



# **COLEGIO DE POSTGRADUADOS**

---

**INSTITUCIÓN DE ENSEÑANZA E INVESTIGACIÓN EN CIENCIAS**

**AGRÍCOLAS**

**CAMPUS CÓRDOBA**

**POSTGRADO EN CIENCIAS EN INNOVACIÓN AGROALIMENTARIA**

**SUSTENTABLE**

**EFFECTO DE LA ADICIÓN DE NANOPARTÍCULAS DE ORO OBTENIDAS  
POR SÍNTESIS VERDE Y QUÍMICA EN PELÍCULAS DE ALGINATO  
DE SODIO**

**L. N. NURIA YOLANDA VARGAS GALINA**

**TESIS**

**PRESENTADA COMO REQUISITO PARCIAL  
PARA OBTENER EL GRADO DE**

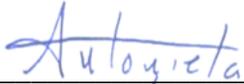
**MAESTRA EN CIENCIAS**

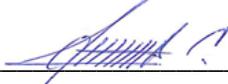
**AMATLÁN DE LOS REYES, VERACRUZ, MÉXICO**

**2021**

La presente tesis, titulada: **“Efecto de la adición de nanopartículas de oro obtenidas por síntesis verde y química en películas de alginato de sodio”**, realizada por la alumna: **Nuria Yolanda Vargas Galina**, bajo la dirección del Consejo Particular indicado, ha sido aprobada por el mismo y aceptada como requisito parcial para obtener el grado de:

MAESTRA EN CIENCIAS  
POSTGRADO EN INNOVACIÓN AGROALIMENTARIA SUSTENTABLE  
CONSEJO PARTICULAR

CONSEJERA Y DIRECTORA:  \_\_\_\_\_  
Dra. María Antonieta Ríos Corripio

ASESORA:  \_\_\_\_\_  
Dra. Aleida Selene Hernández Cázares

ASESORA:  \_\_\_\_\_  
M.C. Natalia Real Luna

ASESOR:  \_\_\_\_\_  
Dr. Marlon Rojas López

Amatlán de los Reyes, Veracruz, México, diciembre de 2021

# **EFECTO DE LA ADICIÓN DE NANOPARTÍCULAS DE ORO OBTENIDAS POR SÍNTESIS VERDE Y QUÍMICA EN PELÍCULAS DE ALGINATO DE SODIO.**

Nuria Yolanda Vargas Galina, M. en C.

Colegio de Postgraduados, 2021.

La creciente contaminación ambiental provocada por el uso de envases plásticos no biodegradables conlleva a la búsqueda de nuevas alternativas que sean económicas, disponibles, biodegradables y permitan la preservación de sus propiedades fisicoquímicas para el envasado de alimentos. Además, el uso de la nanotecnología va en aumento en las diferentes áreas de aplicación, médicas, farmacéuticas, agrícolas y en la industria de alimentos. En la presente investigación se elaboraron películas biodegradables a base de alginato de sodio (PC), glicerol, como plastificante, y la incorporación de diferentes concentraciones (1%, 5% y 10% v/v) de nanopartículas de oro (AuNPs) sintetizadas por síntesis química (AuNPsQ) y síntesis verde (AuNPsV) a partir de citrato de sodio y un extracto acuoso de pulpa de café como agente reductor, respectivamente. Las PC se caracterizaron con el objetivo de evaluar el efecto de la adición de las AuNPsQ y AuNPsV sobre propiedades físicas, mecánicas, antioxidantes y de barrera. La presencia de las AuNPsQ y AuNPsV en las PC produce un cambio sobre las propiedades físicas, mecánicas, de barrera y estructurales. Sin embargo, la adición de AuNPsV evidenció a las películas biodegradables actividad antioxidante, se encontró una relación directa con la mayor concentración de AuNPsV, obteniendo mejores propiedades que las PAuNPsQ. Las AuNPs en general son una innovación prometedora ya que tienen el potencial de mejorar el desempeño de las películas de alginato de sodio para su aplicación como película activa y podría ser utilizada en la industria de envasado de alimentos.

**Palabras clave:** películas activas, AuNPs, pulpa de café, alginato de sodio, propiedades mecánicas

## **EFFECT OF THE ADDITION OF GOLD NANOPARTICLES OBTAINED BY GREEN AND CHEMICAL SYNTESIS IN SODIUM ALGINATE FILMS.**

Nuria Yolanda Vargas Galina, M. en C.

Colegio de Postgraduados, 2021.

The increasing environmental pollution caused using non-biodegradable plastic packaging leads to the search for new alternatives that are economical, available, biodegradable and allow the preservation of their physico-chemical properties for food packaging. In addition, the use of nanotechnology is increasing in different application areas, medical, pharmaceutical, agricultural and food industry. In the present investigation, biodegradable films were prepared based on sodium alginate (PC), glycerol, as plasticiser, and the incorporation of different concentrations (1%, 5% and 10% v/v) of gold nanoparticles (AuNPs) synthesised by chemical synthesis (AuNPsQ) and green synthesis (AuNPsV) from sodium citrate and an aqueous extract of coffee pulp as reducing agent, respectively. The CPs were characterised to evaluate the effect of the addition of AuNPsQ and AuNPsV on physical, mechanical, antioxidant and barrier properties. The presence of AuNPsQ and AuNPsV in PCs produces a change on physical, mechanical, barrier and structural properties. However, the addition of AuNPsV evidenced to the biodegradable film's antioxidant activity, a direct relationship was found with the higher AuNPsV concentration, obtaining better properties than PAuNPsQ. AuNPs in general are a promising innovation as they have the potential to improve the performance of sodium alginate films for application as an active film and could be used in the food packaging industry.

**Key words:** active films, AuNPs, coffee pulp, sodium alginate, mechanical properties.

## DEDICATORIAS

A Dios por ser mi guía, por siempre brindarme oportunidades que me sacan de mi zona de confort, por darme la oportunidad de seguir creciendo personal y profesionalmente.

A mi familia, mis padres Vargas-Arellano J. S. L. y Galina-Mota M. Y. por su apoyo incondicional y soportar mis ausencias, por las enseñanzas, valores y motivarme a siempre seguir a delante. A mis abuelos Galina-Vázquez S. y Mota-Zavala Y. por el apoyo que siempre han tenido a lo largo de mi vida. A mis hermanos por estar ahí cuando los he necesitado, Vargas-Galina M. C. porque han sido momentos difíciles, pero siempre hemos estado la una para la otra, por escucharme y aconsejarme, gracias por siempre estar orgullosa y confiar en mí. A Rooney que también ha soportado mi ausencia y siempre me recibe con mucha alegría, por la lealtad y amor que tienes hacia mí.

A mis amigos y compañeros de la maestría, Fernández-Corte B., Guevara-Carrión M., Bonilla-Nepomuceno G. y Santiago-Cruz I., por su apoyo, compañerismo, por las sonrisas y enseñanzas, por escucharme y estar conmigo y al pendiente de mí en cada momento.

A Pérez-Rojas K. y Ortiz-Cevada M. A., por su apoyo, amistad y todo el amor que me han dado, por siempre estar para mí cuando más los he necesitado, por siempre motivarme a seguir adelante y por siempre apoyar cada una de mis locuras.

A todas las personas que estuvieron en este camino conmigo, compartiendo y apoyándome, gracias por las enseñanzas que me dejaron aun cuando ya no forman parte de mi vida y a los que permanecen espero que podamos seguir compartiendo muchas experiencias juntos.

## **AGRADECIMIENTOS**

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por el financiamiento para poder realizar este trabajo de investigación a través de la beca No. 956160 y con ello poder realizar mis estudios de posgrado.

Al Colegio de Postgraduados, Campus Córdoba y a la Línea de Generación y Aplicación del Conocimiento 2 (LGAC-2) del Programa de Postgrado de la Maestría en Ciencias en Innovación Agroalimentaria Sustentable por los conocimientos que me otorgaron a lo largo de este período.

Al Centro de Investigación en Biotecnología Aplicada (CIBA-IPN), por permitirme utilizar las instalaciones para el desarrollo del proyecto.

A la Dra. María Antonieta Ríos Corripio, por la confianza, apoyo y aportaciones en este proyecto.

A la Dra. Aleida Selene Hernández Cázares por el apoyo, confianza y paciencia, por todas las enseñanzas que me llevo.

A la M.C. Natalia Real Luna por su apoyo, enseñanzas y disposición para colaborar.

Al Dr. Marlon Rojas López, por la confianza y contribución otorgadas en este proyecto.

Al Dr. Juan Valente Hidalgo Contreras, por el apoyo brindado.

Al Laboratorio de Ciencias de los Alimentos por prestar las instalaciones para el desarrollo del proyecto y a la I. A. Paulina Chávez Zepeda y a la M. C. Gisela Cabrera Alvarado, por transmitirme su conocimiento dentro y fuera del laboratorio.

Al Laboratorio de Biotecnología Microbiana Aplicada (BioMA) en COLPOS, a cargo del Dr. Francisco Hernández Rosas y M.C. Jesús David Castilla Marroquín, por su apoyo en el uso de las instalaciones.

A las Ing. Nancy Eufracio García y a la Ing. Jesica Arisbeth Meza Corte por su apoyo en la realización de este proyecto

**A todos, ¡Muchas gracias!**

*“La vida no es fácil para ninguno de nosotros.  
Debemos tener perseverancia y sobre todo,  
confianza en nosotros mismos. Debemos creer  
que estamos dotados para algo y que esto debe  
ser alcanzado”.*

Marie Curie

## CONTENIDO

<b>INTRODUCCIÓN GENERAL .....</b>	<b>1</b>
Planteamiento del problema .....	1
Hipótesis .....	2
Objetivos.....	2
Innovación .....	3
Sustentabilidad.....	4
Seguridad alimentaria .....	6
<b>MARCO TEÓRICO.....</b>	<b>7</b>
1. Nanotecnología.....	7
1.1 Propiedades y aplicaciones de la nanotecnología.....	10
2. Nanomateriales .....	12
2.1 Propiedades de los nanomateriales .....	15
3. Síntesis de nanomateriales.....	16
3.1 Técnicas descendentes (Top-down).....	16
3.2 Técnicas ascendentes (Bottom up) .....	18
4. Nanopartículas metálicas .....	19
4.1 Nanopartículas de oro (AuNPs).....	21
4.2 Síntesis de nanopartículas de oro.....	22
4.2.1 Métodos de síntesis.....	22
4.2.2 Síntesis Química de AuNPs.....	24
4.2.3 Síntesis Verde de AuNPs.....	25
5. Películas biodegradables.....	26
5.1 Componentes de las películas biodegradables.....	27

5.1.1 Alginato .....	28
5.1.2 Agentes plastificantes .....	30
5.2 Métodos para la elaboración de películas biodegradables.....	31
6. Películas bioactivas.....	32
6.1 Películas biodegradables con nanomateriales.....	32
6.2 Películas biodegradables con propiedades antioxidantes .....	33
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	34
<b>CAPÍTULO I.....</b>	<b>46</b>
1.1 INTRODUCCIÓN.....	48
1.2 PARTE EXPERIMENTAL.....	49
1.2.1 Materiales .....	49
1.2.2 Síntesis de AuNPs .....	49
1.2.3 Preparación de las películas adicionadas con AuNPs .....	50
1.2.4 Propiedades de barrera.....	50
1.2.4.1 Permeabilidad al vapor de agua (PVA) .....	50
1.2.5 Propiedades mecánicas .....	51
1.2.6 Caracterización estructural Espectroscopia Infrarroja.....	51
1.2.7 Diseño experimental .....	51
1.3 RESULTADOS .....	51
1.3.1 Síntesis de nanopartículas de oro (AuNPs) .....	51
1.3.2 Películas de alginato adicionadas con nanopartículas de oro .....	52
1.3.3 Permeabilidad al vapor de agua (PVA) .....	53
1.3.4 Fuerza tensil y fuerza a la ruptura .....	53
1.3.5 Caracterización estructural FTIR de películas de alginato de sodio con y sin AuNPs.....	54

1.4 CONCLUSIONES.....	55
1.5 BIBLIOGRAFÍA .....	55
<b>CAPÍTULO II.....</b>	<b>57</b>
2.1 INTRODUCCIÓN.....	58
2.2 MATERIALES Y MÉTODOS.....	60
2.2.1 Materiales .....	60
2.1.2 Síntesis química y verde de AuNPs.....	60
2.2.3 Caracterización de las AuNPs por espectrofotometría UV/Visible.....	61
2.2.4 Preparación de PC adicionadas con AuNPsQ y AuNPsV.....	61
2.2.5 Caracterización de las PC con y sin AuNPs .....	61
2.2.5.1 Espesor .....	61
2.2.5.2 Color .....	62
2.2.5.3. Transparencia .....	62
2.2.5.4 Propiedades de barrera .....	62
2.2.5.4.1 Contenido de humedad .....	62
2.2.5.4.2 Solubilidad en agua .....	62
2.2.5.5 Permeabilidad al vapor de agua (PVA) .....	63
2.2.5.6 Propiedades mecánicas.....	63
2.2.5.7 Actividad antioxidante.....	64
2.2.5.8 Espectroscopia infrarroja.....	64
2.2.6 Análisis estadístico .....	65
2.3 RESULTADOS Y DISCUSIÓN .....	65
2.3.1 Caracterización de las AuNPs por espectrofotometría UV/Visible.....	65
2.3.2 Obtención de PC adicionadas con AuNPsQ y AuNPsV .....	66
2.3.3 Espesor.....	66
2.3.4 Color y transparencia.....	67
2.3.5 Propiedades de barrera.....	68

2.3.5.1 Contenido de humedad y solubilidad .....	68
2.3.5.2 Permeabilidad al vapor de agua (PVA) .....	70
2.3.6 Propiedades mecánicas .....	71
2.3.7 Actividad antioxidante.....	73
2.3.8 Espectroscopia infrarroja.....	74
2.4 CONCLUSIONES .....	75
2.5 REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS .....	76
<b>CONCLUSIONES GENERALES.....</b>	<b>80</b>
<b>RECOMENDACIONES GENERALES.....</b>	<b>80</b>
<b>ANEXOS.....</b>	<b>81</b>

## LISTA DE CUADROS

### MARCO TEÓRICO

<b>Cuadro 1.</b> Métodos para la síntesis de nanopartículas de oro .....	23
--	----

### CAPÍTULO I

<b>Cuadro 1.</b> Valores de permeabilidad al vapor de agua (PVA) en películas de alginato con y sin AuNPs .....	53
---	----

<b>Cuadro 2.</b> Valores de propiedades mecánicas (fuerza tensil y fuerza a la ruptura) en películas de alginato con y sin AuNPs.....	54
---	----

### CAPÍTULO II

<b>Cuadro 1.</b> Valores de color de PC, PAuNPsQ y PAuNPsV a diferentes concentraciones de AuNPs.....	67
---	----

<b>Cuadro 2.</b> Contenido de humedad y solubilidad de PC, PAuNPsQ y PAuNPsV a diferentes concentraciones de AuNPs. ....	69
--	----

## LISTA DE FIGURAS

### MARCO TEÓRICO

<b>Figura 1.</b> Representación de dos escalas macro y nano de objetos. ....	9
<b>Figura 2.</b> Representación de la relación superficie-volumen de la escala nanométrica. ....	10
<b>Figura 3.</b> Nanotecnología en diferentes áreas de aplicación. ....	11
<b>Figura 4.</b> Clasificación de nanoestructuras de acuerdo con su homogeneidad, origen, naturaleza y dimensiones. ....	13
<b>Figura 5.</b> Esquema de los nanomateriales de acuerdo con sus dimensiones. ....	14
<b>Figura 6.</b> Nanomateriales comúnmente utilizados. ....	15
<b>Figura 7.</b> Síntesis de nanomateriales: top-down y bottom-up. ....	16
<b>Figura 8.</b> Representación gráfica del efecto de resonancia de plasmón superficial. ....	20
<b>Figura 9.</b> Representación de moléculas que pueden funcionalizarse con las AuNPs. ....	22
<b>Figura 10.</b> Representación de síntesis de nanopartículas de oro mediante el método de reducción química con citrato de sodio. ....	25
<b>Figura 11.</b> Síntesis verde o biológica de nanopartículas de plata. ....	25
<b>Figura 12.</b> Transferencias que puede ser controladas por barreras comestibles. ....	27
<b>Figura 13.</b> Modelo “caja de huevo” que describe el entrecruzamiento del alginato. ....	29
<b>Figura 14</b> Molécula de glicerol ( $C_3H_8O_3$ ). ....	30

### CAPÍTULO I

Figura 1. Síntesis química de AuNPs .....	51
<b>Figura 2.</b> Espectro UV-Visible de AuNPs obtenidas por el método de reducción química .....	52
<b>Figura 3.</b> Películas de alginato de sodio adicionadas con AuNPs. a) control, b) 1% de AuNPs, c) 5% de AuNPs y d) 10% de AuNPs. ....	52
<b>Figura 4.</b> Espectros FTIR de alginato, glicerol, nanopartículas de oro, películas con y sin nanopartículas de oro en la región de $2000-700\text{ cm}^{-1}$ .....	55

## CAPÍTULO II

<b>Figura 1.</b> Espectro UV/Visible de AuNPsQ y AuNPsV.....	65
<b>Figura 2.</b> Apariencia de PC, PAuNPsQ y PAuNPsV a diferentes concentraciones de AuNPs. .....	66
<b>Figura 3.</b> Transparencia de PC, PAuNPsQ y PAuNPsV a diferentes concentraciones de AuNPs.....	68
<b>Figura 4.</b> Permeabilidad de las PC, PAuNPsQ y PAuNPsV a diferentes concentraciones de AuNPs.....	71
<b>Figura 5.</b> Fuerza tensil (a) y elasticidad (b) de PC, PAuNPsQ y PAuNPsV a diferentes concentraciones de AuNPs. ....	72
<b>Figura 6.</b> Actividad antioxidante de PC y PAuNPsV a diferentes concentraciones de AuNPs. .....	73
<b>Figura 7.</b> Espectros FTIR de alginato, glicerol, AuNPs, PAuNPsQ 1%, PAuNPsQ 5 %, PAuNPsQ 10 % (A), espectros FTIR de alginato, glicerol, AuNPs, PAuNPsV 1 %, PAuNPsV 5 %, PAuNPsV 10% (B) en la región de 2000-700 cm <sup>-1</sup> . ....	75

## INTRODUCCIÓN GENERAL

### Planteamiento del problema

Los empaques y envases juegan un papel importante para la conservación, distribución y comercialización de productos alimenticios. Algunas de sus funciones son preservar el producto de daños mecánicos, físicos, químicos y microbiológicos. Una película biodegradable (PB) es una capa delgada de biopolímero preformada, hecha de material comestible y empleada en la superficie de un alimento (McHugh, 2000). Algunos estudios han reconocido la importancia de evaluar la matriz preformada con el fin de cuantificar diversos parámetros como propiedades mecánicas, físicas, químicas, ópticas y antimicrobianas, ya que esta envoltura tiene la capacidad de disminuir la interacción entre el alimento y el medio que le rodea creando una atmósfera modificada, lo que representa una reducción en la pérdida o ganancia de humedad, aromas, oxidación, contaminación microbiana y restringiendo la transferencia de gases (O<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub>) (Krochta y Mulder-Johnston, 1997). Una PB se obtiene a partir de materiales naturales de fuentes renovables a base de polisacáridos (alginato, pectina, almidones, celulosa, lactosa, sacarosa) y / o proteínas (suero, caseína, colágeno o proteína hidrolizada).

El alginato es la principal macromolécula obtenida de las algas pardas, principalmente de las sales sodio, calcio y potasio del ácido algínico (Solano-Doblado *et al.*, 2018), presenta uniones con ácido poliurónico conteniendo bloques de ácido poli-β-D-manopiranosilurónico y/o bloques ácido poli-α-L-gulosa piranosilurónico (Cagri *et al.*, 2004) y cuentan con gran importancia en la industria alimentaria; sin embargo, también es empleado en la industria textil, farmacéutica y cosmética, debido a su capacidad para formar geles fuertes en presencia de cationes calcio (Ca<sup>+2</sup>). El alginato de sodio es el más comercializado por sus aplicaciones en la industria alimentaria, que está avanzando en el desarrollo de biomateriales innovadores (Avendaño-Romero *et al.*, 2013).

En la obtención de películas biodegradables el alginato de sodio juega un papel importante como biopolímero ya que es fácil de manejar, económico y nos permite obtener películas transparentes y con buenas propiedades de barrera. Estas películas sirven como vehículo para

la incorporación de diferentes ingredientes con actividad funcional como agentes antimicrobianos, antioxidantes, vitaminas, prebióticos y probióticos con el objetivo de mejorar propiedades tales como modificar las condiciones alimentarias, promoviendo la prolongación de la vida útil, mejoras de la seguridad microbiológica o de las propiedades sensoriales; además de monitorear y brindar información de calidad durante el transporte y el almacenamiento (Puligundla *et al.*, 2012), lo que las convierten en películas activas.

Por otro lado, el prefijo *nano* proviene del griego (νάνος), que significa enano el cual al incorporarlo como prefijo el significado es *muy pequeño* y en la nanociencia representa una millonésima parte de algo, por lo tanto, una nanopartícula es una partícula más pequeña a 100 nanómetros (Shi *et al.*, 2015). De acuerdo con Cardenas *et al.* (2009) añadir nanopartículas de Cu a películas biodegradables mejora las propiedades de barrera, Ahmadf y Sanborn (2021) mencionan que al incorporar nanopartículas orgánicas (quitosano) e inorgánicas (óxido de zinc) mejoran las propiedades físicas y mecánicas de las películas. Por su parte Pagno *et al.* (2015) mencionan que la adición de nanopartículas de oro (AuNPs) a películas biodegradables aumenta la fuerza tensil. Además, se ha encontrado que las AuNPs obtenidas por síntesis verde tienen propiedades antimicrobianas, antiinflamatorias, antioxidantes (Bonilla-Nepomuceno *et al.*, 2021), entre otras, y esto es debido a las propiedades de los compuestos presentes en la planta utilizada (Gómez-Garzón, 2018). La adición de estos nanomateriales convierte a estas películas en un sistema innovador en el mantenimiento de la inocuidad y vida útil de alimentos (Falguera *et al.*, 2011).

## **Hipótesis**

La adición de nanopartículas de oro (AuNPs), obtenidas por síntesis química y verde a películas a base de alginato de sodio mejorara las propiedades físicas, mecánicas, de barrera y antioxidantes.

## **Objetivos**

### **Objetivo general**

- Evaluar el efecto de la adición de AuNPs obtenidas por síntesis química y verde sobre las propiedades físicas, mecánicas, de barrera y antioxidantes.

## Objetivos específicos

- Elaborar películas de alginato de sodio adicionadas con nanopartículas de oro (AuNPs) obtenidas por síntesis química y síntesis verde.
- Evaluar las propiedades físicas, mecánicas, antioxidantes y de barrera de las películas de alginato de sodio adicionadas con tres niveles de inclusión de nanopartículas de oro (AuNPs).

## Innovación

La invención es un término que se utiliza indistintamente para referirse a la innovación, Schumpeter (1939) hace la distinción entre estos conceptos, refiriéndose a invención como la creación de un producto nuevo, servicio o proceso, e innovación como la comercialización o introducción del producto, proceso o servicio en el mercado. Por otro lado, las innovaciones se vinculan con el crecimiento regional y nacional a través de la introducción de nuevos productos o productos mejorados.

De acuerdo con la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos (OCDE, 2005) el Manual de Oslo define a la innovación como “introducción de un producto (bien o servicio) nuevo o significativamente mejorado, proceso, un nuevo método de marketing o de un nuevo método organizativo”. Asimismo, el manual menciona dos tipos de innovaciones:

- **Innovaciones tecnológicas** que involucran a la innovación de producto la cual es la introducción de un nuevo bien o servicio los cuales están mejorados, mientras la innovación de proceso es la implementación de un proceso de fabricación nuevo o mejorado.
- **Innovaciones no tecnológicas** que involucran a la innovación de organización en la cual se implementa un nuevo método organizacional en las practicas del negocio de la empresa, entorno laboral o relaciones externas, además involucra a la innovación de mercadotecnia que implica cambios en el diseño, empaque del producto.

Esta investigación se enmarca en la innovación de producto, en la cual se obtendrá una película biodegradable a base de alginato de sodio adicionada con nanopartículas de oro a

diferentes concentraciones (1, 5, 10 %), tanto por síntesis química como por síntesis verde utilizando el extracto acuoso de pulpa de café (*Coffea arabica*) para su posible aplicación en la industria de envasado de alimentos.

## **Sustentabilidad**

La Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible es una propuesta de la Asamblea General de las Naciones Unidas en el 2015, un plan para la humanidad, el planeta y la prosperidad. En el cual, existen 17 objetivos específicos y 169 metas que incluyen la erradicación de la pobreza, abordar las desigualdades e injusticias, y abordar el cambio climático para el 2030 (ONU, 2015).

La Comisión Brundtland (1987) introduce el concepto de desarrollo sustentable definiéndolo como “aquel que permitirá satisfacer las necesidades de las generaciones presentes, sin comprometer las necesidades de las generaciones futuras”. Sin embargo, este término da paso al origen del desarrollo sustentable al intentar combinar las nociones económicas con las ambientales; sin embargo, la sustentabilidad trata de incluir las opiniones ambientalistas dentro de la política y la economía (Badii, *et al.*, 2017). Está surge como una necesidad de involucrar el entorno ambiental dentro de las prioridades del desarrollo humano. Daly (1991) clasifica la sustentabilidad en tres niveles, débil, intermedia y fuerte. La sustentabilidad débil es aquella en la que el capital económico, social y natural pueden suplirse; la sustentabilidad intermedia es en la que el capital económico suple al natural y la sustentabilidad fuerte es aquella que la actividad económica defiende los recursos naturales y procura el bienestar social.

Hanning *et al.* (2012) mencionan que el desarrollo sustentable comprende tres enfoques:

1. **Enfoque ambiental** que incluye herramientas de evaluación y tecnología verde.
2. **Enfoque social** que considera los valores e impactos sociales.
3. **Enfoque económico** que toma en cuenta aspectos políticos.

Donde la interacción de estos debe estar entre la economía y la sociedad de una manera equitativa, entre esta última y el medio ambiente debe existir un ambiente soportable y entre

este y la economía debe de ser de manera viable (Chávez y Binnqüist, 2018). Sin embargo, Oliveira *et al.* (2018) clasifica la sustentabilidad fuerte, como aquella en la que se mantiene el capital económico, ambiental y social a través del uso eficiente de los recursos; además de ir reemplazando los recursos no renovables por renovables. Actualmente la sustentabilidad tiene que ver con otras dimensiones más allá del medio ambiente contando con cinco ejes: económico, social, ambiental, política y cultural, estos ejes son las dimensiones que logran llevar a cabo el desarrollo sustentable (ONU, 2017).

La **dimensión económica** es en la que el número de personas y los bienes que disponen se mantengan en un nivel estable, creando oportunidades para las pequeñas y medianas empresas.

La **dimensión social** implica la transformación económica y debe existir garantía de empleo, educación, alimentación y vestimenta.

La **dimensión ambiental** procura el aprovechamiento y el mínimo deterioro del medio ambiente.

La **dimensión política** permite la participación de las comunidades, la erradicación de la pobreza e impulsar el crecimiento económico sin dañar al medio ambiente.

La **dimensión cultural** permite favorecer la diversidad y el respeto entre las personas debido a que la cultura determina la conducta de las personas.

**La sustentabilidad ambiental** del proyecto se centra en que las películas desarrolladas serán ecológicamente amigables con el medio ambiente, debido a que se degradarán en un menor tiempo, aunque este proceso dependerá de los microorganismos presentes en el suelo. Por otro lado, en la síntesis verde de nanopartículas se utilizará como agente reductor el extracto de la pulpa de café, un subproducto agroindustrial del beneficio húmedo del café, a fin de reducir el uso de reactivos químicos. Con este aprovechamiento se reducirá el impacto ambiental que genera la pulpa de café, cambios de pH de suelo y que en su mayoría se vierte a cuerpos de agua.

**La sustentabilidad social** del presente trabajo será la generación de conocimiento biotecnológico en el uso y aprovechamiento de la pulpa de café.

**La sustentabilidad económica** con el desarrollo del proyecto impactará positivamente en la economía de los productores, se generará mayor ganancia económica ya que le darán valor agregado a la pulpa de café a la que antes la veían como un desecho.

### **Seguridad alimentaria**

La Cumbre Mundial sobre la Alimentación (1996) de la Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y Alimentación (FAO) define que la seguridad alimentaria “*existe cuando todas las personas tienen, en todo momento, acceso físico, social y económico a alimentos suficientes, inocuos y nutritivos que satisfagan las necesidades energéticas a diario y las preferencias alimentarias para llevar una vida activa y sana* (FAO et al., 2021).

Además, se toman en cuenta cuatro dimensiones que deben realizarse simultáneamente para cumplir con los objetivos sostenibles de la seguridad alimentaria:

**Disponibilidad física:** corresponde a la oferta, donde se deben obtener alimentos básicos de calidad y suficientes.

**Acceso:** económico y físico a alimentos.

**Utilización:** obtener una ingesta adecuada de alimentos nutritivos para satisfacer las necesidades nutrimentales de cada individuo.

**Estabilidad:** contempla las tres dimensiones anteriores en donde se puedan afrontar situaciones de emergencia por la escasez de alimentos o por desastres naturales (FAO, 2011).

Dentro de la agenda del Desarrollo Sostenible, la seguridad alimentaria es decisiva para poder alcanzar dichos objetivos, para el año 2019 con la pandemia COVID-19 había 690 millones de personas malnutridas (8.9 % de la población mundial). Sin embargo, los conflictos, variabilidad climática y el debilitamiento de la economía son factores que afectan directamente la seguridad alimentaria debido a que la población adquiere alimentos pocos costosos y nutritivos, lo que ocasiona un retraso en el crecimiento, sobrepeso, obesidad e incluso emaciación (FAO et al., 2021).

De acuerdo con lo anterior, el uso de películas con compuestos biodegradables es una alternativa agroecológica que contribuye a estimular la seguridad alimentaria permitiendo extender la vida de anaquel de los alimentos y dando valor agregado a la pulpa de café.

## MARCO TEÓRICO

### 1. Nanotecnología

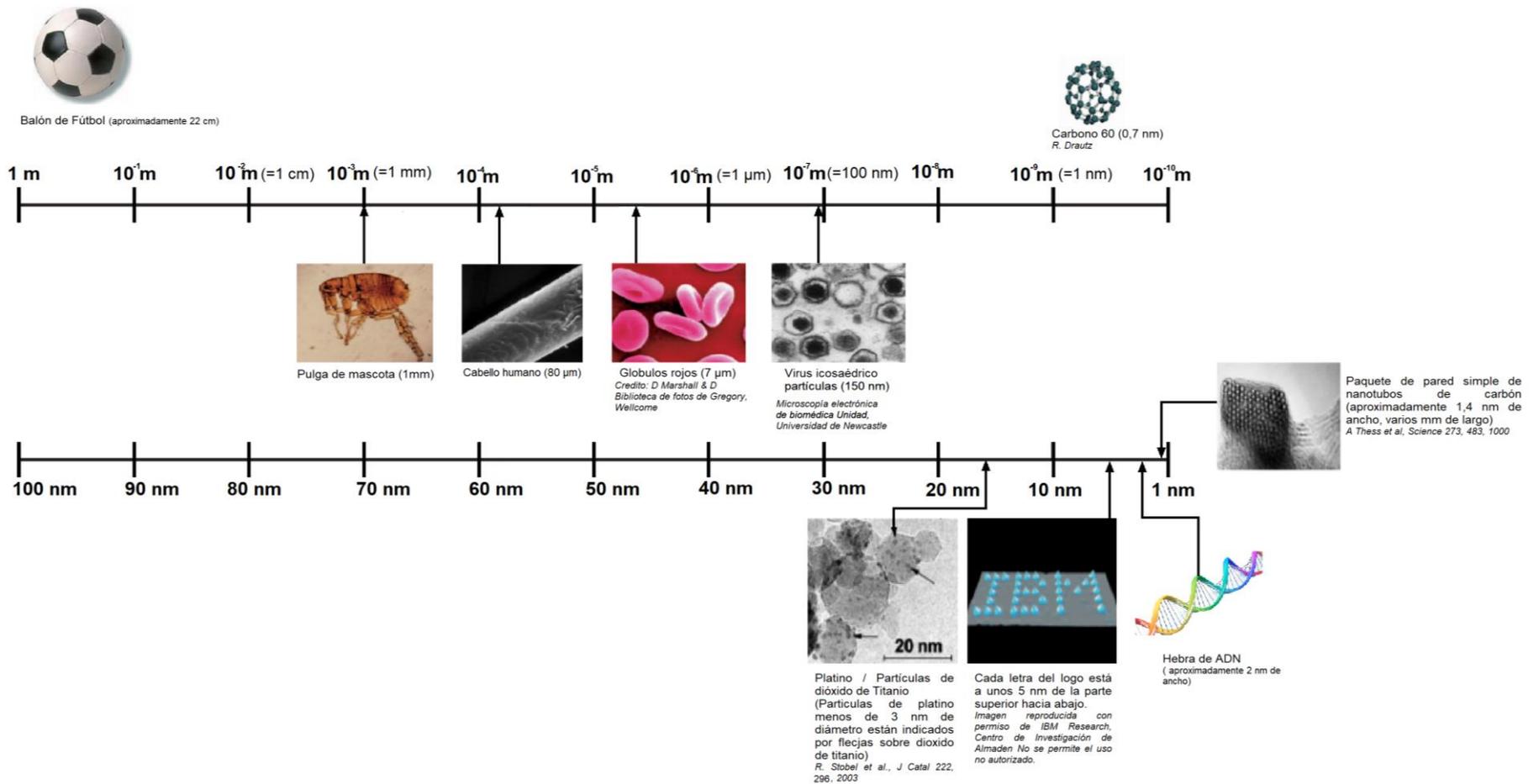
La nanotecnología es una disciplina que estudia la materia escala nanométrica (1-100 nm) donde un nanómetro equivale a una mil millonésima parte de un metro; es decir  $1 \times 10^{-9} m$  y se centra en el estudio de los fenómenos desarrollados a esta escala (Shi *et al.*, 2015; Luo y Stutzberger, 2008). La nanotecnología ha existido desde el siglo IV (a.C.), un ejemplo de ello es la copa de Licurgo, una copa en jaula de vidrio romano, que se fabricó con vidrio dicróico y tenía propiedades ópticas muy llamativas debido a que presentaba metales coloidales (oro y plata de 50-70 nm) capaces de producir un cambio de color. Algo poco usual para la época dado de que fue hasta 1962 que se reveló que las propiedades ópticas que tenía eran otorgadas por la presencia de metal coloidal. Cabe mencionar que este cambio de color se da por la interacción de la luz a una determinada longitud de onda produciendo una vibración conjunta de electrones, efecto denominado como plasmón superficial (Freestone *et al.*, 2007; Veiga-Álvarez *et al.*, 2015).

Sin embargo, la nanotecnología como tal tuvo sus comienzos con el físico Richard P. Feynman quien con su discurso “*There’s Plenty of Room at the Bottoms*”, impartido en la American Physical Society en 1959 dio pauta a la posibilidad de manipular iones, átomos y moléculas de forma individual. No fue hasta 1974 que Norio Taniguchi definió el termino nanotecnología como: “*el procedimiento de separación consolidación y deformación de materiales átomo por átomo o molécula por molécula*” (Nunes *et al.*, 2019). Para 1981 con la invención del microscopio de efecto túnel fue posible visualizar los átomos y enlaces individuales; además permitió manipular átomos individuales en el año 1989 de manera exitosa. Incluso, los desarrolladores del microscopio Heinrich Rohrer del IBM Zurich Research Laboratory (en castellano: Laboratorio de Investigación Zúrich IBM) recibieron

el Premio Nobel en Física en 1986 (Gómez-Garzón, 2018). Binnig, Quate y Gerber también inventaron el microscopio de fuerza atómica análogo ese año (Binnig *et al.*, 1986).

En 1985, Sir Harold W. Kroto, Richard E. Smalley y Robert F. Curl, Sir Jr. utilizaron un láser para pulverizar una varilla de grafito en una atmósfera de helio para obtener moléculas de carbono huecas, estas cápsulas constaron de 60 carbonos conectados por enlaces simples y dobles conocidas como fullereno, mismo descubrimiento les permitió ganar el Premio Nobel de Química en 1996 (Martín, 2011). Además, en 1991, el japonés Sumio Iijima descubrió y detalló la estructura y forma helicoidal de nanotubos de carbono de paredes simples y múltiples (Iijima y Sandhu, 2007).

En la Figura 1 se muestra la comparación en las escalas macro y nano, donde se observa en la parte superior la escala macro que va desde 1 metro (m) a 0,1 nanómetros (nm), haciendo una comparación entre un balón de fútbol con un diámetro de 22 cm y una molécula de 60 carbonos con un diámetro de 0.7 nm. Además, la escala inferior se centra en los 100 a 1 nm, que son las dimensiones de la nanotecnología, en esta escala nanométrica se muestra el tamaño de una partícula de dióxido de titanio y platino con un diámetro menor a 3 nm, la hebra de ADN con aproximadamente 2 nm de ancho (Soler, 2010).



**Figura 1.** Representación de dos escalas macro y nano de objetos.

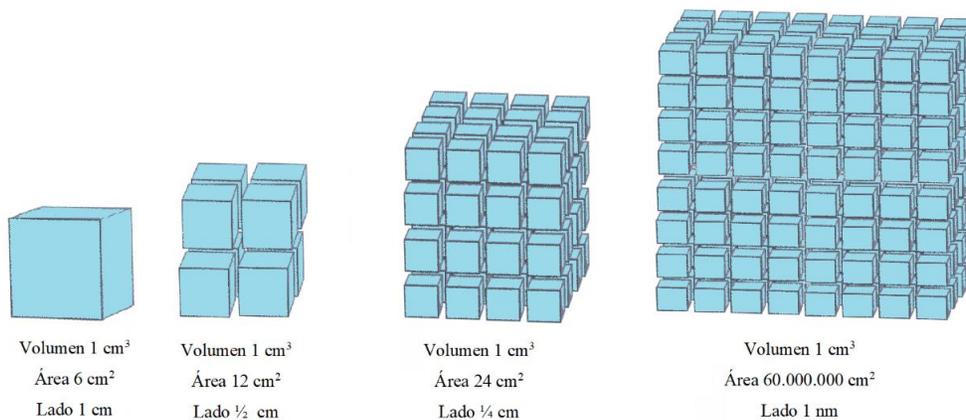
Fuente: Tomado y traducido de The Royal Society, (2004).

## 1.1 Propiedades y aplicaciones de la nanotecnología

La nanotecnología emerge rápidamente debido a sus diversas aplicaciones en la ciencia y tecnología con el fin de fabricar nuevos materiales al nivel de nanoescala (Albrecht *et al.*, 2006). Esta tecnología permitió reformular metales en nuevas partículas con tamaño nanométrico y debido a su tamaño tienen cambios drásticos en sus propiedades físicas y químicas que se aplican en diversos campos (Li *et al.*, 2008).

Los principales cambios que se dan en la escala nanométrica son debido a sus propiedades mecánicas o térmicas por medio de los cambios en su conductividad térmica, disminución del punto de fusión y confinamiento cuántico; propiedades electromagnéticas con el cambio en su conductividad eléctrica, fluorescencia y magnetización; propiedades ópticas debido a sus cambios en los índices de refracción y diferentes interacciones con la luz, el calor o el sonido y propiedades reactivas en las que la mayor área superficial y diversas respuestas a la radiación electromagnética (Gómez-Garzón, 2018).

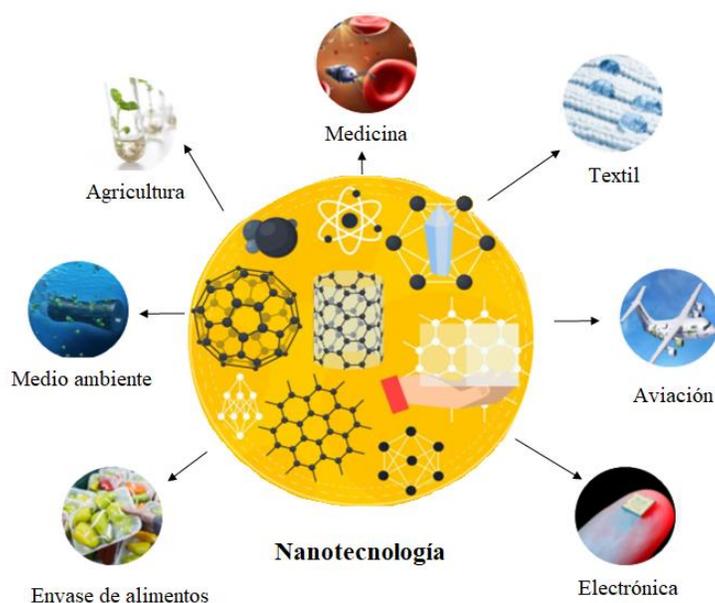
Entre menor sea la partícula de cualquier material, su relación entre la superficie y el volumen será mayor, como se muestra en la Figura 2, la reactividad aumenta debido a que el número de átomos en contacto con la superficie aumenta (Erro, 2011).



**Figura 2.** Representación de la relación superficie-volumen de la escala nanométrica.

Fuente: Modificado de Erro, 2011.

Asimismo, la nanotecnología se utiliza en diversas áreas, como se muestra en la Figura 3. En la industria textil para producir tejidos repelentes y los que previenen la formación de arrugas; en la electrónica, por las propiedades conductoras de los nanotubos de carbono, permiten su uso en pantallas de televisión; en la aviación, para el desarrollo de materiales más resistentes, livianos y anticorrosivos; en la industria alimentaria, por las propiedades ópticas de las nanopartículas metálicas se pueden utilizar como un transductor para detectar patógenos, y el uso de materiales nanocompuestos en el diseño de envases con mayor resistencia y hermeticidad (Ríos-Corripio *et al.*, 2016; López-Rubio *et al.*, 2019).



**Figura 3.** Nanotecnología en diferentes áreas de aplicación.

Tomado y adaptado de Tyagi *et al.* (2018); Jeyasubramanian *et al.* (2016).

En la medicina se utiliza para detectar patógenos por medio de biosensores utilizando nanopartículas como marcadores; además del uso de nanovehículos o nanocontenedores para transportar fármacos de manera controlada dentro del organismo (Molins, 2008; Rojas-Aguirre *et al.*, 2016). En la agricultura por medio de la nanobiotecnología se pueden modificar plantas por la manipulación de semillas, elaboración de nanopesticidas encapsulados para liberación controlada, nanosensores que permiten combatir plagas (Le

Van *et al.*, 2016) y, nanofertilizantes para promover el crecimiento de las plantas (Jeyasubramanian *et al.*, 2016).

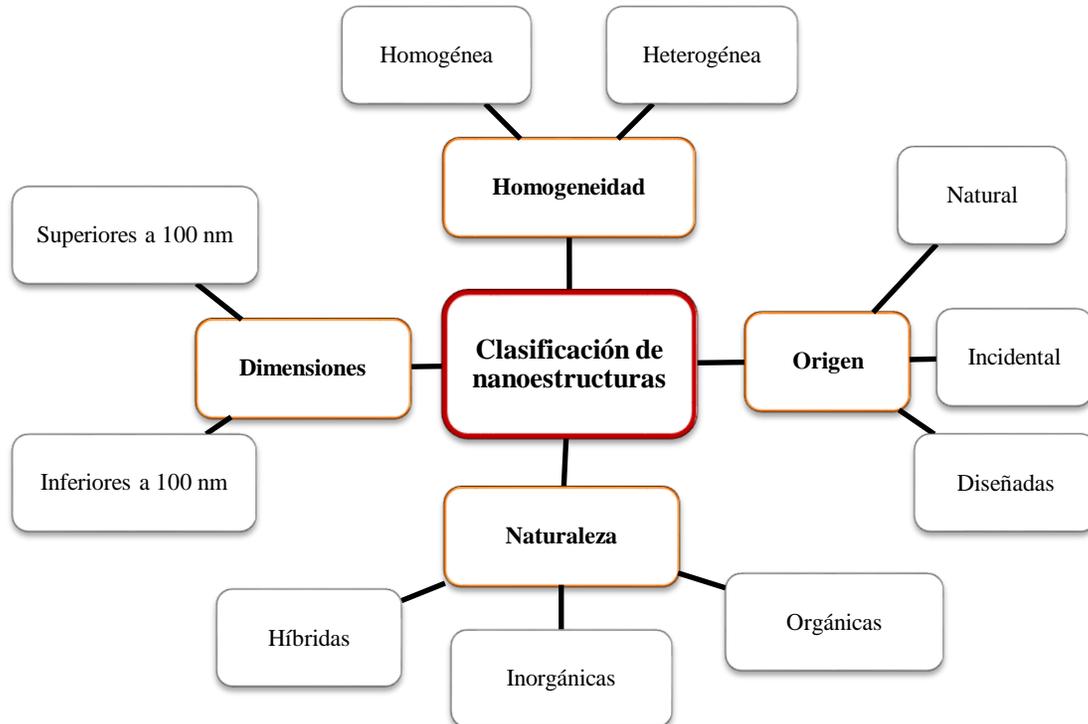
Además, la nanotecnología permite aplicaciones de catálisis y fotocatalisis, en el cual, la luz permite que los compuestos, residuos de plaguicidas y nanomaterial reaccionen entre sí, permitiendo que se descontamine el agua para consumo humano, para el uso agrícola (Quintili, 2012), o se utiliza en la recuperación de aguas subterránea, producción de energía, eliminación de tintes y nitratos (Tyagi *et al.*, 2018).

## **2. Nanomateriales**

Los nanomateriales se definen como materiales que tienen un tamaño inferior a 100 nanómetros en al menos una de sus dimensiones (Shi *et al.*, 2015). López-Lorente y Valcárcel (2014) indican que la diversificación de nanomateriales ha producido diferentes clasificaciones conforme a su origen, homogeneidad, naturaleza y dimensiones (Figura 4).

Las nanoestructuras de acuerdo con su origen natural son moléculas orgánicas (virus, bacterias, proteínas, polvo, arena, etc.) que se producen en el medio ambiente ya sean híbridas, inorgánicas u orgánicas; mientras que las generadas por el ser humano se clasifican como incidentales o involuntarias (residuos industriales, pirolisis, combustión de diésel, calentamiento de aceite, etc.) y las diseñadas son los nanocompuestos de arcilla, nanoláminas, nanofibras, etc.) (Trotta y Mele, 2019).

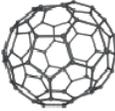
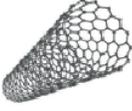
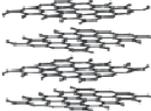
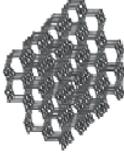
De acuerdo con la homogeneidad de las nanoestructuras, se refiere a las dimensiones y composición química, como es el caso de las nanopartículas idénticas (tamaño y morfología) como el oro y la plata, de ahí que su naturaleza se puede clasificar como orgánicas como los fullerenos, nanotubos de carbono, dendrímeros, etc., inorgánicas como las nanopartículas metálicas, puntos cuánticos, etc. y los híbridos donde se encuentran las nanopartículas modificadas, nanotubos con ferrocenos entre otros (López-Lorente y Valcárcel, 2014).



**Figura 4.** Clasificación de nanoestructuras de acuerdo con su homogeneidad, origen, naturaleza y dimensiones.

Fuente: Tomado y traducido de López-Lorente y Valcárcel, (2014).

Las nanopartículas existen en diferentes dimensiones, estructuras y formas, como se observa en la Figura 5, en cuanto a sus dimensiones se clasifican en 0D, 1D, 2D o 3D. Esta clasificación se relaciona con el movimiento de los electrones a lo largo de las diferentes dimensiones. Los electrones con estructura 0D se localizan en espacios sin dimensiones (un solo punto); las estructuras 1D se mueven en una dirección (sobre el eje x); las estructuras 2D se mueven en dos direcciones (sobre el eje x, y); mientras que las estructuras 3D se mueven en tres direcciones, sobre el eje x, y, z (Chaudhuri y Paria, 2012; Jeevanandam *et al.*, 2018).

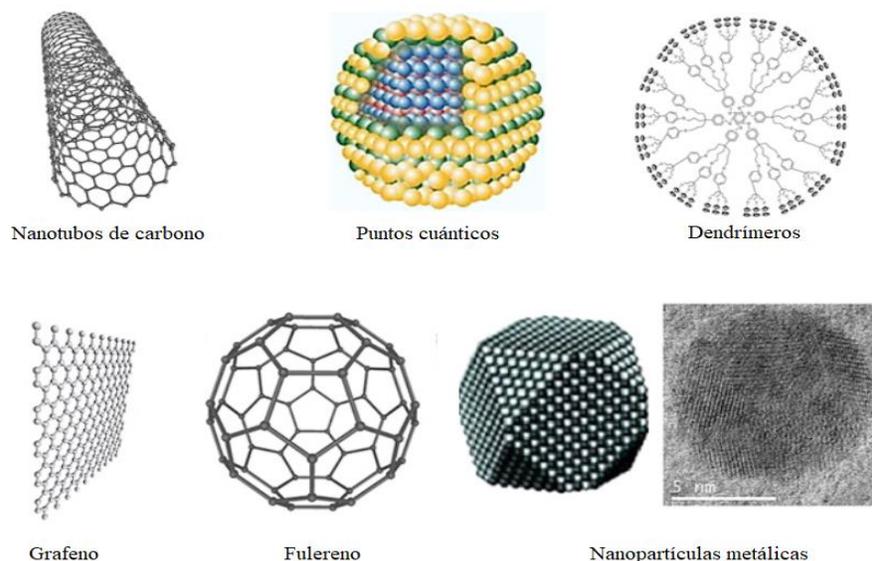
Estructura	Nanomateriales
<p data-bbox="448 281 675 306"><b>Cero dimensional (0D)</b></p> 	<ul data-bbox="878 285 1175 443" style="list-style-type: none"> <li>• Fullerenos</li> <li>• Partículas coloidales</li> <li>• Puntos cuánticos</li> <li>• Nanoclusters</li> <li>• Nanopartículas de Au y Ag</li> </ul>
<p data-bbox="453 506 669 531"><b>Uni dimensional (1D)</b></p> 	<ul data-bbox="878 501 1154 625" style="list-style-type: none"> <li>• Nanocables y nanofibras</li> <li>• Nanotubos</li> <li>• Nanovarillas</li> <li>• Fibras poliméricas</li> </ul>
<p data-bbox="456 737 660 762"><b>Bi-dimensional (2D)</b></p> 	<ul data-bbox="878 743 1198 900" style="list-style-type: none"> <li>• Monocapas</li> <li>• Nanorrecubrimiento</li> <li>• Películas poliméricas (nano)</li> <li>• Superficies espesor &lt;100nm</li> <li>• Película multicapa</li> </ul>
<p data-bbox="451 978 665 1003"><b>Tri-dimensional (3D)</b></p> 	<ul data-bbox="878 993 1198 1150" style="list-style-type: none"> <li>• Materiales nanoestructurales</li> <li>• Policristales</li> <li>• Nanobalas</li> <li>• Nanobobinas</li> <li>• Nanoflores</li> </ul>

**Figura 5.** Esquema de los nanomateriales de acuerdo con sus dimensiones.

Tomado de: Gómez-Garzón (2018).

Los nanomateriales involucran diversos usos y campos, en electrónica, fabricación de envases, revestimientos, textiles, fabricación de material automotriz, medicina, industria alimentaria, entre otros (Ríos-Corripio *et al.*, 2016; Ma *et al.*, 2018). Debido a esto la investigación sobre el desarrollo y aplicación de la nanotecnología sigue creciendo. Los nanomateriales más estudiados son los nanomateriales de carbono (fullerenos, láminas de grafeno y nanotubos de carbono), ampliamente utilizados en el campo de la electrónica, nanopartículas metálicas como nanopartículas de cobre (CuNPs), nanopartículas de plata (AgNPs), nanopartículas oro (AuNPs), entre otros (Figura 6). Debido a sus propiedades ópticas, conductividad eléctrica y térmica se pueden apreciar diferentes colores dependiendo

del tamaño, además las propiedades magnéticas han despertado gran interés debido a que pueden desempeñarse en diferentes áreas por su alto magnetismo y estabilidad (Aguilar-Tapia y Zanella, 2017; Varghese *et al.*, 2019).



**Figura 6.** Nanomateriales comúnmente utilizados.

Fuente: Adaptado de Varghese *et al.* 2019.

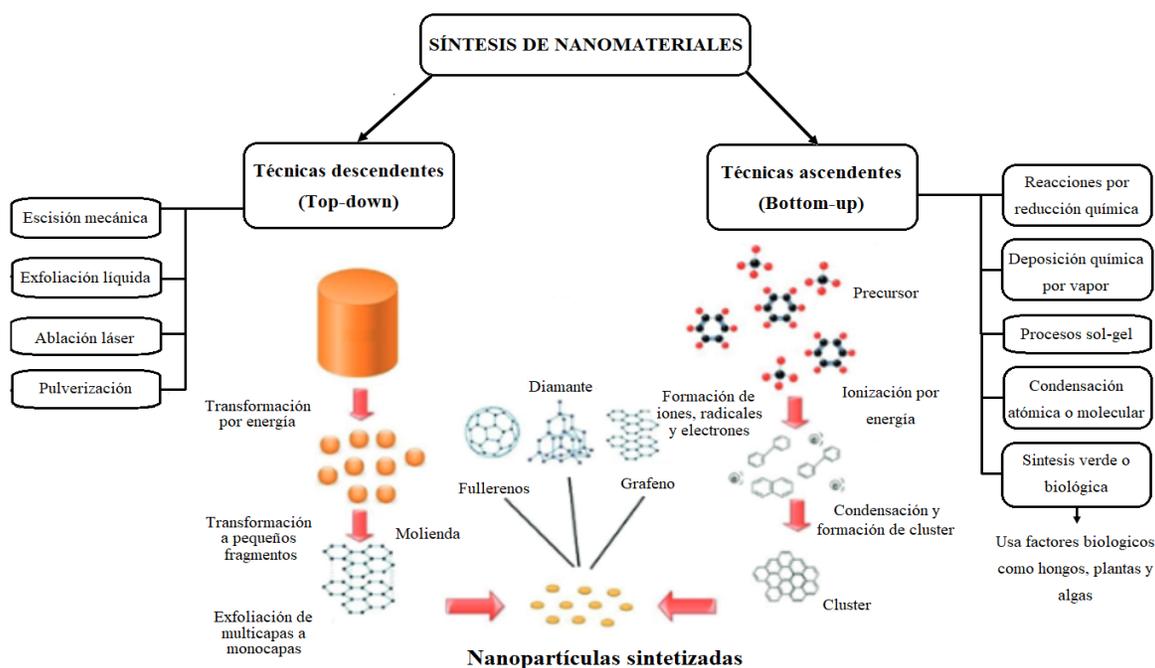
## 2.1 Propiedades de los nanomateriales

Los nanomateriales presentan diferentes características a los materiales “bulk” o bulto, como se comportan de forma distinta a los macromateriales, presentan diferencias físicas, químicas y eléctricas (Guisbiers *et al.*, 2012). De acuerdo con Magerramov *et al.* (2015) las propiedades térmicas o mecánicas producen cambios en su conductividad térmica, disminución su punto de fusión y confinamiento cuántico, propiedades electromagnéticas debido a que presentan cambio en su conductividad eléctrica, fluorescencia, magnetización, cambios ópticos y reactivos en los que se ha observado mayor área superficial y diferente respuesta a la radiación electromagnética. Además, las propiedades ópticas presentan cambios en sus índices de refracción y diferentes interacciones con luz calor o sonido, sin embargo, depende del tamaño y la forma de las partículas, como es el caso de las nanopartículas de Au en las cuales al obtener láminas finas son de color azul y al reducir las

por debajo de 3 nm toman un color morado o rojo; el medio en el que se encuentran dispersas también influye sobre sus propiedades ópticas (Domínguez-Domínguez *et al.*, 2007).

### 3. Síntesis de nanomateriales

Los nanomateriales se fabrican y sintetizan desde dos enfoques, el bottom-up y top-down (Figura 7). El primero se realiza partiendo desde el nivel atómico, mientras que la segunda se realiza disminuyendo el tamaño del material hasta quedar a nanoescala (Reza, 2014).



**Figura 7.** Síntesis de nanomateriales: top-down y bottom-up.

Fuente: Adaptado de Sasidharan *et al.* (2019); Makarov *et al.* (2014).

#### 3.1 Técnicas descendentes (Top-down)

La tecnología de “top down” se utilizan métodos físicos como la molienda o desgaste, métodos químicos y volatilización de un sólido que consisten en descomponer la macroestructura del material en componentes más pequeños (Huang *et al.*, 2017; Gómez-Garzón, 2018). El problema que presenta esta tecnología es la imperfección en la estructura de la superficie que provoca daños cristalográficos u otros defectos que tendrán impacto significativo en las propiedades físicas y químicas de la superficie (Cao, 2004). Las técnicas más utilizadas son:

- **Escisión mecánica:** Este método también es conocido como método de *Scotch-tape*, consiste en la separación mecánica de cristales a escala macro, dividiendo las interacciones de las fuerzas de Van der Waals existentes en cada capa, con el fin de no romper los enlaces covalentes en el plano para producir nano-láminas. Esta técnica se utiliza para obtener láminas de grafeno a partir de grafito, y se han desarrollado nanomateriales (2D) como el nitruro de boro, disulfuro de molibdeno, disulfuro de titanio y disulfuro de tungsteno (Li *et al.*, 2011; Liu *et al.*, 2016).
- **Exfoliación líquida por fuerza mecánica:** Esta técnica se utiliza en cristales en capa, se basa en la exfoliación mediante líquidos aplicando fuerzas mecánicas utilizando la sonicación y la fuerza de corte; las cuales aportan la fuerza mecánica mediante el líquido, rompiendo las interacciones de las fuerzas de Van der Waals que existen entre las capas del cristal y conservando los enlaces covalentes de las mismas, en esta técnica se debe tomar en cuenta el sistema de solvente, tiempo del tratamiento mecánico, temperatura, intensidad de sonicación y la adición de polímeros (Pottathara *et al.*, 2019).
- **Ablación láser:** En esta técnica el láser penetra la superficie de la muestra, la cual, se encuentra sumergida en una solución líquida, los electrones de la muestra son removidos debido al campo eléctrico generado por la luz láser, permitiendo que los electrones interactúan con los átomos de la muestra calentando la superficie y vaporizándola. Una vez que el flujo del láser aumenta, el material pasa a un estado de plasma, el cual está conformado de grupos de átomos, moléculas y iones permitiendo la formación de nanopartículas. Para esta técnica se deben controlar el tipo de material que se va a utilizar, solvente y solutos, temperatura y presión del sistema (factores de la muestra o precursor) y longitud de onda, tiempo, energía y frecuencia (factores del láser) (Varghese *et al.*, 2019).
- **Pulverización catódica:** Esta técnica también es conocida como *sputtering*, un proceso no térmico de evaporación que consiste en que los átomos de la superficie de

un material son expulsados físicamente por la transferencia producida que se genera al bombardearlos sobre un blanco de partículas energéticas de tamaño atómico. Estas partículas constantemente son iones gaseosos acelerados desde un plasma, mientras que el material al ser pulverizado (blanco) puede ser un elemento, una aleación, un material compuesto o una mezcla de varios elementos (Baptista *et al.*, 2018).

### 3.2 Técnicas ascendentes (Bottom up)

La tecnología "bottom-up" utiliza un conjunto de unidades básicas de materia para formar unidades más grandes (Rius *et al.*, 2008), además se requiere ensamblar "building blocks" (monómeros) en una macromolécula o polimerizar la materia a granel. Sin embargo, otro método puede ser el método de crecimiento de cristales, donde las sustancias como átomos, iones o moléculas se combinan de manera ordenada para formar una estructura de cristales (Cao, 2004). Las técnicas más utilizadas son:

- **Reducción química húmeda:** Este método consiste en el uso de precursores los cuales reaccionarán en la fase líquida de la solución. Este método tiene la capacidad para poder controlar el tamaño, forma y cristalinidad de los nanomateriales a obtener, así como, su bajo costo de operación (Pottathara *et al.*, 2019).
- **Deposición química por vapor:** Este método consiste en la deposición de un(os) sólido(s) (precursores) sobre una superficie caliente a partir de una reacción ocurrida en la fase de vapor. Además, existe la deposición en un solo paso que consiste en la introducción de todos los precursores en la cámara de reacción, posteriormente se utiliza un flujo de gas inerte como argón o nitrógeno, permitiendo que la reacción y la difusión de las moléculas adsorbidas formen clústeres con cada capa del nanomaterial utilizado (Varghese *et al.*, 2019).

Por otro lado, la deposición en dos pasos consiste en la degradación de una capa inicial con un precursor mediante deposición física de vapor, la cual posteriormente se introduce al segundo precursor reaccionando, permitiendo que se asocie con la

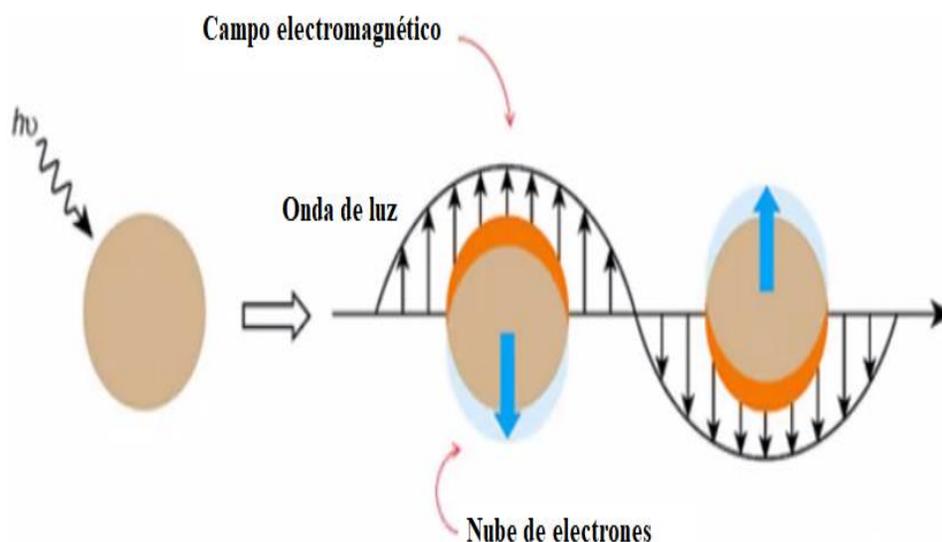
primera capa. Este método es utilizado para la fabricación de nanoláminas con propiedades dieléctricas, conductoras y de pasivación (Raiford *et al.*, 2020).

- **Procesos sol-gel:** Este método consiste en la obtención de nanopartículas de óxido metálico y de nanocompuestos, como nanotubos con dióxido de titanio (CNTs/TiO<sub>2</sub>). Para la producción de este método se divide en varias etapas donde el primer paso es la hidrólisis, condensación, posteriormente el proceso de secado, con el fin de generar el gel, el agente precursor metálico es hidrolizado, formando hidróxido metálico y finalmente se condensa; posteriormente a la obtención del gel es secado y convertido a xerogel o aerogel (Varghese *et al.*, 2019).
- **Condensación atómica o molecular:** Consiste en la obtención de nanopartículas debido a la colisión de átomos metálicos provenientes de una fuente de calor. La cual ha permitido sintetizar nanopulvos metálicos, incluyendo Al, Co, Cr, Fe, Ga, Mg, y Ni y se pueden obtener partículas de tamaño aproximado a 10 nm (Huang, *et al.*, 2017).
- **Síntesis verde o biológica:** Consiste en la reducción de metales mediante el uso de especies naturales con poder antioxidante, que se puedan utilizar para reemplazar los agentes químicos reductores entre los cuales se encuentran las plantas y algas, diatomeas, bacterias, levaduras, hongos, virus y células humanas, debido a que los microorganismos son capaces de transformar los iones inorgánicos metálicos en nanopartículas metálicas mediante la caracterización de la reducción de sus metabolitos y de las proteínas de estos mismos (Gómez-Garzón, 2018).

#### 4. Nanopartículas metálicas

Los primeros estudios sobre nanopartículas de metal se realizaron en plata (Ag), cobre (Cu) y oro (Au), siendo estas últimas las más investigadas por sus características físicas y químicas e incluso por los diferentes campos de aplicación (Vo-Dinh, 2002). Por sus propiedades

eléctricas y ópticas; son de gran interés; una de las propiedades más estudiadas de las nanopartículas metálicas es la *Resonancia de Plasmón Superficial* (RPS) (Figura 8). Este efecto se puede observar cuando la nanopartícula es fotoactivada; es decir, la luz interactúa con el plasmón generando un incremento en el campo electromagnético de las nanopartículas, la interacción entre el fotón incidente y el campo eléctrico permite la dispersión y absorción de la luz (Varghese *et al.*, 2019).



**Figura 8.** Representación gráfica del efecto de resonancia de plasmón superficial.

Fuente: Tomado de Antonio *et al.* (2018)

Cabe mencionar que las nanopartículas metálicas pueden ser compuestas por un solo tipo de metal (homogéneas) o de por diferentes elementos metálicos (heterogéneas), denominándose nanoaleaciones, las cuales pueden tener diferentes patrones de ordenamiento (Johnston, 2012). Las nanopartículas de cobre (CuNPs) han sido las más estudiadas, tienen propiedades que permiten desarrollar nanocatalizadores reactivos, selectivos y estables; es por ello, que las aplicaciones de CuNPs en su mayoría son en nanocompuestos, debido a su inestabilidad en el medio ambiente (oxidación) y son fijadas en sustratos como gránulos poliméricos (Varghese *et al.*, 2019). Además, tienen un efecto antimicrobiano, aunque es menor al de las nanopartículas de plata; sin embargo, presentan un gran potencial sobre bacterias como *Salmonella enterica*, *Campylobacter jejuni*, *E. coli*,

*Listeria monocytogenes*, y *S. aureus*. Su obtención es de bajo costo si se compara con otras nanopartículas metálicas (Chudobova *et al.*, 2015).

Las nanopartículas de plata (AgNPs) se caracterizan por sus propiedades antimicrobianas, se ha demostrado que genera daños a la membrana celular de los microorganismos (Varghese *et al.*, 2019) y su uso se ha extendido ampliamente en el área médica, se ha comprobado que también tienen propiedades antifúngicas, antivirales, antiinflamatorias e inclusive actúan como agentes anticancerígenos (Rozalen *et al.*, 2020).

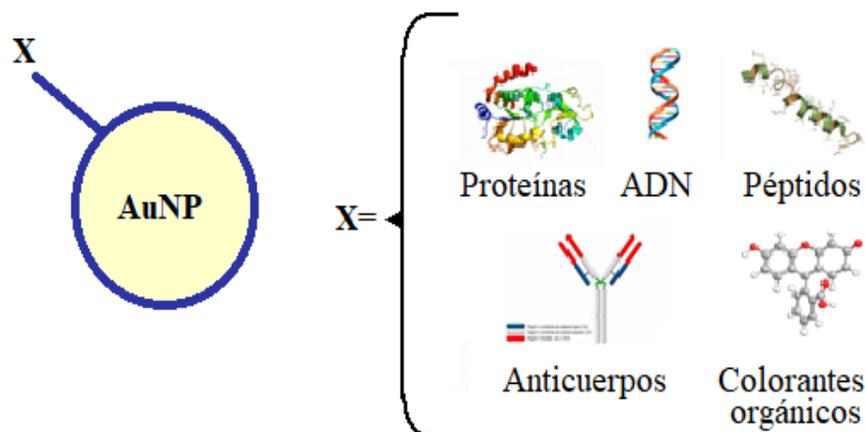
Las nanopartículas de oro se utilizan para la elaboración de vitrales debido a su interacción con la luz visible, en aplicaciones ambientales, alimentarias y médicas en la detección virus como el Herpes y Papiloma Humano debido a su alta biocompatibilidad y área superficial (Varghese *et al.*, 2019), cuyas propiedades se describen en el siguiente apartado.

#### **4.1 Nanopartículas de oro (AuNPs)**

Las nanopartículas de metales como las AuNPs tienen buenas propiedades físicas, químicas y biológicas, específicas a su tamaño nanométrico (Auffan *et al.*, 2009). Además, las AuNPs se pueden producir en una variedad de tamaños y formas; y se pueden funcionalizar fácilmente con abanico de ligandos (anticuerpos, polímeros, sondas de diagnóstico, fármacos, material genético, entre otros), todo eso hace que las AuNPs despierten un gran interés en diversos campos, pero especialmente en los sectores biomédico y alimentario (Al-Qadi y Remuñán-López 2009).

El funcionamiento de las nanopartículas de oro depende de su tamaño, morfología (esféricas, varillas, cápsulas, cajas, anillos, discos, prismas triangulares, etc.), y agentes estabilizantes o de recubrimiento (Varghese *et al.*, 2019). Las AuNPs presentan mayor biocompatibilidad en comparación con nanopartículas de otros metales, esto se debe a relación del área superficial y su volumen, las nanopartículas de oro pueden ser conjugadas o recubiertas, como se muestra en la Figura 9, pueden asociarse con diferentes moléculas biológicas que contienen grupos tiol, amina y fosfato; estos recubrimientos previenen la agregación de las AuNPs, a

la unión de estas moléculas a la superficie de las AuNPs se le conoce como funcionalización (Stabile *et al.*, 2020).



**Figura 9.** Representación de moléculas que pueden funcionalizarse con las AuNPs.

Fuente: Dominio público.

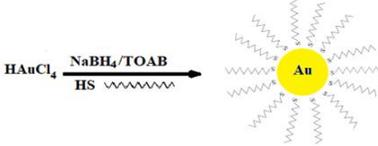
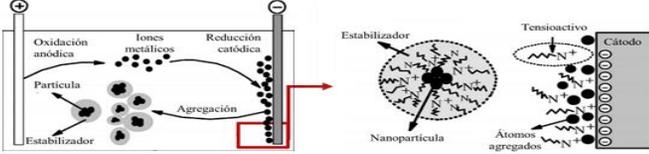
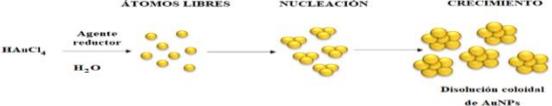
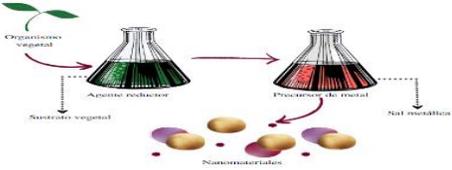
## 4.2 Síntesis de nanopartículas de oro

La síntesis de nanopartículas era utilizada para elaborar colorante en vitrales (Cheng *et al.*, 2014). Sin embargo, el oxiclورو de oro fue uno de los primeros compuestos utilizado como precursor para sintetizar nanopartículas de oro según Michael Faraday en 1857. De allí se utilizaron diferentes compuestos como el borohidruro de sodio y citrato de sodio como agentes reductores (Oliveira *et al.*, 2018).

### 4.2.1 Métodos de síntesis

Como se muestra en el Cuadro 1, los métodos más conocidos de síntesis de nanopartículas son el método Brust-Schiffrin, la síntesis electroquímica, la reducción química con citrato de sodio y la síntesis verde o biológica. Estos métodos requieren condiciones de energía y materiales para la elaboración nanopartículas (Herizchi *et al.*, 2016).

**Cuadro 1.** Métodos para la síntesis de nanopartículas de oro

Método	Ventajas	Desventajas	Referencia y representación
<b>Método de Brust-Schiffrin</b>	Mayor estabilidad Tamaño manipulable	Equipos especializados Altos costos Uso de solventes Alta toxicidad	 <p>Brust <i>et al.</i>, 1994; Herizchi <i>et al.</i>, 2016</p>
<b>Síntesis electroquímica</b>	Controlar nucleación, crecimiento y velocidad	Uso de solventes Altos costos	 <p>Reetz <i>et al.</i>, 1995; Huang <i>et al.</i>, 2006</p>
<b>Síntesis química con citrato de sodio</b>	Fácil reproducibilidad Homogéneas	Agente reductor es un reactivo sintético	 <p>Hermanson, 2008</p>
<b>Síntesis verde</b>	No se requiere de equipo especializado ni sofisticado No utiliza reactivos tóxicos ni altos niveles de energía	Compuestos fenólicos actúan como agentes reductores y de recubrimiento	 <p>Kharissova <i>et al.</i>, 2013; Balasubramanian <i>et al.</i>, 2020</p>

De acuerdo con Cheng *et al.* (2014) son varios los factores que puede controlar la forma y tamaño de las nanopartículas que impactara en las propiedades finales como:

**Agente precursor:** El tetracloroaurato ( $\text{AuCl}_4$ ) o ácido tetracloroaurico ( $\text{HAuCl}_4$ ) son los precursores que comúnmente se utilizan para sintetizar nanopartículas de oro aportando átomos de oro para formar las nanopartículas, la cantidad que se utilice definirá la concentración y por ende determinara la densidad y el tamaño de la partícula (Varghese *et al.*, 2019).

**Agente reductor:** El citrato de sodio es el agente reductor utilizado en el método sintético; sin embargo, se ha reportado el uso de borohidruro de sodio y ácidos orgánicos como el ácido ascórbico y de extractos de plantas con mayor cantidad de antioxidantes y fenoles.

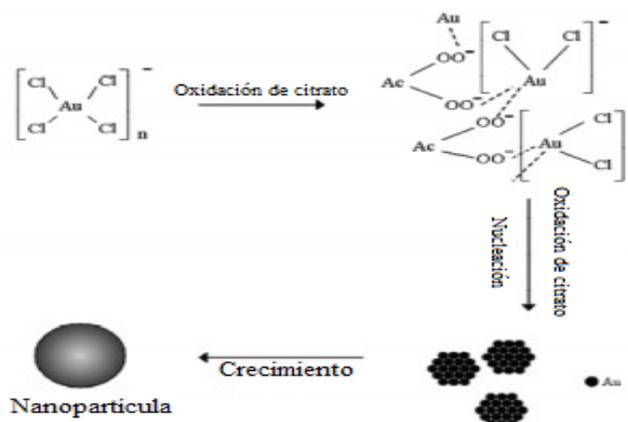
**pH:** El pH debe estar en un rango de 4.7 a 5.3, debido a que en este pH se ha reportado para obtener el mejor rendimiento en la síntesis de nanopartículas (Contreras-Trigo *et al.*, 2018).

**Temperatura:** La alta temperatura permite que los átomos se distribuyan uniformemente durante la fase de crecimiento del núcleo porque afecta directamente la dispersión de las nanopartículas (Herizchi *et al.*, 2016).

#### 4.2.2 Síntesis Química de AuNPs

La síntesis química es uno de los métodos más utilizados para sintetizar nanopartículas de oro (Agunloye *et al.*, 2018). Este método por reducción química (Figura 10) se realiza con ácido tetracloroaurico ( $\text{HAuCl}_4$ ) como precursor y citrato de sodio como agente reductor; el cual es oxidado a acido dicarboxílico acetona, permitiendo que el  $\text{HAuCl}_4$  sea reducido dejando únicamente átomos libres de oro, formando agregados de la nucleación de estos átomos libres. Posteriormente esos agregados o núcleos aumentan de tamaño hasta que el  $\text{HAuCl}_4$  se agota y las nanopartículas quedan formadas.

En este tipo de síntesis, la concentración del agente reductor juega un papel importante debido a que dependiendo de la concentración de este se va a determinar la cantidad y el tamaño de las nanopartículas, obteniendo una suspensión coloidal con coloración rojo rubí (Hermanson, 2008).

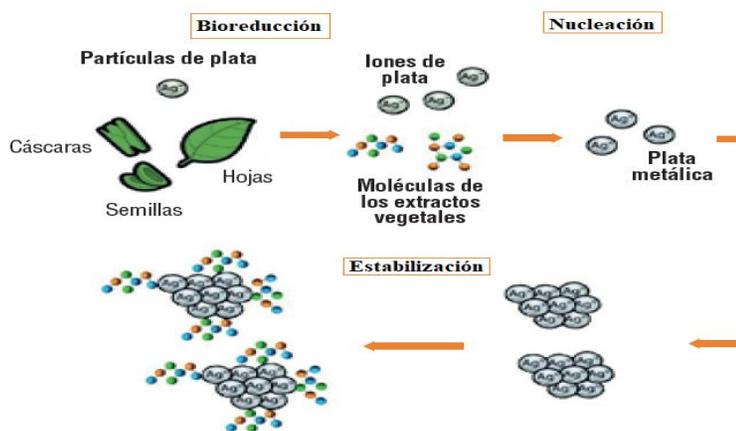


**Figura 10.** Representación de síntesis de nanopartículas de oro mediante el método de reducción química con citrato de sodio.

Fuente: Ríos-Corripio, 2016.

#### 4.2.3 Síntesis Verde de AuNPs

La síntesis verde de nanopartículas es una propuesta para sustituir los reactivos sintéticos por extractos de plantas, hongos e incluso semillas, y otros extractos, principalmente por los compuestos bioactivos (Figura 11), que poseen polifenoles y tienen la propiedad de actuar como agente reductor (Kharissova *et al.*, 2013; Herizchi *et al.*, 2016; Bogireddy *et al.*, 2017). Una de las ventajas que tiene la síntesis verde es que permite que las nanopartículas resultantes sean funcionales por el contenido químico de la planta utilizada; los cuales actúan como agentes reductores y de recubrimiento (Balasubramanian *et al.*, 2020).



**Figura 11.** Síntesis verde o biológica de nanopartículas de plata.

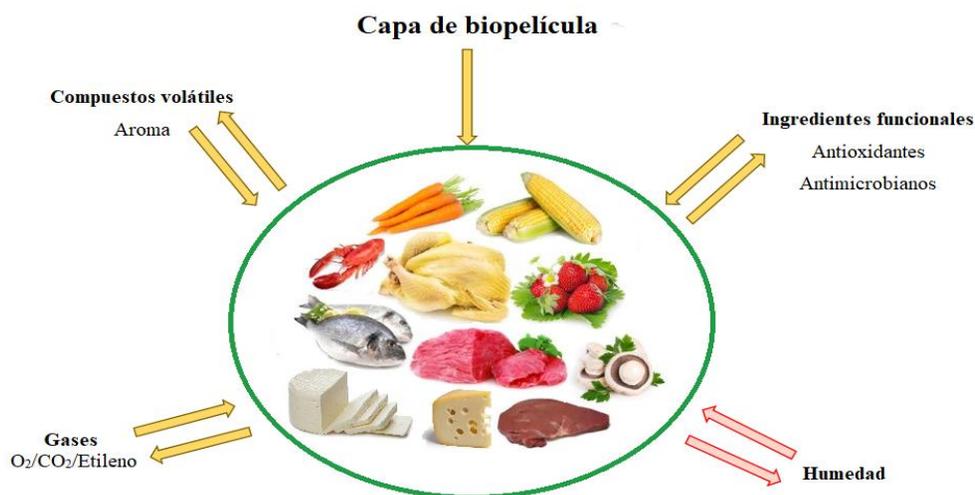
Tomado de Gómez-Garzón, (2018).

## 5. Películas biodegradables

Las películas biodegradables son elaboradas con diferentes biopolímeros, se definen como una capa delgada de polímero que puede ser consumida y empleada en la superficie de un alimento (Krochta y De Mulder-Johnson, 1997). Se pueden utilizar como estructura de prueba para evaluar las propiedades de barrera, propiedades mecánicas y solubilidad en los alimentos (DeI-Valle *et al.*, 2005).

De acuerdo con la norma ISO 14855-1:2012 la biodegradabilidad se define como la descomposición de un compuesto orgánico por microorganismos en presencia de O<sub>2</sub> para producir CO<sub>2</sub>, agua, sales y biomasa, cabe mencionar que la temperatura, humedad, O<sub>2</sub> y microorganismos sean los encargados de la descomposición. Bonilla y Sobral (2020) evaluaron la biodegradabilidad de películas de gelatina, quitosano, caseinato de sodio y una mezcla de gelatina-quitosano, gelatina-caseinato de sodio demostrando que en condiciones de compostaje estas películas son degradadas en 5 días debido a su alta solubilidad en agua.

Las películas biodegradables son una alternativa para mejorar, prolongar la calidad y vida útil de los alimentos durante el manejo pre y postcosecha, el procesado, el transporte y el almacenamiento (Espino-Díaz *et al.*, 2010). Como se muestra en la Figura 12, las películas biodegradables tienen la función de prevenir la migración de agua, controlar la transmisión de gases (O<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub> y etileno), retener componentes volátiles y servir como portador de aditivos para mejorar sus propiedades mecánicas y de manipulación, además de darle mayor integridad a la estructura del alimento (Kester y Fennema 1986), permitiendo mantener la textura de los alimentos durante su almacenamiento (Jooyandeh, 2011), o para controlar los alimentos y protegerlos de factores físicos, mecánicos, químicos y microbiológicos (Quintero *et al.*, 2010).



**Figura 12.** Transferencias que puede ser controladas por barreras comestibles.

Fuente: Adaptado de Falguera *et al.* (2011).

### 5.1 Componentes de las películas biodegradables

Determinar los materiales que componen la película biodegradable depende de la naturaleza, composición y estructura del alimento al que se aplicara y deben ser reconocido por la FDA (Administración de Alimentos y Medicamentos) y la COFEPRIS (Comisión Federal para la Prevención de Riesgos a la Salud) en los Estados Unidos y México, respectivamente, con el fin de que los alimentos sean seguros, sean saludables, estén etiquetados adecuadamente bajo las normas adecuadas. Los materiales deben de ser tipo GRAS (Generally Recognized As Safe, por sus siglas en inglés, /Generalmente reconocidos como seguros), puesto que son materiales que se rigen con grado alimenticio (Dhall, 2013).

Las películas biodegradables se pueden dividir en tres categorías según su composición, ya sea preformada por hidrocoloides, lípidos y materiales compuestos. Los hidrocoloides incluyen proteínas y polisacáridos, como celulosa, carragenina, almidón, alginato y pectina, así como proteínas y sus derivados. Las películas biodegradables formadas por hidrocoloides tienen buenas propiedades mecánicas y buenas propiedades de barrera a los gases ( $O_2$  y  $CO_2$ ); sin embargo, no pueden evitar una transmisión suficiente de vapor de agua (Valencia-

Chamorro *et al.*, 2011). Los lípidos incluyen ceras, acilgliceroles y ácidos grasos, contrariamente a los hidrocoloides los lípidos son hidrofóbicos y no poliméricos, presentando excelentes propiedades de barrera frente a la humedad, pero escasa capacidad para formar películas. Mientras que las películas biodegradables elaboradas con materiales compuestos son formadas con una mezcla de hidrocoloides y lípidos, permitiendo potenciar las ventajas de cada grupo, reduciendo las desventajas individuales de cada material, es por ello por lo que las películas biodegradables de materiales compuestos tienen mayor resistencia al vapor de agua y buena cohesión estructural (Pastor *et al.*, 2005; Valencia-Chamorro *et al.*, 2011).

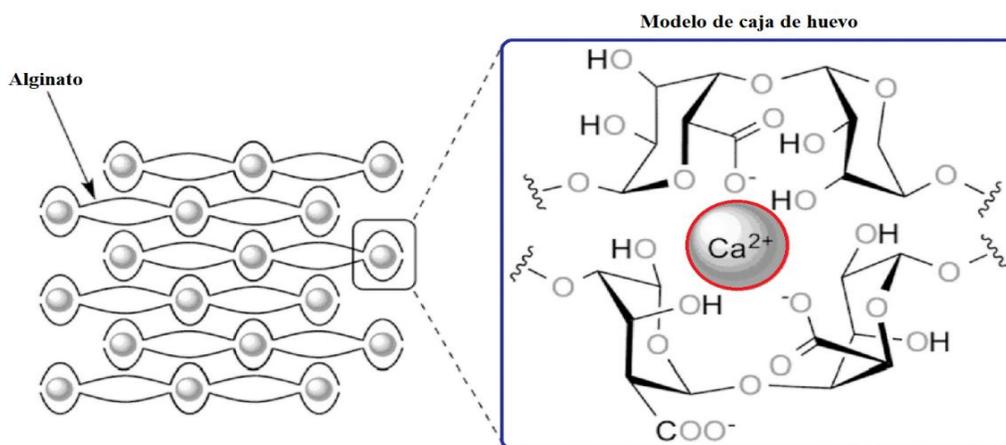
### 5.1.1 Alginato

El alginato es un polisacárido que se obtiene principalmente de tres especies de algas marinas marrones (*Laminaria hyperborea*, *Ascophyllum nodosum* y *Macrocystis pyrifera*), en su estado natural se presentan como una mezcla de sales de cationes principalmente de  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$  y  $\text{Na}^{2+}$  (Avendaño-Romero *et al.*, 2013). El alginato presenta diversas propiedades, dentro de las cuales se encuentran la capacidad para formar películas coloidales no tóxicas y únicas, como espesantes, estabilizadores, agentes de suspensión, formadores de película, generadores de gel y estabilizadores de emulsión (Dhanapal *et al.*, 2012). Las membranas formadas por el alginato son uniformes, transparentes y tienen buenas propiedades de barrera al oxígeno, pero debido a su hidrofilia, tienen baja resistencia al agua (Dhanapal *et al.*, 2012; Lin y Zhao, 2007).

El alginato consta de unidades de ácido *D*-manurónico y *L*-gulurónico unidos por enlaces 1,4-glucosídico (Katouzi *et al.*, 2011). A diferencia de los alginatos ricos en ácido manurónico, los alginatos con alto contenido en ácido gulurónico tienen la propiedad de formar geles rígidos y con mayor porosidad, a diferencia de los alginatos ricos en ácido manurónico (Anal y Singh, 2007). Este biopolímero es el más utilizado para la formación de matrices en la industria alimentaria por el uso fácil, la biocompatibilidad, seguridad y el bajo costo (Sohail, 2011; Bruschi y Záchia, 2011). Como se muestra en la Figura 13, el alginato tiene la capacidad de reaccionar para formar geles en presencia de cationes divalentes y trivalentes, específicamente con los iones calcio y se ha demostrado que la gelificación

inducida por calcio es el resultado de una interacción fuerte y específica entre el  $\text{Ca}_2^+$  y el bloque G de alginato, es por lo que se estableció el modelo “caja de huevo” o *egg-box model*, este modelo permite la unión de dos o más cadenas de unidades de ácido gulurónico del alginato con una estructura bidimensional similar a una caja de huevos de cartón y coordinados los iones calcio (Grant *et al.*, 1973; Nieto, 2016).

El peso molecular y los residuos de ácido manurónico (M) y gulurónico (G) afecta las propiedades físicas y químicas del alginato. La proporción de residuos de ácido manurónico y ácido gulurónico depende de la fuente biológica y la madurez que presentan las algas (Lee y Mooney, 2012; Milani y Maleki, 2012). Por otro lado, Liling *et al.* (2016) demostraron que la reticulación de la película a base de alginato con calcio conduce a un valor de resistencia a la tracción más alto y aumenta la cohesión de la estructura, lo que da como resultado una película más fuerte con menor solubilidad en agua.



**Figura 13.** Modelo “caja de huevo” que describe el entrecruzamiento del alginato.

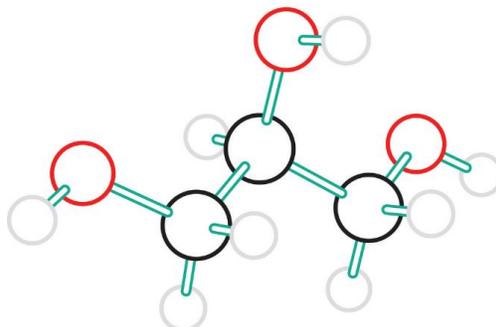
Fuente: Tomado de Costa *et al.* (2018).

El cloruro de calcio ( $\text{CaCl}_2$ ) se utiliza comúnmente para reticulación iónica porque presenta solubilidad en soluciones acuosas, permitiendo el proceso de gelificación del alginato mientras que otros agentes reticulantes como el sulfato de calcio ( $\text{CaSO}_4$ ) y el carbonato de calcio ( $\text{CaCO}_3$ ) presentan menor solubilidad reduciendo la velocidad de gelificación del alginato de sodio (Lee y Mooney, 2012). Méndez-Reyes *et al.* (2015) mencionan que las películas biodegradables a base de alginato muestran mayor resistencia al agua en

comparación con las películas biodegradables formados a base de carragenina. Fazilah *et al.* (2011) desarrollaron una película de alginato de sodio en combinación con almidón de sagú y películas únicamente de almidón de sagú, adicionando cloruro de calcio por inmersión obteniendo mejor resistencia a la tracción, mayor flexibilidad en las películas combinadas en comparación a las películas de almidón de sagú, sin embargo, la película de almidón de sagú presentó una solubilidad moderada al agua demostrando que son más resistentes.

### 5.1.2 Agentes plastificantes

Los plastificantes se incorporan en las películas biodegradables para modificar las propiedades mecánicas, comúnmente los más utilizados son: glicerina, sorbitol, manitol, sacarosa y polipropileno (Kester y Fennema, 1986). Su función es debilitar las cadenas poliméricas adyacentes y mejorar las propiedades mecánicas, favoreciendo la flexibilidad al formar una estructura más homogénea; sin embargo, reduce la capacidad de humedad y la barrera al oxígeno y al aroma (Pérez-Gago y Krochta, 2002). El glicerol llamado también glicerina se forma por un poliol con tres grupos hidroxilo (-OH) (Figura 14), es un líquido viscoso, incoloro e insípido con bajo peso molecular utilizado para aumentar el volumen o la movilidad molecular de los polímeros, disminuyendo los enlaces de hidrogeno internos e incrementando el espacio intermolecular (McHugh y Krochta, 1994). Sus tres grupos hidroxilos presentes en su composición le otorgan higroscopicidad; es decir, tiene la capacidad de liberar o absorber humedad en el ambiente, es soluble en agua y alcohol. Sin embargo, esto puede afectar la permeabilidad al vapor de agua y gases (Sothornvit y Krochta, 2001).



**Figura 14** Molécula de glicerol ( $C_3H_8O_3$ ).

Fuente: Tomado de Gorbacheva, (2021)

## 5.2 Métodos para la elaboración de películas biodegradables

Existen múltiples métodos para elaborar películas biodegradables entre los que destacan el método por eliminación del disolvente, gelación térmica, solidificación, casting, electro spraying y microfluidización.

- El *método de gelación térmica*, el cual se lleva a cabo formando un gel estable con estructura rígida, comúnmente se utiliza para elaborar películas y recubrimientos a base de proteínas en el que se desnaturalizan las moléculas dando lugar a formación de un entramado estable de partículas (Carmona *et al.*, 2007).
- El *método por solidificación* consiste en que las macromoléculas en conjunto con el plastificante son disueltas hasta ser homogeneizadas y son vertidas en moldes como capas finas (Ávila-Sosa *et al.*, 2012)
- El *método de Casting* es una técnica en la cual se obtienen películas premoldeadas a temperatura y humedad controladas (Escobar *et al.*, 2009). La solución hidrocoloide debe incorporarse a un disolvente, ya sea agua, etanol o ácido acético que contenga aditivos como plastificantes, agentes reticulantes o solutos. Posteriormente esta solución se vierte en un molde de silicón donde se deja secar para eliminar el disolvente finalmente, se forma la película biodegradable para ser desprendida (Cagri *et al.*, 2004).
- El método *electrospraying* consiste en la atomización de la disolución por medio de fuerzas eléctricas, el líquido va a salir por la boquilla con un alto potencial eléctrico (Jaworek y Sobczyk 2008). Una de las ventajas de este método es que las gotas obtenidas son de menor tamaño incluso llegan a medir nanómetros, y el tamaño y carga son controlados por medios eléctricos.
- El *método por microfluidización* consiste en dispersiones que se hacen para pasar a través de microcanales, permitiendo obtener nanopartículas que le otorgan a la

película mejores características físicas, posteriormente se debe aplicar el método de casting para la formar la película (Monroy-Villagrana *et al.*, 2014).

## **6. Películas bioactivas**

Las películas biodegradables presentan la funcionalidad de servir como vehículo de compuestos bioactivos donde destacan compuestos: antimicrobianos, antioxidantes, vitaminas, pre y probióticos, fármacos, colorantes, aditivos, entre otros; a este tipo de películas se les conoce como películas activas (Camacho *et al.*, 2011; Gómez-Estaca *et al.*, 2015). La funcionalidad de la película está relacionada con la actividad biológica y se puede clasificar según los aditivos añadidos (Bruna *et al.*, 2014).

Alboofetileh *et al.* (2015) elaboraron una película biodegradable con aceites esenciales de mejorana, alginato y arcilla con el fin de demostrar el efecto inhibitor que tiene contra *L. monocytogenes* reduciendo el crecimiento de esta bacteria, de 6.23 log UFC/g para las rodajas tratadas con las biopelículas en comparación con la biopelícula control de 7.38 log UFC/g. Sogut y Seydim (2018) reportan los efectos de películas comestibles de quitosano a base de extracto de semilla de uva con concentraciones de 5, 10 y 15% sobre filetes de pechuga de pollo para inhibir en su totalidad *L. monocytogenes*. Cano *et al.* (2016) evaluaron la actividad antibacteriana (*Listeria innocua*, *E. coli*) y antifúngica (*Aspergillus niger*, *Penicillium expansum*) de una película de almidón de alcohol polivinil con aceite esencial de orégano y aceite de neem con 6.7 y 22 g/100 g de sólidos donde la película con aceite esencial de orégano a 6.7 g/100 g mostró efecto antibacteriano, mientras el efecto antifúngico se observó incorporando concentraciones más altas de aceite.

### **6.1 Películas biodegradables con nanomateriales**

La demanda de la industria y la aplicación de la nanotecnología conllevan a desarrollar nuevas tecnologías de envasado que mejoren las propiedades mecánicas, térmicas, ópticas y fisicoquímicas en comparación con las matrices poliméricas (Ortega *et al.*, 2017).

Yang *et al.* (2021) elaboraron nanopartículas de lignina por síntesis verde para su aplicación en películas compuestas de alcohol polivinílico a diferentes concentraciones (1,2,3,4 y 6%)

obteniendo mejores propiedades mecánicas, mayor hidrofobicidad, protección a los rayos UV y actividad antioxidantes a las películas conforme se añade la mayor concentración de nanopartículas.

Balaguer *et al.* (2016) evaluaron la biodegradabilidad de películas de poli (ácido láctico) con nanomateriales (montmorillonita modificada con una sal cuaternaria de amonio, CaCO<sub>3</sub> y SiO<sub>2</sub>) mostrando una desintegración de 90% después de 130 días lo que incluso el uso de nanomateriales podría aumentar la biodegradación de las películas.

Ortega *et al.* (2017) elaboraron una película con nanopartículas de plata como empaque activo para evaluar la actividad antimicrobiana a diferentes concentraciones (0, 14.3, 28.6, 71.5 y 143 ppm) contra *E. coli*, *Salmonella* spp., *S. aureus*., y *Penicillium* spp., encontrando que las concentraciones de AgNP superiores a 71.5 ppm inhibieron el crecimiento de *E. coli* y *Salmonella* spp.

## **6.2 Películas biodegradables con propiedades antioxidantes**

Los antioxidantes son moléculas que pueden retrasar o prevenir la oxidación de otras moléculas, prolongar la etapa inicial de autooxidación e inhibir su etapa de difusión o autooxidación. Son particularmente útiles para evitar la oxidación de grasas y productos que contienen grasas. Los principales antioxidantes utilizados en los alimentos son: ácido ascórbico, ascorbato de sodio, ascorbato de calcio, palmitato de ascorbilo, glutatión, melatonina, tocoferoles, tocotrienoles, carotenoides y polifenoles (Quezada-Gallo, 2009).

La incorporación de antioxidantes es una de las estrategias con mayor aplicación en la industria de alimentos debido a que estos confieren estabilidad, actúan como filtro de luz visible y ultravioleta, evita la pérdida de color y rancidez de productos dando como resultado una vida de anaquel más larga (Burt, 2004). Bojorges *et al.* (2020) desarrollaron una película biodegradable a base de alginato de sodio con cúrcuma (*Curcuma longa*), compuesto activo y antioxidante en carne, se evidenció un aumento en la vida útil de 12, 16, 12 días en

almacenamiento refrigerado en carne de cerdo, lomo de res y pechuga de pollo, respectivamente.

López-Mata *et al.* (2011) demostraron la actividad antimicrobiana y antioxidante *in vitro* de películas a base de quitosano incorporadas de aceites esenciales de canela y orégano a diferentes concentraciones (0.5, 1.0 y 1.5 % p/v) contra *Salmonella Choleraesuis*, *Staphylococcus aureus* y *Escherichia Coli*, mostrando que son capaces de capturar más del 50% de DPPH (1,1-difenil-2 picrilhidrazilo), aumentando conforme se incrementaron las concentraciones de aceites esenciales.

Dong *et al.* (2022) caracterizaron y evaluaron la capacidad antioxidante de películas de quitosano adicionadas con nanopartículas de sílice de varios tamaños con proporciones diferentes a la solución de quitosano (2, 4, 8 mg/mL), obteniendo mejores resultados en las películas con nanopartículas de menor diámetro debido a que son más fácil de dispersar en las macromoléculas, siendo un efecto benéfico en las propiedades de barrera a la luz UV, mecánicas, y actividad antioxidante.

Sun *et al.* (2021) elaboraron películas de alginato de sodio con nanopartículas de plata utilizando cáscara de kiwi como agente reductor, evidenciando que es útil para el almacenamiento de cerezas frescas debido a que mejoraron las propiedades antioxidantes y la actividad antimicrobiana contra *Staphylococcus aureus* y *Escherichia Coli*.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Agunloye, E., L. Panariello, A. Gavriilidis and L. Mazzei. 2018. A model for the formation of gold nanoparticles in the citrate synthesis method. *Chemical Engineering Science* 191: 318-331.
- Aguilar-Tapia, A. y R. Zanella. 2017. Las nanopartículas bimetálicas y algunas de sus aplicaciones. *Mundo Nano. Revista Interdisciplinaria En Nanociencias Y Nanotecnología*. 10(19): 72-92.

- Ahmaf, A. A. and N. M. Sarbon. 2021. A comparative study: Physical, mechanical and antibacterial properties of bio-composite gelatin films as influenced by chitosan and zinc oxide nanoparticles incorporation. *Food Bioscience*. 43: 101250.
- Alboofetileh, M., M. Rezaei, H. Hosseini and M. Abdollahi. 2015. Efficacy of activated alginate-based nanocomposite film to control *Listeria monocytogenes* and spoilage flora in rainbow trout slice. *Journal of Food Science and Technology*. 1-6.
- Albrecht, M. A., C. W. Evans and C. L. Raston. 2006. Green chemistry and the health implications of nanoparticles. *Green Chemistry*. 8(5):417-432.
- Al-Qadi, S. and C. Remuñán-López. 2009. Nanopartículas metálicas: oro. *In Real Academia Nacional de Farmacia. Nanotecnología Farmaceutica (Ed.) Madrid (233-248 pp.)*
- Anal, A. and H. Singh. 2007. Recent advances in microencapsulation of probiotics for industrial applications and targeted delivery. *Food Science & Technology*. 18: 240-251.
- Antonio, M., J. Nogueira, R. Vitorino and A. L. Daniel-da-Silva. 2018. Functionalized Nanoparticles for the Detection of C-Reactive Protein. *Nanomaterials*. 8(4): 200.
- Auffan, M., R. Jérôme, B. Jean-Yves, G.V. Lowry, J. Jean-Pierre and M. R. Wiesner. 2009. Towards a definition of inorganic nanoparticles from an environmental, health and safety perspective. *Nature Nanotechnology*. 4:634-641.
- Avendaño-Romero, G. C., A. López y E. Palou. 2013. Propiedades del alginato y aplicaciones en alimentos. *Temas Selectos de Ingeniería de Alimentos*. 7(1): 87-9.
- Ávila-Sosa, R., E. Palou, M. T. J. Munguía., G. V. Nevárez-Moorillón, A. R. N Cruz, and A. López-Malo. 2012. Antifungal activity by vapor contact of essential oils added to amaranth, chitosan, or starch edible films. *International Journal of Food Microbiology*. 153(1-2): 66-72.
- Baddi, M. H., A. Guille, F. R. Lozano y J. L. Abreu. 2017. Componente social del desarrollo sustentable. *International Journal of Good Conscience*. 12 (1): 135-152.
- Balaguer, M. P., C. Aliaga, C. Fito and M. Hortal. 2016. Compostability assessment of nano-reinforced poly (lactic acid) films. *Waste Management*. 48: 143-155.
- Balasubramanian, S., S. M. Jelastin and T. Lurthu. 2020. Biogenic synthesis of gold nanoparticles using *Jasminum auriculatum* leaf extract and their catalytic, antimicrobial and anticancer activities. *Journal of Drug Delivery Science and Technology*. 57: 101620.
- Baptista, A., F. Silva, J. Porteiro, J. Míguez and G. Pinto. 2018. Sputtering physical vapour deposition (PVD) coatings: A critical review on process improvement and market trend demands. *Coatings*. 8(402): 1-22.

- Binning, G. K., C. F. Quate and C. Gerber. 1986. Atomic force microscopy. *Physical review letters*. 56: 726-735.
- Bojorges, H., M. A. Ríos-Corripio, A. S. Hernández-Cázares, J. V. Hidalgo-Contreras and A. Contreras-Oliva. 2020. Effect of the application of an edible film with turmeric (*Curcuma longa* L.) on the oxidative stability of meat. *Food Science & Nutrition*. 8(8): 4308–4319.
- Bonilla, J. and P. J. A. Sobral. 2020. Disintegrability under composting conditions of films based on gelatin, chitosan and/or sodium caseinate containing boldo-of-Chile leaves extract. *International Journal of Biological Macromolecules*. 151 (15): 178-185.
- Bonilla-Nepomuceno G, F. C. Gómez-Merino, L. S. Arcila-Lozano, M. Rojas-López, M. A. Ríos-Corripio, M. A. Méndez-Rojas and A. S. Hernández-Cazares. 2021. Analysis by response surface methodology of gold nanoparticles obtained by green chemical reduction using aqueous coffee pulp extract (*Coffea arabica*). *Canadian Journal of Chemistry*. 99(6): 519-530.
- Bogireddy, N. K. R., L.M. Gomez, I. Osorio-Roman and V. Agarwal. 2017. Synthesis of gold nanoparticles using *Coffea Arabica* fruit extract. *Advances in Nano Research*. 5: 253–60.
- Bruna, J. E., M. Castillo, R. Ocampo, F. Rodríguez, A. Guarda y Ma. J. Galotto. 2014. Eco-compositos basados en un desecho agroindustrial y poliácido láctico con actividad antimicrobiana y antioxidante para potencial uso en envases de alimentos. *In: Actas del Congreso Iberoamericano de Ingeniería de Alimentos* (413-420 pp.).
- Brundtland, G. 1987. El desarrollo sostenible. Informe de la Comisión Mundial sobre el Medio Ambiente y Desarrollo. Asamblea General de las Naciones Unidas. <https://desarrollosostenible.wordpress.com/2006/09/27/informe-brundtland>.
- Brusch, B. G. and A. M. A Záchia. 2011. Effect of microencapsulation on survival of *Lactobacillus plantarum* in simulated gastrointestinal conditions, refrigeration, and yogurt. *Journal of Food Engineering*. 103: 123-128.
- Brust, M., M. Walker, D. Bethell, D. J. Schiffrin, and R. Whyman. 1994. Synthesis of thiol-derivatised gold nanoparticles in a two-phase Liquid–Liquid system. *Journal of Chemical Society. Chemical Communications*. 7: 801–802.
- Burt, S. 2004. Essential oils: their antibacterial properties and potential applications in food: A review. *International Journal of Food Microbiology*. 22: 223-253
- Cagri, A., Z. Ustunol and E. T. Ryser. 2004. Antimicrobial edible films and coatings. *Journal of Food Protection*. 67(4): 833-848.

- Camacho, M. E., J. Vega y A. Campos. 2011. Uso de nanomateriales en polímeros para la obtención de bioempaques en aplicaciones alimentarias. *Revista de la Sociedad Química del Perú*. 77 (4): 292-306.
- Cao, G. 2004. *Nanostructures & nanomaterials, Synthesis, Properties & Applications*. Imperial College Press. London (70 p.).
- Cardenas, G., J. Díaz, M. F. Meléndez, C. Cruzat and A. Garcia-Cancino. 2009. Colloidal Cu nanoparticles/chitosan composite film obtained by microwave heating for food package applications. *Polymer Bulletin*. 62: 511-524.
- Carmona, G., J. A., F. Cordobés, A.F. Guerrero-Conejo, I. Martínez, y P. Partal. 2007. Influencia del pH y de la fuerza iónica sobre la gelificación térmica de proteínas de la yema de huevo. *Grasas y aceites*, 58(3): 289-296.
- Chaudhuri, R. G. and S. Paria. 2012. Core/Shell Nanoparticles: Classes, Properties, Synthesis Mechanisms, Characterization, and Applications. *Chemical Reviews*. 122: 237-2433.
- Cano, A., M. Cháfer, A. Chiralt and C. González-Martínez. 2016. Physical and antimicrobial properties of starch-PVA blend films as affected by the incorporation of natural antimicrobial agents. *Foods*. 5 (3): 1-17.
- Chávez, C. M. y C. G. Binnqüist. 2018. La CFE: Un análisis de la integración de la sustentabilidad en la empresa. *Administración y Organizaciones*. 14(27): 47-71.
- Cheng, H.W., Z. R. Skeete, E. R. Crew, S. Shan, J. Luo and C. J. Zhong. 2014. Synthesis of gold nanoparticles. In. Valcárcel M., López-Lorente I (Ed) *Comprehensive Analytical Chemistry*. 1st ed. Elsevier, Poland. pp 37-79.
- Chudobova, D., K. Cihalova, P. Kopel, L. Melichar, B. Ruttkay-Nedecky, M. Vaculovicova, V. Adam, and R. Kizek. 2015. Complexes of metal-based nanoparticles with chitosan suppressing the risk of *Staphylococcus aureus* and *Escherichia coli* infections. In: *Nanotechnology in diagnosis, treatment and prophylaxis of infectious diseases*. (pp: 217-232). ISBN: 9780128013175
- Contreras-Trigo, B., V. Díaz-García, E. Guzmán-Gutiérrez, I. Sanhueza, P. Coelho, S. E. Godoy, S. Torres, and P. Oyarzún. 2018. Slight pH fluctuations in the gold nanoparticle synthesis process influence the performance of the citrate reduction method. *Sensors*. 18 (7): 2246.
- Costa, M. J., A. M. Marques, L. M. Pastrana, J. A. Teixeira, S. M. Sillankorva and M. A. Cerqueira. 2018. Physicochemical properties of alginate-based films: Effect of ionic crosslinking and mannuronic and guluronic acid ratio. *Food Hydrocolloids*. 81:442-448.

- Daly, H.E. 1991. Elements of environmental macroeconomics. In: Costanza, R. (Ed.), Ecological Economics: the Science and Management of Sustainability. Columbia University Press, New York. (i.e., 525 p.).
- Del-Valle, V., P. Hernández-Muñoz, A. Guarda and M.J. Galotto. 2005. Development of a cactus-mucilage edible coating (*Opuntia ficus indica*) and its application to extend strawberry (*Fragaria ananassa*) shelf-life. Food Chemistry. 91: 751-756.
- Dhall, R. K. 2013. Advances in edible coatings for fresh fruits and vegetables: A review. Food Science and Nutrition. 53(5): 435-450.
- Dhanapal, A., P. Sasikala, L. Rajamani, V. Kavitha, G. Yazhinim and M.S. Banu. 2012. Edible films from polysaccharides. Food Science and Quality Management. 3:9-17.
- Domínguez-Domínguez, S., J. Arias-Pardilla, Á. Bereguer-Murcia, E. Morallón and D. Cazorla-Amorós. 2007. Electrochemical deposition of platinum nanoparticles on different carbon support and conducting polymers. Journal of Applied Electrochemistry. 38: 259-268.
- Dong, W., J. Su, Y. Chen, D. Xu, L. Cheng, L. Mao, Y. Gao and F. Yuan. 2022. Characterization and antioxidant properties of chitosan film incorporated with modified silica nanoparticles as an active food packaging. Food Chemistry. 372 (A): 131414.
- Erro, J. 2011. La seguridad y la salud en la exposición a nanopartículas. Instituto Riojano de Salud Laboral (Ed). España. 50p.
- Escobar, D., A. Sala, C. Silvera, R. Harispe y R. Márquez. 2009. Películas biodegradables y comestibles desarrolladas en base a aislado de proteínas de suero lácteo: estudio de dos métodos de elaboración y del uso de sorbato de potasio como conservador. Revista del Laboratorio Tecnológico del Uruguay. 4: 33-36.
- Espino-Díaz, M., J. de J. Ornelas-Paz, M. A. Martínez-Tellez, C. Santillán, G. V. Barbosa-Cánovas, P. B. Zamudio-Flores and G. I. Olivas. 2010. Development and Characterization of Edible Films Based on Mucilage of *Opuntia ficus-indica* (L.). J. Food Sci. 75 (6): E347-E352.
- Falguera, V., J. P. Quintero, A. Jiménez, J. A. Muñoz and A. Ibarz. 2011. Edible films and coatings: structures, active functions and trends in their use. Trends in Food Science & Technology. 22(6): 292-303.
- FAO, 2011 Una introducción a los conceptos básicos de la seguridad alimentaria. <https://www.fao.org/3/al936s/al936s00.pdf>

- FAO, FIDA, OMS, PMA y UNICEF. 2021. El estado de la seguridad alimentaria y la nutrición en el mundo 2021. Transformación de los sistemas alimentarios para que promuevan dietas asequibles y saludables. Roma, FAO.
- Fazilah, A., M. Maizura, A. Abd, K. Bhupinder, B. Rajeev, U. Uthumporn, and S.H. Chew. 2011. Physical and mechanical properties of sago starch – alginate films incorporated with calcium chloride. *International Food Research Journal*. 18(3):1027-1033.
- Freestone I., N. Meeks, M. Sax, and C. Higgitt. 2007. The Lycurgus Cup - A Roman Nanotechnology. *Gold Bulletin*. 40: 270-277.
- Grant, G.T., E.R. Morris., D.A. Rees, P.J.C. Smith, and D. Thom. 1973. Biological interactions between polysaccharides and divalent cations: the egg-box model. *FEBS Letters*. 32: 195-198.
- Gómez-Estaca, J., C. López-de-Dicastillo, P. Hernández-Muñoz, R. Catála and R. Gavara. 2015. Advances in antioxidant active food packaging. *Trends in Food Science & Technology*. 35(1): 42-51.
- Gómez-Garzón, M. 2018. Nanomateriales, nanopartículas y síntesis verde. *Repertorio de Medicina y Cirugía*. 27(2): 75-80.
- Gorbacheva, M. 2021. Molecule C<sub>3</sub>H<sub>8</sub>O<sub>3</sub> Glycerol. <https://www.stocklib.es/media-73466036/molecule-c3h8o3-glycerol.html?keyword=glycerine>.
- Guisbiers, G., S. Mejía-Rosales and F. L. Deepack. 2012. Nanomaterials properties: Size and shape dependencies. *Journal of Nanomaterials*. 180976:2
- Hanning, A., A. Priem-Abelsson, U. Lundqvist, and M. Svanström. 2012. Are we educating engineers for sustainability? Comparison between obtained competences and Swedish industry's needs. *International Journal of Sustainability in Higher*. 13: 305-320.
- Herizchi, R., E. Abbasi, M. Milani, and A. Akbarzadeh. 2016. Current methods for synthesis of gold nanoparticles. *Artificial Cells, Nanomedicine, and Biotechnology*. 44(2): 596-602.
- Hermanson, G. T. 2008. Bioconjugate techniques. Academic Press Inc, San Diego. 2<sup>nd</sup> (Ed). (1323 p.).
- Huang, L. Z., S. C. Kien, I. Ismail, K. T. Song and J. Y. C. Liew. 2017. Structural transformation of mechanically induced top-down approach BaFe<sub>12</sub>O<sub>19</sub> nanoparticles synthesized from high crystallinity bulk materials. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*. 429:192-202.
- Huang, C. J., P. H. Chiu, Y. H. Wang, K. L. Chen, J. J. Linn, and C. F. Yang. 2006. Electrochemically controlling the size of gold nanoparticles. *Journal of The Electrochemical Society*. 153: D193-D198.

- Iijima, S. and A. Sandhu. 2007. A career in carbon. *Nature Nanotechnology*. 2 (10): 590-591.
- ISO 14855. 2012. Determination of the ultimate aerobic biodegradability of plastic materials under controlled composting conditions. <https://www.iso.org/standard/57902.html>.
- Jaworek, A. T. S. A. and A. T Sobczyk. 2008. Electrospraying route to nanotechnology: an overview. *Journal of electrostatics*. 66(34): 197-219.
- Jeevanandam, J., A. Barhoum, Y. S. Chan, A. Dufresne and M.K. Danquah. 2018. Review on nanoparticles and nanostructured materials: history, sources, toxicity and regulations. *Beilstein Journal of Nanotechnology*. 3 (9): 1050-1074.
- Jeyasubramanian, K., U. U. G. Thoppey, G. S. Hikku, N. Selvakumar, A. Subramania, and K. Krishnamoorthy. 2016. Enhancement in growth rate and productivity of spinach grown in hydroponics with iron oxide nanoparticles. *RSC Advances*. 6: 15451-15459.
- Johnston, R. L. 2012. Metal nanoparticles and nanoalloys. *In: Frontiers of nanoscience*. R. L. Johnston, J.P. Wilcoxon (Eds.). (pp: 1-41). ISBN 9780080963570.
- Jooyandeh, H. 2011. Whey protein films and coatings: A review. *Pakistan Journal of Nutrition*. 10(3): 296-301.
- Katouzi, S., A. Majd, F. Fallahian, and F. Bernard. 2011. Encapsulation of shoot tips in alginate beads containing salicylic acid for cold preservation and plant regeneration in sunflower (*Helianthus annuus L.*). *Australian Journal of Crop Science*. 5.
- Kester, J. J. and O. R. Fennema. 1986. Edible Films and Coatings. A Review. *Food Technology*. 40: 47-59.
- Kharissova, O. V., H. V. Rasika, B. I. Kharisov, B. Olvera, and V. M. Jiménez. 2013. The greener synthesis of nanoparticles. *Trend in Biotechnology*. 31: 240-248.
- Krochta, J. M. and C. De Mulder-Johnston. 1997. Edible and biodegradable polymer films: Challenges and opportunities. *Food Technology* 51 (2): 61-74.
- Lee, K. Y. and D. J. Mooney. 2012. Alginate: Properties and biomedical applications progress. *Polymer Science*. 37(1): 106-126.
- Le Van, N., C. Ma, J. Shang, Y. Rui, S. Liu and B. Xing. 2016. Effects of CuO nanoparticles on insecticidal activity and phytotoxicity in conventional and transgenic cotton. *Chemosphere*. 144: 661-670.
- Li, Q., S. Mahendra, D. Y. Lyon, L. Brunet, M. V. Liga, D. Li and P. J. J. Alvarez. 2008. Antimicrobial nanomaterials for water disinfection and microbial control: Potential applications and implications. *Water Resources*. 42(18): 591-602.
- Li, H., Z. Yin, Q. He, H. Li, X. Huang, G. Lu, and H. Zhang. 2011. Fabrication of single- and multilayer MoS<sub>2</sub> film-based field-effect transistors for sensing NO at room temperature. *Small*. 8: 63-67.

- Liling, G., Z. Di, X. Jiachao, G. Xin, F. Xiaoting and Z. Qing. 2016. Effects of ionic crosslinking on physical and mechanical properties of alginate mulching films. *Carbohydrate Polymers*. 136(20): 259-265.
- Lin, D. y Y. Zhao. 2007. Innovations in the development and application of edible coatings for fresh and minimally processed fruits and vegetables. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*. 6(3): 60-75.
- Liu, F., S. Zheng, A. Chaturvedi, V. Zólyomi, J. Zhou, Q. Fu, and Z. Liu. 2016. Optoelectronic properties of atomically thin ReSSe with weak interlayer coupling. *Nanoscale*. 8: 5826–5834.
- López-Mata, M. A., S. Ruíz-Cruz, N. P. Silva-Beltrán, L. E. Gassos-Ortega y J. J Ornelas-Paz. 2011. Aprovechamiento del residuo de camarón para la elaboración de recubrimientos comestibles con propiedades antioxidantes y antimicrobianas. *Ide@s CONCYTEG*. 6 (71): 552-560.
- López-Lorente, Á. I., and M. Valcárcel. 2014. Analytical nanoscience and nanotechnology. *In: Comprehensive Analytical Chemistry*, ( pp: 3-35). ISBN: 9780444632852.
- López-Rubio A., M. J. Fabra, and M. Martínez-Sanz. 2019. Food packaging based on nanomaterials. *Nanomaterials*. 9: 1224.
- Luo, P. G., and F. J. Stutzenberger. 2008. Nanotechnology in the detection and control of microorganisms. *Advances in Applied Microbiology*. 63:145-181
- Ma, X. M., M. Sun, Y. Lin, Y. J. Liu, F. Luo, L. H. Guo, and G. N. Chen. 2018. Progress of visual biosensor based on gold nanoparticles. *Chinese Journal of Analytical Chemistry*. 46:1-10.
- Magerramov, A. M, M. A. Ramazanov, S. G. Nuriyeva, F. V. Hajiyeva and U.A. Hassanova. 2015. Structure and photoluminescence properties of polymer nanocomposites on the basis of polypropylene PP + Ag<sub>2</sub>S. *J. Optoelectron. Biomed*. 7(2): 39-45.
- Makarov, V. V., A. J. Amor, O. V. Sinitsyna, I. V. Yamanisky, Y. O. Taliansky and N. O. Kalinina. 2014. “Green” Nanotechnologies: Synthesis of Metal Nanoparticles Using Plants. *Acta Naturae*. 6(1): 35-44.
- Martín, N. 2011. Sobre fullerenos, nanotubos de carbono y grafenos. *ARBOR Ciencia, Pensamiento y cultura*. CL XXXVII: 115-131.
- McHugh, T. H. and J. Krochta. 1994. Sorbitol-vs glycerol-plasticized whey protein edible films: Integrated oxygen permeability and tensile property evaluation. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*. 42:841-845.
- McHugh, T. H. 2000. Protein-lipid interactions in edible films and coatings. *Nahrung-Food*. 44 (3): 148-151.

- Méndez-Reyes, D. A., J. P. Quintero-Cerón, H. A. Váquiro-Herrera y J. F. Solanilla-Duque. 2015. Alginato de sodio en el desarrollo de películas comestibles. *Revista Venezolana de Ciencia y Tecnología de Alimentos*. 5 (2): 89-113.
- Milani, J. and G. Maleki. 2012. Hydrocolloids in food industry. *In: B. Valdez (Ed.)*. Food industrial processes- methods and equipment. (pp. 17-39).
- Molins, R. 2008. Oportunidades y amenazas de la nanotecnología para la salud, los alimentos, la agricultura y el ambiente. *Perspectivas*. 4: 38-54.
- Monroy-Villagrana, A., C. Cano-Sarmiento, L. Alamilla-Beltrán, H. Hernández-Sánchez, and G. F. Gutiérrez-López. 2014. Coupled taguchi-rsm optimization of the conditions to emulsify  $\alpha$ -tocopherol in an Arabic gum-maltodextrin matrix by microfluidization. *Revista Mexicana de Ingeniería Química*. 13(3): 679-688.
- Nieto, M. 2016. Edible film and packaging using gum polysaccharides. *In: M. A. Cerqueira, R. N. Pereira, O. L. Ramos, J. A. Teixeira, A. A. Vicente (Eds.)* Edible food packaging, (pp. 9-79).
- Nunes, D., A. Pimentel, L. Santos, P. Barquinha, L. Pereira, E. Fortunato, and R. Martins. 2019. Introduction. *In: Metal Oxide Nanostructures*. (pp: 1-19).
- OCDE. 2005. Manual de Oslo. Tercera edición. Eurostat. Madrid (Ed.). 194 p.
- ONU. 2015. La agenda para el desarrollo sostenible. <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/development-agenda/>
- ONU. 2017. ¿Qué es el desarrollo sostenible y por qué es importante? <http://www.onu.org.mx/que-es-el-desarrollo-sostenible-y-por-que-es-importante/> accessed 5.4.20).
- Oliveira, de N. G. C., L. F. Rodrigues, M. P. Castro, B. F. Giannetti and C. M. Villas. 2018. A framework of actions for strong sustainability. *Journal of Cleaner Production*. 196: 1629-1643.
- Ortega, F., L. Giannuzzi, V. B. Arce and M. A. García. 2017. Active composite starch films containing green synthesized silver nanoparticles. *Food Hydrocolloids*. 70: 152-162.
- Pagno, C. H., T. M. H. Costa, E. W. de Menezes, E. V. Benvenuti, P. F. Hertz. C. R. Mate., J. V. Tosati, A. R. Monteiro, A. O. Ríos and S. H. Flores. 2015. Development of active biofilms of quinoa (*Chenopodium quinoa W.*) starch containing gold nanoparticles and evaluation of antimicrobial activity. *Food Chemistry*. 173: 755-762.
- Pastor, C., M. Vargas y C. González-Martínez. 2005. Recubrimientos comestibles: Aplicación a frutas y hortalizas. *Alimentación, Equipos y Tecnología*. 197(24): 130-135.

- Pérez-Gago, M. and J. Krochta. 2002. Drying temperature effect on water vapour permeability and mechanical properties of whey protein-lipid emulsion films. *Journal Agricultural and Food Chemistry*. 49: 2308-2312.
- Pottathara, Y. B., Y. Grohens, V. Kokol, N. Kalarikkal, and S. Thomas. 2019. Synthesis and processing of emerging two-dimensional nanomaterials. *In: Nanomaterials synthesis*. (pp: 1–25).
- Puligundla P., J. Jung. and S. Ko. 2012. Carbon dioxide sensors for intelligent food packaging applications. *Food Control*. 25 (1): 328-333.
- Quezada-Gallo, J. A. 2009. Delivery of food additives and antimicrobials using edible films and coating. New York, EUA: (Ed) Spring. (315-333 pp.).
- Quintili, M. 2012. Nanociencia y Nanotecnología... un mundo pequeño. *Centro de Estudios en Diseño y Comunicación*. 42: 125-155.
- Quintero, C. J., P. V. Falguera y J. Muñoz, H. 2010. Películas y recubrimientos comestibles: importancia y tendencias recientes en la cadena hortofrutícola. *Revista Tumbaga*. 5: 93-118.
- Raiford, J. A., S. T. Oyakhire, and S. Bent. 2020. Applications of atomic layer deposition and chemical vapor deposition for perovskite solar cells. *Energy & Environmental Science*. 1: 1-50.
- Reza, G. H. 2014. A Review of Methods for Synthesis of Al Nanoparticles. *Oriental Journal of Chemistry*. 30(4):1941–1949.
- Reetz, M. T., W. Helbig, and S. A. Quaiser. 1995. Electrochemical preparation of nanostructured bimetallic clusters. *Chemistry of Materials*. 7: 2227-2228.
- Ríos-Corripio, M. A., L. S. Arcila-Lozano, B. E. Garcia-Perez, M. E. Jaramillo-Flores, A. D. Hernández-Pérez, A. Carlos-Martínez, M. Rosales-Pérez and M. Rojas-López. 2016. Fluorescent gold nanoparticle-based bioconjugate for the detection of *Salmonella*. *Analytical Letters*. 49: 1862-1873.
- Rius, S. G., M. F. Pérez and R. J. Bausells. 2008. Electron beam lithography for nanofabrication. *Barcelona (i.e., 127p.)*.
- Rojas-Aguirre, Y., K. Aguado-Castrejón y I. González-Méndez. 2016. La nanomedicina y los sistemas de liberación de fármacos: ¿La revolución de la terapia contra el cáncer?. *Educación Química*. 27: 286-291.
- Rozalen, M., M. Sanchez-Polo, M. Fernández-Perales, T. J. Widmann, and J. Rivera-Utrilla. 2020. Synthesis of controlled-size silver nanoparticles for the administration of methotrexate drug and its activity in colon and lung cancer cells. *RSC Advances*. 10:10646.

- Sasidharan, S., S. Raj, S. Sonawane, S. Sonawane, D. Pinjari, A. B. Pandit, and P. Saudagar. 2019. Nanomaterial synthesis: chemical and biological route and applications. *In: Nanomaterials synthesis.* (pp: 27–51). ISBN: 9780128157510.
- Schumpeter, J. 1939. *Business Cycles: A Theoretical, Historical and Statistical Analysis of the Capitalist Process.* New York. McGraw-Hill. 385 p.
- Shi, D., Z. Guo, and N. Bedford. 2015. Characterization and Analysis of Nanomaterials. *In: Nanomaterials and Devices.* (ed.) Shi, D. Z. Guo and N. Bedford. pp: 25-47.
- Sogut, E. and A. C. Seydim. 2018. The effects of chitosan and grape seed extract-based edible films on the quality of vacuum packaged chicken breast fillets. *Food Packaging and Shelf Life.* 18: 13-20.
- Sohail, A. 2011. Survivability of probiotics encapsulated in alginate gel microbeads using a novel impinging aerosols method. *International Journal of Food Microbiology.* 145: 162-168.
- Solano-Doblado, L. G., L. Alamilla-Beltrán y C. Jiménez-Martínez. 2018. Películas y recubrimientos comestibles funcionalizados. *TIP Revista Especializada en Ciencias Químico-Biológicas.* 21(2): 30-42.
- Soler, I, G. 2010. *Nanotecnología: El desafío del siglo XXI.* Buenos Aires, Argentina, EUDEBA (Ed.) (272 p.).
- Sothornvit, R. and J. M. Krochta. 2001. Plasticizer effect on mechanical properties of  $\beta$ -lactoglobulin films. *Journal of Food Engineering.* 50:149-155.
- Stabile, J., D. Najafali, Y. Cheema, C.T. Inglut, B. J. Liang, S. Vaja, A. J. Sorrin and H. C. Huang. 2020. Engineering gold nanoparticles for photothermal therapy, surgery, and imaging. *In: Nanoparticles for Biomedical Applications.* (pp:175-193).
- Sun, X., H. Zhang, J. Wang, M. Dong, P.Jia, T. Bu, Q. Wang. Sodium alginate-based nanocomposite films with strong antioxidant and antibacterial properties enhanced by polyphenol-rich kiwi peel extracts bio-reduced silver nanoparticles. *Food Packaging and Shelf Life.* 29: 100741.
- The Royal Society & The Royal Academy of Engineering. *Nanoscience and nanotechnologies: opportunities and uncertainties.* 2004. <http://www.nanotec.org.uk/report/Nano%20report%202004%20fin.pdf>
- Trotta, F. and A. Mele. 2019. Nanomaterials: Classification and properties. *In: Nanosponges: Synthesis and Applications.* (pp:1-26).
- Tyagi, S., D. Rawtani, N. Khatri and M. Tharmawaram. 2018. Strategies for nitrate removal from aqueous environment using nanotechnology: A Review. *Journal of Water Process Engineering.* 21: 84-95

- Valencia-Chamorro, S. A., L. Palou, M.A. Del Río and M. B. Pérez-Gago. 2011. Antimicrobial edible films and coatings for fresh and minimally processed fruits and vegetables: a review. *Food Science and Nutrition*. 51(9): 872-900.
- Varghese, J. R., E. Sakho, E. M. Sakho, S. Parani, S. Thomas, O. S. Oluwafemi, and J. Wu. 2019. Introduction to nanomaterials: synthesis and applications. *In: Nanomaterials for Solar Cell Applications*. (pp: 75-95).
- Veiga-Álvarez, Á., D. Sánchez-de-Alcázar, M. Martínez-Negro, A. Bardu, J. B. González-Díaz and J. Maquea-Blasco. 2015. Riesgos para la salud y recomendaciones en el manejo de nanopartículas en entornos laborales. *Medicina y seguridad del trabajo*. 61(239): 143-161.
- Vo-Dinh, T. 2002. Nanobiosensors: Probing the sanctuary of individual living cells. *Journal of Cellular Biochemistry Supplement*. 39: 154-161.
- Yang, M., X. Zhang, S. Guan, Y. Dou, X. Gao and L. Miao. 2021. Green preparation of lignin nanoparticles in an aqueous hydrotropic solution and application in biobased nanocomposite films. *Holzforschung*. 75(5): 463-473.

## CAPÍTULO I

# EFFECTO DE LA ADICIÓN DE NANOPARTÍCULAS DE ORO SOBRE LAS PROPIEDADES MECÁNICAS Y DE BARRERA EN PELÍCULAS DE ALGINATO DE SODIO

María Antonieta Ríos Corripio<sup>1\*</sup>, Nuria Yolanda Vargas Galina<sup>2</sup>, Aleida Selene Hernández Cázares<sup>2</sup>, Marlon Rojas López<sup>3</sup>

<sup>1</sup>CONACYT- Colegio de Postgraduados Campus Córdoba. Carretera Federal Córdoba-Veracruz Km 348, Manuel León, Amatlán de los Reyes, Veracruz, México. C. P. 894953

<sup>2</sup>Colegio de Postgraduados Campus Córdoba. Carretera Federal Córdoba-Veracruz Km 348, Manuel León, Amatlán de los Reyes, Veracruz, México. C. P. 94953

<sup>3</sup>Centro de Investigación en Biotecnología Aplicada. Ex-Hacienda San Juan Molino Carretera Estatal Tecuexcomac-Tepetitla km 1.5 Tlaxcala C.P. 90700, México

E-mail: ríos.antonietta@colpos.mx

ENVIADO AL LIBRO: TRABAJOS CIENTÍFICOS EN MÉXICO



## CAPÍTULO I

### EFFECTO DE LA ADICIÓN DE NANOPARTÍCULAS DE ORO SOBRE LAS PROPIEDADES MECÁNICAS Y DE BARRERA EN PELÍCULAS DE ALGINATO DE SODIO

#### RESUMEN

Las películas biodegradables se definen como una capa delgada de biopolímero. En los últimos años ha surgido un gran interés por ellas, debido a la iniciativa de eliminar materiales plásticos derivados del petróleo. Uno de los biopolímeros más convenientes para elaborar películas biodegradables es el alginato, ya que es biodegradable y de una fuente renovable. Además, el uso de estas películas puede cumplir funciones de barreras selectivas para la transferencia de gases y humedad en matrices alimentarias y pueden servir como vehículo para una cantidad amplia de compuestos bioactivos. A pesar de estas funciones se busca mejorar las propiedades mecánicas y de barrera, algunos estudios han indicado que estas propiedades se pueden mejorar con la adición de nanomateriales. En específico, las nanopartículas de oro (AuNPs) se usan para reforzar las películas de polímeros debido a su gran área interfacial; la cual cambia la movilidad molecular, el comportamiento de relajación y consecuentemente las propiedades térmicas, mecánicas y de barrera del material. El objetivo de este estudio fue evaluar el efecto de la adición de nanopartículas de oro sobre las propiedades mecánicas (fuerza tensil y fuerza a la ruptura) y de barrera (transferencia al vapor de agua) en películas de alginato de sodio. Las nanopartículas de oro se sintetizaron por el método de reducción química y las películas se prepararon con alginato (1% p/v) a diferentes concentraciones de nanopartículas (1%, 5% y 10%) por el método de casting. Las propiedades mecánicas se analizaron siguiendo el método ASTM. (2010a). D882-97 usando un analizador de textura (Shimadzu EZ-S 500N, Japón). La transferencia al vapor de agua (TVA) se determinó mediante el método ASTM. (2010b). E96M-16. La Espectroscopia Infrarroja FTIR se utilizó para la evaluación de la estructura química de la película con y sin

AuNPs. Los datos obtenidos se analizaron mediante un análisis de varianza ( $p < 0.05$ ) de un solo factor. Los resultados evidenciaron que a medida que aumento la concentración de AuNPs se mejoraban las propiedades mecánicas y de barrera. El análisis FTIR sugiere una interacción entre los componentes de la película conforme se aumenta la concentración de las AuNPs, se observan cambios estructurales, lo cual puede contribuir a controlar las propiedades mecánicas y de barrera de este tipo de películas nanocompuestas. Se concluye que la concentración de AuNPs tiene un efecto importante en las propiedades mecánicas y de barrera de las películas por lo que este tipo de películas podrían usarse como alternativa a los plásticos convencionales.

## 1.1 INTRODUCCIÓN

El envase juega un papel importante en la conservación, distribución y comercialización de los productos alimenticios. Algunas de sus funciones son proteger el producto de daños mecánicos, actividades físicas, químicas y microbiológicas. Una película biodegradable es una capa delgada de biopolímero preformada, hecha de material comestible y empleada en la superficie de un alimento (McHugh, 2000). Algunos estudios han reconocido la importancia de evaluar la matriz preformada con el fin de cuantificar diversos parámetros como propiedades mecánicas, físicas, químicas, ópticas y antimicrobianas, ya que esta envoltura tiene la capacidad de disminuir la interacción entre el alimento y el medio que le rodea creando una atmósfera modificada (MA), lo que representa una reducción en la pérdida o ganancia de humedad o aromas, oxidaciones, contaminaciones microbianas y restringiendo la transferencia de gases ( $O_2$ ,  $CO_2$ ) (Miller y Krochta, 1997). Una película comestible se obtiene a partir de materiales naturales de fuentes renovables a base de polisacáridos (alginato, pectina, almidones, celulosa, lactosa, sacarosa) y / o proteínas (suero, caseína, colágeno o proteína hidrolizada). Los alginatos son la principal macromolécula extraída de las algas pardas, éstos son obtenidos de las sales sódicas, cálcicas y potásicas del ácido algínico. Presenta uniones con ácido poliurónico conteniendo bloques de ácido poli- $\beta$ -Dmanopiranosilurónico y/o bloques ácido poli- $\alpha$ -L-gulosa piranosilurónico (Cagri *et al.*, 2004), cuentan con una importancia especial para diferentes industrias (alimentaria, textil, farmacéutica, cosmética, entre otras), atribuida a su capacidad para formar geles fuertes en

presencia de cationes calcio ( $\text{Ca}^{+2}$ ). El alginato de sodio es la forma más comercializada de alginato y sus aplicaciones en la industria alimentaria hoy en día están generando avances en el desarrollo de nuevos e innovadores biomateriales. En la obtención de películas juega un papel importante como biopolímero ya que es fácil de manejar, económico y nos permite obtener películas transparentes, biodegradables y con buenas propiedades de barrera. Estas películas sirven como vehículo para la incorporación de diferentes ingredientes con actividad funcional como antimicrobianos, antioxidantes, vitaminas, prebióticos y probióticos con el objetivo de mejorar propiedades específicas como cambiar las condiciones del alimento, extender la vida de anaquel, mejorar la seguridad microbiológica o las propiedades sensoriales, además de monitorear y ofrecer información acerca de la calidad durante el transporte y el almacenamiento (Puligundla *et al.*, 2012), que las convierten en películas activas. La evaluación de las propiedades mecánicas es importante porque envases frágiles son inapropiados para el correcto almacenamiento de alimentos. La literatura menciona que la adición de nanopartículas de oro obtenidas por reducción química a estas películas aumenta la fuerza tensil; sin embargo, hacen falta más estudios sobre este efecto. La adición de estos nanomateriales convierte a estas películas en un sistema innovador para aumentar la vida útil de alimentos. El objetivo de este estudio fue evaluar el efecto de la adición de nanopartículas de oro sobre las propiedades mecánicas (fuerza tensil y fuerza a la ruptura) y de barrera (transferencia al vapor de agua) en películas de alginato de sodio.

## **1.2 PARTE EXPERIMENTAL**

### **1.2.1 Materiales**

Se utilizaron los siguientes reactivos alginato de sodio (Sigma, St. Louis MO, USA), glicerol como plastificante (Aditivos, Monarca, México), cloruro de calcio (Meyer, México), ácido tetracloroáurico ( $\text{H}_2\text{AuCl}_4$ ) se adquirió de Sigma Aldrich® (Toluca, México), citrato de sodio como reductor (Meyer, México).

### **1.2.2 Síntesis de AuNPs**

Para la síntesis de nanopartículas de oro se utilizó el método de citrato reducción (Hermanson 2008). Consiste en una serie de reacciones de óxido-reducción con ácido tetracloroáurico

(HauCl4) y citrato de sodio como agente reductor en presencia de calor. Las AuNPs obtenidas fueron almacenadas a 4°C hasta su uso.

### **1.2.3 Preparación de las películas adicionadas con AuNPs**

La preparación de las películas se realizó mediante el método de casting. La solución formadora de película se elaboró disolviendo alginato al 1% p/v en agua destilada previamente a 70°C dejando la solución en agitación constante por 30 min, posteriormente se añadió glicerol al 1.5% p/v y se mantuvo en agitación por 30 min. Las AuNPs se añadieron a la solución a diferentes concentraciones (1%, 5% y 10% p/v). Esta solución se enfrió hasta temperatura ambiente y se realizó una desgasificación utilizando una bomba de vacío durante 20 min. Para la formación de las películas, se colocaron 35 mL de la solución formadora de película en cajas Petri y se colocaron en un deshidratador (Excalibur 4900, España) a 41°C durante 16 h al finalizar, se añadieron 3 mL de cloruro de calcio al 1%, las películas se dejan secar y finalmente se almacenan a HR 33% y 25°C hasta su análisis.

### **1.2.4 Propiedades de barrera**

#### **1.2.4.1 Permeabilidad al vapor de agua (PVA)**

La PVA se determinó usando la modificación del “método de copa” descrita en la técnica gravimétrica de ASTM. (2010b). E96M-16. Para ello se utilizaron pesa filtros de 3 cm de diámetro (PYREX®) en los cuales se colocaron 3 g de CaCl<sub>2</sub> y posteriormente se colocó la película en la parte superior la cual se sujetó con parafilm. Las muestras se colocaron dentro de un desecador que contenía una solución saturada de MgCl<sub>2</sub> (33% de HR) a 25°C. El agua transferida a través de la película se determinó a partir de la ponderación de 0.1 mg más cercano usando una balanza analítica. La muestra de la película se pesó cada 24 h por 5 d. La PVA se determinó de acuerdo con la siguiente ecuación (1).

$$PVA = (VTVA * L) / (p^{w1} - p^{w2}) \quad \text{Ec. 1}$$

Donde: VTVA es la velocidad de transmisión del vapor de agua en la película, L es el espesor de la película, p<sup>w1</sup> es la presión parcial de vapor de agua dentro del recipiente y p<sup>w2</sup> es la presión parcial de la solución saturada de sal dentro de la celda de permeación.

### 1.2.5 Propiedades mecánicas

La fuerza tensil y fuerza a la ruptura se determinó utilizando el método ASTM. (2010a). D882–97 usando un analizador de textura (Shimadzu EZ-S 500N, Japón).

### 1.2.6 Caracterización estructural Espectroscopia Infrarroja

Se utilizó un Espectrofotómetro Infrarrojo con Transformada de Fourier (FTIR) (Bruker, Vertex; Billerica, Massachusetts, EE.UU.) con el método de muestreo Reflectancia Total Atenuada (ATR). Los espectros de cada tratamiento se obtuvieron por triplicado y se promediaron. Se utilizaron 64 barridos con una resolución de  $4\text{ cm}^{-1}$  en la región espectral de  $4000\text{--}400\text{ cm}^{-1}$ . Para el análisis de los espectros se utilizó el programa Origin 6.1 (OriginLab Corporation; Northampton, Massachusetts, EE.UU.).

### 1.2.7 Diseño experimental

El diseño de experimento consistió en un diseño completamente al azar. Se realizó un análisis de varianza (ANOVA), a través del software Minitab Statistic Versión 16. Las pruebas de medias se realizaron empleando la prueba de Tukey con un nivel de significancia establecido en  $p \leq 0.05$ .

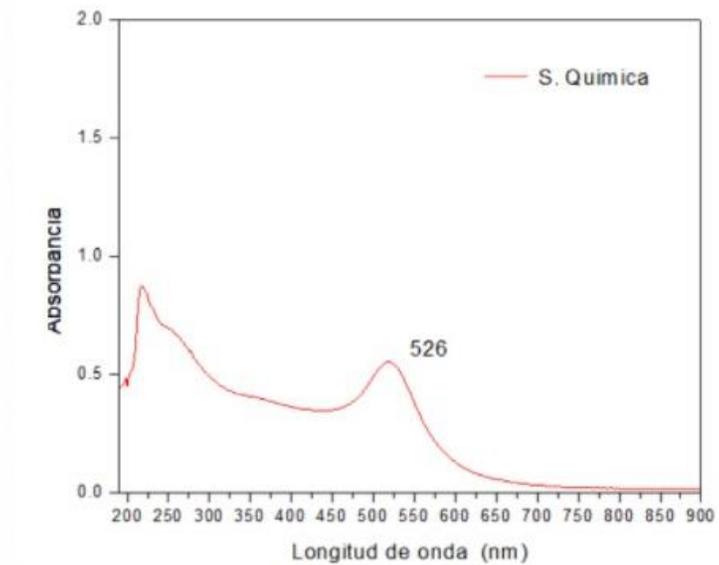
## 1.3 RESULTADOS

### 1.3.1 Síntesis de nanopartículas de oro (AuNPs)

Durante la síntesis de las AuNPs se observó un cambio de color de amarillo a rojo rubí color característico de AuNPs de forma esférica (Figura 1). La formación de nanopartículas se confirmó con la banda de absorción del plasmón en  $526\text{ nm}$  que corresponde a nanopartículas de un tamaño entre  $10\text{ y }20\text{ nm}$  (Figura 2).



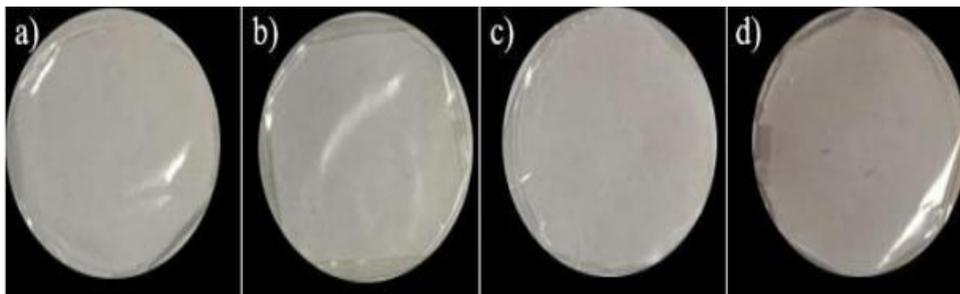
Figura 1. Síntesis química de AuNPs



**Figura 2.** Espectro UV-Visible de AuNPs obtenidas por el método de reducción química

### 1.3.2 Películas de alginato adicionadas con nanopartículas de oro

Las películas activas fueron lisas, no presentaron burbujas, ni porosidad, no se observaron diferencias con el control. En cuanto al color, la película control mantuvo un color transparente, conforme se aumentaba la concentración de las AuNPs se apreciaba un color rojo (Figura 3).



**Figura 3.** Películas de alginato de sodio adicionadas con AuNPs. a) control, b) 1% de AuNPs, c) 5% de AuNPs y d) 10% de AuNPs.

### 1.3.3 Permeabilidad al vapor de agua (PVA)

La PVA indica la capacidad que tiene el material para permitir el paso del vapor de agua a través de él; por lo tanto, se requiere una permeabilidad al vapor baja para tener una mayor resistencia al paso del vapor de agua y de este modo mantener por mayor tiempo la frescura de los alimentos. En el Cuadro 1 se muestran los resultados obtenidos. Valores de PVA desde 0.24 a 0.21 (gmm/kPahm<sup>2</sup>), se observan diferencias significativas ( $p < 0.05$ ) entre los tratamientos y el control, se observa que conforme aumenta la concentración de AuNPs la PVA disminuye, estos resultados sugieren un posible incremento en el número de enlaces que contribuyen en la obtención de una red tridimensional más entretejida.

**Cuadro 1.** Valores de permeabilidad al vapor de agua (PVA) en películas de alginato con y sin AuNPs

Tratamiento	PVA (gmm/kPahm <sup>2</sup> )
Co	0.24±0.05 <sup>a</sup>
AuNPs 1 %	0.23 ±0.01 <sup>b</sup>
AuNPs 5 %	0.22±0.02 <sup>c</sup>
AuNPs 10 %	0.21±0.00 <sup>d</sup>

Los valores reportados para cada película de alginato son sus medias  $\pm$  desviación estándar ( $n = 5$ ). Diferentes letras en la misma columna indican diferencias significativas entre las muestras ( $p < 0.005$ ), de acuerdo con la prueba de Tukey.

### 1.3.4 Fuerza tensil y fuerza a la ruptura

La incorporación de nanomateriales se ha difundido como una estrategia interesante para mejorar las propiedades físicas, mecánicas y de barrera de películas comestibles. En el Cuadro 2, se presentan los resultados obtenidos para la fuerza tensil y fuerza a la ruptura de películas de alginato con y sin AuNPs. Se observa claramente que conforme aumenta la concentración de las AuNPs los valores de la fuerza tensil como la de ruptura aumentan, llegando a un valor de 20.2 N/mm<sup>2</sup> para fuerza tensil y 19.50 N para fuerza a la ruptura, este aumento se debe posiblemente a la gran área superficial de las nanopartículas que le permiten interactuar fuertemente con la matriz polimérica. Las mejoras en las propiedades en general

se alcanzan cuando las cargas puedan dispersarse uniformemente dentro de la matriz polimérica, y su distribución depende de la concentración del refuerzo y de la afinidad química de las cargas por la matriz. Estos resultados sugieren que es posible mejorar las propiedades mecánicas de las películas, haciéndolas más resistentes.

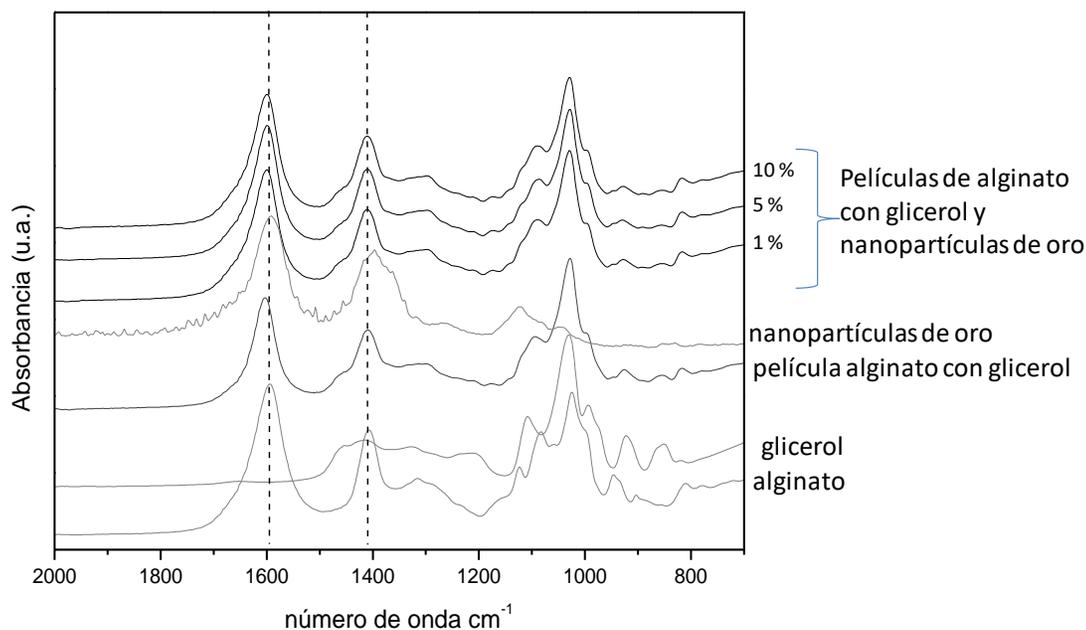
**Cuadro 2.** Valores de propiedades mecánicas (fuerza tensil y fuerza a la ruptura) en películas de alginato con y sin AuNPs.

<b>Tratamiento</b>	<b>Fuerza tensil (N/mm<sup>2</sup>)</b>	<b>Fuerza a la ruptura (N)</b>
<b>Co</b>	3.40±1.54 <sup>b</sup>	5.19±2.35 <sup>ab</sup>
<b>AuNPs 1 %</b>	6.26±0.79 <sup>b</sup>	8.67±5.19 <sup>ab</sup>
<b>AuNPs 5 %</b>	9.94±2.54 <sup>b</sup>	9.56±0.8 <sup>ab</sup>
<b>AuNPs 10 %</b>	20.2±4.73 <sup>a</sup>	19.50±9.64 <sup>a</sup>

### 1.3.5 Caracterización estructural FTIR de películas de alginato de sodio con y sin AuNPs

En la Figura 4 se presentan los espectros FTIR de las películas de alginato adicionadas a diferentes concentraciones de AuNPs, así como los compuestos utilizados para su formación. Los espectros presentan las señales características de la molécula de alginato, además, la adición de glicerol (como plastificante) a estas películas trajo consigo la presencia de nuevas bandas, predominando en la región de 1200-800 cm<sup>-1</sup>. Un corrimiento hacia longitudes de onda mayores se observó en las bandas 1593 y 1407 cm<sup>-1</sup> debido a la adición de glicerol a las películas sin nanopartículas de oro. Una vez adicionadas las nanopartículas de oro los espectros mostraron nuevamente un desplazamiento hacia longitudes de onda menores en las bandas características de las nanopartículas en 1589 y 1403 cm<sup>-1</sup> de los enlaces CH<sub>2</sub>-O y C=O respectivamente. El aumento observado en las intensidades FTIR absolutas, correspondiente a estas bandas, sugiere una interacción inicial entre las moléculas de alginato, glicerol y nanopartículas conforme aumenta la concentración de nanopartículas de

oro. Esto último puede derivar en cambios estructurales, lo cual puede contribuir a controlar las propiedades mecánicas y de barrera de este tipo de películas nano-compuestas.



**Figura 4.** Espectros FTIR de alginato, glicerol, nanopartículas de oro, películas con y sin nanopartículas de oro en la región de 2000-700 cm<sup>-1</sup>.

## 1.4 CONCLUSIONES

Se concluye que el aumento en la concentración de AuNPs en películas de alginato de sodio tiene un efecto importante en las propiedades mecánicas y de barrera, por lo que este tipo de películas activas podrían usarse como alternativa a los plásticos convencionales desarrollando empaques innovadores.

## 1.5 BIBLIOGRAFÍA

- ASTM. (2010a). D882–97 Standard test method for tensile properties of thin plastic sheeting. Annual Book of American Standard Testing Methods. <http://www.astm.org/cgi-bin/resolver.cgi?D882-18>
- ASTM. (2010b). E96M-16 Standard test methods for water vapor transmission of materials (ASTM Inter). ASTM International. <http://www.astm.org/cgi-bin/resolver.cgi?E96E96M-16>.

- Cagri, A., Ustunol, Z., & Ryser, E. T. (2004). Antimicrobial edible films and coatings. *Journal of Food Protection*, 67, 833–848.
- Hermanson G. T. (2008). *Bioconjugate techniques*. Academic Press Inc, San Diego. 2<sup>nd</sup> (Ed). (*i.e.*, 1323 p.).
- McHugh, T. H. (2000). Protein-lipid interactions in edible films and coatings. *Nahrung*, 44, 148-151.
- Miller, K. S., & Krochta, J. M. (1997). Oxygen and aroma barrier properties of edible films: a review. *Trends in Food Science and Technology*, 8(7), 228-237.
- Puligundla, P., Jung, J. & Ko, S. (2012). Carbon dioxide sensors for intelligent food packaging applications. *Food Control*, 25(1), 328-333.

## CAPÍTULO II

### EFFECTO DE LA ADICIÓN DE NANOPARTÍCULAS DE ORO OBTENIDAS POR SÍNTESIS VERDE Y QUÍMICA EN PELICULAS DE ALGINATO DE SODIO

Vargas-Galina N. Y.<sup>1</sup> Hernández-Cázares A.S.<sup>1</sup>, Real-Luna N.<sup>1</sup>, Rojas-López M.<sup>2</sup> Hidalgo-Contreras J. V.<sup>1</sup> Ríos-Corripio M. A.<sup>3\*</sup>

<sup>1</sup>Colegio de Postgraduados Campus Córdoba. Carretera Federal Córdoba-Veracruz Km 348, Manuel León, Amatlán de los Reyes, Veracruz, México. C. P. 94953.

<sup>2</sup>Centro de Investigación en Biotecnología Aplicada. Ex-Hacienda San Juan Molino Carretera Estatal Tecuexcomac-Tepetitla km 1.5 Tlaxcala C.P. 90700, México.

<sup>3</sup>CONACYT- Colegio de Postgraduados Campus Córdoba. Carretera Federal Córdoba-Veracruz Km 348, Manuel León, Amatlán de los Reyes, Veracruz, México. C. P. 94953.

ENVIADO A LA REVISTA: FRONTERA BIOTECNOLÓGICA



## CAPÍTULO II

### EFFECTO DE LA ADICIÓN DE NANOPARTÍCULAS DE ORO OBTENIDAS POR SÍNTESIS VERDE Y QUÍMICA EN PELICULAS DE ALGINATO DE SODIO

#### RESUMEN

Se prepararon películas biodegradables a base de alginato de sodio (PC) y glicerol como plastificante, incorporando nanopartículas de oro (AuNPs) a diferentes concentraciones (1, 5 y 10 % v/v), sintetizadas por el método químico (AuNPsQ) y método verde (AuNPsV) a partir de citrato de sodio y un extracto acuoso de pulpa de café como agente reductor. Se caracterizaron las PC con el objetivo de evaluar el efecto de la adición de las AuNPsQ y AuNPsV sobre propiedades físicas, mecánicas, de barrera, estructurales y antioxidantes. La presencia de las AuNPsQ y AuNPsV sobre las PC produce un cambio sobre las propiedades físicas, mecánicas, de barrera y estructurales. Además, la adición de AuNPsV dota a las PAuNPsV de actividad antioxidante y se observó que su aumento es directamente proporcional a la concentración de AuNPsV adicionadas. Finalmente, los resultados proponen el uso de las AuNPs como una innovación prometedora ya que tienen el potencial de mejorar el desempeño de las PC para su aplicación como película activa en empaques de productos alimenticios.

**Palabras clave:** películas activas, AuNPs, pulpa de café, alginato de sodio, propiedades mecánicas

#### 2.1 INTRODUCCIÓN

El empaque juega un papel importante en la conservación, distribución y comercialización de los productos alimenticios, algunas de sus funciones son proteger el producto de daños mecánicos, actividades físicas, químicas y microbiológicas. Sin embargo, después que el alimento es consumido el empaque es desechado y al ser de plástico tradicional que se obtiene a partir del petróleo tarda mucho tiempo en degradarse lo que genera acumulación y

contaminación al medio ambiente. Como respuesta a esta problemática surgen los materiales biodegradables. Un ejemplo de ello son las películas biodegradables (PB) que son aquellos materiales que cuando son expuestos a condiciones determinadas de humedad, flora microbiana y oxígeno son transformados en sustancias sencillas (agua y CO<sub>2</sub>) y biomasa. Las unidades estructurales de las que se componen se conocen como biopolímeros y se obtienen principalmente de materias primas renovables de origen animal, vegetal o microbiano y existen como polisacáridos (alginato, pectina, almidones, celulosa, lactosa, sacarosa) y / o proteínas (suero, caseína, colágeno o proteína hidrolizada). Entre los biopolímeros más utilizados se encuentra el alginato de sodio, una sal de ácido algínico que se extrae de algas pardas (Siddhesh y Edgar, 2011). Este biopolímero permite obtener películas con buena elasticidad, transparentes, buenas propiedades de barrera y baja permeabilidad a aceites y oxígeno (Oliveira *et al.*, 2018). Una funcionalidad importante de las PB es su habilidad para incorporar ingredientes activos como antimicrobianos, antioxidantes, vitaminas, prebióticos y probióticos con el objetivo de mejorar propiedades específicas como cambiar las condiciones del alimento, extender la vida de anaquel, mejorar la seguridad microbiológica o las propiedades sensoriales, además de monitorear y ofrecer información acerca de la calidad durante el transporte y el almacenamiento (Puligundla *et al.*, 2012), que las convierten en películas activas. Por otra parte, la evaluación de las propiedades mecánicas es importante porque envases frágiles son inapropiados para el correcto almacenamiento de alimentos. Pagno *et al.* (2015) menciona que la presencia de nanopartículas de plata produce una mejora en las propiedades mecánicas, ópticas y morfológicas, manteniendo las propiedades térmicas y de barrera sin cambios en comparación con la película estándar. Sin embargo, hasta donde sabemos, el desarrollo de PC incorporadas con AuNPs no se ha descrito previamente. Además, se ha encontrado que las AuNPs obtenidas por síntesis verde pueden poseer algunas de las ventajas y propiedades conferidas por moléculas orgánicas contenidas en los extractos químicos de las plantas tales como compuestos antioxidantes antiinflamatorios, antibacterianos, entre otras moléculas con actividad biológica (Katas *et al.*, 2019). En este contexto la pulpa de café (*Coffea arabica*) contiene compuestos fenólicos y derivados como el ácido clorogénico, cafeico y ferúlico, (Keijok *et al.*, 2019) que sirven como agentes reductores para la síntesis

de AuNPs y además se contribuye en la reducción de este residuo agroindustrial (Bonilla-Nepomuceno *et al.*, 2021). La adición de estos nanomateriales convierte a estas películas a base de alginato de sodio en un sistema innovador para contribuir a la preservación de la calidad de los alimentos. Esta investigación tuvo como objetivo desarrollar PC, así como evaluar el efecto sobre propiedades físicas, mecánicas, de barrera, estructurales y antioxidantes por la adición de AuNPsQ y AuNPsV.

## **2.2 MATERIALES Y MÉTODOS**

### **2.2.1 Materiales**

Para la elaboración de las PC se utilizó alginato de sodio grado alimenticio (Sigma, St. Louis MO, USA), glicerol como plastificante (Monarca Aditivos, México), cloruro de calcio como agente reticulante (Meyer, México). Para la síntesis de AuNPs se utilizó ácido tetracloroáurico ( $\text{HAuCl}_4$ ) de Sigma Aldrich<sup>®</sup> (Toluca, México), citrato de sodio de Sigma Aldrich<sup>®</sup> (Toluca, México) y pulpa de café de Huatusco, Veracruz, México, como agentes reductores.

### **2.1.2 Síntesis química y verde de AuNPs**

La obtención de AuNPsQ se llevó a cabo por el método de reducción química (Hermanson, 2008). Se añadió 0.5 mL de  $\text{HAuCl}_4$  al 4 % a 200 mL de agua destilada y la solución se llevó a ebullición en agitación constante. Una vez que la solución llegó a 97 °C, se agregó citrato de sodio al 1%. Después de 30 min, la reacción se completó y el color final de la solución fue rojo rubí, indicando la formación de las AuNPsQ. Después de enfriar la solución, las AuNPsQ se centrifugaron a 10,000 rpm durante 15 min, se eliminó el sobrenadante y las AuNPsQ se resuspendieron en 10 mL de agua destilada. La solución obtenida se almacenó en refrigeración a 4 °C hasta su uso.

La síntesis verde de AuNPsV se realizó de acuerdo con la metodología establecida por Bonilla-Nepomuceno *et al.* (2021) y siguiendo el método de oxidación-reducción, donde un extracto acuoso de pulpa de café (2mg/mL) sirvió como agente reductor. La reacción consistió en calentar 200 mL de solución (extracto de pulpa de café) con agitación constante

hasta alcanzar una temperatura de 95 °C, se añadió 1 mL de H<sub>AuCl</sub><sub>4</sub> al 4% y después de 20 min la solución alcanzó el color rojo rubí, lo que indica la formación de las AuNPsV. El almacenamiento fue similar a las AuNPsQ.

### **2.2.3 Caracterización de las AuNPs por espectrofotometría UV/Visible**

Para medir la resonancia de plasmón superficial de las AuNPsQ y AuNPsV se utilizó un espectrómetro Thermo Scientific™ Evolution 300, se midió a una longitud de onda de 190 a 900 nm.

### **2.2.4 Preparación de PC adicionadas con AuNPsQ y AuNPsV.**

La elaboración de la PC se realizó mediante el método vertido en placa o casting (Escobar *et al.*, 2009). La solución formadora de película (SFP) se elaboró disolviendo alginato al 1% p/v en agua destilada a 70°C, se dejó en agitación constante por 30 min, se añadió glicerol al 1.5% v/v y se mantuvo en agitación por 30 min más. Las AuNPsQ y AuNPsV se añadieron a la SFP a diferentes concentraciones (1%, 5% y 10% v/v) en agitación constante por 30 min. Una vez que la temperatura descendió a 35-40°C se sometió a vacío durante 20 min para eliminar las burbujas atrapadas en la solución. La SFP se vertió en placas de Petri (35 mL) y se colocaron en un deshidratador (Excalibur 4900, España) a 41°C durante 16 h. Una vez obtenidas las películas se añadió 3 mL de cloruro de calcio al 1% para su reticulación, dejando secar por 15 min. Seis tipos de películas fueron producidas (película a base de alginato de sodio (PC), PC con AuNPsQ 1% (PAuNPsQ1%), PC con AuNPsQ 5% (PAuNPsQ5%), PC con AuNPsQ 10% (PAuNPsQ10%), PC con AuNPsV 1% (PAuNPsV1%), PC con AuNPsV 5% (PAuNPsV5%), PC con AuNPsV 10% (PAuNPsV10%). Todas las películas fueron acondicionadas en un desecador a 53% de humedad relativa hasta su análisis.

### **2.2.5 Caracterización de las PC con y sin AuNPs**

#### **2.2.5.1 Espesor**

El espesor se determinó con un micrómetro (Modelo 25, AMES, EE.UU.). Los valores promedio se calcularon utilizando 5 medidas para cada tipo de película en un punto diferente (mm).

### 2.2.5.2 Color

El color se determinó con un colorímetro CR-400 Minolta Croma Meter (Konika Minolta, Valencia, España). Las diferentes películas se evaluaron utilizando los valores CIELab L\*, a\* y b\*. La calibración del equipo se utilizó una placa blanca estándar.

### 2.2.5.3. Transparencia

La transparencia se midió con un espectrofotómetro UV-Vis (Genesys™ 10uv Scanning, Alemania) a 600 nm (Han y Floros, 1997). Las películas se cortaron en trozos rectangulares (4 x 1 cm) y se colocaron directamente en una celda de prueba para su lectura en el espectrofotómetro. Las mediciones se realizaron tomando como blanco el aire y se calculó con la ecuación (1)

Ec.1

$$\text{Transparencia} = A_{600} / \delta$$

Donde:  $A_{600}$  es la absorbancia y  $\delta$  es el espesor de la película (mm)

### 2.2.5.4 Propiedades de barrera

#### 2.2.5.4.1 Contenido de humedad

El contenido de humedad se determinó con el método de Kurek *et al.* (2014). Se cortaron películas de 2 x 2 cm, se colocaron en charolas a peso constante, se pesaron y secaron en un horno durante 24 h a 105 °C. El contenido de humedad se determinó por la pérdida de peso de la película después del secado y se calculó con la ecuación (2).

$$\%CH = \frac{P_i - P_f}{P_i} \times 100$$

Ec.2

Donde:  $P_i$  es el peso inicial de la película,  $P_f$  es el peso de la película a peso constante.

#### 2.2.5.4.2 Solubilidad en agua

La solubilidad se realizó en trozos de películas de 2 x 2 cm, secadas previamente en un horno a 105°C a 24 h según el método establecido por Gontard *et al.* (1994), una vez obtenida la

masa seca, las películas se sumergieron en 20 mL de agua destilada en agitación constante durante 24 h.

La solubilidad se expresó en porcentaje y se calculó con la siguiente ecuación (3).

$$\%S = \frac{Si - Sf}{Si} \times 100$$

Ec.3

Donde: Si es el peso inicial de la película, Sf es el peso final de la película después de 24 h bajo agitación.

#### 2.2.5.5 Permeabilidad al vapor de agua (PVA)

La PVA se realizó en base el método gravimétrico estándar E96M-16 (ASTM, 2010). Para ello se utilizaron pesa filtros de 3 cm de diámetro (PYREX<sup>®</sup>); en los cuales se colocaron 3 g de CaCl<sub>2</sub> (Meyer, México, D.F.), y en la parte superior se colocó la película, que se sujetó con Parafilm. Los pesafiltros se colocaron dentro de un desecador que contenía una solución saturada de MgCl<sub>2</sub> (33% de HR) a 25°C. El agua transferida a través de la película se determinó a partir de la ponderación de 0.1 mg más cercano usando una balanza analítica. El pesafiltro se pesó cada 24 h por 5 d. La PVA se determinó de acuerdo con la siguiente ecuación (4 y 5).

$$VTVA = \left( \frac{g}{h \ m^2} \right) = \frac{G/t}{A} \quad \text{Ec. 4}$$

$$PVA = \left( \frac{g \ mm}{kPa \ h \ m^2} \right) = \frac{VTVA}{\Delta P} \times e \quad \text{Ec. 5}$$

Donde:  $G/t$  es la pendiente de la línea recta (ganancia de peso vs tiempo, g/h),  $A$  es el área de la película (área de la abertura de la celda, m<sup>2</sup>),  $\Delta P$  es la diferencia de presiones de vapor (kPa) entre el cloruro de sodio y el cloruro de calcio,  $e$  es el espesor de la película (mm).

#### 2.2.5.6 Propiedades mecánicas

Las propiedades mecánicas que se evaluaron fueron la fuerza tensil y elasticidad, según el método D882-18 (ASTM, 2018) utilizando un texturometro (Shimadzu EZ-S 500N, Japón).

Las películas se cortaron en tiras rectangulares de 2 x 5 cm, se utilizó una separación inicial de 5 cm y una velocidad de 5 mm/s. La evaluación se realizó por triplicado.

#### **2.2.5.7 Actividad antioxidante**

Se evaluó la actividad antioxidante de la PC y PAuNPsV a diferentes concentraciones, se determinó con base al método 1 2,2-difenil-1-picrilhidrazil (DPPH) descrito por Brand-Williams *et al.* (1995). Una muestra de 0.25 g de cada tipo de película se homogenizó con 10 mL de agua destilada en un vortex (Digital Vortex Mixer, EE. UU.), durante 10 s y se incubó durante 30 min a temperatura ambiente. Del extracto madre de la película se tomaron 0.25 mL y se aforó con 10 mL de agua destilada. De esta solución se tomó 1 mL, se mezcló con 3 mL de la solución DPPH (0.0039 g·100·mL<sup>-1</sup> de metanol), se agitó vigorosamente durante 10 s y se mantuvo en oscuridad por 30 min. Posteriormente la mezcla se midió a 517 nm con un espectrofotómetro UV - Visible (Thermo Scientific, GENESYS 10S; Madison, Wisconsin, EE. UU.). La actividad antioxidante se calculó utilizando la ecuación (6):

Ec.6

$$I (\%) = \frac{1-A_s}{A_c} \times 100$$

Donde: I es la inhibición (%),  $A_s$  representa la absorbancia de la muestra y  $A_c$  la absorbancia del blanco, disolución de muestra y agua sin DPPH.

#### **2.2.5.8 Espectroscopia infrarroja**

La caracterización estructural de los diferentes tipos de películas se determinó con un espectrofotómetro infrarrojo con transformada de Fourier (FTIR) (Bruker, Vertex; Billerica, Massachusetts, EE. UU) por el método de muestreo Reflectancia Total Atenuada (ATR). Los espectros de cada tratamiento se obtuvieron por triplicado y se promediaron. Se utilizaron 64 barridos con una resolución de 4 cm<sup>-1</sup> en la región espectral de 4000-400 cm. Para el análisis de los espectros se utilizó el programa Origin 6.1 (OriginLab Corporation; Northampton, Massachusetts, EE. UU.).

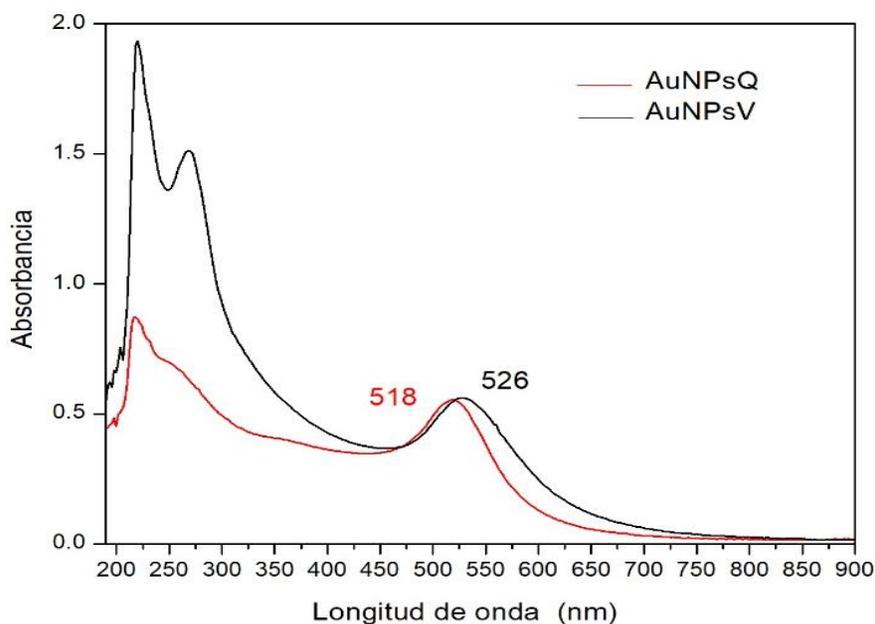
### 2.2.6 Análisis estadístico

Se utilizó un diseño factorial completamente al azar. Los datos se analizaron mediante un ANOVA con el software Minitab Statistic Versión 16. La comparación de medias se realizó con la prueba Tukey a un nivel de significancia de  $p < 0.05$ .

## 2.3 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### 2.3.1 Caracterización de las AuNPs por espectrofotometría UV/Visible

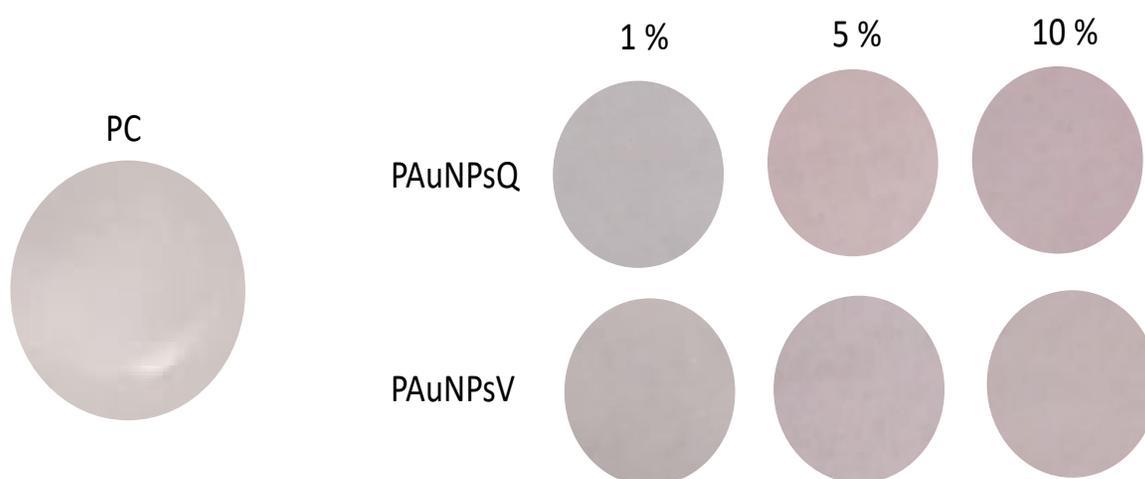
La Figura 1, muestra los espectros UV / Visible de las AuNPs obtenidas por los dos tipos de agentes reductores (citrato de sodio y extracto de pulpa de café). La oscilación colectiva de electrones en los espectros incluye una banda única y fuerte a 518 nm para las AuNPsQ y en 526 nm para la AuNPsV lo que indica un diámetro promedio entre 15 y 20 nm respectivamente y una forma esférica. El espectro de las AuNPsV muestra además una banda en la región de 200-300 nm que es causada por la absorción de compuestos fenólicos específicamente flavonoides (Cala *et al.*, 2007), la pulpa de café contiene flavonoides, ácidos fenólicos lo que indica que estos compuestos forman parte de las AuNPsV.



**Figura 1.** Espectro UV/Visible de AuNPsQ y AuNPsV

### 2.3.2 Obtención de PC adicionadas con AuNPsQ y AuNPsV

Las PC, PAuNPsQ y PAuNPsV a diferentes concentraciones se muestran en la Figura 2. En cuanto a su apariencia física para todas las películas su superficie fue uniforme sin presencia de poros o grietas. En cuanto al color, visualmente la PC era transparente, sin embargo, PAuNPsV y PAuNPsQ se tornaron de color rojizo y esto se observó en las concentraciones más altas de AuNPsQ y de AuNPsV. El color rojo es característico de las AuNPs de forma esférica y tamaño nanométrico de 10-20 nm lo que nos indica su presencia en la estructura de las películas.



**Figura 2.** Apariencia de PC, PAuNPsQ y PAuNPsV a diferentes concentraciones de AuNPs.

### 2.3.3 Espesor

En cuanto al espesor la PC presento un valor de  $0.10 \pm 0.00$  mm, valor que no fue significativamente diferente ( $p < 0.05$ ) por la adición de las AuNPsQ y AuNPsV a concentraciones de 1, 5 y 10 %, debido posiblemente a que las AuNPs ocupan los espacios en la PC e interactúan con el alginato (Jafarzadeh *et al.*, 2016). Este resultado es mayor al reportado por Pagno *et al.* (2015) quienes obtuvieron películas de 0.08 mm de espesor para películas de quinoa (*Chenopodium quinoa* W.) adicionadas al 2.5 y 5% de AuNPs. Sebti *et al.* 2007 menciona que el espesor depende de la naturaleza y composición de la película y en gran medida del método y las condiciones de secado en la que es elaborada.

### 2.3.4 Color y transparencia

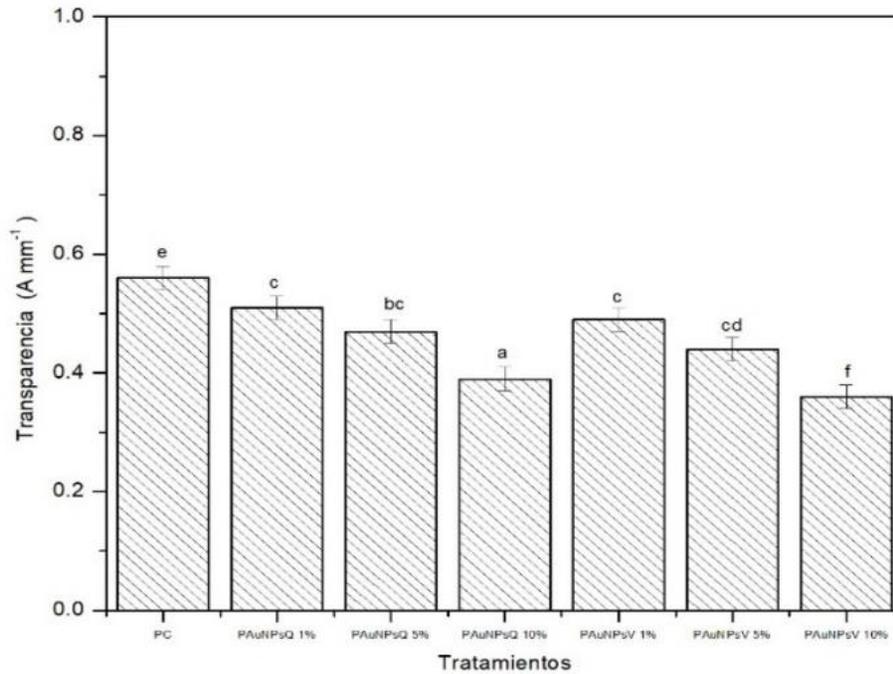
Los resultados de las mediciones de color de PC, PAuNPsQ y PAuNPsV a diferentes concentraciones se presentan en el Cuadro 1. Se puede observar que el valor de L\* disminuye conforme aumenta la concentración de AuNPs, es por ello por lo que para PAuNPsQ 10 % y PAuNPsV 10 % se presentó diferencia significativa ( $p < 0.5$ ) respecto a PC. La reducción de L\* indica una mayor tendencia hacia el enrojecimiento produciendo películas más oscuras (Kumar *et al.*, 2018). Las PAuNPsV 5 % y PAuNPsV 10 % mostraron los valores más altos en el parámetro a\* indicando un aumento en el enrojecimiento respecto a la PC. Pagno *et al.* (2015) encontraron valores similares en películas de quinoa con AuNPs mostrando un color más rojizo característico de las AuNPs.

**Cuadro 1.** Valores de color de PC, PAuNPsQ y PAuNPsV a diferentes concentraciones de AuNPs.

Tratamiento	L*	a*	b*
PC	78.70 ± 0.41 <sup>bc</sup>	2.65 ± 0.02 <sup>e</sup>	2.49 ± 0.01 <sup>c</sup>
PAuNPsQ 1 %	77.64 ± 0.41 <sup>c</sup>	2.98 ± 0.02 <sup>e</sup>	1.51 ± 0.01 <sup>b</sup>
PAuNPsQ 5 %	76.80 ± 0.41 <sup>ab</sup>	4.74 ± 0.02 <sup>d</sup>	3.42 ± 0.01 <sup>f</sup>
PAuNPsQ 10 %	75.60 ± 0.41 <sup>d</sup>	5.53 ± 0.02 <sup>c</sup>	2.59 ± 0.01 <sup>e</sup>
PAuNPsV 1 %	77.53 ± 0.41 <sup>c</sup>	5.58 ± 0.02 <sup>c</sup>	2.55 ± 0.01 <sup>b</sup>
PAuNPsV 5 %	76.37 ± 0.41 <sup>bc</sup>	7.10 ± 0.02 <sup>b</sup>	1.40 ± 0.01 <sup>a</sup>
PAuNPsV 10 %	74.57 ± 0.41 <sup>e</sup>	7.50 ± 0.02 <sup>a</sup>	1.19 ± 0.01 <sup>d</sup>

Nota: Los resultados son expresados como media ± desviación estándar. Las diferencias significativas ( $p \leq 0.05$ ) entre los parámetros se indican con letras diferentes, para película a base de alginato de sodio (PC), PC con nanopartículas por síntesis por método químico (AuNPsQ) al 1% (PAuNPsQ1%), 5% (PAuNPsQ5%), y al 10% (PAuNPsQ10%), PC con nanopartículas por síntesis verde (AuNPsV) al 1% (PAuNPsV1%), 5% (PAuNPsV5%), y 10% (PAuNPsV10%).

Los valores de transparencia se muestran en la Figura 3. La transparencia de PC obtuvo diferencias significativas ( $p < 0.5$ ) con los demás tratamientos PAuNPsV1%. Por otro lado, hubo diferencia significativa ( $p < 0.5$ ) entre PAuNPsQ y PAuNPsV a 5 y 10 %. Se observa que a mayor concentración de AuNPs el valor de transparencia disminuye, tanto síntesis química como verde. Este efecto se atribuye a la dispersión de luz de las AuNPs que limita el intercambio de luz (Aristizabal-Gil *et al.* 2019).



**Figura 3.** Transparencia de PC, PAuNPsQ y PAuNPsV a diferentes concentraciones de AuNPs.

Las diferencias significativas ( $p \leq 0.05$ ) entre los parámetros se indican con letras diferentes, para película a base de alginato de sodio (PC), PC con nanopartículas por síntesis por método químico (AuNPsQ) al 1% (PAuNPsQ1%), 5% (PAuNPsQ5%), y al 10% (PAuNPsQ10%), PC con nanopartículas por síntesis verde (AuNPsV) al 1% (PAuNPsV1%), 5% (PAuNPsV5%), y 10% (PAuNPsV10%).

## 2.3.5 Propiedades de barrera

### 2.3.5.1 Contenido de humedad y solubilidad

Las propiedades de barrera en las PC juegan un papel importante para la conservación de los productos alimentación; además se utiliza para determinar el uso y aplicación de la película (Romani *et al.*, 2018). En el Cuadro 2 se muestra el contenido de humedad y solubilidad.

**Cuadro 2.** Contenido de humedad y solubilidad de PC, PAuNPsQ y PAuNPsV a diferentes concentraciones de AuNPs.

<b>Tratamiento</b>	<b>Humedad (%)</b>	<b>Solubilidad (%)</b>
<b>PC</b>	0.41 ± 0.02 <sup>c</sup>	100 ± 0.00 <sup>a</sup>
<b>PAuNPsQ 1 %</b>	0.38 ± 0.00 <sup>d</sup>	93.7 ± 0.00 <sup>b</sup>
<b>PAuNPsQ 5 %</b>	0.36 ± 0.00 <sup>a</sup>	90.5 ± 0.00 <sup>b</sup>
<b>PAuNPsQ 10 %</b>	0.29 ± 0.00 <sup>b</sup>	89.9 ± 0.00 <sup>b</sup>
<b>PAuNPsV 1 %</b>	0.39 ± 0.00 <sup>d</sup>	92.9 ± 0.00 <sup>b</sup>
<b>PAuNPsV 5 %</b>	0.35 ± 0.00 <sup>a</sup>	90.1 ± 0.00 <sup>b</sup>
<b>PAuNPsV 10 %</b>	0.27 ± 0.00 <sup>b</sup>	89.6 ± 0.00 <sup>b</sup>

Nota: Los resultados son expresados como media ± desviación estándar. Las diferencias significativas ( $p < 0.05$ ) entre los parámetros se indican con letras diferentes, para película a base de alginato de sodio (PC), PC con nanopartículas por síntesis por método químico (AuNPsQ) al 1% (PAuNPsQ1%), 5% (PAuNPsQ5%), y al 10% (PAuNPsQ10%), PC con nanopartículas por síntesis verde (AuNPsV) al 1% (PAuNPsV1%), 5% (PAuNPsV5%), y 10% (PAuNPsV10%).

Los valores de humedad se obtuvieron en un rango de 0.41 a 0.27 %; la PC presentó un valor de 0.41 ± 0.02 % y fue el valor máximo de humedad, esto puede atribuirse a la presencia de grupos hidroxilos en el alginato, además presentó diferencia significativa ( $p < 0.05$ ) respecto a los tratamientos. Por otro lado, se observó una reducción del contenido de humedad en las PAuNPsQ y PAuNPsV que contenían la mayor concentración de AuNPs, esto puede deberse a la interacción que existe entre el átomo de Au y grupos hidroxilo del alginato, lo que resulta en una red molecular más fuerte debido a los iones metálicos que interactúan con el alginato mejorando el crosslinking y dando una mayor compactación en la matriz polimérica (Ramziia *et al.*, 2017).

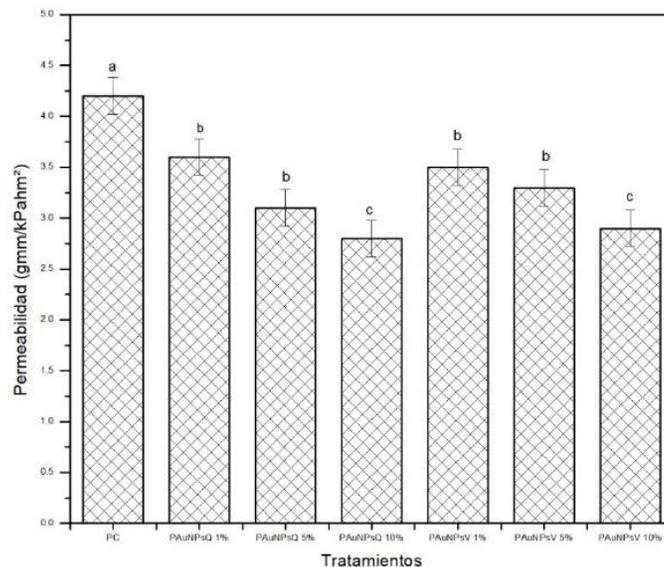
La solubilidad de las PC se encontró en un rango de 100 a 89.6 % siendo la PC la que mostró una solubilidad mayor a la de PAuNPsQ y PAuNPsV a diferentes concentraciones, este efecto puede atribuirse a la ruptura entre los átomos de  $Ca^{+2}$  y las moléculas del alginato; mientras que en las PC con la adición de AuNPsQ y AuNPsV se presentó menor solubilidad siendo la PAuNPsV 10 % la que mostró el menor valor 89.6 %. Como se mencionó anteriormente la presencia de las AuNPs en las PC genera una red polimérica más compacta que se ve reflejado en una disminución de la solubilidad. Estos resultados coinciden con lo reportado por Aristizabal-Gil *et al.* (2019), a medida que incremento la concentración de

nanopartículas de óxido de Zinc (ZnO) disminuyó el valor de humedad, obteniendo valores de 75-78%.

### **2.3.5.2 Permeabilidad al vapor de agua (PVA)**

El deterioro de los alimentos se ve influenciado por el contenido de humedad presente en ellos, es por esto por lo que se sugieren valores bajos de PVA en PC. Los valores de PVA de PC, PAuNPsQ, PAuNPsV se muestran en la Figura 4. La PVA de PC fue de  $4.2 \text{ mm/kPah}^{-1}\text{m}^{-2}$  y se redujo a  $2.8 \text{ g mm/kPah}^{-1}\text{m}^{-2}$  encontrando diferencias significativas ( $p < 0.05$ ) para PAuNPsQ10% y fue el menor valor reportado. Sin embargo para las PAuNPsQ y PAuNPsV al 1 y 5% entre ellos no hubo diferencia significativa, estos resultados coinciden con lo reportado por Wu *et al.* (2019) en películas de aislado de proteína de soja con nanopartículas de ZnO; y Ahmadi *et al.* (2021) en películas de gelatina y nanofibras de celulosa con nanopartículas de ZnO y Se, lo cual puede deberse a la disminución de la disponibilidad de grupos hidroxilo por la presencia de la AuNPs.

Filho *et al.* (2019) mencionan que, al incorporar nanomateriales a una PC, existe una reducción en los sitios de la reticulación provocando la disminución de volumen libre, como consecuencia disminución de PVA. Solano-Doblado *et al.* (2018) refieren que la PVA depende de la porción hidrofóbica, en este caso del alginato de sodio, sin embargo, al adicionar las AuNPs existe una reticulación por iones metálicos, y esto permite la formación de redes insolubles y reduce la PVA. Además, es posible que la presencia de iones  $\text{Ca}^{2+}$  tenga un efecto de reticulación más fuerte (Liling *et al.* 2016; Aristizabal-Gil *et al.* 2019).



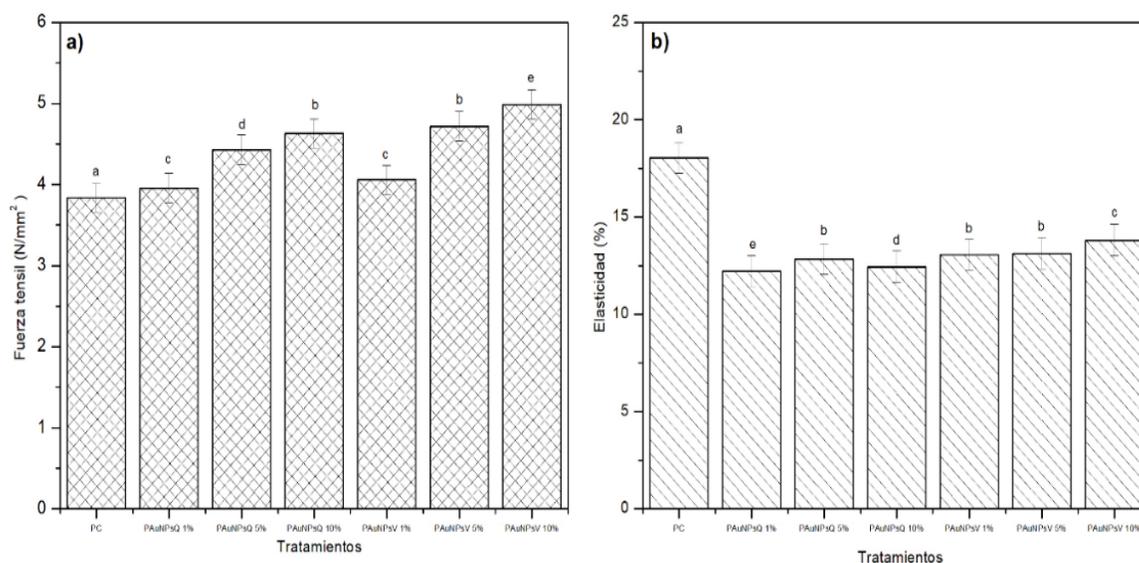
**Figura 4.** Permeabilidad de las PC, PAuNPsQ y PAuNPsV a diferentes concentraciones de AuNPs.

Las diferencias significativas ( $p \leq 0.05$ ) entre los parámetros se indican con letras diferentes, para película a base de alginato de sodio (PC), PC con nanopartículas por síntesis por método químico (AuNPsQ) al 1% (PAuNPsQ1%), 5% (PAuNPsQ5%), y al 10% (PAuNPsQ10%), PC con nanopartículas por síntesis verde (AuNPsV) al 1% (PAuNPsV1%), 5% (PAuNPsV5%), y 10% (PAuNPsV10%).

### 2.3.6 Propiedades mecánicas

La fuerza tensil y elasticidad son valores importantes debido a que por medio de estos parámetros se puede evaluar la capacidad de mantener la integridad del producto frente a factores ambientales relacionados con la aplicación del empaque y el transporte (Kumar *et al.* 2018; Hanani *et al.* 2019). La fuerza tensil y elasticidad se muestran en la Figura 5. La fuerza tensil de la PC (Figura 5a) tuvo un valor inicial de  $3.84 \pm 0.01$  N/mm<sup>2</sup>. La adición de las AuNPsQ y AuNPsV mostro un aumento de este valor y se vio más evidente en PAuNPsQ10% y PAuNPsV 10% obteniendo valores de  $4.63 \pm 0.01$  N/mm<sup>2</sup> y  $4.99 \pm 0.01$  N/mm<sup>2</sup>, respectivamente. Siendo mayor la fuerza tensil en las películas que contenían

AuNPsV, esto puede deberse a que estas AuNPs presentan mayor tamaño que las AuNPsQ. Valores similares fueron reportados por y Pagno *et al.* (2015) y Aristizabal-Gil *et al.* (2019). Por otro se pudo observar un efecto inverso en los valores de elasticidad para las PAuNPsQ y PAuNPsV a diferentes concentraciones (Figura 5b). La adición de AuNPs a las PC disminuyó la elasticidad conforme se aumentó la concentración de las AuNPsQ y AuNPsV. La PC tuvo un valor inicial de elasticidad de  $18.04 \pm 0.42$  %, mostrando diferencias significativas ( $p < 0.05$ ) respecto a las películas adicionadas con AuNPs obteniendo un valor final de  $12.45 \pm 0.36$  % asociado a PAuNPsQ10 %. Esto se relaciona con la presencia de iones metálicos formando uniones más fuertes en los enlaces, esto genera que la elasticidad disminuya (Alinaqi *et al.* 2021).

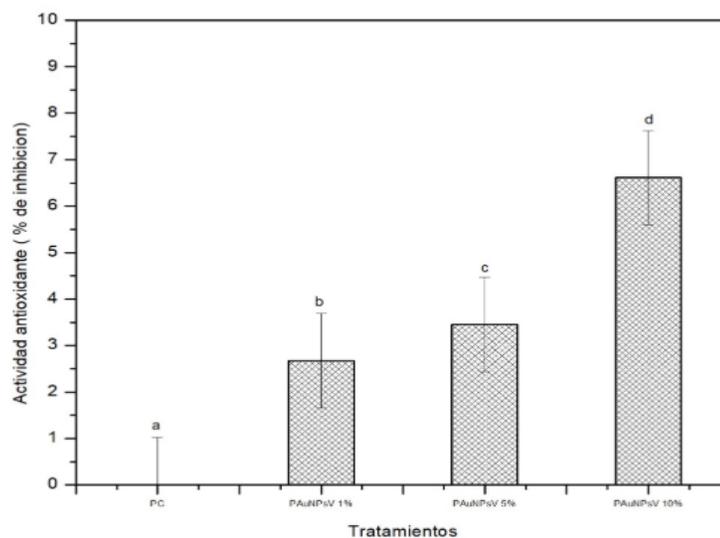


**Figura 5.** Fuerza tensil (a) y elasticidad (b) de PC, PAuNPsQ y PAuNPsV a diferentes concentraciones de AuNPs.

Las diferencias significativas ( $p \leq 0.05$ ) entre los parámetros se indican con letras diferentes, para película a base de alginato de sodio (PC), PC con nanopartículas por síntesis por método químico (AuNPsQ) al 1% (PAuNPsQ1%), 5% (PAuNPsQ5%), y al 10% (PAuNPsQ10%), PC con nanopartículas por síntesis verde (AuNPsV) al 1% (PAuNPsV1%), 5% (PAuNPsV5%), y 10% (PAuNPsV10%).

### 2.3.7 Actividad antioxidante

Los radicales de DPPH se utilizan para confirmar la presencia de actividad antioxidante, formando un radical libre estable que permita la donación de electrones para neutralizar estructura del anillo (Cuvelier *et al.* 1992). En la Figura 6 se presentan los valores de actividad antioxidante para PC y PAuNPsV a diferentes concentraciones. La actividad antioxidante de la PC mostro diferencias significativas ( $p < 0.05$ ) respecto a las PAuNPsV a diferentes concentraciones. La actividad antioxidante de las AuNPsV esta otorgada por los ácidos hidroxicinámicos (ácido clorogénico, cafeico y ferúlico) presente en el extracto de pulpa de café (Duangjai *et al.* 2016); lo que permitió que las PAuNPsV mostraran actividad antioxidante, obteniendo valores desde  $2.67 \pm 0.14$  a  $6.61 \pm 0.12$  % de inhibición DPPH, la cual aumento a medida que se incrementó la concentración de AuNPsV; sin embargo, las AuNPsQ debido a su naturaleza no presentan actividad antioxidante (datos no mostrados).

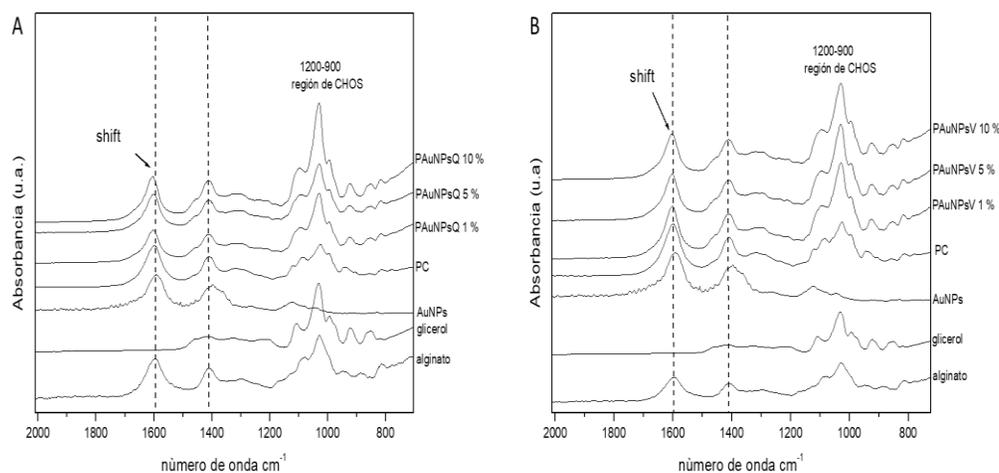


**Figura 6.** Actividad antioxidante de PC y PAuNPsV a diferentes concentraciones de AuNPs.

Las diferencias significativas ( $p \leq 0.05$ ) entre los parámetros se indican con letras diferentes, para película a base de alginato de sodio (PC), PC con nanopartículas por síntesis por método químico (AuNPsQ) al 1% (PAuNPsQ1%), 5% (PAuNPsQ5%), y al 10% (PAuNPsQ10%), PC con nanopartículas por síntesis verde (AuNPsV) al 1% (PAuNPsV1%), 5% (PAuNPsV5%), y 10% (PAuNPsV10%).

### 2.3.8 Espectroscopia infrarroja

En la Figura 7 se presentan los espectros FTIR de las PAuNPsQ y PAuNPsV, así como los componentes utilizados para su formación. En la Figura 7A y 7B el espectro de alginato presenta bandas de absorción relacionadas a la presencia de enlaces C=O, C-O-C, COOH. En las bandas 1597 y 1410  $\text{cm}^{-1}$ , se observa un enlace doble C=O del grupo carboxilato. De igual forma, en 1300  $\text{cm}^{-1}$  se evidencian los enlaces simples entre carbono e hidrogeno C-H y a 1123  $\text{cm}^{-1}$  los enlaces C-C. El enlace C-O-C se observa en el pico de 1084  $\text{cm}^{-1}$  y en el pico de 948  $\text{cm}^{-1}$  se evidencia el tipo de enlace C-O (Coates, 2000). En la Figura 7A y 7B el espectro del glicerol presento bandas características asociadas a grupos funcionales C-C en 850-995  $\text{cm}^{-1}$ , C-O en 1038  $\text{cm}^{-1}$  y 1110  $\text{cm}^{-1}$ . En la Figura 7A y 7B el espectro de las AuNPs presento 2 bandas características en 1589 y 1403  $\text{cm}^{-1}$  relacionada con los enlaces  $\text{CH}_2\text{-O}$  y C=O. En la Figura 7A y 7B la PC presento bandas intensas asociadas a alginato y glicerol, lo que nos indica la presencia de estos compuestos en la estructura de la PC. En la Figura 7A se presentan los espectros de las PAuNPsQ a diferentes concentraciones, se observa que estos espectros presentan similitud de línea base con PC; sin embargo, la adición de las AuNPsQ trajo un desplazamiento en la banda en 1589  $\text{cm}^{-1}$  banda característica de las AuNPs, este desplazamiento pudiera estar asociado a la interacción entre los componentes (alginato, glicerol) de la PC y las AuNPsQ presentes en PAuNPsQ generando nuevos cambios estructurales en la matriz polimérica de PC, este mismo resultado se evidencio en la Figura 7B para las PAuNPsV a diferentes concentraciones. Este efecto puede derivar en cambios estructurales, lo cual puede contribuir a controlar las propiedades mecánicas y de barrera.



**Figura 7.** Espectros FTIR de alginato, glicerol, AuNPs, PAuNPsQ 1%, PAuNPsQ 5 %, PAuNPsQ 10 % (A), espectros FTIR de alginato, glicerol, AuNPs, PAuNPsV 1 %, PAuNPsV 5 %, PAuNPsV 10% (B) en la región de 2000-700  $\text{cm}^{-1}$ .

## 2.4 CONCLUSIONES

Los resultados sugieren que la adición de AuNPs a las PC indicó que se puede obtener una película activa afectando de manera positiva a las propiedades físicas, mecánicas, de barrera, estructurales. Por otro lado, los resultados de las PAuNPsV demostraron excelentes propiedades antioxidantes debido a la adición de extracto de pulpa de café en su composición aumentando conforme aumentó la concentración, a diferencia de las PC y PAuNPsQ, esto debido a su naturaleza. Por lo que se concluye que las AuNPs son una innovación prometedora ya que tienen el potencial de mejorar el desempeño de las PC para su aplicación como película activa en empaques de productos alimenticios.

## AGRADECIMIENTOS

Agradecemos al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por la beca otorgada (N° 956160) y al Colegio de Postgraduados Campus Córdoba, por el apoyo brindado para el desarrollo y financiamiento de la presente investigación.

## CONFLICTO DE INTERÉS

Los autores han declarado no tener ningún conflicto de intereses para este artículo.

## 2.5 REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- Ahmadi A, Ahmadi P, Alizadeh M S, Ehsani A, Ghanbarzadeh B (2021) Functional biocompatible nanocomposite films consisting of selenium and zinc oxide nanoparticles embedded in gelatin/cellulose nanofiber matrices. *Int. J. Biol. Macromol.* 175 (1): 87-97.
- Alinaqi Z, Kezri A, Razaenia H (2021) Sustained release modeling of clove essential oil from the structure of starch-based bio-nanocomposite film reinforced by electrosprayed zein nanoparticles. *Int. J. Biol. Macromol.* 173 (15):193-202.
- Aristizabal-Gil M V, Santiago-Toro S, Sanchez L T, Pinzon M I, Gutierrez J A, Villa C C (2019) ZnO and ZnO/CaO nanoparticles in alginate films. Synthesis, mechanical characterization, barrier properties and release kinetics. *LTW.* 112: 108217.
- ASTM (2010) E96M-16 Standard test methods for water vapor transmission of materials (ASTM Inter). ASTM International. Available from <http://www.astm.org/cgi-bin/resolver.cgi?E96E96M-16>.
- ASTM (2018) D882-18 Standard test method for tensile properties of thin plastic sheeting (ASTM Inter). ASTM International. Available from <https://www.astm.org/search/fullsite-search.html?query=d882&>
- Bonilla-Nepomuceno G, Gómez-Merino FC, Arcila-Lozano LS, Rojas-López M, Ríos-Corripio MA, Méndez-Rojas MA and Hernández-Cazares AS (2021) Analysis by response surface methodology of gold nanoparticles obtained by green chemical reduction using aqueous coffee pulp extract (*Coffea arabica*). *Can. J. Chem.* 99(6): 519-530.
- Brand-Williams W, Cuvelier M E, Berset C (1995) Use of a free radical method to evaluate antioxidant activity. *LWT - Food Sci. Technol.* 28: 25-30.

- Cala, M M, Vásquez C A, Martínez M J R, Stashenko E E (2007) Caracterización de compuestos fenólicos por electroforesis capilar de la especie *Phyllanthus acuminatus* (Euphorbiaceae) y estudio de su actividad antioxidante. *Scientia et Technica UTP*. 33: 173-175.
- Coates, J. (2000) Interpretation of infrared spectra: A practical approach. *In*: Meyers, R.A., Ed., *Encyclopedia of Analytical Chemistry*, John Wiley & Sons Ltd., Chichester, (p.p.10881-10882).
- Cuvelier, M E, Richard H, Berset C (1992) Comparison of the antioxidative activity of some acid-phenols: Structure-activity relationship. *Biosci. Biotechnol. Biochem.* 56 (2):324-325.
- Duangjai A, Suphrom N, Wungrath, J, Ontawong, A, Nuengchamnong N, Yosboonruang A (2016) Comparison of antioxidant, antimicrobial activities and chemical profiles of three coffee (*Coffea arabica L.*) pulp aqueous extracts. *Integr. Medicina Res.* 4:324-331.
- Escobar, D, Sala A, Silvera C, Harispe R, Márquez R (2009) Películas biodegradables y comestibles desarrolladas en base a aislado de proteínas de suero lácteo: estudio de dos métodos de elaboración y del uso de sorbato de potasio como conservador. *Innotec*. 4: 33-36.
- Filho, de O J G, Rodrigues J M, Valadares A C F, Almeida de A B, Lima de T M, Takeuchi K P, Alves C C F, Sousa de F H A, Silva da E R, Dyszy F H, Egea M B (2019) Active food packaging: Alginate films with cottonseed protein hydrolysates. *Food Hydrocoll.* 92: 267-275.
- Gontard N, Duchez C, Cuq J-L, Guilbert S (1994) Edible composite films of wheat gluten and lipids: water vapour permeability and other physical properties. *Int. J. Food Sci.* 29 (1): 39-50.
- Hanani, Z A N, Cheng F Y, Nor-Khaizura M A R (2019) Effect of pomegranate (*Punica granatum L.*) peel powder on the antioxidant and antimicrobial properties of fish gelatin films as active packaging. *Food Hydrocolloids.* 89: 253-259.
- Han, J H, Floros DJ (1997) Casting antimicrobial packaging films and measuring their physical properties and antimicrobial activity. *Plast. Film Sheeting.* 13(4): 287-298.

- Hermanson G T (2008) Bioconjugate techniques. Academic Press Inc, San Diego. 2<sup>nd</sup> (Ed). (i.e., 1323 p.).
- Jafarzadeh S, Karim A A, Ariffin F, Mahmud S y Najafi A (2016) Preparation and characterization of bionanocomposite films reinforced with nano kaolin, J. Food Sci. Technol. 53:1111-1119.
- Katas H, Lim C S, Azlan A Y H N, Buang F, Busra M F M (2019) Antibacterial activity of biosynthesized gold nanoparticles using biomolecules from *Lignosus rhinocerotis* and chitosan. Saudi Pharm J. 27 (2) 283-292.
- Keijok W J, Pereira R H A, Alvarez L A C, Prado A R, da Silva A R, Ribeiro J, Oliveira J P, Guimarães M C C (2019) Controlled biosynthesis of gold nanoparticles with *Coffea arabica* using factorial design. Sci Rep. 9:16019.
- Kumar S, Shukla A, Pratim P B, Mitra A, Halder D (2018). Biodegradable hybrid nanocomposites of chitosan/gelatin and silver nanoparticles for active food packaging applications. Food Packag. Shelf Life. 16: 178-184.
- Kurek M, Galus S, Debeaufort F (2014) Surface, mechanical and barrier properties of bio-based composite films based on chitosan and whey protein. Food Packag. Shelf Life. 1(1): 56-67.
- Liling G, Di Z, Jiachao X, Xin G, Xiaoting F, Qing Z (2016) Effects of ionic crosslinking on physical and mechanical properties of alginate mulching films. Carbohydr. Polym. 136 (20): 259-265.
- Oliveira, de N G C, Rodríguez L F P, Castro M P A, Giannetti B F and Villas C M, B de A (2018) A framework of actions for strong sustainability. J. Clean. Prod. 196: 1629-1643.
- Pagno, C H, Costa T M H, de Menezes E W, Benvenuti E V, Hertz P F, Mate C. R, Tosati J V, Monteiro A. R, Ríos A.O, Flores S.H (2015) Development of active biofilms of quinoa (*Chenopodium quinoa W.*) starch containing gold nanoparticles and evaluation of antimicrobial activity. Food Chem. 173: 755-762.
- Puligundla P, Jung J, Ko S (2012) Carbon dioxide sensors for intelligent food packaging applications. Food Control. 25 (1): 328-333.

- Ramziia S, Ma H, Yao Y, Wei K, Huang Y (2017) Enhanced antioxidant activity of fish gelatin-chitosan edible films incorporated with procyanidin. *Journal of Applied Polymer Science*. 135: 45781.
- Romani, P V, Hernández C P, Martins V G (2018) Pink pepper phenolic compounds incorporation in starch/protein blends and its potential to inhibit apple browning. *Food Packag. Shelf Life*. 15: 151-158.
- Sebti I, Chollet E, Degraeve P, Noel C, Peyrol E (2007) Water sensitivity, antimicrobial, and physicochemical analyses of edible films based on HPMC and/or chitosan. *J. Agric. Food Chem*. 55(3):693–699
- Siddhesh N P, Edgar K J (2011) Chemical modification of alginates in organic solvent systems. *Biomacromolecules*.12 (11): 4095-4103
- Solano-Doblado L G, Alamilla-Beltrán L, Jiménez-Martínez C (2018) Películas y recubrimientos comestibles funcionalizados. *TIP Rev. Esp. Cienc. Quím. Biol*. 21(2): 30-42.
- Wu J, Sun Q, Huang H, Duan Y, Xiao G, Le T (2019) Enhanced physico-mechanical, barrier and antifungal properties of soy protein isolate film by incorporating both plant-sourced cinnamaldehyde and facile synthesized zinc oxide nanosheets. *Colloids Surf. B: Biointerfaces*. 180 (1): 31-38.

## **CONCLUSIONES GENERALES**

El uso de nanopartículas de oro es ideal para ser incorporada en películas biodegradables, además el método de casting es un método sencillo y eficaz que permite la adición de AuNPsQ obtenidas por el método de reducción y AuNPsV por el método de síntesis verde utilizando un extracto soluble de pulpa de café (*Coffea arabica*) como fuente de compuestos bioactivos. La adición de nanopartículas de oro a las películas biodegradables de alginato de sodio dio como resultado buenas propiedades físicas, mecánicas, de barrera, estructurales. Pero la adición de AuNPsV demostraron excelentes propiedades antioxidantes, las cuales aumentaron conforme se incrementó el contenido de nanopartículas. La literatura menciona que el uso de PC son una opción prometedora para el mantenimiento de la seguridad alimentaria logrando extender la vida de anaquel de los alimentos; pero con la adición de nanopartículas de oro mejora el desempeño de las PC para su aplicación como película activa en empaques de productos alimenticios.

## **RECOMENDACIONES GENERALES**

Para futuras investigaciones se recomienda:

- Realizar ensayos sobre la liberación de las nanopartículas durante el almacenamiento de un producto envasado.
- Evaluar la actividad antimicrobiana del extracto acuoso de pulpa de café para saber si es idóneo para elaborar películas con propiedades antimicrobianas.
- Evaluar las propiedades fisicoquímicas, mecánicas y de barrera a diferentes días de almacenamiento.

## ANEXOS

### A1. Anexos del Capítulo I

#### A.1.1 Obtención del extracto acuoso de la pulpa de café

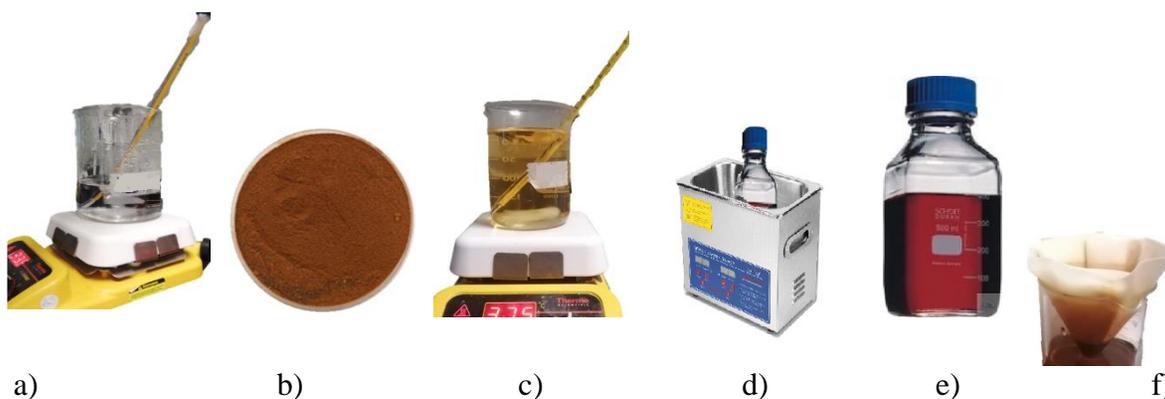


Figura 1. a) Agua destilada, b) Pulpa de café seca y pulverizada, c) Homogenizado de la pulpa de café y el agua (85°C) en agitación constante, d) Sonicado de extracto, e) Filtración del extracto, f) Extracto acuoso de pulpa de café.

#### A.1.2 Síntesis verde de nanopartículas de oro

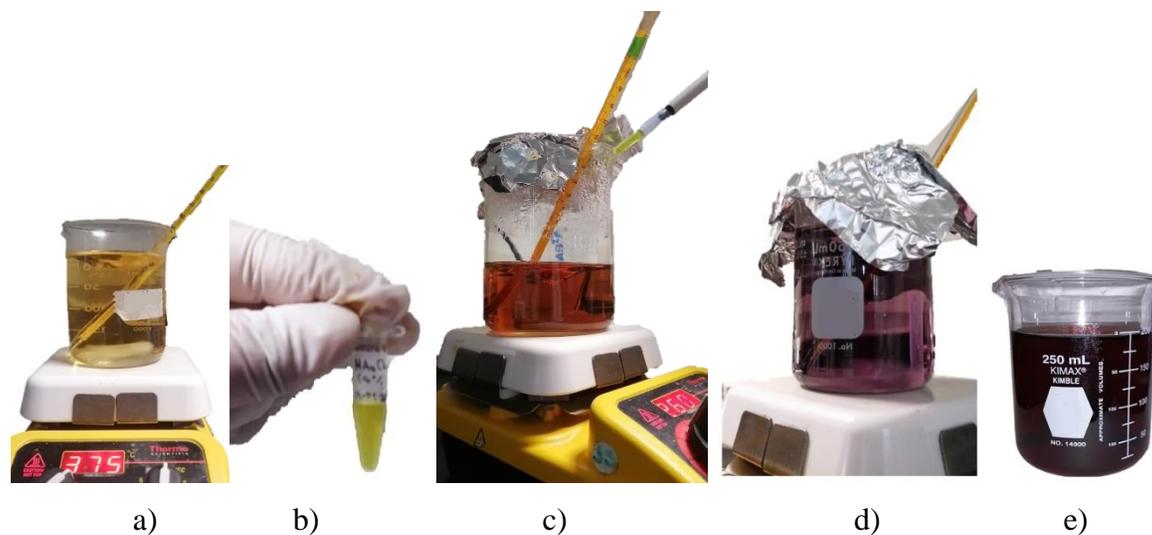


Figura 2. a) Extracto acuoso de pulpa de café, b) Agente precursor al 4% ( $\text{HAuCl}_4$ ), c) Adición de  $\text{HAuCl}_4$ , d) Formación de nanopartículas de oro, e) Suspensión coloidal de nanopartículas de oro.

### A.1.3 Síntesis química de nanopartículas de oro



Figura 3. a) Agua destilada, b) Agente precursor al 4% ( $\text{HAuCl}_4$ ), c) Adición de  $\text{HAuCl}_4$ , d) Agente reductor (citrato de sodio), e) Formación de nanopartículas de oro, f) Suspensión coloidal de nanopartículas de oro.

### A1.4 Tratamiento de AuNPs



Figura 4. a) Centrifugado de muestras, b) Precipitado de AuNPs, c) Lavados continuos de AuNPs con agua destilada, d) Resuspensión de AuNPs en agua destilada.

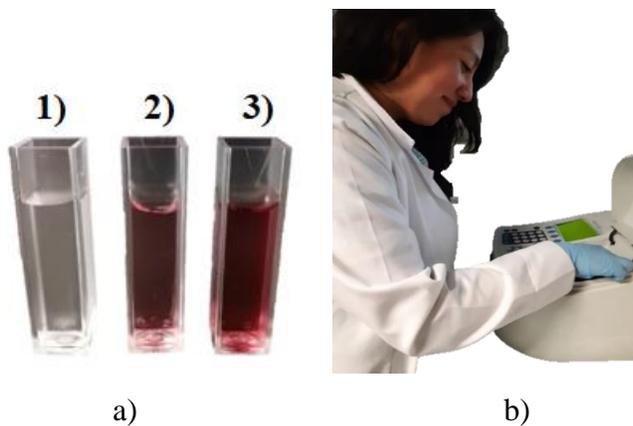


Figura 4.1 Lectura UV de nanopartículas a) (1) agua destilada como blanco 2) síntesis verde de AuNPs 3) Síntesis química de AuNPs), b) Mención en espectralómetro UV.

#### A1.5 Desarrollo de películas biodegradables con nanopartículas (AuNPs)

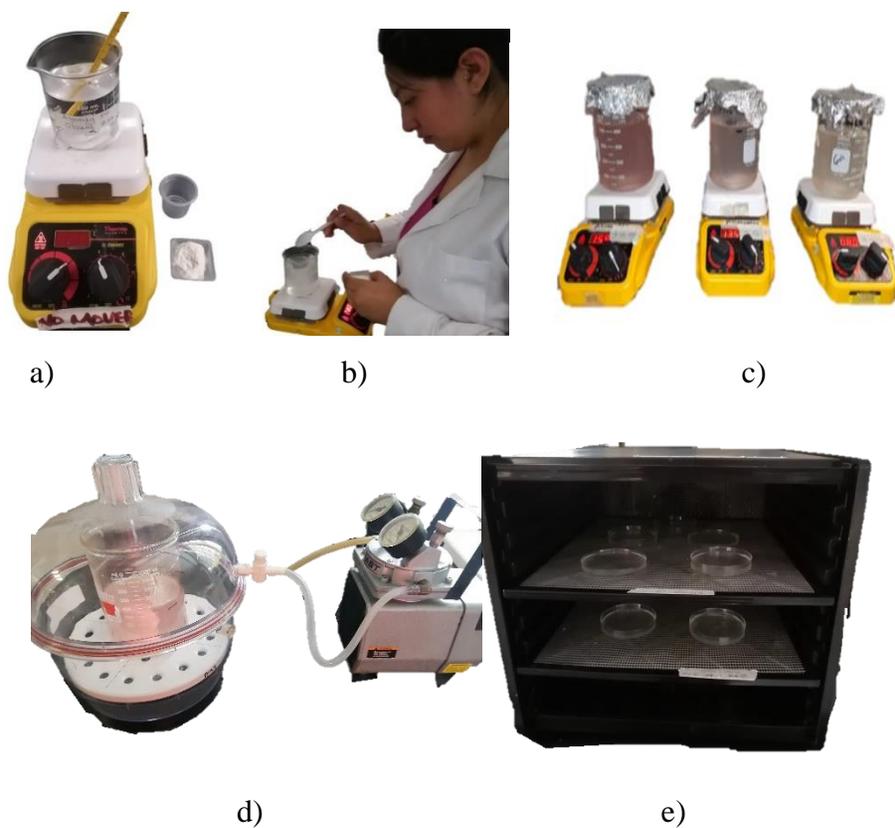


Figura 5. Obtención de películas biodegradables a) Materiales para la formación de la PB b) Adición de alginato c) Solución formadora de PB d) Solución formadora sometida a vacío e) Formación de PB (método de casting)

## A1.6 Caracterización de películas biodegradables con nanopartículas (AuNPs)



Figura 6. Análisis de películas biodegradables a) Espesor b) Propiedades mecánicas c) Humedad d) Solubilidad e) Permeabilidad f) Capacidad antioxidante

## A2. Participación en eventos científicos

### A2.1 Presentación de infografía científica “Uso de nanopartículas de oro para el desarrollo de películas activas” en el 1er Simposio Relacionado a Ciencia e Ingeniería de Materiales.

