

**CENTRO DE INVESTIGACIÓN EN QUÍMICA APLICADA**



**POTENCIALES USOS Y APLICACIONES DEL ÁCIDO  
HIALURÓNICO EN LA AGRICULTURA Y LA POSCOSECHA.**

**CASO DE ESTUDIO**

**PRESENTADO COMO REQUISITO PARA OBTENER EL DIPLOMA DE:**

**ESPECIALIZACIÓN EN QUÍMICA APLICADA**

**OPCIÓN: AGROPLASTICULTURA**

**PRESENTA:**

**EMMANUEL GARCÍA GARCÍA.**

**SALTILLO, COAHUILA DE ZARAGOZA.**

**Diciembre, 2019.**

CENTRO DE INVESTIGACIÓN EN QUÍMICA APLICADA



POTENCIALES USOS Y APLICACIONES DEL ÁCIDO  
HIALURÓNICO EN LA AGRICULTURA Y LA  
POSCOSECHA.

CASO DE ESTUDIO

PRESENTADO COMO REQUISITO PARA OBTENER EL DIPLOMA DE:

ESPECIALIZACIÓN EN QUÍMICA APLICADA  
OPCIÓN: AGROPLASTICULTURA

PRESENTA:

EMMANUEL GARCÍA GARCÍA

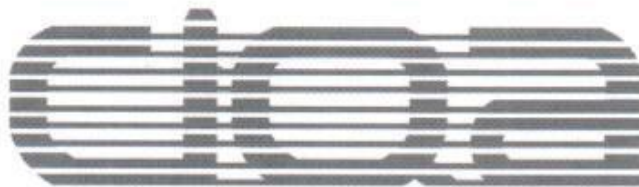
ASESORA:

DRA. LLUVIA DE ABRIL ALEXANDRA SORIANO MELGAR

SALTILLO, COAHUILA DE ZARAGOZA.

Diciembre, 2019.

CENTRO DE INVESTIGACIÓN EN QUÍMICA APLICADA



POTENCIALES USOS Y APLICACIONES DEL ÁCIDO  
HIALURÓNICO EN LA AGRICULTURA Y LA  
POSCOSECHA

CASO DE ESTUDIO

PRESENTADO COMO REQUISITO PARA OBTENER EL DIPLOMA DE:

ESPECIALIZACIÓN EN QUÍMICA APLICADA

OPCIÓN: AGROPLASTICULTURA

PRESENTA:

EMMANUEL GARCÍA GARCÍA

EVALUADORES:

DRA. YOLANDA ORTEGA ORTEGA

DR. ANTONIO CÁRDENAS FLORES

SALTILLO, COAHUILA DE ZARAGOZA.

Diciembre, 2019.

## **AGRADECIMIENTOS**

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT) por la beca otorgada para la realización de los estudios de Especialización en Química Aplicada con opción en Agroplasticultura.

Al Centro de Investigación en Química Aplicada (CIQA), por todas las oportunidades que me dieron, a pesar de mis numerosos fallos, sobre todo a la Dra. Leticia Larios.

A mi padre, el único que siempre ha estado allí para darme la mano.

A la Dra. Lluvia de Abril Soriano Melgar que la admiro mucho.

## ÍNDICE GENERAL

|                                                                            |     |
|----------------------------------------------------------------------------|-----|
| ABREVIATURAS .....                                                         | i   |
| ÍNDICE DE FIGURAS .....                                                    | ii  |
| ÍNDICE DE TABLAS.....                                                      | iii |
| RESUMEN .....                                                              | i2  |
| ABSTRACT .....                                                             | 2   |
| <br>                                                                       |     |
| I. INTRODUCCIÓN .....                                                      | 1   |
| II. REVISIÓN DE LITERATURA .....                                           | 4   |
| II.1. Agricultura. ....                                                    | 4   |
| II.2. Agricultura en México. ....                                          | 4   |
| II.2.1. Principales Productos Hortofrutícolas.....                         | 5   |
| II.2.2. Producción a Nivel Internacional. ....                             | 5   |
| II.2.3. Producción Nacional. ....                                          | 6   |
| II.3. Principales Problemas en la Agricultura. ....                        | 7   |
| II.4. Tratamientos Aplicados en Precosecha.....                            | 8   |
| II.4.1. Fitorreguladores.....                                              | 9   |
| II.4.2. Bioestimulantes. ....                                              | 12  |
| II.4.3. Elicitores.....                                                    | 12  |
| II.5. Tratamientos Aplicados en Poscosecha. ....                           | 14  |
| II.5.1. Recubrimientos.....                                                | 15  |
| II.5.1.1. Quitosano.....                                                   | 16  |
| II.6. Polisacáridos. ....                                                  | 16  |
| II.6.1. Ácido Hialurónico. ....                                            | 18  |
| III. ESTADO DEL ARTE DEL USO DE POLISACÁRIDOS EN LA AGRICULTURA .....      | 21  |
| III.1. Polisacáridos Como Alternativa al Uso de Polímeros Sintéticos. .... | 21  |
| III.2. Aplicaciones de Polisacáridos en la Agricultura. ....               | 21  |
| IV. HIPÓTESIS .....                                                        | 23  |

|                                                                                                            |    |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| V. OBJETIVOS .....                                                                                         | 24 |
| V.1. Objetivo General. ....                                                                                | 24 |
| V.2. Objetivos Específicos.....                                                                            | 24 |
| VI. JUSTIFICACIÓN.....                                                                                     | 25 |
| VII. ÁREAS DE OPORTUNIDAD .....                                                                            | 26 |
| VII.1. Efecto del Ácido Hialurónico en Plantas. ....                                                       | 26 |
| VII.1.1. Ácido Hialurónico como Fitorregulador. ....                                                       | 26 |
| VII.1.2. Ácido Hialurónico como Bioestimulante. ....                                                       | 28 |
| VII.1.3. Efecto sobre el Mecanismo de Respuesta/Defensa de la Planta (Elicitor) del Ácido Hialurónico..... | 32 |
| VII.1.4. Efecto Antioxidante del Ácido Hialurónico en Plantas.....                                         | 36 |
| VII.2. Efecto del Ácido Hialurónico en Poscosecha. ....                                                    | 39 |
| VII.2.1. Ácido Hialurónico como Biocida. ....                                                              | 39 |
| VII.2.2. Ácido Hialurónico como Antioxidante. ....                                                         | 39 |
| VII.3. Posibles Resultados de la Aplicación del Ácido Hialurónico. ....                                    | 41 |
| VIII. CONCLUSIONES .....                                                                                   | 43 |
| IX. REFERENCIAS .....                                                                                      | 44 |

## **ABREVIATURAS**

|         |                                                                                                                                             |
|---------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| AG      | Ácido giberélico o giberelinas.                                                                                                             |
| AH      | Ácido hialurónico.                                                                                                                          |
| AJ      | Ácido jasmónico.                                                                                                                            |
| AS      | Ácido salicílico.                                                                                                                           |
| ET      | Etileno.                                                                                                                                    |
| ERO     | Especies reactivas de oxígeno.                                                                                                              |
| FAO     | Food and Agriculture Organization (por sus siglas en inglés).<br>Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación. |
| OG      | Oligogalacturónidos.                                                                                                                        |
| RSA     | Resistencia sistémica adquirida.                                                                                                            |
| SAGARPA | Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación.                                                               |
| SIAP    | Servicio de información agroalimentaria y pesquera.                                                                                         |
| UV      | Radiación ultravioleta.                                                                                                                     |

## ÍNDICE DE FIGURAS

|                                                                                                                                          |    |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Figura 1.</b> Distribución del territorio nacional. ....                                                                              | 5  |
| <b>Figura 2.</b> Porcentaje de la pérdida generada por eslabón de la cadena alimentaria .....                                            | 8  |
| <b>Figura 3.</b> Estructura química del ácido jasmónico. ....                                                                            | 11 |
| <b>Figura 4.</b> Estructura química del quitosano. ....                                                                                  | 13 |
| <b>Figura 5.</b> Producción de cuerpos protocórmicos y brotes con quitosano en plántulas de <i>Cymbidium dayanum in vitro</i> . ....     | 18 |
| <b>Figura 6.</b> Estructura química del ácido hialurónico mostrando las unidades repetitivas de disacáridos. ....                        | 18 |
| <b>Figura 7.</b> Efecto de a) bencil adenina, b) ácido hialurónico y c) quitosano en explantes de <i>Cymbidium dayanum</i> híbrido. .... | 20 |
| <b>Figura 8.</b> Propuesta del mecanismo de acción del ácido hialurónico como fitorregulador. ....                                       | 28 |
| <b>Figura 9.</b> Efecto del ácido hialurónico en la organogénesis de <i>Cymbidium dayanum</i> . ....                                     | 30 |
| <b>Figura 10.</b> Propuesta del mecanismo de acción del ácido hialurónico como bioestimulante. .                                         | 31 |
| <b>Figura 11.</b> Propuesta del mecanismo de acción del ácido hialurónico como elicitor en plantas. ....                                 | 34 |
| <b>Figura 12.</b> Mecanismo contra patógenos del ácido hialurónico .....                                                                 | 36 |
| <b>Figura 13.</b> Propuesta del mecanismo antioxidante del ácido hialurónico. ....                                                       | 38 |
| <b>Figura 14.</b> Efecto antioxidante de los recubrimientos de ácido hialurónico.. ....                                                  | 40 |
| <b>Figura 15.</b> Modelo general de las acciones del ácido hialurónico en plantas. ....                                                  | 42 |



## ÍNDICE DE TABLAS

|                                                                                                                                                           |    |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Tabla 1.</b> Exportaciones de frutas y hortalizas mexicanas en el mercado mundial. ....                                                                | 6  |
| <b>Tabla 2.</b> Principales cultivos hortofrutícolas producidos por agricultura protegida en México<br>ordenados por su valor de producción. ....         | 7  |
| <b>Tabla 3.</b> Efecto del ácido hialurónico, quitosano y bencil aminopurina en la organogénesis de<br>PLB de cultivos de <i>Cymbidium dayanum</i> . .... | 19 |
| <b>Tabla 4.</b> Efecto de ácido hialurónico, quitosano y N-acetil-D glucosamina en la organogénesis<br>de <i>Cymbidium dayanum</i> . ....                 | 29 |

## RESUMEN

El ácido hialurónico (AH) tiene varias funciones biológicas, tales como: la proliferación y diferenciación celular, y la expresión génica. También ha demostrado ser un regulador del crecimiento más potente que otros compuestos como el quitosano y la N-acetil-D-glucosamina donde, además de producir mayor número de brotes, se requieren concentraciones de hasta 10 veces inferiores a las generalmente empleadas. Asimismo, se ha demostrado que el AH presenta actividad antioxidante *in vivo* e *in vitro* en células animales y vegetales. Por si fuera poco, el AH presenta propiedades elicitoras contra el ataque de diferentes organismos patogénicos, incluyendo virus, en los cultivos de tomate, pepino y pimiento; siendo el AH un elicitor igual de efectivo que el ácido salicílico (AS) y el ácido jasmónico (AJ). Los mecanismos de acción del AH en plantas aún se desconocen. El ácido D-glucurónico que está presente en los dímeros que conforman la estructura del polímero, son monómeros análogos de los oligogalacturónidos (OG) obtenidos de fuentes vegetales y podría ser responsable de otorgarle la actividad biología al AH, ya que estas propiedades también están presentes en los OG. Los OG se encargan de desencadenar las reacciones de defensa en las plantas, por lo cual en este estudio nos centraremos en las similitudes entre OG y AH para explicar los mecanismos de acción del AH. Por todo lo anterior, se propone al AH como una alternativa económica, ecológica y efectiva al uso de sustancias químicas que son menos amigables con el medio ambiente. Así, el uso del AH podría solucionar una parte de los problemas actuales de la agricultura como los patógenos resistentes a los pesticidas y las pérdidas poscosecha.

## ABSTRACT

Hyaluronic acid (HA) has several biological functions, such as cell proliferation and differentiation, and gene expression. It has also proven to be a more potent growth regulator than other compounds such as chitosan and N-acetyl-D-glucosamine where, in addition to producing more shoots, concentrations up to 10 times lower than those generally used are required. Likewise, it has been demonstrate that HA presents antioxidant activity *in vivo* and *in vitro* in animal and vegetable cells. On top of that, the HA has elicitor properties against the attack of different pathogenic organisms, including viruses in tomato, cucumber and pepper crops; the HA being an elicitor as effective as salicylic acid (AS) and jasmonic acid (AJ). The mechanisms of action of HA in plants are still unknown. The D-glucuronic acid that is present in the dimers that make up the structure of the polymer, are monomers analogous to oligogalacturonides (OG) obtained from plant sources and could be responsible for giving biological activity to HA, since these properties are also present in the OG. The OG are responsible for triggering the defense reactions in plants, so in this study we will focus on the similarities between OG and AH to explain the mechanisms of action of HA. For these reason, the HA was propose as an economic, ecological and effective alternative to the use of chemicals that are less friendly to the environment. Thus, the use of HA could solve part of the current agricultural problems such as pesticide resistant pathogens and postharvest losses.

## I. INTRODUCCIÓN

El ácido hialurónico o hialuronano (AH) es un polímero compuesto por ácido D-glucurónico y N-acetil-D-glucosamina, el cual pertenece al grupo de poliaminosacáridos, en donde se encuentran otros compuestos más conocidos como la quitina y el quitosano (Mehraj y Shimasaki, 2017). Estos compuestos están presentes en crustáceos, moluscos, insectos, así como, en bacterias y hongos (Struszczyk, 2002). Por si fuera poco, el AH está presente en casi todos los fluidos y tejidos biológicos del cuerpo humano, por lo que es utilizado como marcador diagnóstico en diversas enfermedades, así como, en la regeneración cosmética de tejidos de la piel, los ojos y diversos tejidos a los cuales se les haya realizado alguna cirugía (Slotés *et al.*, 2006; Neuman *et al.*, 2015); siendo más eficaz el AH que la quitina y el quitosano en procesos de cicatrización y tratamientos posquirúrgicos (Struszczyk, 2002). Existen sorprendentes paralelismos entre los oligogalacturónidos (OG) y los fragmentos del AH que se encuentran en las células animales (Ferrari *et al.*, 2013).

Éste compuesto ha sido ampliamente estudiado desde el año de su descubrimiento en 1880, pero con un repunte desde el año de su síntesis en 1934. Apareciendo desde entonces en múltiples investigaciones y patentes, las cuales superan las 142,575 apariciones en publicaciones y las 19,288 en patentes (Fallacara *et al.*, 2018). Por lo que se ha demostrado que el AH tiene varias funciones biológicas, incluyendo la proliferación y diferenciación celular y la expresión génica con diferentes aplicaciones en el campo industrial y en la biomedicina (Slotés *et al.*, 2007). Además, se ha demostrado que el AH presenta actividad antioxidante *in vivo* e *in vitro* en células animales (Ke *et al.*, 2011). Recientemente, uno de los derivados del ácido jasmónico (AJ), el ácido tetrahydro-jasmónico (LR2412), ha mostrado un potencial antienvjecimiento en el caso de la piel humana (Michelet *et al.*, 2012). Por lo que se sabe que el LR2412 aumenta la expresión de las enzimas hialuronasa sintasa 2 (HAS2) y 3 (HAS3), lo que aumenta la síntesis de AH en la piel (Michelet *et al.*, 2012). El AJ y el AH también han sido estudiados por sus efectos en plantas, principalmente el AJ, ya que es un conocido elicitador de plantas.

El AH fue reportado como un elicitor por Wu y Zhou (2006), quienes mencionan que éste compuesto mejora la producción de metabolitos secundarios en el cultivo de tejidos vegetales. Además, éste actúa como regulador del crecimiento en las plantas, ya que se ha reportado que el número de brotes se modifica con la presencia del AH, en donde a menores concentraciones se obtiene una mayor proliferación (Kaewjampa *et al.*, 2012; Mehraj y Shimasaki, 2017). Reportándose que se requiere una concentración al menos diez veces menor al de los fitorreguladores convencionales para la obtención de brotes laterales (Kaewjampa *et al.*, 2012). Al igual que algunas oligosacarinas, la actividad biológica del AH en las plantas depende de su tamaño, por lo que sus efectos están relacionados con el peso molecular del compuesto (Mehraj y Shimasaki, 2017).

Park *et al.*, (2008) es el primer y único reporte que incluye el uso del AH como elicitor en plantas en campo y su efecto contra el ataque de diferentes organismos patogénicos, incluyendo virus. Así, Park *et al.*, (2008) han demostrado el potencial que tiene este compuesto químico contra el ataque del virus del mosaico (CMV), enfermedades del tomate por *Pseudomonas syringae* pv. y *Xanthomonas axonopodis* pv., mancha angular por *Pseudomonas syringae* pv. *lachrymans* y *antracnosis* por *Colletotrichum orbiculare* en pimiento. Los resultados reportados por Park *et al.*, (2008) indican que el AH *per se* no muestra acción antimicrobiana directa contra los patógenos, sino que tiene una acción sobre el incremento de los mecanismos de defensa de la planta al comprobar que el AH incrementa la transcripción de genes de defensa. Estos mismos genes se activan cuando se aplican otros elicitores en las plantas (como el ácido salicílico y el AJ). Así, el AH presenta acciones similares a otros elicitores (Park *et al.*, 2008).

Kaewjampa *et al.*, (2012) y Kamal *et al.*, (2014) indicaron que el AH puede ser un nuevo regulador de crecimiento en plantas, ya que ellos obtuvieron una mayor proliferación de cuerpos protocórmicos (PLB) en plántulas de orquídeas *in vitro* en comparación con fitorreguladores convencionales [bencil aminopurina o bencil adenina (BAP o BA) y auxinas como el ácido naftalenacético (ANA)]. Esto ha sido reafirmado recientemente por Sultana *et al.*, (2015) y Mehraj y Shimasaki, (2017) en plántulas de *Phalaenopsis in vitro*. Además, entre los diferentes

modos de aplicación del AH, se ha reportado que la aplicación vía *drench* es más efectiva que la aplicación por inyección y por asperjado (Park *et al.*, 2008).

Por todo lo anterior, se conoce la acción de elicitor del AH en las plantas contra diferentes factores bióticos y su efecto en la proliferación de plantas *in vitro*. Sin embargo, este no se ha explotado en mayor medida. Además, el AH es un tema muy atractivo para la biotecnología desde varios puntos de vista, tanto de las diferentes fuentes de donde se puede obtener el AH, hasta de la forma de preparación del compuesto, con las características moleculares y propiedades adecuadas para poder obtener resultados deseados (Slotes *et al.*, 2006). Por lo que el AH puede ser obtenido como un subproducto de desecho, en donde las fuentes más empleadas a la fecha son: a partir de las crestas de gallos y por fermentación bacteriana. Es por ello que, la propuesta de caso de estudio involucra el determinar si el AH tiene un potencial real en la agricultura, así como, si éste compuesto puede ser aplicado como tratamiento en el área poscosecha; siendo esta última un área no explorada.

## II. REVISIÓN DE LITERATURA

### II.1. Agricultura.

Hoy en día la agricultura enfrenta dos grandes desafíos a nivel mundial: el gran uso de recursos y el impacto ambiental debido a prácticas de producción de alimentos insostenibles (Rivas y Galicia, 2017). El cambio climático está poniendo en riesgo la producción de alimentos, además los agroquímicos y los pesticidas han impactado negativamente sobre la fauna silvestre y los polinizadores (Altieri, 2012). Por si fuera poco, la contaminación del agua por nitratos y fosfatos han generado la proliferación de algas que suprimen otras formas de vida (Hamilton *et al.*, 2018). Los agroquímicos también son la mayor fuente de metano y óxido nitroso, gases responsables del efecto invernadero (Altieri, 2012). Por lo anterior, cada vez es más necesario buscar un enfoque ecológico en las prácticas agrícolas. Para ello, la aplicación de biofertilizantes como bacterias, hongos y los derivados de éstos ha resultado muy positivo para fertilizar de manera orgánica diversos cultivos e incrementar la producción agrícola (Tripathy y Ayyappan, 2005). Esto será necesario aplicarlo, ya que se prevé que para el año 2050 la población mundial alcance los 9.7 mil millones de personas, por lo cual es necesario incrementar la producción de alimentos un 50 % al que se obtiene actualmente (SAGARPA, 2017).

### II.2. Agricultura en México.

México tiene como territorio 198 millones hectáreas (ha) (Figura 1) de la cual el área destinada a la agricultura ocupa 27.8 millones ha<sup>2</sup>, aproximadamente el 15 % de la superficie del país (INEGI-SAGARPA, 2015). Es debido al clima y a la topografía del territorio nacional que solo esta pequeña fracción del territorio es apta para fines agrícolas. Sólo el 21 % de la superficie agrícola es de riego y se concentra en el noroeste del país (Johnson *et al.*, 2009). Al sur es donde está más del 60 % de los recursos para la agricultura, la cual carece de infraestructura hídrica y tecnología para aprovecharlos correctamente (Johnson *et al.*, 2009). El 58 % de la superficie se utiliza para el pastoreo y los bosques ocupan el 34 % del país, el resto del territorio son los asentamientos humanos (Johnson *et al.*, 2009).



Figura 1. Distribución del territorio nacional según categorías de uso de terreno. Fuente: INEGI-SAGARPA, (2015).

### II.2.1. Principales Productos Hortofrutícolas.

A pesar de que en México el cultivo hortofrutícola solo ocupa el 12.1 % de la superficie cosechada total nacional, es un sector que presenta rendimientos muy altos, tanto que ha superado la siembra de granos, en gran medida gracias al mercado estadounidense que es el principal cliente de nuestro país (Macías, 2010). El rendimiento hortofrutícola promedio es de 19.7 TM ha<sup>-1</sup> mientras que el rendimiento de granos y oleaginosas es de 3.48 TM ha<sup>-1</sup> (Cruz *et al.*, 2013). Además del mayor rendimiento, las hortalizas han adquirido un gran valor en mercados nacionales e internacionales y México ocupa el tercer lugar mundial en exportación de hortalizas y el octavo en frutos comestibles, siendo el mayor productor de algunas hortalizas de América latina; dichas hortalizas son el pimiento, el tomate y el aguacate (Macías, 2010). Actualmente, México es uno de los países que más exportan estos productos gracias al proceso de apertura comercial iniciado en la década de 1990 (Cruz *et al.*, 2013).

### II.2.2. Producción a Nivel Internacional.

A lo largo de los últimos 20 años, México se ha convertido en un importante proveedor de frutas y verduras en el mercado internacional (Van den Broeck y Maertens, 2016). Las principales exportaciones son: 1) jitomate, que es el más rentable de todas las exportaciones; 2) el aguacate, del cual México es el principal productor mundial; 3) pimiento morrón y chile



verde. También la caña de azúcar y el café son de gran importancia económica para el país (SIAP, 2013). Otros cultivos de importancia son el pepino y la calabaza, de los cuales el 70 % de la producción se exporta a los Estados Unidos de América (EUA) (SAGARPA, 2017). México está en el octavo lugar en la producción mundial de tomate y su mayor cliente es EUA seguido por Canadá y los demás países del TLCAN (Cruz *et al.*, 2013).

Las principales frutas cultivadas en México para su consumo a nivel internacional son el aguacate, la lima ácida, la papaya, la naranja, la frambuesa, la fresa y la toronja (Macías, 2009). Mientras que las verduras producidas en México más importantes para el consumo internacional son el chile, el ejote, la cebolla, la calabaza, el espárrago, el tomate, el brócoli y la coliflor (Macías, 2009) (Tabla 1).

Tabla 1. Exportaciones de frutas y hortalizas mexicanas en el mercado mundial.

| Rubro      | % de las exportaciones hortícolas de México |       | % de las exportaciones mundiales |       | Ranking en el mundo |      | % de exportaciones a EUA entre total exportado |       |
|------------|---------------------------------------------|-------|----------------------------------|-------|---------------------|------|------------------------------------------------|-------|
| Año        | 2001                                        | 2008  | 2001                             | 2007  | 2001                | 2007 | 2001                                           | 2007  |
| Frutas     | 25.01                                       | 35.23 | 2.80                             | 3.25  | 10°                 | 9°   | 88.31                                          | 84.73 |
| Hortalizas | 74.99                                       | 64.77 | 9.36                             | 8.09  | 3°                  | 4°   | 94.35                                          | 95.96 |
| Tomate     | 18.08                                       | 21.46 | 17.47                            | 16.26 | 3°                  | 3°   | 99.64                                          | 99.50 |
| Aguacate   | 2.65                                        | 11.19 | 22.96                            | 46.39 | 1°                  | 1°   | 50.56                                          | 72.87 |
| Pimiento   | 14.32                                       | 10.87 | 23.84                            | 17.65 | 3°                  | 3°   | 99.84                                          | 99.69 |
| Cebolla    | 5.61                                        | 5.73  | 16.68                            | 10.22 | 2°                  | 3°   | 92.93                                          | 90.55 |
| Pepino     | 6.48                                        | 5.66  | 20.75                            | 21.84 | 3°                  | 3°   | 99.75                                          | 100   |
| Sandía     | 2.41                                        | 5.73  | 16.68                            | 10.22 | 2°                  | 3°   | 9.89                                           | 99.99 |
| Fresa      | 1.45                                        | 2.44  | 5.68                             | 7.47  | 6°                  | 5°   | 97.33                                          | 99.62 |
| Melón      | 2.67                                        | 1.80  | 10.57                            | 6.49  | 3°                  | 7°   | 99.90                                          | 99.78 |
| Papaya     | 0.97                                        | 1.06  | 24.77                            | 29.20 | 1°                  | 1°   | 99.92                                          | 99.78 |

Fuente: IMEGI-BIE (2010).

### II.2.3. Producción Nacional.

La amplia variedad de tipos de suelo y climas en el territorio nacional, permite una producción agrícola (Tabla 2) para una gran variedad de productos de las cuales el maíz, el frijol y el chile conforman la base de la dieta mexicana (Sosa, 2017). Los principales cultivos que se producen bajo agricultura protegida son: el tomate (70 %), el pimiento (16 %) y el pepino (10 %) (SIAP, 2013). Los cinco frutales más importantes de la producción agrícola nacional son: el aguacate, la lima ácida, la naranja, el plátano y la nuez (SIAP, 2013). Las cinco hortalizas principales son: el chile verde, el tomate rojo, el espárrago, la cebolla y el pepino (SIAP, 2013).

Tabla 2. Principales cultivos hortofrutícolas producidos por agricultura protegida en México ordenados por su valor de producción.

| Grupo de cultivos | Producto     | Valor de la producción (%) | Superficie sembrada (%) |
|-------------------|--------------|----------------------------|-------------------------|
| Frutas            | Aguacate     | 21.1                       | 8.6                     |
|                   | Plátano      | 8.5                        | 5.7                     |
|                   | Limón        | 7.4                        | 10.6                    |
|                   | Naranja      | 7.2                        | 24.3                    |
|                   | Mango        | 7.2                        | 12.9                    |
|                   | Uva          | 6.4                        | 1.3                     |
|                   | Nuez         | 5.2                        | 5.5                     |
|                   | Manzana      | 4.8                        | 4.4                     |
|                   | Papaya       | 4.5                        | 1.5                     |
|                   | Sandia       | 3.9                        | 3.4                     |
| Hortalizas        | Tomate rojo  | 28.4                       | 10.8                    |
|                   | Chile verde  | 25.8                       | 26.2                    |
|                   | Cebolla      | 9.9                        | 7.9                     |
|                   | Tomate verde | 6.0                        | 8.9                     |
|                   | Esparrago    | 4.3                        | 2.4                     |
|                   | Calabacita   | 4.0                        | 5.1                     |
|                   | Pepino       | 3.3                        | 2.9                     |
|                   | Brócoli      | 2.5                        | 3.7                     |
|                   | Elote        | 2.4                        | 11.4                    |
|                   | Zanahoria    | 1.8                        | 2.5                     |

Fuente: Cruz *et al.*, (2013).

### II.3. Principales Problemas en la Agricultura.

Las prácticas que se han utilizado desde hace 60 años en todo el mundo para proteger los cultivos e incrementar su productividad, tales como: el uso de pesticidas y de fertilizantes, han resultado poco sustentables debido a la contaminación provocada por su acumulación (Badawy y Rabea, 2011). En conjunto con el cambio climático y el incremento de la población, son los principales problemas a los que se enfrenta el sector agrícola en la actualidad (Merino *et al.*, 2018). Los pesticidas han resultado ineficaces por la aparición de nuevas variedades de patógenos resistentes a estos compuestos, por lo cual son necesarias nuevas alternativas como los productos biológicos para el control de plagas y enfermedades en los cultivos, así como, el uso de moléculas inductoras de defensa en la planta llamadas elicitores (García *et al.*, 2018).

Otro problema de la agricultura son las pérdidas poscosecha, que es la forma en la que se denomina a aquellas pérdidas que se producen después de la cosecha y antes de que el producto llegue al consumidor (Lipinski *et al.*, 2013). Según la FAO, entre el 15 % y el 50 %

de la producción hortofrutícola se pierde en poscosecha, por lo tanto, esto representa una pérdida económica importante (Arias y Moors, 2018). Éstas ocurren debido a que los alimentos se descomponen antes de que puedan ser consumidos, ya sea por un almacenamiento o una distribución inadecuadas (Figura 2) (Gustavsson *et al.*, 2018). Por ello, es esencial almacenar los alimentos frescos de manera que se retrase su descomposición para incrementar su disponibilidad, para así poder abastecer de alimentos a la población (Arias y Moors, 2011). Las causas de las pérdidas poscosecha también son socioeconómicas, ya que una parte de la población no puede acceder a los alimentos por su costo elevado, por lo tanto, los productos no están disponibles para ellos (Lipinski *et al.*, 2013). Los costos de los alimentos se elevan como resultado de que los alimentos deben ser trasladados hasta las localidades donde serán consumidos (Arias y Moors, 2018). Reducir las pérdidas poscosecha podría ahorrar los recursos económicos de los agricultores y las empresas, aumentar la disponibilidad de alimentos y reducir la presión sobre los recursos naturales necesarios para cultivar alimentos (Arias y Moors, 2018).

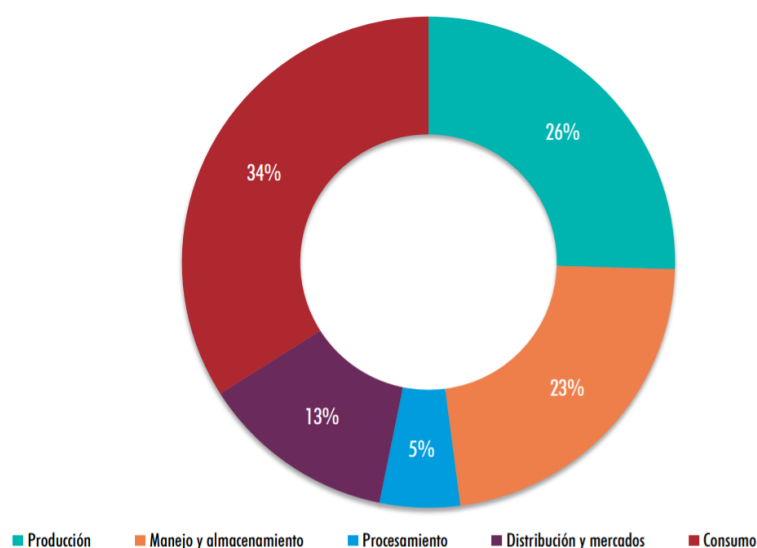


Figura 2. Porcentaje de la pérdida generada por eslabón de la cadena alimentaria. Fuente: FAO (2013).

#### II.4. Tratamientos Aplicados en Precosecha.

Los tratamientos precosecha son aquellos que se aplican al cultivo antes del corte de los frutos y que están orientados a retrasar la maduración del producto (Osuna-Enciso, 2012). Su objetivo también puede ser mejorar la calidad, el diámetro, el peso del fruto, el color y/o la firmeza (Giménez *et al.*, 2015). La maduración de los frutos define el color, la textura, el aroma y el sabor de los frutos, y es un conjunto de procesos bioquímicos y fisiológicos que están programados genéticamente (Raghav *et al.*, 2016). Estos procesos pueden ser modificados mediante los tratamientos precosecha que se le apliquen al cultivo ya que, después de la cosecha, la calidad y el estado general de los productos no puede ser modificado (Osuna-Enciso, 2012). Estos tratamientos constan de la aplicación de diferentes sustancias químicas; una de la más empleadas es el Etefón que libera etileno (ET), uniformando la maduración de frutos climatéricos (Osuna-Enciso, 2012).

Otro regulador de crecimiento utilizado en tratamientos precosecha es el ácido giberélico (AG), que en interacción con cera de carnauba aplicada poscosecha logra retrasar la maduración bajo condiciones de refrigeración en frutos de lima ácida (Álvarez *et al.*, 2010). El metil salicilato (MeSa) aplicado a cultivos de cerezos en precosecha retrasa el proceso de maduración en la poscosecha, por lo cual es utilizado para conservar la calidad durante el almacenamiento de los frutos (Giménez *et al.*, 2015). La mezcla del AG con cloruro de calcio ( $\text{CaCl}_2$ ) retrasa el deterioro de frutos durante su almacenamiento (Osuna-Enciso, 2012). Las aplicaciones foliares de  $\text{CaCl}_2$  en precosecha también pueden estar enfocados a obtener una mejor respuesta de la planta ante enfermedades, ya que las plantas con mayor concentración de calcio en sus tejidos muestran menos desarrollo de bacterias, tales como: *Erwinia carotovora pv atroseptica* y el hongo *Colletotrichum gloeosporoides* (Saborio *et al.*, 2000).

Los tratamientos poscosecha también pueden retrasar el deterioro de los productos, pero el hecho de que los cultivos respondan positivamente a los tratamientos poscosecha depende en gran medida de los tratamientos precosecha que se hayan aplicado (Osuna-Enciso, 2012).

#### **II.4.1. Fitorreguladores.**

Las fitohormonas u hormonas vegetales son moléculas producidas por las células vegetales y tienen las funciones de regular el crecimiento de las plantas (Santner y Estelle,

2009). También tienen la función de regular los procesos de señalización respuesta al estrés biótico y abiótico. Estas respuestas de defensa de las plantas están mediadas por tres vías principales de las fitohormonas: AJ, ácido salicílico (AS) y ET. La intensidad de la respuesta de la planta al estrés depende de las interacciones sinérgicas o antagónicas entre estas tres vías (Ahmad *et al.*, 2015).

Las fitohormonas como auxinas, citoquininas, AG y ET, también pueden ser sintetizadas por microorganismos beneficiosos. Estas hormonas vegetales regulan múltiples procesos fisiológicos que incluyen la iniciación de la raíz, el alargamiento de la raíz y la formación de pelos radicales (Calvo *et al.*, 2014).

El ET conocido principalmente como la hormona de la maduración es una hormona gaseosa producida en las plantas, que está involucrada en la regulación de procesos biológicos como el crecimiento y el desarrollo de la planta, la germinación de semillas, el crecimiento y el desarrollo de brotes y raíces, y la senescencia foliar (Li *et al.*, 2018). Este fitorregulador incrementa la biosíntesis de auxinas, además interacciona con otras fitohormonas como la citoquinina, el ácido abscísico, la AG, el AS y el AJ en la regulación de diferentes procesos de desarrollo. Sin embargo, los efectos del ET sobre la biosíntesis y el contenido de estas hormonas aún no se comprenden completamente (Li *et al.*, 2018).

El AS es un ácido orgánico que actúa como fitohormona, sus funciones son regular procesos fisiológicos y bioquímicos de la planta como el crecimiento, el desarrollo, la fotosíntesis, la transpiración, la absorción de iones y el aumento de la resistencia de la planta ante estrés abiótico como metales pesados, previene los daños causados por el estrés oxidativo al aumentar la producción de antioxidantes (Rostami y Rostami, 2019). Otra función de esta fitohormona es prevenir la descomposición de la hormona auxina (Rostami y Rostami, 2019).

Los jasmonatos, el AJ y su estereoisómero (+) -7-iso-AJ (Figura 3) son ácidos grasos cíclicos que principalmente estimulan la senescencia de las hojas, pero también regulan diversos procesos de desarrollo como la germinación de semillas, el crecimiento de raíces, el gravitropismo, la formación de tricomas, el desarrollo de embriones, la determinación del sexo (en maíz), la fertilidad, el desarrollo de plántulas, la formación de tubérculos (indirectamente a

través de la interferencia con la señalización de AG) y la maduración de los frutos (Ahmad *et al.*, 2015). También se ha descubierto que participan en la defensa contra el estrés abiótico porque se acumulan en las plantas en respuesta a la exposición a estrés salino, heridas, sequía, radiación ultravioleta (UV), ozono y la exposición a inductores como quitinas y OG (Browse y Howe, 2008). Por si fuera poco, también participan en la respuesta al estrés biótico de manera indirecta, ya que estimulan la emisión de compuestos volátiles (el metil jasmonato y cis-jasmona que atraen a miembros de los parasitoides de insectos *Braconidae* y *Sarcophagidae* en cultivos) y de manera directa con la biosíntesis de proteínas de defensa en las plantas luego del ataque de los herbívoros (Ahmad *et al.*, 2015). La activación completa de las respuestas de defensa reguladas por esta vía requiere de ET para activarse (Ferrari *et al.*, 2013).

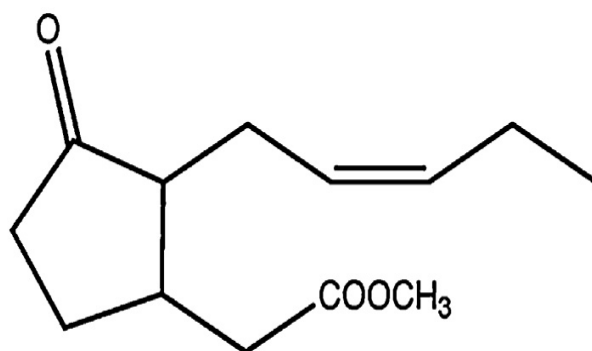


Figura 3. Estructura química del ácido jasmónico. Fuente: Ahmad *et al.*, (2015).

Las AG son fitohormonas que poseen una serie de efectos fisiológicos, tales como: la eliminación de la latencia de las semillas, la mejora de los rendimientos de los cultivos, la promoción de la producción de frutos y la inducción de la floración en algunas plantas (Santner y Estelle, 2009). Promueven la división celular y su presencia se asocia con activos procesos de crecimiento (Santner y Estelle, 2009).

El ácido abscísico (ABA), participa principalmente en la regulación de la abscisión de hojas y frutos, así como, la latencia de brotes y semillas. Además, está relacionado con la respuesta de las plantas al estrés abiótico, por ejemplo: el estrés por frío y/o estrés hídrico. El ABA también se utiliza como inhibidor del crecimiento en explantes (Teixeira da Silva, 2014).

#### **II.4.2. Bioestimulantes.**

Los bioestimulantes de plantas son sustancias, microorganismos o una mezcla de ambas que cuando se aplican a las plantas, semillas o la rizósfera tienen la función de promover el crecimiento mediante alguno de los siguientes mecanismos: estimular los procesos naturales para mejorar la captación, asimilación y translocación de nutrientes, incrementar la tolerancia al estrés abiótico, y mejorar la calidad de los cultivos al incrementar atributos como el contenido de azúcar, tamaño y color (Calvo *et al.*, 2014). Al aumentar la tasa de fotosíntesis neta, puede aumentar el crecimiento de las plantas (Rostami y Rostami, 2019).

Algunos microorganismos como los hongos micorrízicos, las bacterias *Rhizobium* y las bacterias promotoras del crecimiento de las plantas (PGPR), producen cambios en los beneficiarios y estimulan el crecimiento de las plantas a través de mecanismos directos o indirectos (Sharma *et al.*, 2019). Una de estas rizobacterias es *Klebsiella* spp que mejora parámetros como el peso fresco, el número de vainas y también disminuye la infección por hongos fitopatógenos como *Aspergillus flavus* en cultivos de cacahuete bajo condiciones de campo (Sharma *et al.*, 2019). La aplicación de bioestimulantes es un enfoque eficiente y ecológico para mejorar parámetros de calidad en cultivos, pero es importante evaluar la reproducibilidad de los efectos de éstos en diferentes tipos de suelo y condiciones ambientales (Calvo *et al.*, 2014).

#### **II.4.3. Elicitores.**

Los elicitores son sustancias de diversas fuentes, tanto inorgánicos como orgánicos, que pueden inducir la activación de respuestas defensivas y la acumulación de fitoalexinas en el organismo al cual son aplicados, para así minimizar los daños y también para conservar recursos que le permitan a la planta continuar su desarrollo y crecimiento (García *et al.*, 2018). Estas moléculas ayudan a reducir el tiempo necesario para alcanzar las concentraciones óptimas de metabolitos que protegen a la planta ante el estrés (Nahar *et al.*, 2015).

El uso de elicitores es una alternativa prometedora porque existe una amplia variedad de moléculas inductoras que se generan de manera natural dentro de la misma planta, que pueden utilizarse como inductores de la respuesta inmune (Jin y West, 1984). Sin embargo, es necesario

elegir un inductor adecuado, ya que la eficacia y la magnitud de la respuesta inducida depende de la capacidad de la molécula para inducir la señalización en un tejido específico (García *et al.*, 2018).

Un elicitador muy utilizado es el quitosano (Figura 4), ya que tanto el quitosano como sus productos de degradación poseen propiedades antifúngicas y antivirales (Struszczyk, 2002). El quitosano puede estimular los sistemas de defensa de las plantas, por ejemplo, la acumulación de fitoalexinas, proteínas relacionadas con patógenos e inhibidores de la proteínasa, síntesis de lignina y formación de callos en respuesta a las infecciones microbianas (Teixeira da Silva *et al.*, 2012). El quitosano también se ha utilizado para la síntesis de sistemas de liberación controlada de agroquímicos (Teixeira da Silva *et al.*, 2012).

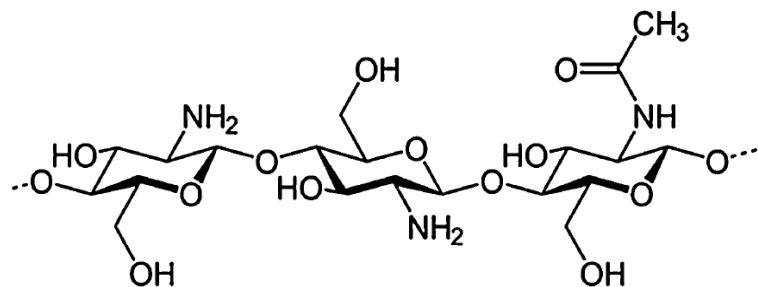


Figura 4. Estructura química del quitosano. Fuente: Merino *et al.*, (2018).

La aplicación de algunos extractos vegetales promueve la inducción de resistencia en las plantas tratadas, asimismo, tienen un efecto sobre el crecimiento y el desarrollo del patógeno, como se ha demostrado contra la enfermedad causada por *Fusarium oxysporum* f. sp. *Lycopersici* (García *et al.*, 2018). Los fragmentos pépticos de la pared celular de la planta también pueden servir como intermediarios en la provocación de la respuesta inmune. Estos fragmentos pépticos contienen galacturónidos que son los responsables de la actividad elicitora (Jin y West, 1984). Los oligómeros del galacturonosilo liberados de las paredes celulares de las plantas tras la degradación pueden provocar una amplia gama de respuestas de defensa, incluida la acumulación de especies reactivas de oxígeno (ERO), proteínas relacionadas con la patogénesis, la acumulación de fitoalexinas y óxido nítrico, y así protegen a las plantas contra las infecciones por patógenos (Ferrari *et al.*, 2013). Por ejemplo, el uso de extracto de alga verde



común (*Ulva intestinalis*) estimula el crecimiento de raíces en *Arabidopsis thaliana* y también ayudan a mejorar la floración y la defensa contra patógenos (Ghaderiardakani *et al.*, 2019).

El AH, un componente de la matriz extracelular animal, es otro polianion que también se ha utilizado como elicitador abiótico en la micropropagación de híbridos de *Cymbidium in vitro* (Kaewjampa *et al.*, 2012). También ha demostrado ser un potente agente para suprimir enfermedades como *Pseudomonas syringae* pv. Lachrymans y *Colletotrichum orbiculare* en pepinos, *Pseudomonas syringae* pv. y *Xanthomonas axonopodis* pv. vesicatoria en tomates y virus del mosaico (CMV) en pimiento (Park *et al.*, 2008). La descomposición del hialuronano en la lesión tisular o la infección por patógenos, activa el sistema inmunitario innato de los vertebrados (Ferrari *et al.*, 2013). Los paralelismos que existen en la estructura química de la pectina y sus OG de plantas vegetales con los fragmentos de AH que se encuentran en las células animales, podrían ser los responsables de la actividad elicitora del AH (Ferrari *et al.*, 2013).

## **II.5. Tratamientos Aplicados en Poscosecha.**

Los factores de calidad importantes para la comercialización de los productos frescos son la textura, el color, la apariencia, el sabor, el valor nutricional y la seguridad microbiana (Raghav *et al.*, 2016). En poscosecha se aplican técnicas que frenan el metabolismo: como la refrigeración sin llegar a congelar, ni al umbral de sensibilidad a los daños por frío. Además, se emplean condiciones de humedad relativa elevada, sin que condense agua sobre los productos y, por último, renovar el ambiente de almacenamiento (Artes-Calero, 2006). Otro tratamiento aplicado son los recubrimientos, que sirven como una barrera a la difusión de los gases en las frutas y vegetales, lo cual reduce la pérdida de humedad y los niveles internos de oxígeno (Guilbert y Gontard, 1995; Báez-Sañudo *et al.*, 2018). Estos cambios pueden alterar las tasas de respiración, maduración, color de la piel y los volátiles del sabor (Avena-Bustillos *et al.*, 1997).

Otros tratamientos aplicados en la poscosecha son el envasado en empaques plásticos para crear atmósferas modificadas (Martínez-Ferrer *et al.*, 2002), tratamientos térmicos (Weerahewa y Adikaram, 2005), adición de cloruro de calcio ( $\text{CaCl}_2$ ) (Youryon y Wongsaree, 2015), ABA (Zhang *et al.*, 2015), 1-metilciclopropeno (1-MCP) (Selvarajah *et al.*, 2001) y el almacenamiento a bajas temperaturas (Ramos-García *et al.*, 2010). Bajas presiones parciales de

oxígeno ( $O_2$ ) y metano ( $C_2H_4$ ) y/o elevadas de dióxido de carbono ( $CO_2$ ) y vapor de agua, frenan el metabolismo, reducen la transpiración y retrasan el deterioro de origen fisiológico o microbiano del vegetal a conservar (FAO, 2000).

### **II.5.1. Recubrimientos.**

Los recubrimientos son capas delgadas de material sintético ó natural aplicadas a la superficie del fruto (Báez-Sañudo *et al.*, 2018). Las propiedades de cubrimiento de los frutos y su preservación, dependerán básicamente de la permeabilidad al vapor de agua y a los gases (Avena-Bustillos *et al.*, 1997). Mediante la respiración, la fruta obtiene la energía necesaria para desarrollar una serie de procesos biológicos indispensables. El proceso respiratorio ocurre tomando oxígeno de la atmósfera que oxida las sustancias de reserva (carbohidratos simples y complejos) con el consiguiente consumo de oxígeno ( $O_2$ ) y producción de dióxido de carbono ( $CO_2$ ) (FAO, 2000). Este efecto se debe a que los productos vegetales continúan vivos tras la recolección y manifiestan procesos metabólicos de respiración, transpiración, crecimiento, maduración y senescencia (Artes-Calero, 2006). Por lo tanto, disminuir la respiración de los productos ayuda a prolongar la supervivencia de los productos hasta el consumo optimizando su aprovechamiento económico para adaptarlos a las exigencias comerciales (Artes-Calero, 2006).

Además del recubrimiento céreo natural, se utilizan materiales como el polietileno, el polipropileno y el policloruro de vinilo junto con alguna resina o alguna cera natural para formar películas empleadas para cubrir los productos hortofrutícolas (FAO, 2000; Salvador *et al.*, 2003). También existen recubrimientos comestibles que, a diferencia de las películas extruidas, son una tecnología prometedora y respetuosa con el medio ambiente, ya que reduce la utilización del envasado tradicional como las películas plásticas, además son biopolímeros naturales y biodegradables (Dhall, 2013). Los recubrimientos hechos a base de polisacáridos han sido los más utilizados para recubrir frutos, debido a sus propiedades mecánicas de adherencia y flexibilidad, y a sus propiedades de barrera a los gases (Ramos-García *et al.*, 2010).

Una ventaja del uso de recubrimientos comestibles es que se pueden incorporar ingredientes activos en la matriz del polímero y consumirse con los alimentos, mejorando así la

seguridad o incluso los atributos nutricionales y sensoriales del fruto tratado (Dhall, 2013). Por ejemplo, se puede incorporar AS a estas ceras o aplicarlo en la fruta después de disolverlo en solución etanol-agua para reducir la deshidratación y así mantener la firmeza y turgencia de los frutos (Báez-Sañudo *et al.*, 2018). En resumen, la función de los recubrimientos es reducir la pérdida de agua durante el manejo y la comercialización, mejorando la apariencia y prolongando la vida en anaquel de frutas y verduras (Lin y Zhao, 2007). Así, el polisacárido más empleado y útil para la formulación de los recubrimientos comestibles en la actualidad, es el quitosano (Ramos-García *et al.*, 2010).

#### **II.5.1.1. Quitosano.**

El quitosano es un polímero catiónico gracias a los grupos amino que están presentes de forma natural en su estructura (Rinaudo, 2006). Está presente en los exoesqueletos de los crustáceos, pero también se encuentra en las cutículas de los insectos, así como, en las paredes celulares de los hongos y algunas algas, es una de los polímeros más comunes que se pueden encontrar (Texeira da Silva *et al.*, 2012). Es obtenido por desacetilación química o enzimática de la quitina y es empleado en diferentes tratamientos debido a sus múltiples propiedades (Struszczyk, 2002). Por ejemplo, el quitosano ha demostrado tener efectos sobre los síntomas de infección por hongos en los frutos de fresa, retrasando su aparición hasta 5 días después de ser almacenados, mientras que en los controles los síntomas aparecieron desde el primer día (El Ghaouth y Arul, 1992).

#### **II.6. Polisacáridos.**

Los polisacáridos son carbohidratos poliméricos compuestos por unidades de monosacáridos unidos entre sí por enlaces glucosídicos (Merino *et al.*, 2018). Se pueden modificar químicamente ya que poseen grupos funcionales como hidroxilo, amino y carboxilo, que pueden sustituirse en reacciones químicas por nuevos grupos (Liu *et al.*, 2018). Los polisacáridos representan una solución a los problemas ambientales, ya que además de estar disponibles ampliamente en la naturaleza, son biodegradables. Así se evita la acumulación de

desechos tóxicos y la posibilidad de ser obtenidos a bajo costo (Mukherjee *et al.*, 2019). Los polisacáridos se obtienen generalmente por biosíntesis en plantas y microorganismos; por ejemplo, el AH bacteriano, gelano o xantano (Rinaudo, 2006). Estos materiales son biocompatibles, biodegradables y con frecuencia tienen actividad biológica (Merino *et al.*, 2018). Estos polímeros se usan con fines biomédicos como la fabricación de biomateriales, ingeniería de tejidos o vehículos farmacológicos para la liberación lenta de agroquímicos (Rinaudo, 2006).

Los polisacáridos pueden ser polímeros neutros (celulosa, amilosa y galactomananos) o cargados ya que presentan grupos carboxilo o sulfato o amino en su estructura (Rinaudo, 2006). Los polisacáridos como el quitosano también pueden utilizarse como estimulantes del crecimiento, ya que no son tóxicos para los seres humanos ni para el medio ambiente (Mukherjee *et al.*, 2019). Además, este material está ampliamente disponible en la naturaleza (Nahar *et al.*, 2011). El quitosano ha sido utilizado en cultivos de orquídea para estimular el crecimiento y mejorar la resistencia contra hongos y virus (Nahar *et al.*, 2011). También, se ha utilizado en el cultivo de tejidos (Figura 5), el cual induce brotes y cuerpos protocórmicos o PLB (Nahar *et al.*, 2011). La inclusión de quitosano a  $0.1 \text{ mg L}^{-1}$  en los medios de cultivo produjo un mayor porcentaje de formación de PLB en comparación con el control, mientras que la adición de quitosano a  $1 \text{ mg L}^{-1}$  generó la inducción de brotes (Nahar *et al.*, 2011).

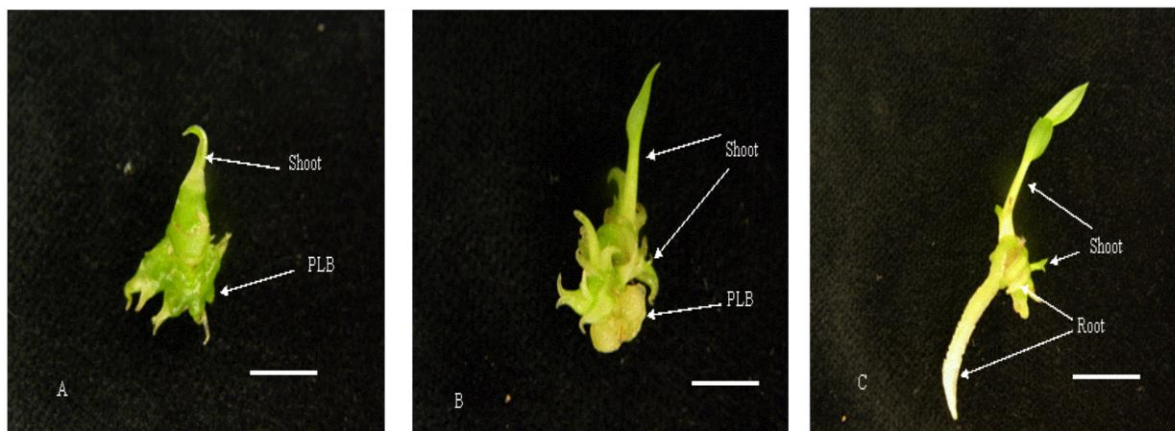


Figura 5. Producción de cuerpos protocórmicos y brotes con quitosano en plántulas de *Cymbidium dayanum* in vitro. Fuente: Nahar *et al.*, (2011).

### II.6.1. Ácido Hialurónico.

El AH (Figura 6), es un polímero natural biocompatible, no tóxico para el ser humano y seguro para el medio ambiente (Kaewjampa *et al.*, 2012). Es un copolímero lineal cuya estructura está compuesta por unidades lineales de disacáridos polianiónicos que consisten en ácido D-glucurónico y N-acetil-D-glucosamina unidas alternativamente por enlaces glucosídicos beta 1-3 y beta 1-4 (Rinaudo, 2006). También es muy soluble en agua (Rinaudo, 2009).

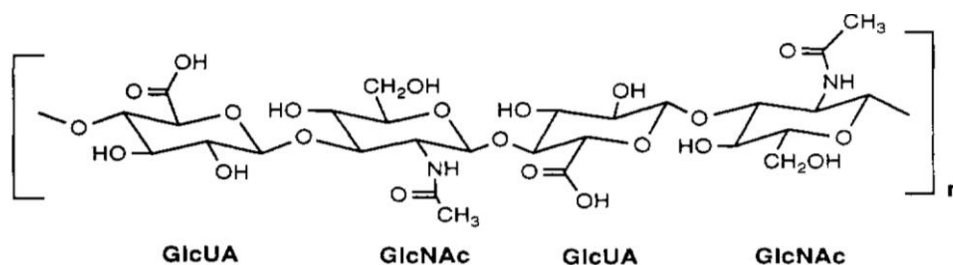


Figura 6. Estructura química del ácido hialurónico mostrando las unidades repetitivas de disacáridos. Fuente: Pouyani y Prestwich (1993).

El AH está distribuido ampliamente en todo el tejido conjuntivo, epitelial, cartílago, humor vítreo y neural por lo que se incluye dentro del grupo de los glicosaminoglicanos (Jabun *et al.*, 2011). Es el único glicosaminoglicano no sulfatado que se encuentra en la matriz extracelular de algunos tejidos, por lo cual está involucrado en procesos dinámicos mediados por la interacción con los componentes de la matriz extracelular (Jabun *et al.*, 2011). Dichas

funciones son la regulación de la secreción de proteínas, la expresión de genes y la adhesión, migración, proliferación y diferenciación celular (Kaewjampa *et al.*, 2012). Además, regula el factor de crecimiento e inhibe la hidrólisis por acción de las proteasas (Jabun *et al.*, 2011). También es extremadamente hidrófilo y puede retener el agua con 90 veces su peso, por lo que posee la capacidad de amortiguar a las células (Wu *et al.*, 2006). Presenta funciones biológicas en organismos inferiores y superiores, incluidos los humanos (Mehraj y Shimasaki, 2017). Suprime enfermedades en plantas y tiene actividad antioxidante (Teixeira da Silva *et al.*, 2012).

El AH es un material biocompatible y no inmunogénico (Pouyani y Prestwich, 1993), por lo cual no induce una reacción inflamatoria o alérgica después de la implantación y sus productos de degradación no son tóxicos para el cuerpo humano (Jabun *et al.*, 2011). También es degradado por enzimas ampliamente distribuidas en todo el cuerpo humano (Pouyani y Prestwich, 1993). Los grupos carboxilo e hidroxilo ofrecen sitios potenciales para la modificación química, estos grupos permiten modificar el comportamiento del AH en solución acuosa para aumentar o disminuir su solubilidad o también hacen que el polímero pase por un proceso de reticulado químico para estabilizarlo y producir películas o nanopartículas (Pouyani y Prestwich, 1993; Rinaudo, 2006). El AH se puede extraer del humor vítreo bovino, de crestas de gallo, cordones umbilicales y también de bacterias (*Streptococcus equi* y *Streptococcus zooepidemicus*) (Ke *et al.*, 2011). Dentro de las fuentes más conocidas, pero el AH puede encontrarse en diversas fuentes, tanto de animales como plantas.

El AH también se ha utilizado como aditivo para el cultivo de tejidos vegetales, ya que actúa como un regulador del crecimiento (Kaewjampa *et al.*, 2012). Por ejemplo, fue comparado el efecto del AH con respecto a la actividad bioestimulante del BA o BAP y el quitosano, todos a concentraciones de 1.0 y 0.1 mg L<sup>-1</sup> y se encontró que el mayor número de PLB en híbridos de orquídeas (*Cymbidium dayanum*) se obtuvo en el medio que contenía AH a una concentración de 0.1 mg L<sup>-1</sup> (Tabla 3 y Figura 7) (Kaewjampa *et al.*, 2012).

Tabla 3. Efecto del ácido hialurónico, quitosano y bencil aminopurina en la organogénesis de PLB de cultivos de *Cymbidium dayanum*.

| Tratamiento | mgL <sup>-1</sup> | PLB |
|-------------|-------------------|-----|
|-------------|-------------------|-----|

|                    |     | Número   | (%)  | Peso Seco  |
|--------------------|-----|----------|------|------------|
| Control            | 0   | 5.1±0.8  | 82.7 | 181.1±24.3 |
| Ácido Hialurónico  | 0.1 | 12.4±1.1 | 93.3 | 351.2±45.6 |
|                    | 1.0 | 9.5±1.1  | 100  | 278.5±29.0 |
| Quitosano          | 0.1 | 5.8±0.3  | 100  | 261.5±27.2 |
|                    | 1.0 | 5.1±0.3  | 100  | 286.1±24.9 |
|                    | 10  | 3.5±0.6  | 93.3 | 173.1±39.1 |
| Bencil Aminopurina | 0.1 | 5.7±0.9  | 100  | 467.3±72.4 |
|                    | 1.0 | 7.3±1.3  | 100  | 461.6±52.8 |
|                    | 10  | 8.1±1.1  | 100  | 451.1±65.8 |

Fuente: Kaewjampa *et al.*, (2012).

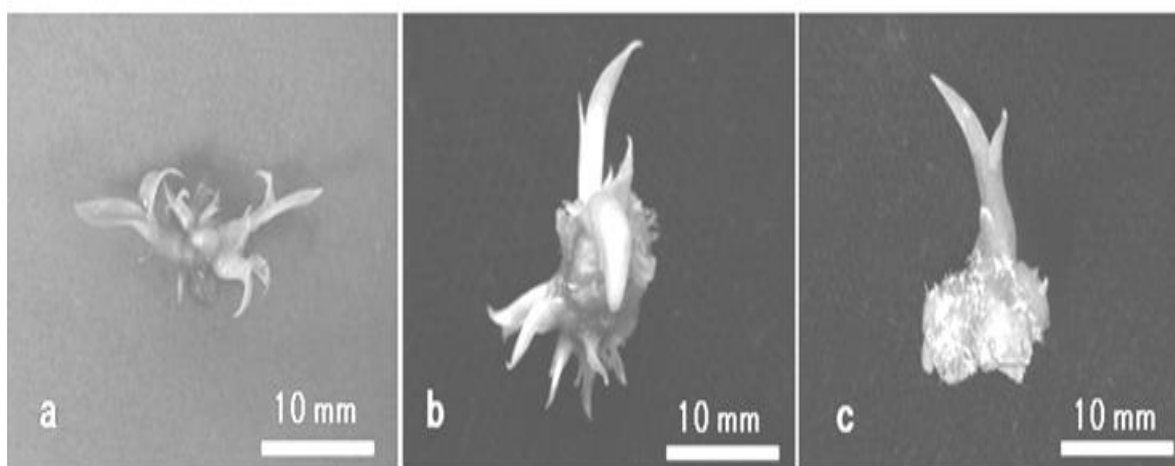


Figura 7. Efecto de a) bencil aminopurina o bencil adenina, b) ácido hialurónico y c) quitosano en explantes de *Cymbidium dayanum* híbrido. Fuente: Kaewjampa *et al.*, (2012).

### **III. ESTADO DEL ARTE DEL USO DE POLISACÁRIDOS EN LA AGRICULTURA**

#### **III.1. Polisacáridos Como Alternativa al Uso de Polímeros Sintéticos.**

Los agroquímicos utilizados actualmente para aumentar la producción y combatir enfermedades en los cultivos, tienen altos precios y son considerados agentes contaminantes del suelo, de los cultivos, y causantes de enfermedades en animales y humanos (Falcón-Rodríguez, 2015). El uso de biopolímeros derivados de la materia prima de biomasa renovable, es una alternativa al uso de pesticidas, que además es sostenible y respetuosa con el medio ambiente (Mukherjee *et al.*, 2019).

La obtención de productos poliméricos sintetizados por microorganismos permite abaratar los costos de estos sistemas de liberación, por lo tanto, los productos microbianos tendrán un impacto cada vez mayor en el problema mundial de los alimentos y la supervivencia de la humanidad (Merino *et al.*, 2018). Los materiales poliméricos utilizados pueden ser polímeros naturales como el dextrano, la celulosa, el quitosano y el AH, los cuales tienen como ventaja la presencia de grupos hidrofílicos como los grupos carboxilo, hidroxilo y aminos que permiten la modificación química de las macromoléculas; estos grupos permiten modificar el comportamiento del polímero en solución acuosa o también el reticulado químico del polímero para estabilizar los materiales (Michalak *et al.*, 2016). La modificación artificial de los polisacáridos naturales puede aumentar sus actividades biológicas (Chen y Huang, 2018). Los polímeros biodegradables son los más utilizados para el diseño de sistemas de liberación modificada, ya que la acción de enzimas y microorganismos puede degradarlos en dióxido de carbono, agua y materia orgánica (Chagas *et al.*, 2018).

#### **III.2. Aplicaciones de Polisacáridos en la Agricultura.**

Los polisacáridos se han utilizado durante la precosecha de maneras muy variadas. Por ejemplo, se han utilizado para sintetizar micro- o nanopartículas poliméricas que pueden portar fertilizantes como nitrógeno, fósforo y potasio para liberarlo de manera continua y prolongada en campo, reduciendo así los riesgos de contaminación (Chagas *et al.*, 2018). También se han



utilizado para crear películas plásticas a base de almidón (para crear redes de exclusión y películas de acolchado), ya que la mayoría de los plásticos que se utilizan en agricultura (para el acolchado del suelo, fabricación de recipientes, bandejas y macetas) se fabrican a partir de polietileno, polipropileno, policloruro de vinilo y otros polímeros no biodegradables que se obtienen de recursos no renovables (Treinyte *et al.*, 2018). El empleo de biopolímeros biodegradables permite solucionar el problema de la acumulación de plásticos, ya que éstos se desechan después de su uso y se acumulan contaminando aguas y suelos (Mukherjee *et al.*, 2019).

Por otra parte, los polisacáridos como el quitosano, la quitina y los componentes de la pared celular vegetal han sido utilizados como elicitores en plantas (Flores *et al.*, 2019). A estos polisacáridos también se les pueden modificar para unirlos a flavonoides y otros compuestos (alginato y AH), gracias a que contienen grupos carboxílicos; lo que incrementa su actividad antioxidante y antimicrobiana (Liu *et al.*, 2018). El quitosano ha sido utilizado en precosecha como agente desinfectante de semillas, también se ha aplicado en raíces y por medio de aspersión foliar para el control de enfermedades de las plantas y la resistencia al estrés biótico y abiótico (Badawy y Rabea, 2011).

#### **IV. HIPÓTESIS**

Mediante este caso de estudio se analizará si el AH representa una alternativa como elicitor aplicado durante el desarrollo de plantas y/o en tratamientos poscosecha. Por lo que, partiremos de la hipótesis de que el AH presentará efectos positivos en el desarrollo y el crecimiento de las plantas al ser aplicadas de forma exógena (vía *drench*). Así mismo, por sus características y propiedades antioxidantes, el AH tendrá efectos positivos sobre productos poscosecha.

## **V. OBJETIVOS**

### **V.1. Objetivo General.**

Evaluar mediante un caso de estudio si el ácido hialurónico tiene potencial uso en el área agrícola a nivel pre- y poscosecha.

### **V.2. Objetivos Específicos.**

- a) Recopilar y documentar información acerca de los efectos de la aplicación de AH y su mecanismo de acción en las plantas.
- b) Analizar los posibles efectos de la aplicación del AH en la pre- y poscosecha.
- c) Analizar si el AH representa una alternativa como elicitador y/o bioestimulante aplicado durante el desarrollo de plantas
- d) Determinar el posible efecto antioxidante y/o biocida del AH en tratamientos poscosecha.

## **VI. JUSTIFICACIÓN**

Debido a todos los factores ambientales y problemas ecológicos que se encuentran en la actualidad, se requerirá cada vez más de la aplicación de tratamientos precosecha más naturales que permitan una mayor producción de los cultivos y que, a su vez, permitan obtener una mayor resistencia a diversas enfermedades, sin dejar de lado la obtención de productos poscosecha con buena calidad. Por si fuera poco, también se requerirá de mantener una economía circular, donde todos los desechos sean reutilizados e ingresados a la cadena de producción. Es por ello que, se propone la búsqueda del potencial de generar formulaciones naturales a base de compuestos con actividad biológica positiva en el ser humano y en las plantas, que al mismo tiempo nos brinde la protección de los productos pre- y poscosecha. Además, el uso del AH en productos poscosecha no se ha llevado a cabo. Así, se puede generar información científica relevante y de alto impacto sobre la aplicación de compuestos naturales (subproductos de desecho) en productos poscosecha.

## VII. ÁREAS DE OPORTUNIDAD

### VII.1. Efecto del Ácido Hialurónico en Plantas.

Existen similitudes entre los OG obtenidos de fuentes vegetales y el hialuronano o AH (Ferrari *et al.*, 2013), por lo que principalmente este trabajo está enfocado en este tipo de compuestos.

#### VII.1.1. Ácido Hialurónico como Fitorregulador.

Los efectos y acciones del AH fue compilado por Nahar *et al.*, (2011), quienes mencionan que éste compuesto actúa como regulador del crecimiento en las plantas (fitorregulador), ya que se ha reportado que el número de brotes se modifica cuando éste es aplicado en las plantas. El AH aumenta la formación de PLB, brotes y raíces en un periodo de tiempo muy breve y es un mejor regulador del crecimiento de plantas comparado con el quitosano (Nahar *et al.*, 2011). A menores concentraciones de AH se obtiene una mayor proliferación, por lo que se requieren de concentraciones al menos diez veces menores al de otros fitorreguladores para la obtención de brotes laterales (Kaewjampa *et al.*, 2012; Mehraj y Shimasaki, 2017). El incremento de la producción de raíces y brotes lleva a los cultivos a una mejor obtención de nutrimentos por el mayor volumen radicular y a una mayor área foliar (Nahar *et al.*, 2011). Estas dos mejoras podrían llevar a una mayor tasa fotosintética y un incremento en la producción de frutos, por lo cual, el AH puede contribuir a mitigar una parte del desabasto de alimentos.

Kaewjampa *et al.*, (2012) y Kamal *et al.*, (2014) indicaron que aplicando AH obtuvieron una mayor proliferación de PLB en plántulas de orquídeas *in vitro* en comparación con otros fitorreguladores, tales como: BAP y ANA. Esto ha sido reafirmado por Sultana *et al.*, (2015) y Mehraj y Shimasaki, (2017) en plántulas de *Phalaenopsis in vitro*. Además, se ha reportado que la aplicación del AH vía *drench* es más efectiva que la aplicación por asperjado (Park *et al.*, 2008).

La actividad biológica del AH en las plantas depende de su peso molecular, al igual que algunas oligosacarinas y/u OG (Mehraj y Shimasaki, 2017). Si relacionamos al AH con los OG,

esto podría ayudar a explicar el por qué la aplicación vía *drench* es mejor que el asperjado, ya que los OG se mueven a través del xilema en la plantas por medio de la transpiración (MacDougall *et al.*, 1992). Los OG no se mueven en el floema (Ridley *et al.*, 2001). Los OG, una vez dentro de las plantas, se fragmentan en oligómeros más pequeños y se esterifican (MacDougall *et al.*, 1992). Además, los OG liberados durante la infección de las raíces o tallos podrían moverse a lo largo del xilema de la planta y activar la resistencia sistémica adquirida (RSA) (MacDougall *et al.*, 1992).

Los OG fragmentados enzimáticamente por la acción de la celulasa a partir de xiloglucano (XG) *in vitro*, actúan como reguladores del crecimiento (Cote y Hahn, 1994). Al agregarlos exógenamente, influyen en el crecimiento y desarrollo de los tejidos de las plantas, como el XG9, que antagoniza el crecimiento en tallo en chícharos (*Pisum sativum* L.); ya que cuanto los OG son reconocidos por los receptores WAK1 activan la formación de un complejo ASK1 y CUL1, cuya acción está regulada por las enzimas RUB1 y RING BOX1 (RBX). Todas éstas degradan la auxina con ayuda del proteosoma. Así, las respuestas fisiológicas a las auxinas pueden ser antagonizadas por los OG. Posteriormente, los fragmentos liberados llamados factores de respuesta a auxina (FRA), inician la transcripción de genes que responden a la auxina (AuxRE) estableciendo un ciclo de retroalimentación negativa (Ferrari *et al.*, 2013). Por ello se establece que los OG tienen un efecto antiauxínico, aunque posteriormente se comprobó que la actividad antiauxínica del XG9 es absolutamente dependiente del residuo de glucosa terminal y que los OG similares al XG9, pero carentes de dicho residuo, no poseían actividad antiauxínica (Cote y Hahn, 1994).

La auxina, al aumentar la tasa de fotosíntesis neta, puede aumentar el crecimiento de las plantas (Rostami y Rostami, 2019). En particular, el ácido indol-3-acético (IAA) es crucial para el crecimiento y el desarrollo de las plantas, ya que estimulan la elongación y el alargamiento celular (Ferrari *et al.*, 2013). Es por esto que los OG pueden inhibir el alargamiento del tallo del chícharo (Braca *et al.*, 1988). Una propuesta con base en lo anterior de cómo puede actuar el AH como fitorregulador, ya que contiene análogos de los OG se muestra en la Figura 8.

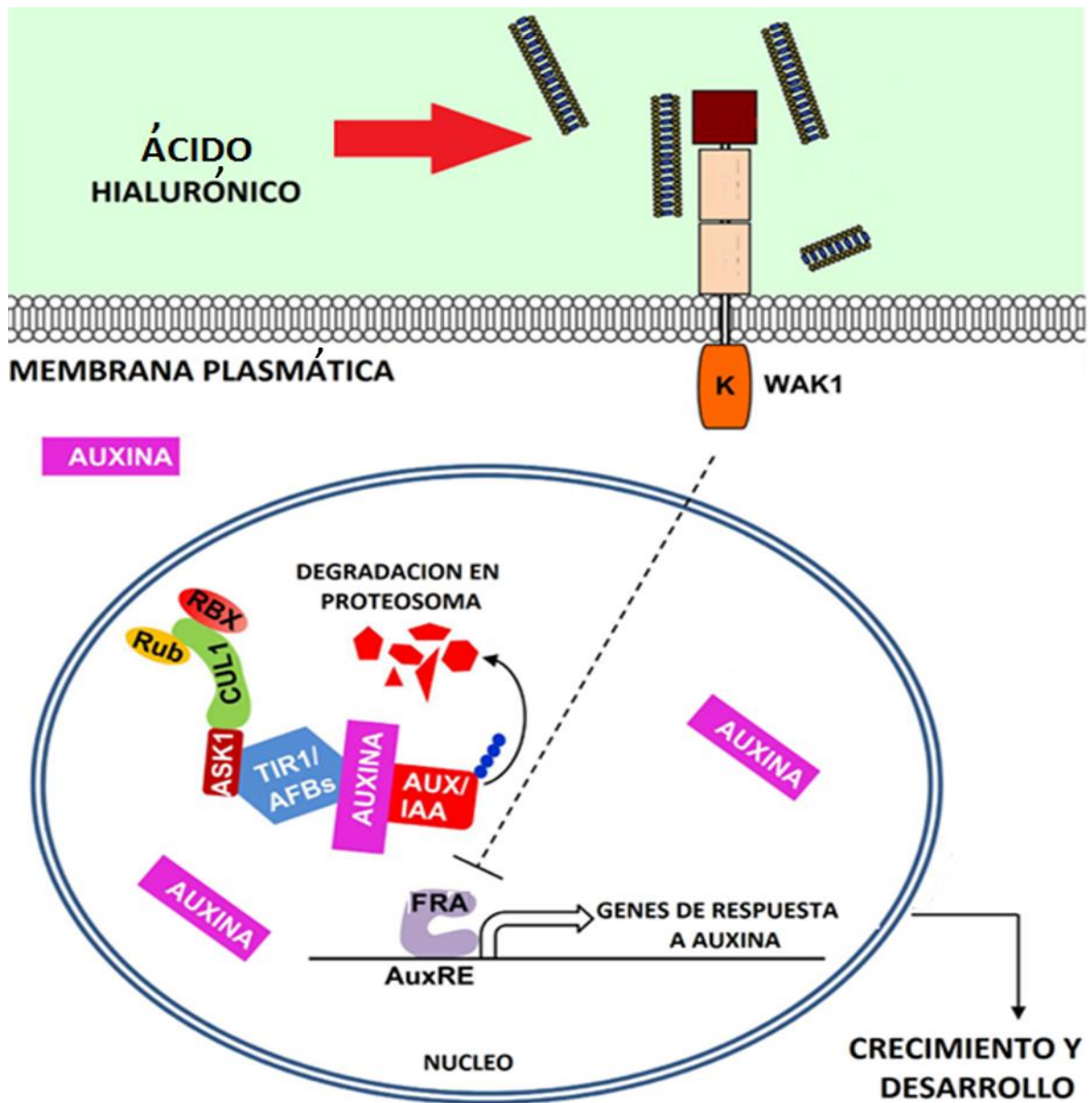


Figura 8. Propuesta del mecanismo de acción del ácido hialurónico como fitorregulador. Modelo propio.

### VII.1.2. Ácido Hialurónico como Bioestimulante.

También existen mezclas de OG que contienen elementos auxínicos y citoquinínicos, como el denominado comercialmente Pectimorf (Hidrobo-Luna *et al.*, 2002). Este compuesto es una mezcla de OG con grado de polimerización (GP) entre 9 y 16, que estimula el crecimiento

y diferenciación en diferentes cultivos a concentraciones de 6 hasta 12 mg L<sup>-1</sup>, provocando un incremento significativo sobre el desarrollo vegetativo de las plantas y en la actividad fotosintética; evidenciándose el efecto auxínico de los OG. Sin embargo, en concentraciones menores y mayores a éstas, el producto tuvo un efecto citoquinínico (Lara-Acosta *et al.*, 2018).

Nahar *et al.*, (2011) también demostraron que el AH presenta una actividad como bioestimulante mejor que otros compuestos; en este caso lo comparó con el quitosano y con N-acetil-D glucosamina (Tabla 4). La formación de PLB y brotes se observó con 1 mg L<sup>-1</sup> de AH, mientras que con los otros compuestos los rendimientos fueron inferiores. También comparó el peso fresco de cada PLB formado y los mayores resultados se encontraron con el tratamiento de AH.

Tabla 4. Efecto de ácido hialurónico, quitosano y N-acetil-D glucosamina en la organogénesis de *Cymbidium dayanum*.

| Concentración<br>(mg L <sup>-1</sup> ) | Ácido Hialurónico |                        |     | Quitosano   |                        |     | N-acetil-D-glucosamina |                        |     |
|----------------------------------------|-------------------|------------------------|-----|-------------|------------------------|-----|------------------------|------------------------|-----|
|                                        | # explantes       | Peso<br>Fresco<br>(mg) | (%) | # explantes | Peso<br>Fresco<br>(mg) | (%) | # explantes            | Peso<br>Fresco<br>(mg) | (%) |
| Control                                | 2.0 ± 0.4         | 173.5                  | 80  | 1.6 ± 0.7   | 58.0                   | 57  | 0.9 ± 0.4              | 62.4                   | 47  |
| 0.001                                  | 1.7 ± 0.6         | 129.5                  | 60  | -           | -                      | -   | 1.9 ± 0.6              | 122.8                  | 67  |
| 0.01                                   | 2.1 ± 0.3         | 135.6                  | 93  | -           | -                      | -   | 1.4 ± 0.6              | 108.8                  | 53  |
| 0.1                                    | 2.3 ± 0.4         | 96.5                   | 93  | 2.7 ± 0.5   | 83.8                   | 93  | 2.7 ± 0.5              | 168.7                  | 87  |
| 1                                      | 2.5 ± 0.3         | 171.2                  | 100 | 2.1 ± 0.6   | 126.2                  | 71  | 2.2 ± 0.5              | 154.4                  | 80  |
| 10                                     | 1.9 ± 0.4         | 186.0                  | 80  | 1.7 ± 0.4   | 60.57                  | 64  | 1.9 ± 0.4              | 103.3                  | 80  |

Fuente: Nahar *et al.*, (2011).

En la figura 9 se observa que el AH promovió la formación de PLB a una concentración de 1 mg L<sup>-1</sup>, y favoreció la formación de raíces a 0.001 mg L<sup>-1</sup> (Nahar *et al.*, 2011).



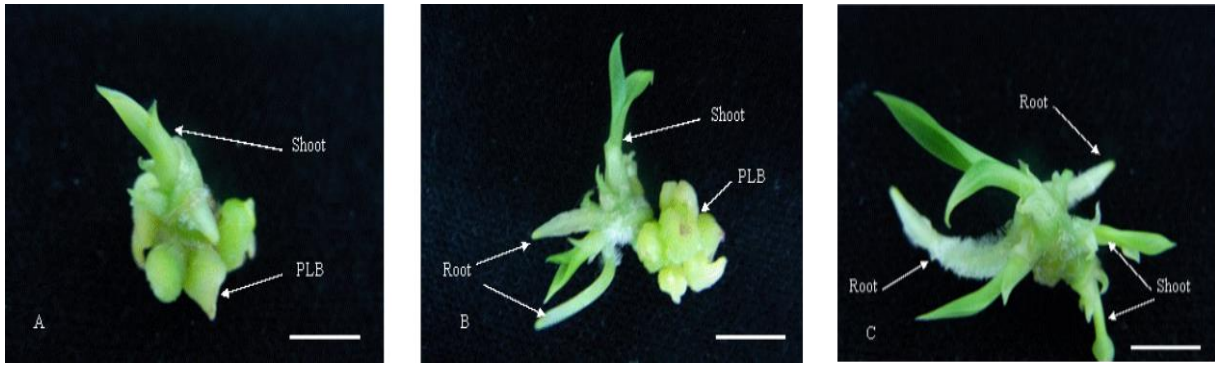
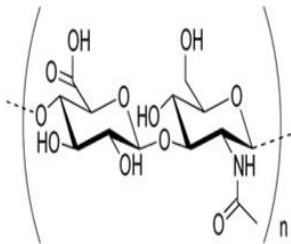


Figura 9. Efecto del ácido hialurónico en la organogénesis de *Cymbidium dayanum*. Fuente: Nahar *et al.*, (2011).

Por lo tanto, el AH, al contener análogos de los OG en su estructura, podría ayudar a producir mayor volumen radicular, con todos los beneficios relacionados con ello, tales como: una mejor obtención de nutrimentos y el consecuente incremento en la fotosíntesis (Ferrari *et al.*, 2013). Al aumentar la tasa de fotosíntesis neta, puede aumentar el crecimiento de las plantas (Rostami y Rostami, 2019). Tal hecho ya fue afirmado por Nahar *et al.*, (2011), quienes mencionan que el AH estimula la producción de raíces, por lo que los cultivos logran una mayor obtención de nutrimentos y esto les proporciona una mayor área foliar. Una mayor área foliar incrementa la fotosíntesis, lo que provoca una mayor ganancia de esqueletos carbonados que pueden ser utilizados para la síntesis de nuevos compuestos, como las proteínas (Lara-Acosta *et al.*, 2018). Estas dos mejoras en conjunto podrían llevar a un incremento en la producción de frutos (Figura 10).

Aplicación de  
Ácido Hialurónico



Efecto auxínico  
de los análogos  
de OGs  
contenidos en  
el ácido  
Hialurónico

Incremento del  
volumen  
radicular y mayor  
disponibilidad de  
nutrientes



Mayor  
producción  
de frutos

Incremento  
del área  
foliar y  
mayor tasa  
fotosintética



Figura 10. Propuesta del mecanismo de acción del ácido hialurónico como bioestimulante.  
Modelo propio.

### **VII.1.3. Efecto sobre el Mecanismo de Respuesta/Defensa de la Planta (Elicitor) del Ácido Hialurónico.**

El documento de Park *et al.*, (2008) es el primer reporte que incluye el uso del AH como elicitador en plantas en campo y su efecto contra el ataque de diferentes organismos patogénicos, incluyendo virus. Después, Nahar *et al.*, (2011) afirmaron que el AH es un elicitador biótico y de los más efectivos para mejorar la producción de metabolitos secundarios en el cultivo de tejidos de plantas e inducir resistencia sistémica en pepinos, tomates y pimientos. La actividad elicitora de este compuesto químico (AH) ha sido comprobada contra el ataque del virus del mosaico (CMV), enfermedades del tomate por *Pseudomonas syringae* pv. y *Xanthomonas axonopodis* pv., mancha angular por *Pseudomonas syringae* pv. *lachrymans* y antracnosis por *Colletotrichum orbiculare* en pimiento (Nahar *et al.*, 2011).

Los resultados reportados por Park *et al.*, (2008) indican que el AH no muestra acción antimicrobiana directa contra los patógenos por sí mismo, sino que tiene una acción sobre el incremento de las defensas de la planta, al comprobar que el AH incrementa la transcripción de genes de defensa: PR-1a y PDF1.2. Estos mismos genes se activan cuando se aplican otros elicitores en las plantas (como el AS y el AJ), durante la activación de los mecanismos de defensa.

Como se ha mencionado anteriormente, el AH presenta acciones similares a otros elicitores. Las endopoligalacturonasas y las liasas endopectadas secretadas por patógenos degradan los OG de la pared celular. Los OG liberados son una fuente de carbono para los patógenos, pero las plantas pueden detectarlos como señales para iniciar las respuestas de defensa (Ridley *et al.*, 2001). Son las cinasas o quinasas asociadas a la pared celular (WAK1) las que reconocen a las oligosacarinas y/o OG, y transmiten la señal al citoplasma (Brutus *et al.*, 2010). Entonces, ocurre la estimulación de la producción de fitoalexinas y ERO (el fenómeno denominado *Burst* o “estallido” oxidativo) (Enríquez-Guevara *et al.*, 2010). Las ERO impulsan el entrecruzamiento oxidativo mediado por la peroxidasa. Esta peroxidasa cataliza la reticulación de ligninas, proteínas y carbohidratos (Ridley *et al.*, 2001). Todo se realiza para reforzar la zona dañada mediante el depósito de macromoléculas como proteínas y glucoproteínas ricas en prolina, polisacáridos como la calosa y polímeros aromáticos del tipo

lignina. Finalmente, ocurre la producción de una gran gama de péptidos y proteínas defensivas, la mayor parte de ellas conocidas como proteínas relacionadas con la patogénesis (PR) (Enríquez-Guevara *et al.*, 2010).

Las ERO también actúan como segundos mensajeros que provocan otras respuestas de defensa, incluida la RSA. La RSA es la inducción de mecanismos de defensa en lugares remotos del sitio original de la herida o infección que sirven para preparar a la planta contra nuevos ataques de patógenos (Ridley *et al.*, 2001). Uno de estos ejemplos es la activación de la expresión de genes de defensa mediada por las MAP cinasas (MAPK). La invasión de patógenos (herbívoros, hongos o bacterias) o el daño mecánico también causan un aumento de los niveles de JA, SA y ET, mediados por las cascadas MAPK, lo que desencadena respuestas de defensa independientemente de los OG (Ferrari *et al.*, 2013). Con base en lo anterior, se muestra en la siguiente figura una propuesta modelo de la acción del AH como elicitor (Figura 11).

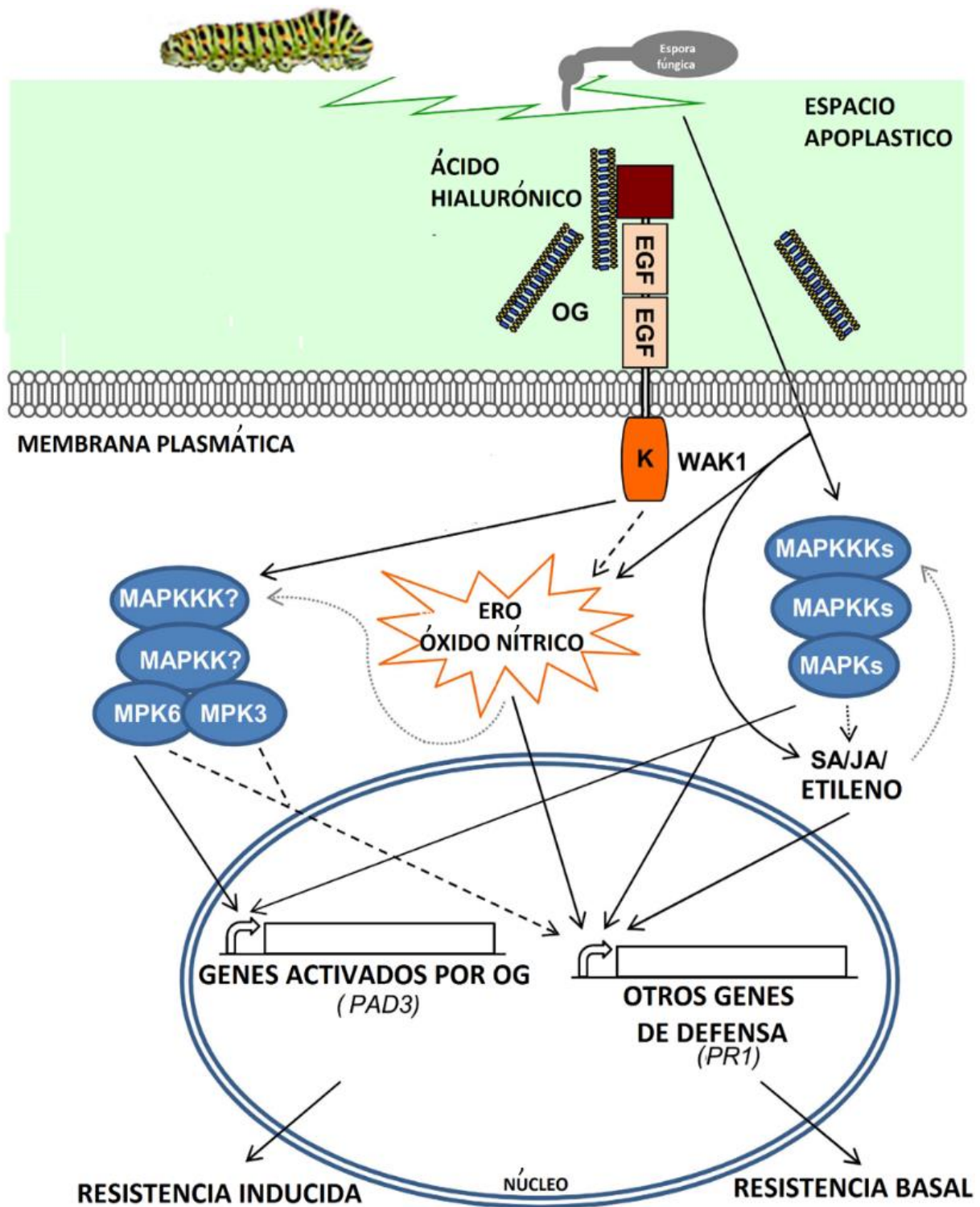


Figura 11. Propuesta del mecanismo de acción del ácido hialurónico como elicitor en plantas.  
Imágenes modificadas de: Ferrari *et al.*, (2013). Modelo propio.

Los estudios de Michelet *et al.*, (2012) indican que uno de los mecanismos de acción del AJ en plantas es promoviendo la producción de AH, ya que uno de los derivados del AJ, el ácido tetrahidro-jasmónico (LR2412), aumenta la expresión de las enzimas hialuronasa sintasa 2 (HAS2) y 3 (HAS3), lo que aumenta la síntesis de AH (Michelet *et al.*, 2012).

El polisacárido homogalacturonano (HGA) es un polímero polianiónico lineal que mantiene la integridad de la pared y la cohesión célula-célula. Los fragmentos de HGA, los OG, inducen la expresión de genes y proteínas de defensa cuando se rompe la célula, protegiendo a las plantas contra enfermedades fúngicas (Ridley *et al.*, 2001). Además de inducir respuestas de defensa, los OG también afectan varios aspectos del crecimiento y desarrollo de las plantas. Al igual que los fragmentos del AH, los OG se consideran patrones moleculares asociados con el hospedador o el daño (HAMP o DAMP) y su actividad biológica está relacionada con su tamaño molecular porque los OG con un grado de polimerización (GP) entre 10 y 15 son los más activos (Brutus *et al.*, 2010). Los OG consisten en una cadena lineal de moléculas de ácido D-galacturónico unida por enlaces  $\alpha$  1-4 (Menderos y Hormaza, 2008). Los receptores que detectan a los OG, son algunos miembros de la familia de la proteína quinasa asociada a la pared (WAK) (Ferrari *et al.*, 2013). En *Arabidopsis thaliana*, esta proteína incluye cinco genes estrechamente agrupados (WAK1-WAK5). WAK1 se expresa en hojas juveniles y adultas, tallos y flores, pero no en raíces y es activado por el AS y su ácido análogo al ácido 2,2-dicloro isonicotínico (INA), heridas e infecciones bacterianas.

El ácido glucurónico y el ácido D-galacturónico son estructuras estrechamente relacionadas: el ácido poli- $\alpha$  (1,4) D-galacturónico es la imagen de espejo del ácido poli- $\alpha$  (1,4) -glucurónico, excepto en las posiciones 3-hidroxilo, que son epiméricas (Farmer *et al.*, 1991). El ácido D-galacturónico y poli- $\alpha$  (1,4) -glucurónico forman complejos intermoleculares de "caja de huevo" que se unen al calcio ( $\text{Ca}^{2+}$ ) muy fuertemente como iones puente. Estas confirmaciones resultan del retorcimiento de las cadenas debido a los enlaces  $\alpha$ (1,4). La formación de complejos intermoleculares con  $\text{Ca}^{2+}$  puede ser necesaria para sus actividades biológicas (Farmer *et al.*, 1991). Estas similitudes estructurales entre los componentes del AH y los OG puede hacernos suponer que el AH, una vez absorbido por la planta después de su aplicación, es descompuesto en sus monómeros por alguna enzima de la planta y, los fragmentos

OG obtenidos de esta degradación, son los responsables de desencadenar una serie de señalizaciones típicas de los OG (Figura 12).

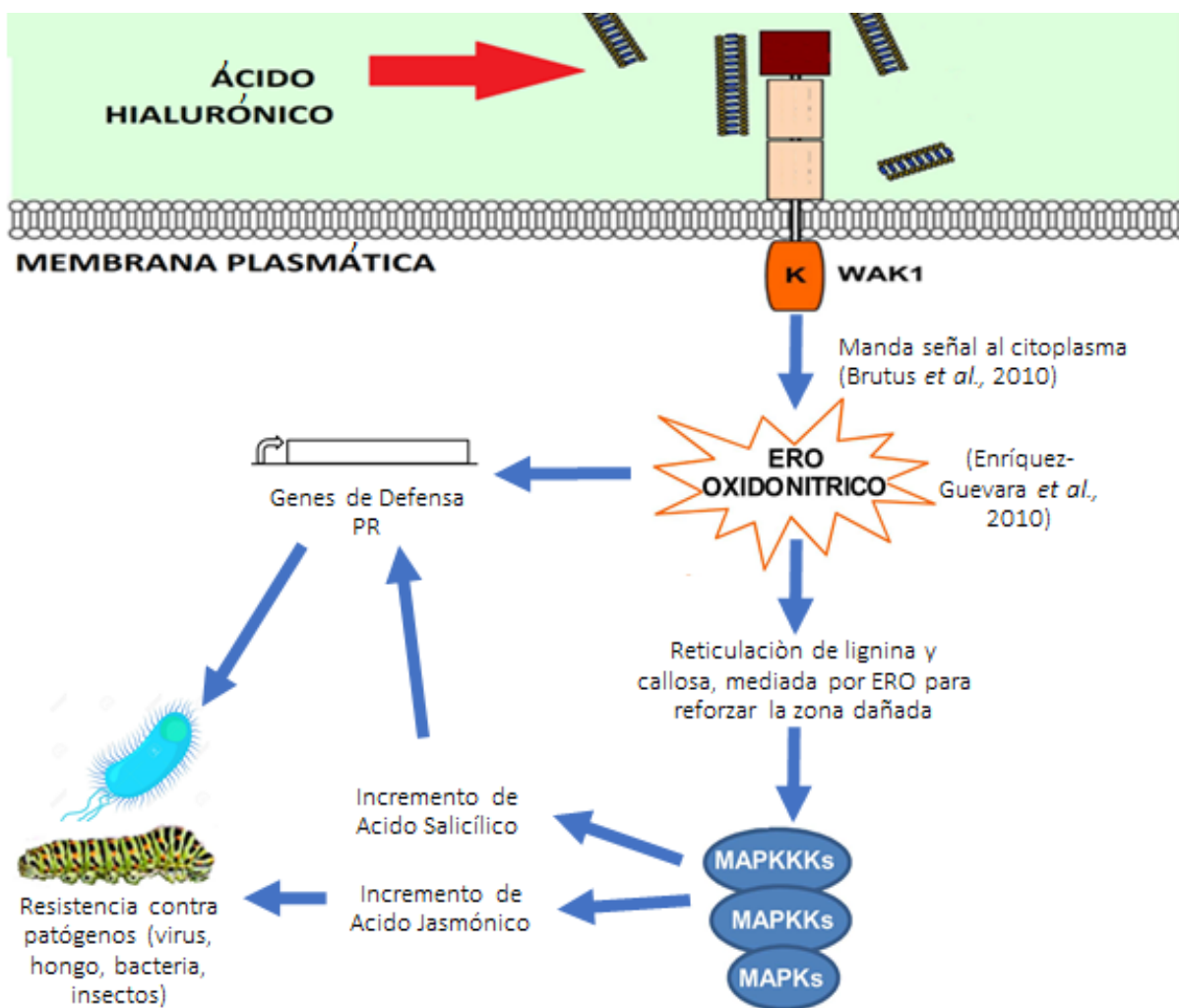


Figura 12. Mecanismo contra patógenos del ácido hialurónico. Imágenes modificadas de: Ferrari *et al.*, (2013). Modelo propio.

#### VII.1.4. Efecto Antioxidante del Ácido Hialurónico en Plantas.

Un antioxidante es una sustancia presente en baja concentración que inhibe la oxidación de biomoléculas celulares como proteínas, lípidos, ADN y carbohidratos. Estos incluyen a la superóxido dismutasa (SOD), la catalasa (Cat) y a la ascorbato peroxidasa (APX) dentro del mecanismo enzimático antioxidante (Ahmad, 2015). La SOD convierte los radicales superóxido

( $O_2^{\cdot-}$ ) en peróxido de hidrógeno ( $H_2O_2$ ) y éste se descompone en agua y oxígeno mediante la acción de la Cat; lo que evita la formación del radical hidroxilo ( $OH^{\cdot}$ ) (Cui *et al.*, 2010). Las plantas también pueden sintetizar estas enzimas antioxidantes para proteger a las células contra los diversos daños inducidos por las ERO que se producen en exceso durante condiciones de estrés oxidativo (Ma *et al.*, 2016).

Las ERO tienen un papel en la señalización celular, tanto en animales como en plantas, ya que inducen la muerte celular programada o necrosis, inducen o suprimen la expresión de diferentes genes y activan las cascadas de señalización celular; cuando las ERO sobrepasan los niveles fisiológicos pueden tener efectos perjudiciales (Slotes *et al.*, 2006). En los últimos años, se ha descubierto que el AH, además de su participación en la activación y modulación de la respuesta inflamatoria, tiene propiedades antioxidantes tanto *in vitro* como *in vivo* (Slotes *et al.*, 2006). También, se ha informado que el AH digerido enzimáticamente reveló una mejor capacidad como eliminador de radicales que el AH intacto, en especial contra el  $OH^{\cdot}$  (Ke *et al.*, 2011). En la piel, el órgano más grande del cuerpo humano, el AH desempeña un papel de eliminador de radicales libres generados por la radiación UV (Mukherjee *et al.*, 2011). La UV es absorbida por la piel y genera ERO, provocando estrés oxidativo en las células, daño en las paredes celulares, y en las membranas lipídicas, las mitocondrias y el ADN, desencadenando la degeneración y la muerte celular (Slotes *et al.*, 2006; Ke *et al.*, 2011).

La actividad antioxidante del AH podría deberse, al igual que en otros polisacáridos, a que éstos pueden incrementar la expresión del ARNm de las enzimas antioxidantes, tal como lo propone Pang *et al.*, (2000). Estos autores administraron un polisacárido (polisacárido-K o Krestin, PSK) vía peritoneal en ratones, el cual no sólo aumentó la actividad enzimática, sino que también incrementó el ARNm de la enzima SOD (Pang *et al.*, 2000). También, Ke *et al.*, (2011) aplicaron AH de bajo peso molecular en una lesión hepática inducida por tetracloruro de carbono, y esto redujo la peroxidación lipídica, aumentó la concentración de SOD y las actividades del glutatión (GSH) en el hígado. Por lo tanto, el efecto inhibitorio del AH de bajo peso molecular en la peroxidación lipídica podría atribuirse, al menos parcialmente, a su influencia sobre las enzimas antioxidantes al incrementar la expresión del ARNm de la enzima antioxidante (Pang *et al.*, 2000) (Figura 13).



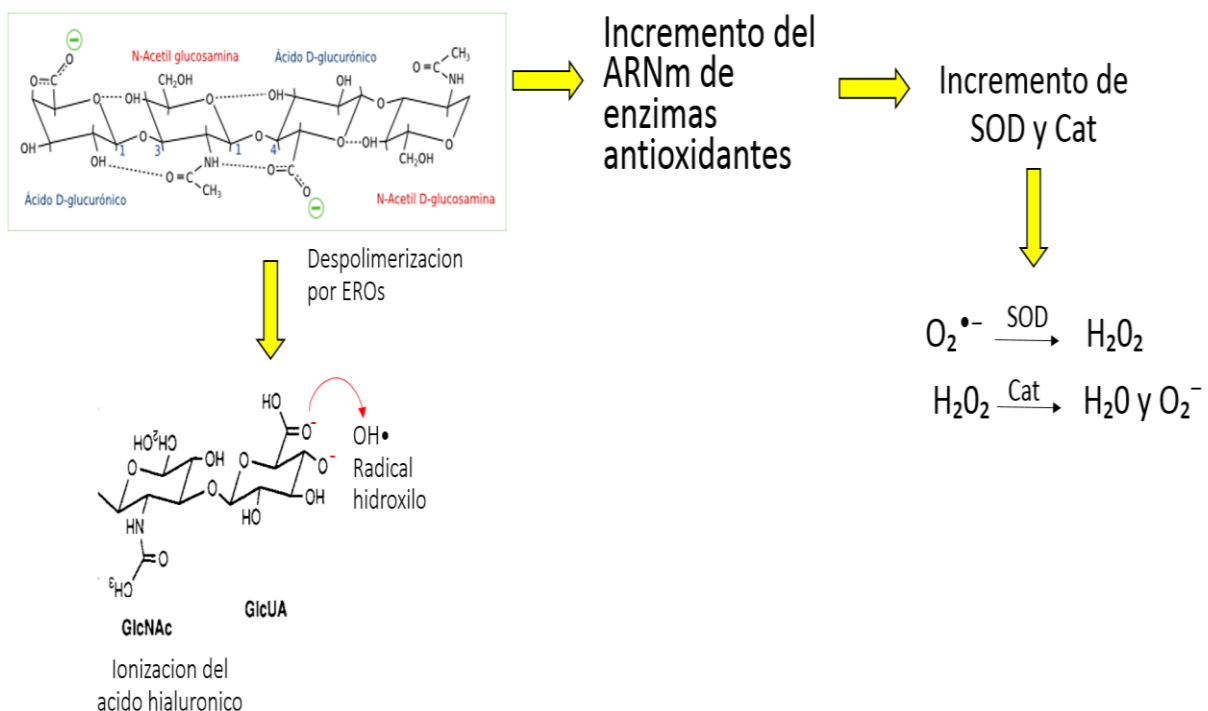


Figura 13. Propuesta del mecanismo antioxidante del ácido hialurónico. Modelo propio.

Además, el AH también se le atribuye una actividad como secuestrador de ERO (Krasiński *et al.*, 2009). A pH fisiológico se comporta como un polianión al ionizarse el grupo carboxilo del ácido glucurónico (Laurent y Fraser, 1992). Las cargas negativas son muy importantes para la actividad antioxidante, los grupos hidroxilo confieren estabilidad a las formas radicales y participan en la dislocación de electrones (Martínez-Ferrer *et al.*, 2002). Por lo que es importante que la molécula sea un buen donador de protones y electrones para tener buena actividad antioxidante (Martínez-Ferrer *et al.*, 2002).

Sato *et al.*, (1988) determinaron que la actividad antioxidante del AH también se debe al ácido D-glucurónico, el cual puede disminuir a las ERO, pero también descubrieron que el AH se degrada en presencia de ERO. Slotes *et al.*, (2006) estudiaron la degradación de AH con ERO descubriendo que de esta degradación resultan pequeños fragmentos oligoméricos como el ácido glucurónico y también productos de la oxidación de este ácido. Por lo tanto, se puede deducir que cuando el AH se degrada por contacto con ERO y produce fragmentos de ácido glucurónico, es este producto el encargado de combatir a las ERO.

## **VII.2. Efecto del Ácido Hialurónico en Poscosecha.**

### **VII.2.1. Ácido Hialurónico como Biocida.**

Diversos estudios han afirmado que el AH no tiene acción biocida directa contra patógenos, tales como: bacterias (Park *et al.*, 2008; Lee *et al.*, 2010) ni virus (Cermelli *et al.*, 2011). Pero, el AH ha demostrado tener efectos bacteriostáticos (Pirnazar *et al.*, 1999; Al-Bayaty *et al.*, 2011; Romano *et al.*, 2017) y fungistáticos (Kang *et al.*, 2011). En un estudio que realizaron Park *et al.*, (2008) en tabaco transgénico, se obtuvieron los mejores resultados para el control de enfermedades con la aplicación de AH vía *drench*. Por lo tanto, los autores sostienen que la acción antibacteriana del AH en las plantas es sistémica y no directa (Park *et al.*, 2008). También los genes de defensa PR1a y PDF1.2 se activaron tras el tratamiento con AH, lo que demuestra que las vías de AS y AJ se activan gracias a la inducción de RSA con AH en las plantas completas (Park *et al.*, 2008). Por lo anterior, no se puede garantizar un efecto biocida del AH aplicado en productos hortofrutícolas en tratamientos poscosecha.

### **VII.2.2. Ácido Hialurónico como Antioxidante.**

Los OG también están involucrados en el proceso de maduración de los frutos. La respiración de los frutos genera radicales libres (Dorado-Lambert y Revilla-Montero, 2000). Además, la disminución de las ERO retrasa la senescencia de los frutos (Wilson-García *et al.*, 2008; Eum *et al.*, 2009) (Figura 14). Por lo que se sugiere que al utilizar AH como recubrimiento se podría reducir la respiración del fruto, neutralizar a las ERO y proteger al fruto contra el estrés oxidativo. Éstas dos propiedades podrían disminuir las quemaduras en la corteza del fruto producidas por la exposición a rayos solares en precosecha, ya que se ha comentado anteriormente que el AH puede actuar como un antioxidante. Por lo tanto, la aplicación del AH como recubrimiento ayudará a alargar la vida poscosecha o en anaquel de los frutos, reduciendo así en gran medida las pérdidas poscosecha.

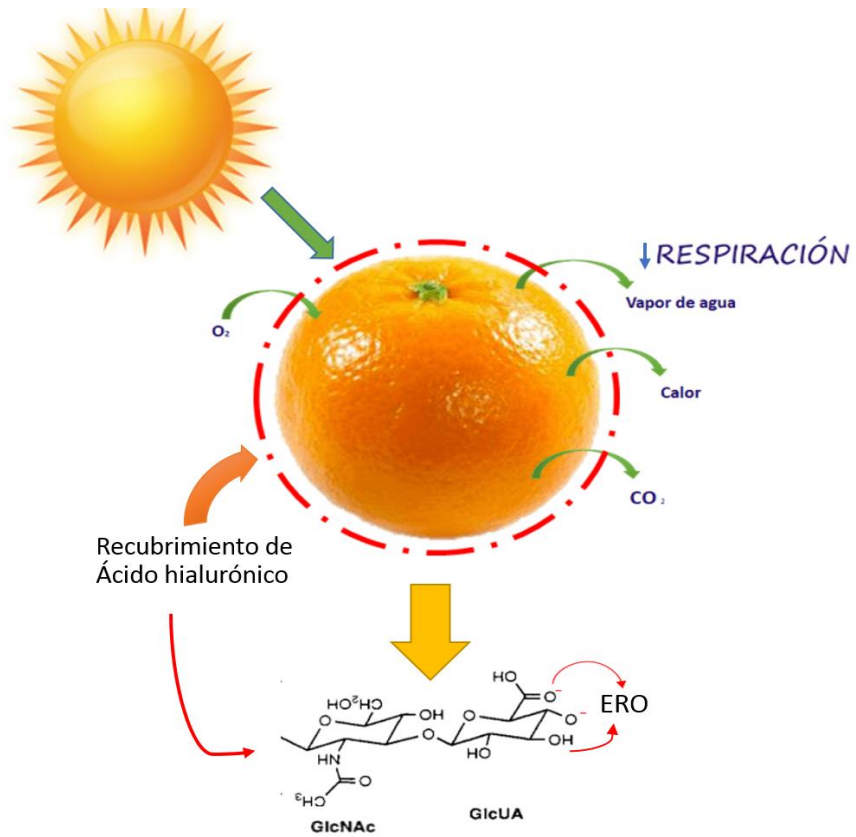


Figura 14. Efecto antioxidante de los recubrimientos de ácido hialurónico.

### VII.3. Posibles Resultados de la Aplicación del Ácido Hialurónico.

El AH es una molécula de alto peso molecular que, una vez dentro de la planta, puede inducir resistencia a plagas y utilizarse como un tratamiento preventivo (Ferrari *et al.*, 2013). El AH aplicado vía *drench* puede disminuir el impacto del estrés oxidativo en plantas, aumentar la capacidad de las plantas para defenderse de las enfermedades y, a su vez, impulsar el crecimiento y desarrollo de los cultivos (Sato *et al.*, 1988; Ridley *et al.*, 2001; Ferrari *et al.*, 2013).

El AH podría ser una alternativa viable y más económica, ya que las cantidades requeridas para obtener buenos resultados llegan a ser hasta diez veces menores al de los fitorreguladores convencionales, también sus diferentes aplicaciones: elicitor, antioxidante y bioestimulante permiten manejar más de un problema del cultivo con el mismo producto, lo cual se traduce en un ahorro económico para los productores y la posibilidad de obtener productos a precios menores (Figura 15).

El estrés oxidativo en las plantas puede interferir con las reacciones bioquímicas y reducir la fotosíntesis e intercambio gaseoso por la alta producción de ERO (Adrees *et al.*, 2015). Por lo tanto, reducir a las ERO con AH permitiría aumentar la tasa fotosintética e incrementar la concentración de carbohidratos y, probablemente, mejorar la concentración de azúcares, mejorando el sabor y la calidad de los frutos. Además, el crecimiento de la planta y de las raíces impulsado por la administración de AH, dotará a la planta de una mayor área foliar. Esto último permitirá a la planta aumentar la fotosíntesis y así, una mayor producción de frutos. Por si fuera poco, el AH podría generar una reducción de la actividad microbiana y de los efectos patógenos generados por los microorganismos, gracias al incremento de la reacción de defensa de la planta (Figura 15). El AH es extremadamente hidrófilo y puede retener el agua con 90 veces su peso (Wu *et al.*, 2006). Por lo tanto, su aplicación en frutos frescos puede ayudar a éstos a permanecer hidratados más tiempo manteniendo la turgencia (Avena-Bustillos *et al.*, 1997).

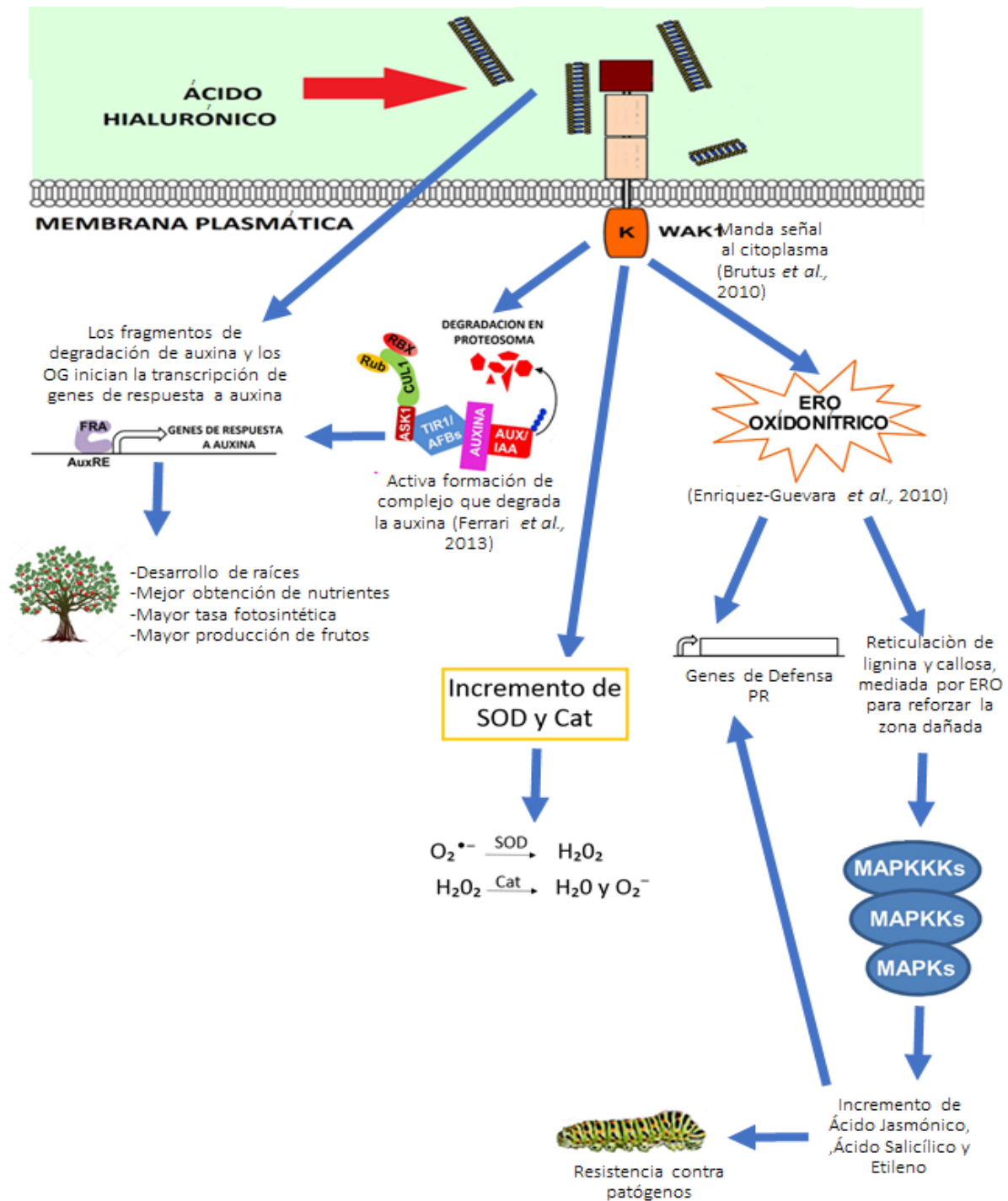


Figura 15. Modelo general de las acciones del ácido hialurónico en plantas. Imágenes modificadas de: Ferrari *et al.*, (2013). Modelo propio.

## **VIII. CONCLUSIONES**

Con base en la literatura consultada se considera que el ácido hialurónico puede presentar efectos positivos en el desarrollo y el crecimiento de las plantas, prevenir y combatir enfermedades, y proteger a los cultivos del estrés biótico y abiótico. Además de que se trata de un material biodegradable que no resulta dañino para el consumidor ni para el medio ambiente y cuyas propiedades antioxidantes pueden ser aprovechadas a nivel pre- y poscosecha.

## IX. REFERENCIAS

- Adrees M., Ali S., Iqbal M., Bharwana S. A., Siddiqi Z., Farid M., Rizwan M. (2015). Mannitol Alleviates Chromium Toxicity in Wheat Plants in Relation to Growth, Yield, Stimulation of Anti-oxidative Enzymes, Oxidative Stress and Cr Uptake in Sand and Soil Media. *Ecotoxicology and Environmental Safety*. 122(1), 1-8.
- Al-Bayaty F. H., Taiyeb-Ali T. B., Abdulla M. A., Mahmud Z. B. (2011). Antibacterial Effects of Oradex, Genigel and Salvathymol-n Mouthwash on Dental Biofilm Bacteria. *Full Length Research Paper*. 5(6), 636-642.
- Altieri M. Á., Nicholls C. (2012). Agroecología: Única Esperanza para la Soberanía Alimentaria y la Resiliencia Socioecológica. *Agroecología*. 7(2), 65-83.
- Álvarez A. R., Saucedo V. C., Chávez F. S., Medina U. V., Colinas L. M. T., Báez S. R. (2010). Aplicación de Ácido Giberélico en Precosecha y Cera en Poscosecha a Frutos de Limón Mexicano. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*. 1(1), 95-100.
- Ahmad Dar T., Uddin M. A., Khan M., Hakeem K. R., Jaleel H. (2015). Jasmonates Counter Plant Stress. A Review. *Environmental and Experimental Botany*. 115, 49-57.
- Araiza-Flores R., Barrios-Ayala A., Herrera-García M., Barboza-Moreno F., Aceves A. M., Otero-Sánchez M. A., Tejacal I. A. (2015). Fitohormonas y Bioestimulantes para la Floración, Producción y Calidad de Lima Mexicana de Invierno. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*. 6(7), 1653-1666.
- Arias B. C., Moors M. E. (2018). Reducing Post-Harvest Food Losses Through Innovative Collaboration: Insights From the Colombian and Mexican Avocado Supply Chains. *Journal of Cleaner Production*, 199(187), 1020-1034.
- Artes-Calero F. (2006). El Envasado en Atmosfera Modificada Mejora la Calidad de Consumo de los Productos Hortofrutícolas Intactos y Mínimamente Procesados en Fresco. *Revista Iberoamericana de Tecnología Poscosecha*. 7(2), 61-68.
- Avena-Bustillos R., Krochta J., Saltveit E. (1997). Water Vapour Resistance of Red Delicious Apples and Celery Sticks Coated With Edible Caseinate-Acetylated Monoglyceride Films. *Journal of Food Science*. 62(2), 351-354.
- Badawy M. E. I., Rabea E. I. (2011). A Biopolymer Chitosan and Its Derivatives as Promising Antimicrobial Agents Against Plant Pathogens and Their Applications in Crop Protection. *International Journal of Carbohydrate Chemistry*. 1(1), 1-29.
- Báez-Sañudo R., Mercado-Ruiz J., García-Robles J. M., Valle-Sotelo E. G., Falcón-Verdugo L. P., Martínez-Garate A. A., Herrera-Cereros J. M., Anaya-Dyck J. M. (2018).

- Acetylsalicylic Acid and Edible Coatings for Fruits Conservation: Tomatoes as a Model. *Revista Iberoamericana de Tecnología Postcosecha*. 19(1), 1665-0204.
- Branca C., De Lorenzo G., Cervone F. (1988). Inhibición competitiva del alargamiento inducido por auxina por  $\alpha$ -D-oligogalacturonides en segmentos de tallo de guisante. *Plant Physiology*. 72(1), 499–504.
- Browse J., Howe G. A. (2008). New Weapons and a Rapid Response Against Insect Attack. *Plant Physiology*. 146(1), 832–838.
- Brutus A., Sicilia F., Macone A., Cervone F., De Lorenzo G. (2010). A Domain Swap Approach Reveals a Role of the Plant wall-Associated Kinase 1 (WAK1) as a Receptor of Oligogalacturonides. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*. 107(1), 9452-7.
- Calvo P., Nelson L., Kloepper J. W. (2014) Agricultural Uses of Plant Biostimulants. *Plant and Soil*. 383(1-2), 3-41.
- Carson L. C., Ozores-Hampton M. (2013). Factors Affecting Nutrient Availability, Placement, Rate, and Application Timing of Controlled-Release Fertilizers for Florida Vegetable Production Using Seepage Irrigation. *HortTechnology*. 23(5), 553-562.
- Cermelli C., Cuoghi A., Scuri M., Bettua C., Neglia R., Ardizzoni A., Blasi E., Lannitti T., Palmieri B. (2011). Evaluación *in vitro* de la Actividad Antiviral y Virucida de un Ácido Hialuronano de Alto Peso Molecular. *Revista de Virología*. 8, 141.
- Chagas J. O., Gomes M. J., Matos-Cunha I. C., Ferreira-Silva de Melo N., Fernández-Fraceto L., Da Silva G. A., Lobo F. A. (2018). Polymeric Microparticles for Modifies Release of NPK in Agricultural Applications. *Arabian Journal of Chemistry*. 63, 163-172.
- Chen L., Huang G. (2018). The Antiviral Activity of Polysaccharides and Their Derivatives. *International Journal of Biological Macromolecules*. 115, 77-82.
- Cruz D. D., Leos R. J., Altarmirano C. J. (2013). México: Factores Explicativos de la Producción de Frutas y Hortalizas Ante la Apertura Comercial. *Chapingo. Serie Horticultura*. 19(3), 267-278.
- Cote F., Hahn M. G. (1994). Oligosaccharins: structures and signal transduction. *Plant Molecular Biology*, 26(1), 1379-1411.
- Cui J. J., Yuan J. F., Zhang Z. Q. (2010) Anti-Oxidation Activity of the Crude Polysaccharides Isolated from *Polygonum cillinerve* (Nakai) Ohwi in Immunosuppressed Mice. *Journal of Ethnopharmacology*, 132(2), 512-517.
- Dhall R. K. (2013). Advances in Edible Coatings for Fresh Fruits and Vegetables: A Review. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*. 53(5), 435-450.



- Dorado-Lambert A., Revilla-Montero J. (2000). Radicales Libres de Oxígeno y Distress Respiratorio Agudo. *Revista Cubana de Pediatría*. 72(3), 214-9.
- El Ghaouth A., Arul J. (1992). Antifungal Activity of Chitosan on Post-harvest Pathogens: Induction of Morphological and Cytological Alterations in *Rhizopus Stolonifer*. *Mycological Research*. 96(1), 769-772.
- Enríquez-Guevara E. A., Aispuro-Hernández E., Vargas-Aispuro I., Martínez -Téllez M. (2010). Cell Wall Oligosaccharine Derivatives: Biological Activity and Participation in the Response of Plant Defense. *Revista Mexicana de Fitopatología*. 28(2), 1-12.
- Esquerre-Tugaye M. T., Boudart G., Dumas B. (2000). Cell Wall Degrading Enzymes, Inhibitory Proteins, and Oligosaccharides Participate in the Molecular Dialogue Between Plants and Pathogens. *Plant Physiology and Biochemistry*. 38(1-2), 157-163.
- Eum H., Hwang D., Linke M., Lee S., Zude M. (2009). Influence of Edible Coating on Quality of Plum (*Prunus salicina* Lindl. Cv 'Sapphire'). *European Food Research and Technology*. 229(3), 427-434.
- Falcón-Rodríguez A. B., Costales-Menéndez D., González-Peña D., Napoles-García M. C. (2015). Nuevos Productos Naturales para la Agricultura: Las Oligosacarinas. *Cultivos Tropicales*. 36, 111-129.
- Fallacara A., Baldini E., Manfredini S., Vertuani S. (2018). Hyaluronic Acid in the Third Millennium. *Department of the Life Sciences and Biotechnology*. 10(7), 701.
- FAO (2000). Manejo Poscosecha de Frutas Tropicales (Papaya, Piña, Plátano, Cítricos). Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación. México.
- FAO (2013). Panorama de la Seguridad Alimentaria y Nutricional en México, México. 240.
- Farmer E. E., Moloshok T. D., Saxton M. J., Ryan C. A. (1991). Oligosaccharide Signaling in Plants. Specificity of Oligouronide-Enhanced Plasma Membrane Protein Phosphorylation. *The Journal of Biological Chemistry*. 266(15), 3140-3145.
- Ferrari S., Savatin D., Sicilia F., Gramegna G., Cervone F., De Lorenzo G. (2013). Oligogalacturoides. Plant damage-associated Molecular Patterns and Regulators of Growth and Development. *Frontiers in Plant Science*. 4(412), 1-12.
- Flores C., Nieto M., Millan-Gomez D. V., Caro M., Galindo E., Serrano-Carreón L. (2019). Elicitation and Biotransformation of 6-pentyl- $\alpha$ -pyrone in *Trichoderma atroviride* cultures. *Process Biochemistry*. 82, 68-74.
- Ghaderiardakani F., Collas E., Damiano D. K., Tagg K., Graham N. S., Coates J. C. (2019). Effect of Green Seaweed Extraction Arabidopsis Early Development Suggest Roles for Hormone Signaling in Plant Responses to Algal Fertilizers. *Scientific Reports*. 9, 1-13.

- García E. E., Robledo O. A., Benavides M. A., Solís G. S., González M. S. (2018). Efecto de Elicitores de Origen Natural Sobre Plantas de Tomate Sometidas a Estrés Biótico. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícola*. 20(1), 4211-4221.
- Giménez M. J., Castillo S., Valverde J. M., Valero D., Martínez-Romero D. (2015) Tratamientos de Cerezos con Metil Salicilato Mantienen la Calidad Post-recolección de Cerezos. *Departamento de Tecnología Agroalimentaria*, EPSO-UMH, Orihuela, Alicante XIV Congreso Nacional de Ciencias Hortícolas; Orihuela, España.
- Grigorij K., Ladislav S., Stern R., Gemeiner P. (2006). Hyaluronic Acid: A Natural Biopolymer with a Broad Range of Medical and Industrial Applications. *Biotechnology Letters*. 29, 17-25.
- Guilbert S., Gontard N. (1995). Edible and Biodegradable Food Packaging. In: Ackermann P., Jagerstad M. y Ohlsson T. (eds.), *Foods and Packaging Materials-Chemical Interactions*. Cambridge, England: The Royal Society of Chemistry. 159-168.
- Gustavsson J., Cederberg C., Sonesson U., Van Otterdijk R., Meybeck A. (2011). Global Food Losses and Food Waste. *Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO)*, Rome.
- Hamilton A. H., Ivanova D., Stadler K., Merciai S., Schmidt J., Zelm R., Moran D., Wood R. (2018). Trade and the Role of Non-food Commodities for Global Eutrophication. *Nature Sustainability*. 1(6), 314-321.
- Herrera L. P., Champion J. A. (2015). Protein Nanoparticles for Therapeutic Protein Delivery. *Biomaterial Science*. 3(1), 787-799.
- Hidrobo-Luna J. R., Ardisana E. H., Cabrera J. C., Jomarrón-Rodiles I. (2002). Utilización del Pectimorf y Biobras-16 en la Embriogénesis Somática de la Papa. *Biotechnología Vegetal*. 2(1), 9-14.
- INEGI-SAGARPA, (2015). Nota Técnica Encuesta Nacional Agropecuaria 2014. En: Conociendo el Campo de México, Instituto Nacional de Estadística Geografía y Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación, Aguascalientes, México, 20.
- Jabun N. S., Shimasaki K. (2011). Effect of Plant Growth Regulators on Organogénesis in Protocorm-like Body (PLBs) of *Cymbidium dayanum* In Vitro. *Journal of Agricultural and Biological Science*. 6(6), 28-33.
- Jin F. J., West C. (1984). Characteristics of Galacturonic Acid Oligomers as Elicitors of Casbene Synthetase Activity in Castor Bean Seedlings. *Plant Physiology*. 74 (4), 989-992.
- Johnson T. M., Alatorre C., Romo Z., Liu F. (2009). Bajo-Carbono Para el Desarrollo de México. Herndon, VA, Estados Unidos: Publicaciones del Banco Mundial. 73.

- Kaewjampa N., Shimasaki K., Jabun S. (2012). Hyaluronic Acid Can Be a New Plant Growth Regulator for Hybrid *Cymbidium* Micropropagation. *Plant Tissue Culture & Biotechnology*. 22(1), 56-64.
- Kamal M. M., Shimasaki K., Aker N. (2014). Effect of Hyaluronic Acid in Organogenesis in Rhizome Cultures of *Cymbidium karan* Makino. *Plant Tissue Culture & Biotechnology*. 24(1), 121-124.
- Kang J. H., Kim Y. Y., Chang J. Y., Kho H. S. (2011) Influencias del Ácido Hialurónico en las Actividades Anticandidales de la Lisozima y el Sistema de Peroxidasa. *Oral Diseases*. 17, 577-583.
- Ke C, Sun L., Qiao D., Wang D., Zeng X. (2011). Antioxidant Activity of Low Molecular Weight Hyaluronic Acid. *Food and Chemical Toxicology*. 49(10), 2670-2675.
- Krasinski R., Tchórzewski H, Lewkowicz P. (2009) Antioxidant Effect of Hyaluronan on Polymorphonuclear Leukocyte-Derived Reactive Oxygen Species is Dependent on its Molecular Weight and Concentration and Mainly Involves the Extracellular Space *Postepy Hig Med Dosw*. 4(63), 205-212.
- Lara-Acosta D., Costales-Menéndez D., Falcón-Rodríguez A. (2018). Los Oligogalacturoides en el Crecimiento y Desarrollo de las Plantas. *Cultivos Tropicales*. 39(2), 1819-4087.
- Laurent T. C., Fraser J. R. (1992). Hyaluronan. *The FASEB Journal*. 6(7), 2397-2404.
- Lee D. G., Cho J. J., Park H. K., Kim D. K., Kim J. I., Chang S., Lee S. (2010). Efectos Preventivos del Ácido Hialurónico en la Infección del Tracto Urinario Inducida por *Escherichia coli* en Ratas. *Urología*. 75(4) 949-954.
- Li W., Nishiyama R., Wantanabe Y., Van Ha Ch., Kojima M., An P., Tian L., Tian Ch., Sakakibara H., Son Phan Tran L. (2018). Effects of Overproduced Ethylene on the Contents of Other Phytohormones and Expression of Their Key Biosynthetic Genes. *Plant Physiology and Biochemistry*. 128(1), 170-177.
- Lin D., Zhao Y. (2007). Innovation the Development and Application of Edible Coating for Fresh and Minimally Processed Fruits and Vegetables. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*. 6(3), 60-75.
- Lipinski B., Hanson C., Lomax J., Kitinoja L., Waite R., Searchinger T. (2013). Reducing Food Loss and Waste. World Resources Institute Working Paper, June. Installment of Creating a Sustainable Food Future. *World Resources Institute*, Washington, DC. 1-2.
- Liu J., Wang X., Yong H., Kan J., Jin C. (2018). Recent Advances in Flavonoid-Grafted Polysaccharides. Synthesis, Structural Characterization, Bioactivities and Potential Applications. *Macromolecules*. 116, 1011-1025.

- Ma X., Ou Y., Gao Y., Lutts S., Li T., Wang Y., Chen Y., Sun Y., Yao Y. (2016). Moderate Salt Treatment Alleviates Ultraviolet-B Radiation Cause Impairment in Poplar Plants. *Scientific Reports*. 6(1), 1-15.
- MacDougall A. J., Rigby N. M., Needs P. W., Selvendran R. R. (1992). Movement and Metabolism of Oligogalacturonide Elicitors in Tomato Shoots. *Planta*, 188(4), 566-574.
- Macías M. A. (2010). Competitividad de México en el Mercado de Frutas y Hortalizas de Estados Unidos de América, 1989-2009. *Agroalimentaria*. 16(31), 31-48.
- Macías M. A. (2009). Mallas de Valor Global en la Agricultura de Hortalizas en México. El Caso de Sayula, Jalisco. *Regio y Sociedad*. 21(46), 113-144.
- Martínez-Ferrer M., Harper C., Pérez-Munoz, F., Chaparro M., (2002). Modified Atmosphere Packaging of Minimally Processed Mango and Pineapple Fruits. *Journal of Food Science*. 67(9), 3365-3371.
- Maynard A. D., Aitken R. J., Butz T., Colvin V., Don-Aldson K., Oberdörster G., Philbert M. A., Ryan J., Seaton A., Stone V., Tinkle S. S., Tran L., Walker N. J., Warheit D. B. (2006). Safe Handling of Nanotechnology. *Nature*. 444(16), 267-269.
- Mehraj H., Shimasaki K. (2017). *In Vitro* PLBs Organogénesis of *Phalaenopsis* Using Different Concentrations of HA9 and HA12 Combination. *Journal Binet*. 12(2), 1036-1040.
- Menderos Y., Hormaza J. (2008). Consideraciones Generales en la Obtención, Caracterización e Identificación de los Oligogalacturónidos. *Cultivos Tropicales*. 29(1), 83-90.
- Merino D., Casalongué C., Álvarez V. A. (2018). Polysaccharides as Eco-Nanomaterials for Agricultural Applications. En: Martínez L., Kharissova O., Kharisov B. (eds) *Handbook of Ecomaterials*. Springer, Cham. Buenos Aires, Argentina. 1-17.
- Michalak G., Gluszek K., Piktel E., Deptula P., Pusz-Karz I., Niemirowics K. (2016). Polymeric Nanoparticles – a Novel Solution for Delivery of Antimicrobial Agents. *Medical Studies/Studia Medyczne*, 32(1), 56-62.
- Michelet J. F., Olive, C., Rieux E., Fagot D., Simonetti L., Galey J. B., Pereira R. (2012). The Anti-Ageing Potential of a New Jasmonic Acid Derivative (LR2412): *In Vitro* Evaluation Using Reconstructed Epidermis Episkin™. *Experimental Dermatology*, 21(5), 398-400.
- Mukherjee P. K., Maity N., Nema N., Sarkar B. (2011). Bioactive Compounds from Natural Resources Against Skin Aging. *Phytomedicine*. 19, 64-73.
- Mukherjee A., Knoch S., Chouinard G., Tavares J. R., Dumont J. M. (2019). Use of Bio-Based Polymers in Agricultural Exclusion Nets: A Prespective. *Biosystem Engineering*. 180(1), 121-145.

- Nahar S. J. S., Kazuhinko S., Li H. C., Kaewjampa N. (2011). Effect of Plant Growth Regulators on Organogenesis in Protocorm-Like Body (PLBs) of *Cymbidium dayanum* in Vitro. *Journal of Agricultural and Biological Science*. 6(6), 28-33.
- Neuman M., Radu M. N., Orduña-Sanchez L., Goto G. (2015). Hyaluronic Acid and Wound Healing. *Journal of Pharmacy & Pharmaceutical Sciences*. 18(1), 53-60.
- Osuna-Enciso T. (2012). Aplicación Precosecha de Etefón para Mejorar la Calidad de Mangos 'Tommy Atkins' para Procesado Industrial. *Revista Fitotecnica Mexicana*. 35(5), 69-74.
- Pang Z. P., Chen Y., Zhou M. (2000). Polysaccharide Krestin Enhances Manganese Superoxide Dismutase Activity and mRNA Expression in Mouse Peritoneal Macrophages. *American Journal of Chinese Medicine*. 28(3-4), 331-341.
- Park K., Paul D., Kim E., Kloepper J. W. (2008). Hyaluronic acid of *Streptococcus* sp. as a potent elicitor for induction of systemic resistance against plant diseases. *World Journal of Microbiology and Biotechnology*. 24(7), 1153-1158.
- Pirnazar P., Wolinsky., Nachnani S., Haake S., Pilloni A., George W. B. (1999). Bacteriostatic Effects of Hyaluronic Acid. *Journal of Periodontology*. 70(4), 370-4.
- Pouyani T., Prestwich D. (1993). Functionalized Derivatives of Hyaluronic Acid Oligosaccharides: Drug Carriers and Novel Biomaterials. *Bioconjugates Chemistry*. 5(4), 229-347.
- Quintero C. J., Falguera V., Muñoz H. A. (2010). Películas y Recubrimientos Comestibles: Importancia y Tendencias Recientes en la Cadena Hortofrutícola. *Tumbaga*. 1(5), 93-118.
- Raghav P. K., Agarwal N., Saini M. (2016). Edible Coating of Fruits and Vegetables: A Review. *International Journal of Scientific Research and Modern Education*, 1(1), 188-204.
- Ramos-Garcia M., Bautista-Baños S., Barrera-Necha L. L. (2010). Compuestos Antimicrobianos Adicionados en Recubrimientos Comestibles para Uso en Productos Hortofrutícolas. *Revista Mexicana de Fitopatología*. 28(1), 44-57.
- Ridley L. B., O Neil M. A., Mohnen D. (2001). Pectins. Structure, Biosynthesis, and Oligogalacturonide-Related Signaling. *Phytochemistry*. 57(6), 929-967.
- Rinaudo M. (2006). Characterization and Properties of Some Polysaccharides Used as Biomaterials. *Centre de Recherché Sur Les Macromolecules Vegetales*. 245-246(1), 549-557.
- Rinaudo M. (2009). Polyelectrolyte Properties of a Plant and Animal Polysaccharide. *Structural Chemistry*. 20(2), 277-289

- Rivas M., Galicia I. (2017). Rethinking Food Security in Mexico Discussing the Need for Sustainable Transversal Policies Linking Food Production and Food Consumption. *Investigaciones Geográficas, Boletín del Instituto de Geografía*. 94, 106-121.
- Romano C. L., De Vecchi E., Bortolin M., Morelli I., Drago L. (2017). Hyaluronic Acid and its Composites as a Local Antimicrobial/Antiadhensive Barrier. *Journal of Bone & Joint Infection*. 2(1) 63-72.
- Rostami M., Rostami S. (2019). Effect of Salicylic Acid and Mycorrhizal Symbiosis on Improvement of Tlouranthene Phytoremediation Using Tall Fescue (*Festuca arundinacea* Shreb). *Chemosphere*. 20(232), 70-75.
- Rudzinski W. E., Dave A. M., Vaishnav U. H., Kumbar S. G., Kulkarni A. R., Aminabhavi T. M. (2002). Hydrogels as Controlled Release Devices in Agriculture. *Designed Monomers and Polymers*. 5(1), 39-65.
- Saborio D., Saenz V., Arauz L., Bertsch F. (2000). Efecto del Calcio en Aplicaciones Precosecha y Poscosecha Sobre la Severidad de Antracnosis (*Colletricum gloeosporoides*) y la Calidad de Frutos de Papaya (*Carica papaya*). *Agronomía Costarricense*. 24(2), 77-88.
- Saldaña Z. (2015). Natural Disasters, Foreign Trade and Agriculture in Mexico. En: SpringerBriefs in Environmental Science. *Natural Disasters, Foreign Trade and Agriculture in Mexico*. International Institute for Applied Systems Analysis (IIASA) Laxenburg, Austria. 1-3.
- Salvador A., Cuquerella J., Monteverde A. (2003). Efecto del Quitosano Aplicado como Recubrimiento de Mandarinas 'Fortune'. *Revista Iberoamericana de Tecnología Poscosecha*. 5(2), 122-127.
- Santner A., Estelle M. (2009). Recent Advances and Emerging Trends in Plant Hormone Signalling. *Reviews*. 459(25), 1071-1078.
- Sato H., Takahashi T., Ide H., Fukushima T., Tabata M., Sekine F., Kobayashi K., Negishi M., Niwa Y. (1988). Antioxidant Activity of Synovial Fluid, Hyaluronic Acid, and Two Subcomponents of Hyaluronic Acid. 31(1), 63-71.
- Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación (SAGARPA). (2017). Planeación Agrícola Nacional: 2017-2030. SAGARPA. 1-67.
- Selvarajah S., Bauchot A. D., John P. (2001). Internal Browning in Cold-Stored Pineapples is Suppressed by a Postharvest Application of 1-Methylcyclopropene. *Postharvest Biology and Technology*. 23(2), 167-170.
- Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera (SIAP). (2013). Hortalizas, Legumbres y Frutos en las Exportaciones Mexicanas. SIAP. 18 pp.

- Sharma S., Chen C., Navathe S., Chand R., Pandey S. P. (2019). A Halotolerant Growth Promoting Rhizobacteria Triggers Induce Systemic Resistance in Plants and Defends Against Fungal Infection. *Scientific Reports*. 9(1), 4054.
- Slotes L., Mendichi R., Kogan G., Schiller J., Stankovska M., Arnhold J. (2006). Degradative Action of Reactive Oxygen Species on Hyaluronan. *Biomacromolecules*. 7(3), 659-68.
- Sosa B. A. (2017). La Disponibilidad de Alimentos en México: Un Análisis de la Producción Agrícola de 35 Años y su Proyección para 2050. *Papeles de Población*. 23(93), 207-229.
- Sultana S. K., Hasan K. M., Mehraj H., Shimasaki K., Habiba U. S. (2015). Effect of Hyaluronic Acid (HA) on Organogenesis in Protocorm Like Bodies (PLBs) of Phalaenopsis “Fmk02010” Cultured in Vitro. *American-Eurasian Journal of Agricultura & Enviromental Sciences*. 15(9), 1721-1724.
- Struszczyk M. (2002). Chitin and Chitosan. *Polimery*. 47(9), 619-627.
- Takahashi I., Asami T. (2018). Selectividad Basada en el Objetivo de los Agonistas y Antagonistas de la Strigolactona en Plantas y su Uso Potencial en la Agricultura, *Journal of Experimental Botany*. 69(9), 2241–2254.
- Tang Y., He, R., Zhao, J., Nie, G., Xu, L., Xing, B. (2016). Oxidative Stress-Induced Toxicity of CuO Nanoparticles and Related Toxicogenomic Responses in *Arabidopsis thaliana*. *Environmental Pollution*. 212(1), 605-614.
- Trabucchi E., Pallotta S., Morini M., Corsi F., Franceschini R., Casiraghi A., Pravettoni A., Foschi D., Minghetti P. (2009). Low Molecular Weight Hyaluronic Acid Prevents Oxygen Free Radical Damage to Granulation Tissue During Wound Healing. *International Journal Tissue of Reactions*. 24(2), 65-71.
- Teixeira da Silva J. A. (2014). Response of Hybrid *Cymbidium (Orchidaceae)* Protocorm-Like Bodies to 26 Plant Growth Regulators. *Botanica lithuanica*. 20(1), 3-13.
- Teixeira da Silva J., Uthairatanakij K. O., Obsuwan K., Shimasaki K., Tanaka M. (2012). Elicitors (Chitosan and Hyaluronic Acid) Affect Protocorm-Like Body Formation in Hibrid *Cymbidium*. *The Asian and Australasian Journal of Plant Science and Biotechnology*. 7(1), 77-81.
- Treinyte J., Bridziuvienė D., Fataraite-Urbonienė E., Rainosalo E., Rajan R., Cesoniene L., Grazuleviciene V. (2018). Forestry Wastes Filled Polymer Composites for Agricultural Use. *Journal of Cleaner Production*. 205(4), 388-406.
- Tripathy P. P., Ayyappan, S. (2005). Evaluation of Azotobacter and Azospirillum as Biofertilizers in Aquaculture. *World Journal of Microbiology and Biotechnology*, 21(8-9), 1339-1343.

- Van den Boerck G., Maertens, M. (2016). Horticultural Exports and Food Security in Developing Countries. *Global Food Security*. 10(1), 11-20.
- Weerahewa D., Adikaram N. K. B. (2005). Heat-induced Tolerance to Internal Browning of Pineapple (*Ananas comosus* cv. 'Mauritius') Under Cold Storage. *Journal of Horticultural Science and Biotechnology*. 80(4), 503-509.
- Wilson-García C. Y., Zavaleta-Mancera H. A., López-Delgado H., Hernández-Garay A. (2008). La Citocinina BAP Retrasa Senescencia. Aumenta Antioxidantes, Proteína y Crecimiento en el Pasto Ovillo (*Dactylis glomerata* L.). *Agrociencia*. 42, 799-806.
- Wu J., Wang X., Keum J. K., Zhou H., Gelfer M., Avila C., Chen W., Chiao Sh., Hsiao B., Chu B. (2006). Water Soluble Complexes of Chitosan-g-MPEG and Hyaluronic Acid. *Journal of Biomedical Materials Research*. 80(4), 800-812.
- Youryon P., Wongsaree C. (2015). Postharvest Application of Calcium Chloride Affects Internal Browning Reduction During Low Temperature Storage of 'Sawi' Pineapple. *Acta Horticulturae*. 1088, 197-200.
- Zhang Q., Liu Y., He C., Zhu S. (2015). Postharvest Exogenous Application of Absciscic Acid Reduces Internal Browning in Pineapple. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*. 63(22), 5313-5320.