioinorganic solution to bioorganic essentiality. *Journal of Inorganic Biochemistry*. Volume 69, Issue 3. Pages 139–144.
- Fernández-Trujillo, J. P., Obando, J., Martínez, J. A., Alarcón, A. L., Eduardo, I., Arús, P. and Monforte, A. J. 2007. Mapping fruit susceptibility to postharvest physiological disorders and decay using a collection of near-isogenic lines of melon. *J. Am. Soc. Hortic. Sci.* 132(5):739-748.
- Fraga, C. G., Kevin, D., Croft, D., Kennedy, O., Tomás-Barberán, F. A. 2019. The Effects of Polyphenols and Other Bioactives on Human Health. *Food & Function* 10(2): 514–28.
- Fauteux, F., Rémus-Borel, W., Menzies, J. G., Bélanger, R. R. 2005. Silicon and plant disease resistance against pathogenic fungi, *FEMS Microbiology Letters*, Volume 249, Issue 1, Pages 1–6.

- Fu, P. P., Xia, O., Hwang, H. M., Ray, P. C., Yu, H. 2014. Mechanisms of Nanotoxicity: Generation of Reactive Oxygen Species. *Journal of Food and Drug Analysis* 22(1): 64–75.
- Galati, C. V., Guimarães, R., Emmanuel, J., Marques, M., Fernandes, K., Diniz J., Bernardes, R., Filho, C., Mattiuz, A., Ben-Hur, 2015. Aplicação de Silício, Em Hidroponia, Na Conservação Pós-Colheita de Alface Americana ‘Lucy Brown’ Minimamente Processada. *Ciência Rural* 45(11): 1932–38.
- Gapper, N. E.; McQuinn, R. P. and Giovannoni, J. J. 2013. Molecular and genetic regulation of fruit ripening. *Plant Mol. Biol.* 82(6):575-591.
- Ghasemnezhad, M., Mohamad S., Gholam A. P., 2011. Variation in Phenolic Compounds, Ascorbic Acid and Antioxidant Activity of Five Coloured Bell Pepper (*Capsicum Annum*) Fruits at Two Different Harvest Times. *Journal of Functional Foods* 3(1): 44–49.
- Ghormade, V., Deshpande, M., Paknikar, K. 2011. Perspectives for nano-biotechnology enabled protection and nutrition of plants. *Biotechnology advances*, 29, (6), 792-803.
- Giovannoni, J. J. 2004. Genetic regulation of fruit development and ripening. *The plant cell.* 16(1):S170-S180.
- Given, N. K., Veis, M. A., Gierson, D. 1988. Hormonal regulation of ripening in the strawberry, a non-climacteric fruit. *Planta.* 174(3):402-406.
- Gordon, R. H. 1992. *Horticultura. 1ª Reimpresión.* Editor S.A México. D. F.
- Grijalva, R. L., Robles, F. 2003. Avances en la producción de hortalizas en invernaderos. *Publicación Técnica No. 7.* INIFAP-CIRNO-CECAB. Caborca, Sonora. México. 14-18.
- Grimes, M., Kobrin, B., 2008 *Surface engineering for microfabrication.* *Solid State Technol.* 51, 28–31.
- Hajiboland, R., Bahrami-Rad, S., Poschenrieder, C. 2017. Silicon Modifies Both a Local Response and a Systemic Response to Mechanical Stress in Tobacco Leaves. *Biologia Plantarum* 61(1): 187–91.
- He, J. and Giusti, M. M. 2010. Anthocyanins: natural colorants with health-promoting properties. *Annual review of food science and technology.* 1: 163-187.

- He, L., Yang L., Azlin M., and Mengshi L., 2011. Antifungal Activity of Zinc Oxide Nanoparticles against *Botrytis Cinerea* and *Penicillium Expansum*." *Microbiological Research* 166(3): 207–15.
- Hernández-Fuentes, A. D., López-Vargas, E. R., Pinedo-Espinoza, J. M., Campos-Montiel, R. G., Valdés Reyna, J., Juárez-Maldonado, A. 2017. Postharvest Behavior of Bioactive Compounds in Tomato Fruits Treated with Cu Nanoparticles and NaCl Stress. *Applied Sciences* 7(10): 980.
- Hodson, M. J., and A. G. Sangster. 1985. Silica Deposition in the Inflorescence Bracts of Wheat (*Triticum Aestivum*). I. Scanning Electron Microscopy and Light Microscopy. *Canadian Journal of Botany* 66(5): 829–38.
- Howard, L. R. Talcott, S. T., Brenes, C. H. and Villalon, B. 2000. Changes in Phytochemical and Antioxidant Activity of Selected Pepper Cultivars (*Capsicum* Species) As Influenced by Maturity. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*. 48 (5), 1713-1720
- Huang, D., Ou, B., and Prior, R.L. 2005. The Chemistry behind Antioxidant Capacity Assays. *J. Agric. Food Chem.* 53:1841-1856.
- Imahori, Y. 2014. Role of Ascorbate Peroxidase in Postharvest Treatments of Horticultural Crops. *Oxidative Damage to Plants*: 425–51.
- INTAGRI. 2012. "Tercer Diplomado Internacional En Horticultura Protegida." (Instituto para la innovación tecnológica en agricultura).
- Jamsheed, S., Hameed, A., Rasool, S. 2014. "Drought Stress Induced Oxidative Damage and Antioxidants in Plants." *Oxidative Damage to Plants*: 345–67.
- Jiménez, M. 2008. Effect of the nutritional status of banana (*Musa* spp.) on leaf disease infestation by *Mycosphaerella fijiensis* Morelet in Ecuador. PhD Thesis. Catholic University Leuven - Belgium. 146p.
- Jincy, M., Djanaguiraman, M., Jeyakumar, P., Subramanian, K. S., Jayasankar, S., Paliyath, G. 2017. Inhibition of Phospholipase D Enzyme Activity through Hexanal Leads to Delayed Mango (*Mangifera indica* L.) Fruit Ripening through Changes in Oxidants and Antioxidant Enzymes Activity. *Scientia Horticulturae* 218: 316–25.
- John G. S., Lingqiang G., and Alexios N. P., 1997. *Catalases in Plants: Gene Structure, Properties, Regulation, and Expression*. Cold Spring Harbor Laboratory Pres.
- Juárez-maldonado, A., Ortega-Ortíz, H., Pérez-Labrada, F., Cadenas-Pliego, G., Benavides-Mendoza, A. 2016. Cu Nanoparticles Absorbed on Chitosan

Hydrogels Positively Alter Morphological, Production , and Quality Characteristics of Tomato. 189: 183–89.

- Kitinoja, L., Saran, S., Roy, S. K. and Kader, A. A. 2011. Postharvest technology for developing countries: challenges and opportunities in research, outreach and advocacy. *J. Sci. Food Agric.* 91: 597-603.
- Klunklin, Warinporn, Geoffrey Savage, Warinporn Klunklin, and Geoffrey Savage. 2017. Effect on Quality Characteristics of Tomatoes Grown Under Well-Watered and Drought Stress Conditions. *Foods* 6(8): 56.
- Kumar, S. and Prabodh K. T. 2016. Heavy Metal Stress Signaling in Plants. *Plant Metal Interaction*: 585–603.
- Laguerre, M., Lecomte, J., Villeneuve, P. 2007. Evaluation of the ability of antioxidants to counteract lipid oxidation: Existing methods, new trends and challenges. *Progress in Lipid Research.* 46:244–282.
- Lampe J. W. 1999. Health effects of vegetables and fruit: assessing mechanisms of action in human experimental studies. *Am J Clin Nutr.* 70:475S490S.
- Lee J, Koo N, Min D. B. 2004. Reactive oxygen species, aging, and antioxidative nutraceuticals. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety.* 3:21-33
- Lelièvre, J. M., Latché, A., Jones, B., Bouzayen, M., Pech, J. C. 1997. Ethylene and fruit ripening. *Physiol. Plantarum.* 101: 727-739.
- Leonard, S. S., Harris, G. K., Shi, X. 2004. Metal-induced oxidative stress and signal transduction. *Free Radic. Biol. Med.* 37:1921–1942.
- Leonarduzzi, G., Sottero, B., Poli, G. 2010. Targeting tissue oxidative damage by means of cell signaling modulators: The antioxidant concept revisited. *Pharmacology & Therapeutics* 128: 336–374.
- Liang, Y., Sun, W. and Romheld, V. 2005. Effects of Foliar and Root applied silicon on the enhancement of induced resistance to powdery mildew in *Cucumis sativus*. *Plant Pathology.* 54 (5):678–685.
- Lili, H., Liu, Y., Mustapha, A., Lin, M. 2011. Antifungal activity of zinc oxide nanoparticles against *Botrytis cinerea* and *Penicillium expansum*. *Microbiological Research*, 166:207–215.
- Loft, S., Møller, P., Cooke, M. S., Rozalski, R., Olinski, R. 2008. Antioxidant vitamins and cancer risk: is oxidative damage to DNA a relevant biomarker? *European Journal of Nutrition*, 47 Suppl 2, 19–28.

- López-Vargas, E., Ortega-Ortíz, H., Cadenas-Pliego, G., De Alba-Romenus, K., Cabrera de la Fuente, M., Benavides-Mendoza, A., Juárez-Maldonado, A. 2018. Foliar Application of Copper Nanoparticles Increases the Fruit Quality and the Content of Bioactive Compounds in Tomatoes. *Applied Sciences* 8(7): 1020.
- Mareček, V., Mikyška, A., Hampel, D., Čejka, P., Neuwirthová, J., Malachová, A., Cerkal, R. 2017. ABTS and DPPH Methods as a Tool for Studying Antioxidant Capacity of Spring Barley and Malt. *Journal of Cereal Science* 73: 40–45.
- Matichenkov, V. & Calvert, D. 1999. Silicon fertilizers for citrus in Florida. En: *Proc. Fla. State Hort. Soc.* No. 112. pp. 5-8.
- Mendoza-Cózatl, D., Loza-Tavera, H. Hernández-Navarro, A. Moreno-Sánchez, R., 2005. Sulfur Assimilation and Glutathione Metabolism under Cadmium Stress in Yeast, Protists and Plants. *FEMS Microbiology Reviews* 29(4): 653–71
- Michalak, A. 2006. Heavy Metals Toxicity Phenolic Compounds and Their Antioxidant Activity in Plants Growing under Heavy Metal Stress. *Polish J. of Environ*
- Misra, A.N., Misra, M., Singh, R. 2013. Nanotechnology in Agriculture and Food Industry. *Int. J. Pure Appl. Sci. Technol.* 16: 1 9.
- Nadagouda, M. N., Polshettiwar, V., Varma, R. S., 2009. Self-assembly of palladium nanoparticles: synthesis of nanobelts, nanoplates and nanotrees using vitamin B1, and their application in carbon–carbon coupling reactions. *J. Mater. Chem.* 19, 2026-2031
- Nair, P. M. G., Chung, I. M., 2015. Study on the correlation between copper oxide nanoparticles induced growth suppression and enhanced lignification in Indian mustard (*Brassica juncea* L.). *Ecotoxicol. Environ. Saf.*, 113: 302-303.
- Nakamura, S., Suzui, N., Nagasaka, T., Komatsu, F., Ishioka, N. S., Ito-Tanabata, S., Kawachi, N., Rai, H., Hattori, H., Chino, M., Fujimaki, S., 2013. Application of Glutathione to Roots Selectively Inhibits Cadmium Transport from Roots to Shoots in Oilseed Rape. *Journal of Experimental Botany* 64(4): 1073–81.
- Nakano, Y., Asada, K. 1987. Purification of ascorbate peroxidase in spinach chloroplasts; its inactivation in ascorbate-depleted medium and reactivation by monodehydroascorbate radical. *Plant Cell Physiol.* 28, 131–140.

- Navarrete, L. P., Pérez, P., Morales, I., Maccioni, R., Novel, B. 2011. Drugs affecting tau behavior in the treatment of Alzheimer's disease and tauopathies. *Current Alzheimer Research*.8 (6):678- 685.
- Niki, E. 2010. Assessment of antioxidant capacity in vitro and in vivo. *Free Radical Biology Medicine*, 49(4), 503–515.
- Nishiyama, K., Guis, M., Rose, J. K., Kubo, Y., Bennett, K. A., Wangjin, L., Kato, K., Koichiro, U., Nakano, R., Inaba, A., Bouzayen, M., Latché, A., Pech, J. C. and Bennett, A. B. 2007. Ethylene regulation of fruit softening and cell wall disassembly in Charentais melon. *J. Exp. Bot.* 58(6):1281-1290.
- Ojeda, T., 2011. Producción y calidad de genotipos de pepino (*Cucumis sativus* L.) bajo un sistema orgánico a campo abierto. Tesis. UAAAN UL. Torreón Coahuila, México. Pp. 1-47.
- Pace-Asciak C. R., Hahn, S., Diamandis, E. P., Soleas, G., Goldberg, D. M. 1995. The red wine phenolics trans-resveratrol and quercetin block human platelet 55 aggregation in eicosanoid synthesis: implication for protection against coronary heart disease. *Clin Chim Acta*, 235:207-219.
- Pacifico, S., Gallicchio, M., Fiorentino, A., Fischer, A., Meyer, U., Stintzing, F. C. 2012. Antioxidant properties and cytotoxic effects on human cancer cell lines of aqueous fermented and lipophilic quince (*Cydonia oblonga* Mill.) preparations. *Food and Chemical Toxicology : An International Journal Published for the British Industrial Biological Research Association*, 50(11), 4130–4135.
- Padayatty, S. J., Katz, A., Wang, Y., Eck, P., Kwon, O., Lee, J., Chen, S., Corpe, C., Dutta, A., Dutta, S. K., Levine, M. 2003. Vitamin C as an Antioxidant: Evaluation of Its Role in Disease Prevention. *Journal of the American College of Nutrition* 22(1): 18–35.
- Pautot, V., Holzer, F. M., Walling, L. L. 1991. Differential expression of tomato proteinase inhibitor I and II genes during bacterial pathogen invasion and wounding. *Molecular Plant-Microbe Interactions* 4:284-292.
- Pavel, S., Bořivoj, K., and Vlastimil K. 2006. Determination of Total Content of Phenolic Compounds and Their Antioxidant Activity in Vegetables Evaluation of Spectrophotometric Methods. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*. 54 (3), 607-616
- Payasi, A., Mishra, N. N., Chaves, A. L. S. and Singh, R. 2009. Biochemistry of fruit softening: an overview. *Physiol. Mol. Biol. Plants*. 15(2):103-113.

- Pech, J. C., Purgatto, E., Girardi, C. L., Rombaldi, C. V. and Latché, A. 2013. Current challenges in postharvest biology of fruit ripening. *Current Agric. Sci. Technol.* 19(1-18).
- Pérez-Labrada, F.; López-Vargas, E.R.; Ortega-Ortiz, H.; Cadenas-Pliego, G.; Benavides-Mendoza, A.; Juárez-Maldonado, A. 2019. Responses of Tomato Plants under Saline Stress to Foliar Application of Copper Nanoparticles. *Plants*, 8, 151.
- Pinchuk, I., Shoval, H., Dotan, Y., Lichtenberg, D. 2012. Evaluation of antioxidants: scope, limitations and relevance of assays. *Chemistry and Physics of Lipids*, 165(6), 638–647.
- Pinedo-Guerrero, Z. H., Hernández-Fuentes, A. D., Ortega-Ortiz, H., Benavides-Mendoza, A., Cadenas-Pliego, G., and Juárez-Maldonado, A. 2017. Cu Nanoparticles in Hydrogels of Chitosan-PVA Affects the Characteristics of Post-Harvest and Bioactive Compounds of Jalapeño Pepper. *Molecules*, 22(6).
- Prior R.L. 2003. Fruits and vegetables in the prevention of cellular oxidative damage. *Am J Clin Nutr.* 78:570S-578S
- Prior. F.1999. Oxidative Stress Status in vivo total antioxidant capacity: comparison of different, *Free Radical Biology Medicine*, 27(99), 1173–1181.
- Quandt, A., Özdoğan, C. 2010 Biominerals and graphene—basic aspects of nanoscience. *Commun. Nonlinear Sci. Numer. Simul.* 15, 1575–1582.
- Quero, G.E. 2007. Silicio en la protección de las plantas. 2007, Uruapan, michoacán,
- Rahman, A., Anisuzzaman, M. 2008. Study of Nutritive Value and Medicinal Uses of Cultivated Cucurbits. *J Appl Sci Res* 4(5): 555–58.
- Re, R., Pellegrini, N., Proteggente, A., Pannala, A., Yanga, M., Rice-Evans, C. A. 1999. Antioxidant Activity Applying an Improved ABTS Radical Cation Decolorization Assay. *Free Radical Biology and Medicine* 26(9–10): 1231–37.
- Reche J, 2011. Cultivo del pepino en invernadero. Ministerio De Medio Ambiente, Medio Rural y Marino, Gobierno de España.
- Rizwan, M., Ali, S., Qayyum, M. F., Adrees, M., Ibrahim, M., Zia-Ur-Rehman M., Farid, M., Abbas, F., 2017. Effect of Metal and Metal Oxide Nanoparticles on Growth and Physiology of Globally Important

- Food Crops: A Critical Review. *Journal of Hazardous Materials* 322 (Pt A): 2–16.
- Romanazzi, G., Sanzani, A. M., Bi Y., Tian, S., Gutiérrez-Martínez, P., Alkan, N. 2016. Induced Resistance to Control Postharvest Decay of Fruit and Vegetables. *Postharvest Biology and Technology* 122: 82–94.
- Sanzani, S. M., Massimo, R., Rolf, G. 2016. Mycotoxins in Harvested Fruits and Vegetables: Insights in Producing Fungi, Biological Role, Conducive Conditions, and Tools to Manage Postharvest Contamination. *Postharvest Biology and Technology* 122: 95–105.
- Seymour, G. B., Jane E., Taylor, A., Tucker. 1993. *Biochemistry of Fruit Ripening*. Springer. 86–106.
- Seymour, G. B., Ostergaard, L., Chapman, N. H., Knapp, S., Martin, C. 2013. Fruit development and ripening. *Ann. Rev. Plant Biol.* 64: 219-241.
- Sharon, M., Choudhary, A. K., Kumar, R. 2010. Nanotechnology in agricultural diseases and food safety. *Journal of Phytology*, 2(4):83-92
- Shen, X., Zhou, Y., Duan, L., Li, Z., Eneji, A. E., Li, J. 2010. Silicon Effects on Photosynthesis and Antioxidant Parameters of Soybean Seedlings under Drought and Ultraviolet-B Radiation. *Journal of Plant Physiology* 167(15): 1248–52.
- Silva, M. L. S., Vilela, J. T., Trevizam, A. R., Torre, A. S., Schwarz, K., 2013. Influência Do Silício Na Produção e Na Qualidade de Frutos Do Morangueiro. *Semina: Ciências Agrárias* 34(6Supl1): 3411.
- Singleton, V. L., Orthofer, R., Lamuela-Raventós, R. M. 1999. Analysis of Total Phenols and Other Oxidation Substrates and Antioxidants by Means of Folin-Ciocalteu Reagent. 299: 152–78.
- Steiner, A. A. 1961. A Universal Method for Preparing Nutrient Solutions of a Certain Desired Composition. *Plant and Soil* 15(2): 134–54.
- Syklowska-Baranek, K., Pietrosiuk, A., Naliwajski, M. R., Kawiak, A., Jeziorek, M., Wyderska, S., Łojkowska, E., Chinou, I. 2012. Effect of l-phenylalanine on PAL activity and production of naphthoquinone pigments in suspension cultures of *Arnebia euchroma* (Royle) Johnst. In *Vitro Cell. Dev. Biol.Plant.* 48, 555–564.
- Tripathi, R., Mohan, H., Kamat, J.P. 2007. Modulation of oxidative damage by natural products. *Food Chemistry.* 100:81–90.

- USDA. 2018. Vegetables and Pulses Outlook Falling Exports More Than Offset Production Declines to Raise Per Capita Availability. United States Department of Agriculture.
- Valko, M., Morris, H., Cronin, M. T. D. 2005. Metals, toxicity and oxidative stress. *Curr. Med. Chem.* 12: 1161–1208
- Warinporn, K., Savage, G. 2017. Effect on Quality Characteristics of Tomatoes Grown Under Well-Watered and Drought Stress Conditions. *Foods* 6(8): 56.
- Waterkeyn L., Bientait, A. Peeters, A. 1982. Callose et Silice Epidermiques Rapports Avec La Transpiration Culticulaire. *La Cellule* 73: 263–287.
- Weaver, L. M., Klaus M. H. 1997. Dynamics of the Shikimate Pathway in Plants. *Trends in Plant Science* 2(9): 346–51.
- Wickson, F., Grieger, K., Baun, A. 2010. Nature and nanotechnology: science, ideology and policy. *Aust. J. Emerg. Technol. Soc.* 8, 5–23.
- Williamson G., Plumb G. W., García-Conesa M. T. 1999. Glycosylation, esterification, and polymerization of flavonoids and hydroxycinnamates: Effects on antioxidant properties. En: *Plant polyphenols 2: Chemistry, biology, pharmacology, ecology.* Gross et al. Editores. Kluwer Academic/Plenum Publishers. New York. 926pp.
- Wills, R., McGlasson, B., Graham, D., Jo, D. 1998. *Postharvest: An Introduction to the Physiology & Handling of Fruit, Vegetable and Ornamentals.* CAB International: Oxfordshire 4th ed: 262.
- Wiseman, H., Halliwell, B. 1996. Damage to DNA by reactive oxygen and nitrogen species: Role in inflammatory disease and progression to cancer. *Biochemical Journal*, 313(1), 17–29.
- Xue, T., Hartikainen, H., Piironen, V. 2001. Antioxidative and growth-promoting effect of selenium on senescing lettuce. *Plant Soil.* 237, 55–61.
- Zamudio, G. B., Félix, R., 2014. Producción de pepino bajo invernadero en Valles Altos del Estado de México. INIFAP.
- Zhang, Y., Seeram, N. P., Lee, R., Feng, L., Heber, D. 2008. Isolation and identification of strawberry phenolics with antioxidant and human cancer cell antiproliferative properties. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 56(3), 670–675.

- Zhao, H., Fan, W., Dong, J., Lu, J., Chen, J., Shan, L., Lin, Y., Kong, W. 2008. Evaluation of antioxidant activities and total phenolic contents of typical malting barley varieties. *Food Chem.* 107, 296e304.
- Zuverza-Mena, N., Martínez-Fernández, D., Du, W., Hernandez-Viezcas J. A., Bonilla-Bird, N., López-Moreno, M. L., Komárek, M., Peralta-Videoa, J. R., Gardea-Torresdey, J. L. 2017. Exposure of Engineered Nanomaterials to Plants: Insights into the Physiological and Biochemical Responses-A Review. *Plant Physiology and Biochemistry* 110: 236–64.