

Desarrollo y caracterización de películas activas con nanopartículas de plata obtenidas mediante síntesis verde

Development and characterization of active films with silver-nanoparticles obtained by green synthesis

Enna B. Estudillo-Díaz¹, Federico A. Gutiérrez-Miceli¹, Daniel González-Mendoza², Benjamín Valdez-Salas³, Miguel Abud-Archila^{1*}

¹ Tecnológico Nacional de México/IT de Tuxtla Gutiérrez, División de Estudios de Posgrado e Investigación, Carretera Panamericana km. 1080, Tuxtla Gutiérrez, Chiapas, C.P. 29050, México.

² Universidad Autónoma de Baja California, Instituto de Ciencias Agrícolas, Ejido Nuevo León, Baja California, C.P. 21705, México.

³ Universidad Autónoma de Baja California, Instituto de Ingeniería, Mexicali, Baja California, C. P. 21100, México.

RESUMEN

El uso de películas comestibles es una tecnología para alargar la vida útil de los alimentos. La adición de nanopartículas de plata (AgNPs) podría mejorar el desempeño de películas comestibles y evitar el crecimiento de microorganismos que podrían afectar a los alimentos. El objetivo fue elaborar y caracterizar AgNPs mediante síntesis verde y evaluar el efecto de su adición sobre las propiedades mecánicas y de barrera de películas formadas a partir de proteína de *Cajanus cajan* y goma de la semilla de *Tamarindus indica*. Para la síntesis de AgNPs se utilizó extracto acuoso de *Annona muricata*. Tres diferentes formulaciones de películas se elaboraron las cuales contenían AgNPs, extracto acuoso de guanábana y agua (control). Las películas fueron evaluadas en términos de su permeabilidad al vapor de agua (WVP), color, opacidad y propiedades mecánicas. Las AgNPs incrementaron el doble el módulo de Young de las películas (0.0675 MPa) y la fuerza de tensión (2.84 MPa) con respecto al control. Además, las AgNPs influyeron estadísticamente en el color y opacidad de la película. Sin embargo, no se observaron diferencias en la PVA. La adición de AgNPs a recubrimientos podría ser una opción para incrementar la vida útil de alimentos.

Palabras clave: *Cajanus cajan*, nanopartículas de plata, goma de tamarindo.

ABSTRACT

The use of edible films is a technology to extend the shelf life of food. The addition of silver nanoparticles (AgNPs) could improve the performance of edible films and avoid the growth of microorganisms that could affect food. The objective was to elaborate and characterize AgNPs by green synthesis and to evaluate the effect of their addition on the mechanical and barrier properties of films formed from *Cajanus cajan* protein and *Tamarindus indica* seed gum. An aqueous extract of *Annona muricata* leaves was used for green synthesis. Three films were developed containing AgNPs, aqueous extract of *Annona muricata* leaves and water (control). Films were evaluated by their water vapour permeability (WVP), color, opacity and mechanical properties. The

AgNPs increased two-fold the Young's module (0.0675 MPa) and the tensile strength (2.84 MPa) in relation to control film. Moreover, the AgNPs influenced also the color and opacity of the films. However, no differences were observed in the WVP. The addition of AgNPs to films, could be an option to increase the shelf life of foods.

Keywords: *Cajanus cajan*, tamarind gum, silver nanoparticles.

INTRODUCCIÓN

Durante las últimas décadas, la utilización de materiales en la industria alimentaria elaborados a base de petróleo es un problema ambiental grave. Por lo anterior, el uso de recursos naturales biodegradables como las películas comestibles para extender la vida útil y la calidad de los alimentos ha incrementado (Suput *et al.*, 2015). Aunado a lo anterior, aproximadamente del 20 al 30 % de los productos hortofrutícolas producidos en el mundo se pierde debido al deterioro microbiológico y fisiológico (Salehi, 2020), por lo que el uso de nuevas tecnologías que eviten o minimicen el deterioro hoy en día es un reto. Una de las tecnologías empleadas para evitar el deterioro fisiológico y microbiológico es el uso de películas comestibles. Sin embargo, estas películas deben de tener un comportamiento de barrera semipermeable a gases como CO₂, O₂, etileno y al vapor de agua (Robles-Flores *et al.*, 2018), además de presentar propiedades mecánicas, ópticas y antimicrobianas adecuadas para el producto en el cual se aplicará (Mohamed *et al.*, 2020). Estas propiedades de las películas frecuentemente dependen de los materiales utilizados para la formulación. Por lo anterior, diversos autores han adicionado diversos materiales: como compuestos activos como antimicrobianos (Madera-Santana *et al.*, 2019; Nguyen *et al.*, 2020), aceites esenciales (Xue *et al.*, 2019) y nanocompuestos (Osorio-Echavarría *et al.*, 2017), entre otros. En cuanto al uso de nanopartículas de plata (AgNPs), diversos trabajos han reportado la adición de AgNPs a películas modificando sus propiedades. Bahrami *et al.* (2019) reportaron el aumento en la elongación, así como el grosor de la película, además de mostrar la disminución de la fuerza de tracción,

*Autor para correspondencia: Miguel Abud Archila
Correo electrónico: miguel.aa@tuxtla.tecnm.mx

Recibido: 31 de marzo de 2022

Aceptado: 29 de julio de 2022

la luminosidad y la PVA de películas a base de tragacanto/hidroxipropil metil-celulosa/cera de abeja adicionada con AgNPs (US Research nanomaterials, Inc). Sin embargo, otros estudios han reportado que la adición de nanopartículas de cobre-plata (Sigma-Aldrich, St. Louis, MO, USA) aumenta la resistencia a la tracción y una disminución en la elongación, así como la disminución de la luminosidad de la película (Arfat *et al.*, 2017). Estas nanopartículas son elaboradas frecuentemente por síntesis química, sin embargo, pocos trabajos han reportado el uso de nanopartículas mediante síntesis verde. El interés de las nanopartículas comúnmente llamadas nanopartículas verdes radica en que su proceso de obtención es de bajo costo, no requiere infraestructura especializada para la elaboración, el proceso es amigable con el medio ambiente y sobre todo que se han reportado con actividad antimicrobiana (Jalab *et al.*, 2021).

Debido a que no se ha reportado el efecto de AgNPs, obtenidas mediante síntesis verde con extracto de *Annona muricata* (guanábana), sobre las propiedades de películas, el objetivo de este trabajo fue elaborar y caracterizar nanopartículas de plata mediante síntesis verde utilizando extracto acuoso de hojas de guanábana y evaluar el efecto de su adición sobre las propiedades mecánicas y de barrera de películas formadas a partir de proteína de *Cajanus cajan* (guandul) y goma de la semilla de tamarindo (*Tamarindus indica*).

MATERIALES Y MÉTODOS

Materias primas

Los granos de guandul se adquirieron en un mercado de la ciudad de Tapachula, Chiapas, México y la proteína se extrajo mediante la metodología reportada por Robles-Flores *et al.* (2018). La goma de semillas de tamarindo fue obtenida a partir de semilla de *Tamarindus indica* adquiridas en el mercado local (Tuxtla Gutiérrez, Chiapas, México), y se obtuvo según la metodología reportada por Robles-Flores *et al.* (2018).

Obtención del extracto acuoso

Las hojas de guanábana fueron colectadas en la ciudad de Tuxtla Gutiérrez, Chiapas. Las hojas fueron secadas a la sombra a 40 °C hasta obtener una humedad de 10 %. Posteriormente, las hojas secas fueron pulverizadas hasta un tamaño de partícula de malla 60 (0.250 mm) y guardadas en bolsas herméticas al vacío hasta su utilización. El extracto acuoso se preparó usando la metodología descrita por Chang *et al.* (2002).

Preparación de las AgNPs

Las AgNPs fueron preparadas siguiendo la metodología descrita por Ruiz-Romero *et al.* (2018). El coloide (sobrenadante) se almacenó a 4 °C en oscuridad, hasta su posterior uso.

Contenido de fenoles totales, flavonoides y actividad antioxidante

Para la cuantificación de fenoles totales y flavonoides, el extracto acuoso se diluyó con agua tridestilada en proporción 1:5 v:v (extracto:agua). Para la determinación de fenoles totales en el extracto acuoso y en las AgNPs, se usó la metodología reportada por Singleton *et al.* (1999). Para la cuantificación de flavonoides en el extracto acuoso y en las AgNPs se usó el método colorimétrico de cloruro de aluminio (Chang *et al.*, 2002). Para la determinación de la capacidad antirradical del extracto acuoso se usó la metodología reportada por Zhao y Shah (2014).

Espectrofotometría de luz UV-visible

Las AgNPs fueron analizadas en un espectro (UV-visible) con un barrido de 300 a 700 nm en un espectrofotómetro Beckman coulter modelo DU 730 (Indianapolis, EU), a intervalos de 5 nm y usando AgNO₃ como blanco.

Potencial zeta y dispersión dinámica de la luz (DLS)

La distribución de tamaño de las AgNPs y el potencial zeta se analizaron utilizando un Nanotrak Wave Instrument (Montgomeryville, PA, EU). Las mediciones se realizaron mediante la técnica de dispersión dinámica de la luz en un rango de 0.1 – 1000 nm a 25 °C, con una longitud de onda del láser de 780 nm y un ángulo de dispersión de 90 °. Los datos de DLS se analizaron mediante el software operativo Microtrak FLEX (Montgomeryville, PA, EU).

Microscopia electrónica de barrido (MEB)

Para el registro de las microfotografías se utilizó un microscopio electrónico de barrido (MEB), modelo JEOL-6010LA (Massachusetts, EU), con un voltaje de 10 kV con una magnificación de 100.00 kx utilizando un detector de electrones secundarios (SEI). Después de tomar las imágenes con el MEB, se procedió a ejecutar un barrido de haz de electrones y se registraron espectrografías y la distribución de los elementos químicos identificados con el detector de energía dispersa (EDS).

Formulación de las películas

Los recubrimientos fueron formulados según la metodología reportada por Robles-Flores *et al.* (2018) con modificaciones. Tres formulaciones fueron probadas como se presentan en la Tabla 1.

Caracterización de las películas

Antes de realizar las determinaciones, las películas fueron estabilizadas a 25 °C y una humedad relativa (HR) de 53 % durante 48 h. Esta HR fue proporcionado con una solución saturada de Mg(NO₃)₂.

Permeabilidad al vapor de agua

La permeabilidad al vapor de agua (PVA) de la película se determinó de acuerdo a la metodología descrita por ASTM E96M-16 (2016).

Tabla 1. Formulación de películas.**Table 1.** Films formulation.

| Película | Aislado de proteína (g/dL de sfp) | Goma <i>Tamarindus indica</i> (g/dL de sfp) | Glicerol (g/100 dL de sfp) | Extracto (% v/v) | AgNPs (% v/v) |
|----------|-----------------------------------|---|----------------------------|------------------|---------------|
| TE | 10 | 1 | 5.5 | 25 | - |
| TN | 10 | 1 | 5.5 | - | 25 |
| T | 10 | 1 | 5.5 | - | - |

Sfp = Solución formadora de película.

T es la película control, TE es la película con extracto de *Annona muricata* y TN es la película con AgNPs.

Opacidad

La opacidad se determinó colocando una lámina de la película de 4 x 1 cm² dentro de una celda espectrofotométrica, asegurando que la lámina cubriera completamente la cara de la celda, y se realizó un barrido a lo largo del rango visible (400 - 800 nm) empleando un espectrofotómetro Beckman coulter modelo DU 730 (California, EU). La opacidad se reportó como el área bajo la curva como unidades de absorbancia en función del espesor de la película (mm⁻¹).

Color

El color de las películas fue medido utilizando un colorímetro portátil Konica minolta modelo CM-2500d (Tokio, Japón) por triplicado, según la escala CIE- Lab.

Textura

La fuerza de tensión, elongación y módulo de Young de las películas se determinaron empleando un texturómetro Stable Micro Systems modelo TA.XT. plus (Godalming, UK) con una apertura de 30 mm, velocidad de 30 mm/min y deformación del 80 %.

Microscopia electrónica de barrido (MEB) de las películas

Para el registro de las microfotografías de las películas se utilizó un microscopio electrónico de barrido (SEM), modelo JEOL-6010LA (Massachusetts, EU), con un voltaje de 10 kV con una magnificación de 120x y 600x.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Formación de AgNPs

La formación de las AgNPs usando extracto de hoja de guanábana se demostró con un cambio en la coloración de la mezcla de amarillo claro a amarillo oscuro. Este cambio de coloración es indicativo de la reducción de los compuestos fenólicos del extracto y ha sido reportado por otros autores (Santhosh *et al.*, 2015; Gavamukulya *et al.*, 2020). Según John *et al.* (2017) el principal mecanismo en la síntesis de las nanopartículas es la óxido-reducción. Ellos muestran un posible mecanismo de acción para la formación de las AgNPs en los cuales los antioxidantes polifenólicos actúan como los agentes reductores en la síntesis verde de las nanopartículas.

El cambio de color del extracto después de la síntesis de las AgNPs es debido al fenómeno de resonancia del plasmón superficial (Cardeño y Londoño, 2014). Martínez

et al. (2015) describen a la resonancia plasmónica como un fenómeno en el que los electrones en la superficie de una nanopartícula metálica oscilan al interactuar con una onda electromagnética, induciendo un momento dipolar sobre la partícula en un intervalo de tiempo determinado. Cuando el componente eléctrico de la onda electromagnética que incide sobre la nanopartícula oscila a la misma frecuencia que los electrones de esta, ocurre el fenómeno de resonancia de plasmón de superficie. Lo anterior fue identificado en las muestras de solución de plata y extracto de guanábana mediante un barrido espectrofotométrico de 300 a 700 nm, en donde fue posible registrar el efecto plasmón de la plata en la región de 470 nm (Figura 1a). En este sentido, el posible mecanismo de reducción del ión Ag⁺ por los compuestos fenólicos en el extracto acuoso de guanábana, implica la ionización de polifenoles y la transferencia de un electrón al ión Ag⁺. Entonces, el ión Ag⁺ podría ser reducido a Ag⁰ (AgNPs) por acción de los compuestos bioactivos (fenoles y flavonoides). Los polifenoles entonces podrían actuar como antioxidantes, preservando a las nanopartículas (Erdogan *et al.*, 2019). En este sentido, nuestros resultados son consistentes con los reportados por León-Jimenez *et al.* (2019) quienes encontraron que la formación de nanopartículas podría deberse a grupos carboxilo de aminoácidos, proteínas y compuestos fenólicos que tienen la capacidad de reducir los iones metálicos y actuar como agentes de estabilizantes del complejo que se forma (Valdez-Salas *et al.*, 2020).

Microscopía Electrónica de Barrido de las AgNPs y análisis de EDS

En la Figura 1b, se muestra la microfotografía de las nanopartículas a magnificaciones de 100 kx. En esta Figura se observan nanopartículas irregulares y aglomeradas. Esto podría ser debido a que en la síntesis verde no se puede controlar el tamaño, forma, ni distribución de las nanopartículas como lo reportado por Anandan *et al.* (2019). La espectroscopía de energía dispersa (Figura 1c) proporcionó información en cuanto a la composición elemental de la muestra analizada, con lo cual se determinó una composición media másica de las AgNPs de 9.76 % de carbono, 2.84 % de oxígeno, 46.97 de silicio, 1.68 % de cloro y 38.72 % de plata, confirmando así la síntesis. El pico de señal a 3 keV corresponde a las AgNPs debido a la resonancia de plasmón superficial (Tamilarasi y Meena, 2020). La presencia del Si es probable que provenga de contenido mineral del tejido vegetal de acuerdo a las condiciones de cultivo o crecimiento de la planta. Similares resultados fueron reportados previamente por Femi-Adepoju *et al.* (2019) y Valdez-Salas *et al.* (2020), quienes observaron la presencia de Si y otros elementos que sirven como estabilizadores orgánicos de la nanopartículas y su presencia responde de las condiciones de cultivo de las plantas. Los resultados obtenidos mediante la técnica de dispersión dinámica de la luz (DLS) indican que las nanopartículas presentaron una polaridad negativa y presentaron una conductividad promedio de 1332 μS /cm, un tamaño promedio de las nanopartículas de 64.6 nm y un potencial zeta de 29.1 mV. El potencial zeta es

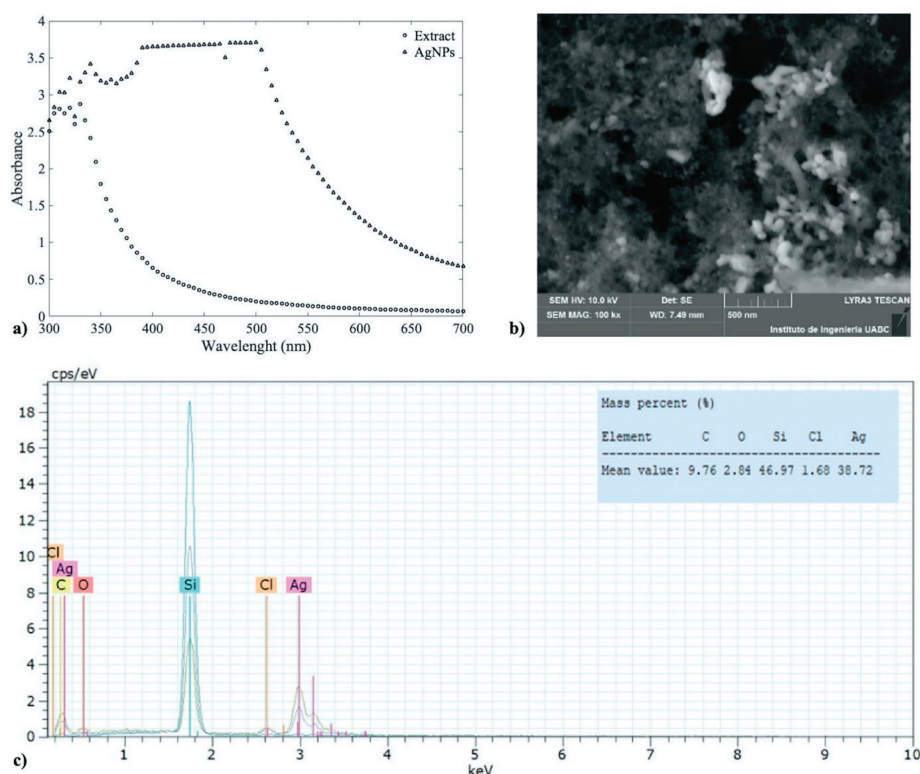


Figura 1. a) Espectro UV - Visible de extracto de guanábana (círculos) y AgNPs (triángulos), b) Microfotografía de AgNPs y c) Análisis químico de la espectroscopia de energía dispersa (EDS) de AgNPs sintetizadas con extracto acuoso de *Annona muricata*.

Figure 1. a) UV - Visible spectrum of soursop extract (circles) and AgNPs (triangles), b) AgNPs Microphotograph, and c) Chemical analysis of dispersed energy spectroscopy of AgNPs synthesized with *Annona muricata* aqueous extract.

un parámetro fundamental que nos indica la interacción de la partículas en suspensión en una solución coloidal, las fuerzas de repulsión entre ellas producen suspensiones estables, mientras que cuando no hay repulsión entre las partículas se produce la aglomeración y por lo tanto la sedimentación de aglomerados. Para que esto no suceda, el potencial zeta debe ser mayor a + 30 mV o menor a - 30 mV para tener estabilidad coloidal según Emil y Gautam (2019). Los valores aquí reportados para nuestras AgNPs indican que hay repulsión entre las partículas en suspensión, sin embargo, se observa que empieza a ver aglomeración entre las nanopartículas.

Contenido de fenoles totales, flavonoides y actividad antioxidante del extracto acuoso y nanopartículas

En la Tabla 2 se presenta la caracterización del extracto acuoso y AgNPs. En esta Tabla 2 se puede observar que no hay diferencia estadística significativa en el contenido de fenoles totales y flavonoides. Estos resultados son menores a los reportados por Vergara Sotomayor *et al.* (2018) quienes obtuvieron 523.34 µg EAG/mL en fenoles totales y 0.76 µg EQ/mL en flavonoides en extracto acuoso de hojas de guanábana. Pero similar a lo reportado por Poma *et al.* (2011) quienes reportaron una concentración de 3.167 µg EQ/mL en hojas de guanábana. En cuanto a la actividad antioxidante del extracto acuoso fue de 69.08 %. La presencia de antioxidantes producidos por las plantas pueden inhibir o retrasar el

proceso de oxidación, actuando como captadores de radicales libres en los sistemas biológicos, dado a que se producen de forma natural, el riesgo de efectos secundarios es menor (Akhtar *et al.*, 2022). Es por ello que al tener una mayor actividad antioxidante en el extracto vegetal podría ser mayor la inhibición o el retraso en el estrés oxidativo celular.

Permeabilidad al vapor de agua (PVA)

Los resultados mostraron que la PVA no fue afectada estadísticamente ($p < 0.05$) con la adición del extracto ni con las nanopartículas (Tabla 3). Estos valores de permeabilidad son probablemente debido a la naturaleza hidrofílica de los

Tabla 2. Contenido de fenoles totales, flavonoides y actividad antioxidante de extracto acuoso de *Annona muricata* y AgNPs.

Table 2. Total phenols content, flavonoids and antioxidant activity of *Annona muricata* aqueous extract and AgNPs.

| | Fenoles totales µg EAG/mL | Flavonoides µg EQ/mL | Actividad antioxidante (%) |
|------------------------|------------------------------|------------------------------|-------------------------------|
| Extracto acuoso | 0.3523 ± 0.0184 ^a | 0.029 ± 0.0002 ^a | 69.0864 ± 0.1769 ^b |
| AgNPs | 0.3833 ± 0.0072 ^a | 0.0238 ± 0.0031 ^a | ND |
| DMS | 0.0602 | 0.0097 | |

ND= no determinado.

Letras minúsculas similares en una columna indican que no hay diferencia estadística entre los tratamientos.

Tabla 3. Permeabilidad al vapor de agua (PVA), luminosidad (L*), valor b*, valor a*, opacidad, fuerza de estrés, elongación, y modulo de Young de películas obtenidas con diferentes formulaciones.**Table 3.** Water vapour permeability (WVP), luminosity (L*), b* value, a* value, opacity, stress force, elongation, and Young module of films obtained with different formulations.

| Película | PVA (g mm h ⁻¹ kPa ⁻¹ m ⁻²) | L* | b* | a* | Opacidad (μm) | Fuerza de tensión (MPa) | Elongación (%) | Módulo de Young (MPa) |
|----------|---|---------------------------|---------------------------|---------------------------|--------------------------|------------------------------|-------------------------------|------------------------------|
| T | 5.04 ± 0.15 ^a | 60.44 ± 0.34 ^a | 27.2 ± 4.76 ^a | -2.92 ± 0.05 ^a | 4.17 ± 0.34 ^a | 1.477 ± 0.1496 ^a | 45.2093 ± 5.219 ^a | 0.0331 ± 0.0054 ^a |
| TE | 5.04 ± 0.35 ^a | 55.14 ± 1.26 ^b | 29.78 ± 0.34 ^a | -2.11 ± 0.1 ^b | 4.15 ± 0.14 ^a | 2.9812 ± 0.1756 ^b | 44.5993 ± 4.8309 ^a | 0.0673 ± 0.0067 ^b |
| TN | 5.32 ± 0.17 ^a | 39.46 ± 0.66 ^c | 24.49 ± 0.54 ^a | 2.92 ± 0.1 ^c | 6.54 ± 0.38 ^b | 2.8459 ± 0.2083 ^b | 42.3521 ± 4.802 ^a | 0.0675 ± 0.0036 ^b |
| DMS | 0.4911 | 1.6974 | 5.55 | 0.1828 | 0.6156 | 0.2015 | 5.5636 | 0.0061 |

Letras minúsculas similares en una columna indican que no hay diferencia estadística entre los tratamientos. T es la película control, TE es la película con extracto de *Annona muricata* y TN es la película con AgNPs.

componentes de las formulaciones como el glicerol debido a sus grupos funcionales (-OH). Estos valores de PVA fueron más elevados con lo reportados por Robles-Flores *et al.* (2018), quienes mostraron valores de 1.98 a 3.76 quienes usaron goma de *C. cajan*, esta diferencia puede deberse a que la goma usada en este trabajo fue de *T. indica*, la cual ha sido catalogada como un agente emulsionante aunado con el glicerol, pueden interaccionar con las moléculas de agua e hidratar la película para posteriormente difundir el agua a través de la matriz de la película (Yamatoya *et al.*, 2020; Gahruie *et al.*, 2022), además, de la existencia de posibles grietas en la estructura de la película.

Apariencia, color y opacidad de las películas

La película TN con AgNPs presentó una coloración marrón oscuro mientras que las películas T y TE presentaron un color café claro. Este cambio de coloración se pudo deber probablemente a la interacción de compuestos fenólicos "libres" (aun en el coloide de las AgNPs) con los componentes de las películas (proteína y goma). En la Tabla 3 se muestran los resultados de la evaluación de color y opacidad de las películas. Los valores de luminosidad variaron de 39.46 a 60.44, mientras que los valores de "a" fueron de - 2.11 a 2.92 y los valores de "b" oscilaron entre los 24.49 a 29.78, para todas las películas. Con respecto a la luminosidad (L) y el parámetro "a" se observó que las películas fueron estadísticamente diferentes. La luminosidad de las películas disminuyó con la adición de extracto de guanábana y de AgNPs, provocando el incremento de la opacidad de las mismas con respecto a las películas sin extracto ni nanopartículas. Con respecto a la opacidad, los valores variaron de 4.15 para las películas sin extracto y sin nanopartículas hasta un valor de 6.54 mm⁻¹ para las películas con nanopartículas. Esto puede deberse a que en la síntesis de las nanopartículas pudieron haber quedado iones Ag⁺ libres los cuales pudieron haber reducido o reaccionado con los componentes de la proteína, así como de la goma de tamarindo. Ledezma *et al.* (2014) mencionaron que los azúcares reductores y fenoles presentes en los extractos pueden actuar como agentes reductores para la síntesis de nanopartículas.

Estructura y propiedades mecánicas

Los resultados de las propiedades mecánicas se pueden apreciar en la Tabla 3. Nuestros valores de fuerza de tensión (entre 1.477 y 2.981 MPa) fueron más bajos que los reportados por Cano *et al.* (2016) quienes reportaron valores de entre 18.3 y 30.7 MPa para películas elaboradas con polivinil-alcohol, almidón y AgNPs a diferentes concentraciones. Ellos atribuyen esta fuerza de tensión a la absorción de la plata a las cadenas poliméricas mediante interacciones de Van der Waals con los grupos -OH, así como a la carga parcial positiva en la superficie de las AgNPs.

La adición de nanopartículas incrementó la fuerza de tensión de las películas. Sin embargo, este efecto no siempre es el mismo. Bahrami *et al.* (2019) mencionaron que la incorporación de nanopartículas metálicas en las películas de biopolímeros puede disminuir la fuerza de tensión de la película cuando los componentes de la misma no son compatibles. Lo anterior debido a que no se crea una fuerte interacción entre las nanopartículas y la matriz de los polímeros. Por lo tanto, se puede concluir que el aumento a la fuerza de tensión es por la interacción química entre el aislado de proteína y la goma de tamarindo, con el extracto vegetal y las AgNPs junto con el glicerol aumentando la estructura de la red en las películas formuladas. La deformación o elongación es un parámetro que muestra el porcentaje en el que un material se puede alargar, los resultados muestran que no hubo diferencia estadística significativa entre las películas (Tabla 3). Este resultado es interesante debido a que a pesar de que las películas son más resistentes, estas no perdieron elasticidad. Las propiedades mecánicas de las películas elaboradas están estrechamente relacionadas con la distribución y densidad de las interacciones intermoleculares e intramoleculares en las cadenas de polímeros en la matriz de la película (Orsuwan *et al.*, 2016). El módulo de Young (E) según Pérez-González (2014) lo definen como "el parámetro característico de cada material que indica la relación existente entre los incrementos de tensión aplicados y los incrementos de deformación longitudinal unitaria producidos, indicando la rigidez de un material: cuando más rígido es un material mayor es su módulo de Young". Por lo tanto, los valores del módulo de Young de las películas TE y TN fueron estadísticamente diferentes

con respecto a la película control T, como sucedió con la fuerza de tensión. Esto es probablemente debido a que estas dos películas contienen mayor número de grupos hidroxilos expuestos y disponibles para interactuar con el resto de los componentes de la formulación durante el reordenamiento a lo largo del secado, permitiendo una película más compacta, como lo reportado por Robles-Flores *et al.* (2018). Lo compacto de las películas puede observarse en la Figura 2 donde se aprecian las microfotografías que muestran la estructura individual de las películas a 120x (Figuras 2a, 2c y 2e) y 600x (Figuras 2b, 2d y 2f). En las microfotografías se pueden observar que las películas son lisas, homogéneas y compactas.

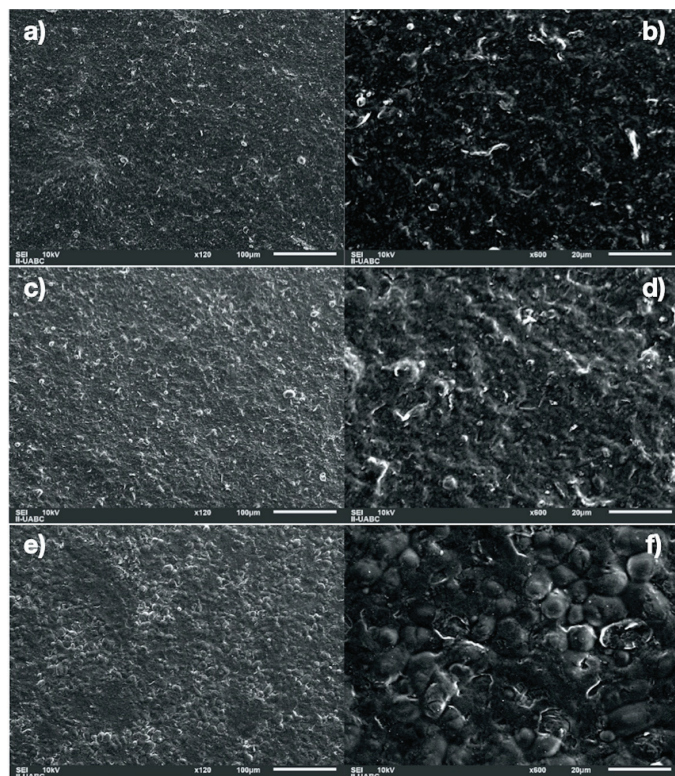


Figura 2. Microfotografía de la película T a x120 (a) y x600 (b); Microfotografía de la película TE a x120 (c) y x600 (d); Microfotografía de la película TN a x120 (e) y x600 (f).

Figure 2. T- film Microphotograph at x120 (a) and x600 (b); TE- film microphotograph at x120 (c) and x600 (d); TN- film microphotograph at x120 (e) and x600 (f).

CONCLUSIONES

A partir del trabajo realizado se puede concluir que el extracto acuoso de hojas de *Annona muricata* contiene compuestos reductores de los iones plata permitiendo la obtención de AgNPs estables. Los resultados mostraron que el extracto vegetal y las AgNPs refuerzan la estructura mecánica de las películas sin detrimento de sus propiedades de barrera al vapor de agua. Sin embargo, la adición de las AgNPs tuvo un efecto negativo en el color, por lo cual es necesario realizar más pruebas para la eliminación del oscurecimiento de las películas. Finalmente, la adición de AgNPs obtenidas mediante síntesis verde en las películas puede desarrollar características mecánicas y de barrera prometedoras para el empleo de películas preformadas usándolas como

empaques de algún alimento en específico. Sin embargo, se recomienda realizar estudios dirigidos a probar la toxicidad de las películas con AgNPs sintetizadas y estudios sobre su actividad antimicrobiana, como un paso posterior hacia la utilización de estas películas con nanopartículas en la conservación de alimentos.

REFERENCIAS

- Akhar, M., Rafiullah, M., Shehata, W., Hossain, A. y Ali, M. 2022. Comparative phytochemical, thin layer chromatographic profiling and antioxidant activity of extracts from some Indian herbal drugs. *Journal of Bioresources and Bioproducts*. <https://doi.org/10.1016/j.jobab.2022.01.001>
- Anandan, M., Poorani, G., Varunkumar, K., Anil-Chuturgoon, A., Saravanan, M. y Gurumallesh-Prabu, H. 2019. Green synthesis of anisotropic silver nanoparticles from the aqueous leaf extract of *Dodonaea viscosa* with their antibacterial and anticancer activities. *Process Biochemistry*, 80: 80-88. <https://doi.org/10.1016/j.procbio.2019.02.014>
- Arfat, Y., Ahmed, J., Hiremath, N., Auras, R. y Joseph, A. 2017. Thermo-mechanical, rheological, structural and antimicrobial properties of bionanocomposite films based on fish skin gelatin and silver-copper nanoparticles. *Food Hydrocolloids*, 62: 191-202. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2016.08.009>
- Bahrami, A., Rezaei-Mokarram, R., Sowti-Khiabani, M., Ghanbarzadeh, B. y Salehi, R. 2019. Physico-mechanical and antimicrobial properties of tragacanth/hydroxypropyl methylcellulose/beeswax edible films reinforced with silver nanoparticles. *International Journal of Biological Macromolecules*, 129: 1103-1112. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2018.09.045>
- Cano-Embuena, A., Cháfer-Nácher, MT., Chiralt, A. y González-Martínez, M.C. 2016. Development and characterization of active films based on starch-PVA, containing silver nanoparticles. *Food Packaging and Shelf Life*, 10: 16-24. <https://doi.org/10.1016/j.fpsl.2016.07.002>
- Cardeno, L. y Londoño, M. 2014. Síntesis verde de nanopartículas de plata mediante el uso del ajo (*Allium sativum*). *Soluciones de Postgrado EIA*, 12: 126-137. <https://doi.org/10.14508/sdp.2014.6.12.126-137>
- Chang, C., Yang, M., Wen, H. y Chern, J. 2002. Estimation of total flavonoid content in propolis by two complementary colorimetric methods. *Journal of Food and Drug Analysis*, 10(3): 178-182. <https://doi.org/10.38212/2224-6614.2748>
- Emil, J. y Gautam, S. 2019. Multifunctional nanocrystals for cancer therapy: a potential nanocarrier. *Nanomaterials for Drug Delivery and Therapy*: 91-116. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-816505-8.00007-2>
- Erdogan, O., Muruvvet, A., Melike-Demirbolat, G., Birtokocak, F., Aksel, M., Pasa, S. y Cevik, O. 2019. Green synthesis of silver nanoparticles via *Cynara scolymus* leaf extracts: the characterization, anticancer potential with photodynamic therapy in MCF7 cells. *PLoS One*, 14(6), e0216496. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0216496>
- Femi-Adepoju, A.G., Oluwasogo-Dada, A., Opeyemi-Otun, K., Olufemi-Adepoju, A. y Paul-Fatoba, O. 2019. Green synthesis of silver nanoparticles using terrestrial fern (*Gleichenia pectinata* (Willd.) C. Presl.): characterization and antimicrobial studies. *Heliyon*, 5(4), e01543. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2019.e01543>

- Gahruie, H., Mirzapour, A., Ghiasi, F., Eskandari, M., Moosavi-Nasab, M. y Hashem, S. 2022. Development and characterization of gelatin and Persian gum composite edible films through complex coacervation. *LWT- Food Science and Technology*. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2021.112422>
- Gavamukulya, Y., Maina, E., Meroka, A., Madivoli, E., El-Shemy, H., Wamunyokoli, F. y Magoma, G. 2020. Green Synthesis and Characterization of Highly Stable Silver Nanoparticles from Ethanolic Extracts of Fruits of *Annona muricata*. *Journal of Inorganic and Organometallic Polymers and Materials*, 30: 1231-1242. <https://doi.org/10.1007/s10904-019-01262-5>
- Jalab, J., Abdelwahed, W., Kitaz, A. y Al-Kayali, R. 2021. Green synthesis of silver nanoparticles using aqueous extract of *Acacia cyanophylla* and its antibacterial activity. *Heliyon*, 7(9). <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2021.e08033>
- John, J., Aravindakumar, C.T. y Thomas, S. 2017. Green Synthesis of Silver Nanoparticles Using Phyto-Constituents of *Ficus Auriculata* Lour. Leaf Extract: Mechanistic Approach, 4(1): 1-10.
- Ledezma, A., Romero, J., Hernández, M., Moggio, I., Arias, E., Padrón, G., Orozco, V., Martínez, A., Martínez, C. y Torres, S. 2014. Síntesis biomimética de nanopartículas de plata utilizando extracto acuoso de nopal (*Opuntia* sp.) y su electrohilado polimérico. *Superficies y Vacío*, 27(4), 133-140.
- Madera-Santana, J., De Dios-Aguilar, M., Colín-Chávez, C., Mariscal-Amaro, L., Núñez-Colín, C., Veloz-García, R., Guzmán-Maldonado, S., Peña-Caballero, V., Grijalva-Verdugo, C. y Rodríguez-Núñez, J. 2019. Recubrimiento a base de quitosano y extracto acuoso de hoja de *Moringa oleifera* obtenido por UMAE y su efecto en las propiedades fisicoquímicas de fresa (*Fragaria x ananassa*). *Biocetnia*, 21(2). <https://doi.org/10.18633/biotecnia.v21i2.941>
- Martinez, F., Zuñiga, E. y Lafarga, A. 2015. Método de síntesis de nanopartículas de plata adaptable a laboratorios de docencia relacionado con la nanotecnología. *Mundo Nano. Revista Interdisciplinaria En Nanociencias y Nanotecnología*, 6(10). <https://doi.org/10.22201/ceiich.24485691e.2013.10.50967>
- Mohamed, S. A. A., El-Sakhawy, M. y El-Sakhawy, M. A.-M. 2020. Polysaccharides, Protein and Lipid -Based Natural Edible Films in Food Packaging: A Review. *Carbohydrate Polymers*, 238: 116178. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2020.116178>
- Nguyen, T., Dao, U., Bui, Q., Long, G., Thuc, C. y Thuc, H. 2020. Enhanced antimicrobial activities and physicochemical properties of edible film based on chitosan incorporated with *Sonneratia caseolaris* (L.) Engl. leaf extract. *Progress in Organic Coatings*, 140: 105487. <https://doi.org/10.1016/j.porgcoat.2019.105487>
- Orsuwan, A., Shankar, S., Wang, L., Sothornvit, R. y Rhim, J. 2016. Preparation of antimicrobial agar/banana powder blend films reinforced with silver nanoparticles. *Food Hydrocolloids*, 60: 476-485. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2016.04.017>
- Osorio-Echavarría, J., Gómez-Vanegas, N., Osorio-Echeverría, J. y Ossa-Orozco, C. 2017. Obtención de biopelículas de carragenina suplementadas con nanopartículas de plata sintetizadas biológicamente. *DYNA*, 84(201): 82-87. <https://doi.org/10.15446/dyna.v84n201.55702>
- Pérez-González, A. Módulo de elasticidad. [Consultado 26 Marzo 2022]. Disponible en: http://www.mecapedia.uji.es/modulo_de_elasticidad.htm
- Poma, E., Requis, E., Gordillo, G. y Fuertes, C. 2011. Estudio fitoquímico y actividad antiinflamatoria de la *Annona muricata* L (Guanábana) de Cuzco. *Ciencia e Investigación*, 14(2): 29-33. Retrieved from <https://revistasinvestigacion.unmsm.edu.pe/index.php/farma/article/view/3168/2642>
- Robles-Flores, G., Abud-Archila, M., Ventura-Canseco, L., Meza-Gordillo, R., Grajales-Lagunes, A., Ruiz-Cabrera, M. y Gutiérrez-Miceli, F. 2018. Development and Evaluation of a Film and Edible Coating Obtained from the *Cajanus cajan* Seed Applied to Fresh Strawberry Fruit. *Food and Bioprocess Technology*, 11(12): 2172-2181. <https://doi.org/10.1007/s11947-018-2175-5>
- Ruiz-Romero, P., Valdez-Salas, B., González-Mendoza, D. y Méndez-Trujillo, V. 2018. Antifungal Effects of Silver Phytonanoparticles from *Yucca shillerifera* Against Strawberry Soil-Borne Pathogens: *Fusarium solani* and *Macrophomina phaseolina*. *Mycobiology*, 46 (1): 47-51. <https://doi.org/10.1080/12298093.2018.1454011>
- Salehi, F. 2020. Edible Coating of Fruits and Vegetables Using Natural Gums: A Review. *International Journal of Fruit Science*, 20(sup2): S570-S589. <https://doi.org/10.1080/15538362.2020.1746730>
- Santhosh, S. B., Yuvarajan, R. y Natarajan, D. 2015. *Annona muricata* leaf extract-mediated silver nanoparticles synthesis and its larvicidal potential against dengue, malaria and filariasis vector. *Parasitology Research*, 114(8): 3087-3096. <https://doi.org/10.1007/s00436-015-4511-2>
- Singleton, V. L., Orthofer, R. y Lamuela-Raventós, R. M. 1999. Analysis of total phenols and other oxidation substrates and antioxidants by means of folin-ciocalteu reagent. *Methods in Enzymology*, 299: 152-178.
- Standard test methods for water vapor transmission of materials ASTM E96/E96M-16. 2016. www.astm.org
- Suput, D., Lazic, V., Popovoc, S. y Hromis, N. 2015. Edible films and coatings: Sources, properties and application. *Food and Feed Research*, 42(1): 11-22. <https://doi.org/10.5937/FFR15010115>
- Tamilarasi, P. y Meena, P. 2020. Green synthesis of silver nanoparticles (Ag NPs) using *Gomphrena globosa* (Globe amaranth) leaf extract and their characterization. *Materials Today: Proceedings*. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.04.025>
- Valdez-Salas, B., Beltrán-Partida, E., Méndez-Trujillo, V. y González-Mendoza, D. 2020. Silver nanoparticles from *Hyptis suaveolens* and their effect on biochemical and physiological parameter in mesquite plants. *Biocatalysis and Agricultural Biotechnology*, 28: 101733. <https://doi.org/10.1016/j.bcab.2020.101733>
- Vergara-Sotomayor, A., Páucar-Cuba, K., Morales-Comettant, C., Castro-Mandujano, O., Pizarro-Solis, P. y Díaz-Rosado, J. 2018. Obtención de extractos de hojas de *Annona muricata* L. (guanábana) inducidos por su efecto inhibidor de la corrosión. *Revista de la Sociedad Química del Perú*, 84: 119-132. <https://doi.org/10.37761/rsqp.v84i1.173>
- Xue, F., Gu, Y., Wang, Y., Li, C. y Adhikari, B. 2019. Encapsulation of essential oil in emulsion based edible films prepared by soy protein isolate-gum acacia conjugates. *Food Hydrocolloids*, 96: 178-189. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2019.05.014>
- Yamatoya, K., Tabuchi, A., Suzuki, Y. y Yamada, H. 2020. Chapter 20-Tamarind seed polysaccharide: Unique profile of properties and applications. *Biopolymer- Based Formulations*. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-816897-4.00020-5>
- Zhao, D. y Shah, N. 2014. Changes in antioxidant capacity, isoflavone profile, phenolic and vitamin contents in soymilk during extended fermentation. *LWT - Food Science and Technology*, 58(2): 454-462. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2014.03.029>