



CIENCIA ergo-sum, Revista Científica
Multidisciplinaria de Prospectiva
ISSN: 1405-0269
ISSN: 2395-8782
ciencia.ergosum@yahoo.com.mx
Universidad Autónoma del Estado de México
México

Conservación de productos hortofrutícolas mediante el uso de nanopartículas de quitosano y agentes naturales

Bautista-Baños, Silvia; Corona-Rangel, María Luisa; Correa-Pacheco, Zormy Nacary

Conservación de productos hortofrutícolas mediante el uso de nanopartículas de quitosano y agentes naturales

CIENCIA ergo-sum, Revista Científica Multidisciplinaria de Prospectiva, vol. 29, núm. 3, 2022

Universidad Autónoma del Estado de México, México

Disponible en: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=10472165005>

DOI: <https://doi.org/10.30878/ces.v29n3a9>

Atribución — Usted debe dar crédito de manera adecuada, brindar un enlace a la licencia, e indicar si se han realizado cambios. Puede hacerlo en cualquier forma razonable, pero no de forma tal que sugiera que usted o su uso tienen el apoyo de la licenciante. NoComercial — Usted no puede hacer uso del material con propósitos comerciales. SinDerivadas — Si remezcla, transforma o crea a partir del material, no podrá distribuir el material modificado. No hay restricciones adicionales — No puede aplicar términos legales ni medidas tecnológicas que restrinjan legalmente a otras a hacer cualquier uso permitido por la licencia.



Esta obra está bajo una Licencia Creative Commons Atribución-NoComercial-SinDerivar 4.0 Internacional.

Conservación de productos hortofrutícolas mediante el uso de nanopartículas de quitosano y agentes naturales

Conservation of horticultural products using chitosan nanoparticles and natural agents

Silvia Bautista-Baños

Instituto Politécnico Nacional, México

sbautis@ipn.mx

 <https://orcid.org/0000-0002-5151-3004>

DOI: <https://doi.org/10.30878/ces.v29n3a9>

Redalyc: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=10472165005>

María Luisa Corona-Rangel

Instituto Politécnico Nacional, México

mcorona@ipn.mx

 <https://orcid.org/0000-0002-0878-0959>

Zormy Nacary Correa-Pacheco

Instituto Politécnico Nacional, México

zcorreap@ipn.mx

 <https://orcid.org/0000-0003-0774-6879>

Recepción: 30 Abril 2021

Aprobación: 07 Octubre 2021

RESUMEN:

Actualmente se buscan nuevas alternativas amigables con el ambiente que permitan la conservación de productos agrícolas expuestos al deterioro durante la cosecha, transporte y distribución en el mercado para su venta con la subsecuente reducción de sus atributos de calidad, fisiológicos y propiedades sensoriales, aunados a la manifestación de microorganismos patógenos. En este sentido, se presenta el estado del arte del uso de recubrimientos nanoestructurados de nanopartículas de quitosano con agentes naturales, sus beneficios y un enfoque académico, industrial y gubernamental del uso de la nanoagrotecnología, así como las perspectivas de esta técnica para la conservación de frutas y hortalizas como una solución viable.

PALABRAS CLAVE: quitosano, aceites esenciales, propóleo, tecnologías emergentes, investigación.

ABSTRACT:

Nowadays, new environmentally friendly alternatives that will allow the preservation of agricultural products exposed to deterioration during harvesting, transportation and distribution in the market for sales with the subsequent reduction of their quality, physiological and sensory properties, together with the manifestation of pathogenic microorganisms are being sought. The state of the art of the use nanostructured coatings of chitosan nanoparticles with natural agents is presented, along with its benefits. Also, an academic, industrial, and governmental approach to the use of nano-agrotechnology, as well as the perspectives of this technique for fruit and vegetable preservation as a viable solution.

KEYWORDS: chitosan, essential oils, propolis, emerging technologies, research.

NOTAS DE AUTOR

zcorreap@ipn.mx

1. ¿QUÉ SON LA NANOTECNOLOGÍA Y LAS NANOPARTÍCULAS?

Hoy en día la nanotecnología se define como la *tecnología a nanoescala*. Se considera que un material se encuentra dentro del orden de la nanoescala si sus dimensiones están entre 1 y 100 nanómetros (nm) siendo $1\text{ nm} = 1 \times 10^{-9}\text{ m}$.

Actualmente, se apuesta por sintetizar nanopartículas a partir de compuestos naturales como el quitosano por ser un polímero biocompatible y con notable actividad antimicrobiana. Las nanopartículas de quitosano se pueden preparar mediante diferentes técnicas como la emulsificación, la gelificación iónica, la nanoprecipitación y la nanoencapsulación y tienen aplicaciones en campos tan variados como la medicina, farmacéutica, agricultura y medioambiente (Divya y Jisha, 2018). Su efectividad antimicrobiana (Rozman *et al.*, 2019) se ha demostrado *in vitro* tanto en bacterias (Chandrasekaran *et al.*, 2020) como en hongos (El-Mohamedy *et al.*, 2019) e *in vivo* para la conservación de productos hortofrutícolas (Hu y Gänzle, 2019).

México en la actualidad, después de Brasil, es uno de los líderes en nanotecnología. Sin embargo, no existe aún una política o plan relacionado con el tema. De igual forma, la publicación de artículos se encuentra muy por debajo de otros países, aunque se ha incrementado con el tiempo. Por lo tanto, es básico apoyar la promoción de los beneficios de la nanotecnología mediante una mayor difusión de escritos que impulsen el desarrollo científico y técnico de México incentivando la innovación tecnológica. De aquí la importancia del tópico abordado en este trabajo, ya que el uso de recubrimientos nanoestructurados, en los cuales se encapsulan agentes naturales (pueden ser volátiles o fáciles de oxidar) propicia que se conserve su estabilidad, aunado al uso del quitosano como encapsulante que en escala nanométrica posee una mayor área de superficie/volumen con una mayor actividad antimicrobiana haciendo más efectiva la conservación de las propiedades de las frutas y vegetales en postcosecha.

2. ENCAPSULACIÓN DE AGENTES NATURALES EN NANOPARTÍCULAS DE QUITOSANO

Entre los agentes naturales encapsulados frecuentemente en nanopartículas de quitosano están los aceites esenciales extraídos de las plantas, los cuales son una mezcla de metabolitos secundarios que intervienen en sus mecanismos de defensa. Entre los compuestos reportados con mayor actividad antimicrobiana se mencionan cinamaldehído, carvacrol, timol, eugenol y limoneno, entre otros (Mishra *et al.*, 2020).

Por su parte, los extractos botánicos se componen de metabolitos secundarios que se obtienen de raíz, hoja, semilla de la planta mediante métodos como maceración en agua o solventes orgánicos, calentamiento bajo reflujo, entre otros (Altemimi *et al.*, 2017), con notables efectos antibacterianos y antifúngicos (Cárdenas *et al.*, 2016).

El propóleo posee de igual forma propiedades antibacterianas. Las abejas son las encargadas de recolectar esta resina secretada en la corteza de los árboles y arbustos para reparación e impermeabilización de sus colmenas (Almuhayawi, 2020).

3. FACTIBILIDAD EN EL USO DE NANOPARTÍCULAS DE QUITOSANO CON AGENTES NATURALES ENCAPSULADOS PARA EL CONTROL DE MICROORGANISMOS

La literatura reporta diversas investigaciones en las que se ha evaluado el encapsulamiento de agentes naturales en nanopartículas de quitosano. Por ejemplo, el tiempo de vida de arilos de granada con recubrimiento nanoestructurado de quitosano incorporando aceite de esencial de clavo y almacenados a $5\text{ }^{\circ}\text{C}$ se extendió 54 días comparado con los no recubiertos (18 días) y mantuvo así la calidad microbiológica, contenido de fenoles y antocianinas, capacidad antioxidante y propiedades sensoriales (Hasheminejad y Khodaiyan, 2020).

Respecto a la efectividad de los extractos botánicos encapsulados en nanopartículas de quitosano, utilizando extracto de nanche (González Saucedo *et al.*, 2019), se reportó la disminución de la carga microbiana en general (hongos, levaduras y bacterias) en pimientos recubiertos, pero se conservó la calidad del fruto después de 21 días de almacenamiento.

Por otro lado, la aplicación de propóleo mediante recubrimientos con nanopartículas de quitosano inhibió a *L. monocytogenes* y *E. coli* (Correa-Pacheco *et al.*, 2019) y se conservó la capacidad antioxidante y propiedades sensoriales en fresas refrigeradas por 8 días (Martínez-González *et al.*, 2020).

En la figura 1 se muestra la aplicación de recubrimientos con nanopartículas de quitosano y agentes naturales para la conservación de productos hortofrutícolas (fresa, jitomate y pimiento morrón).

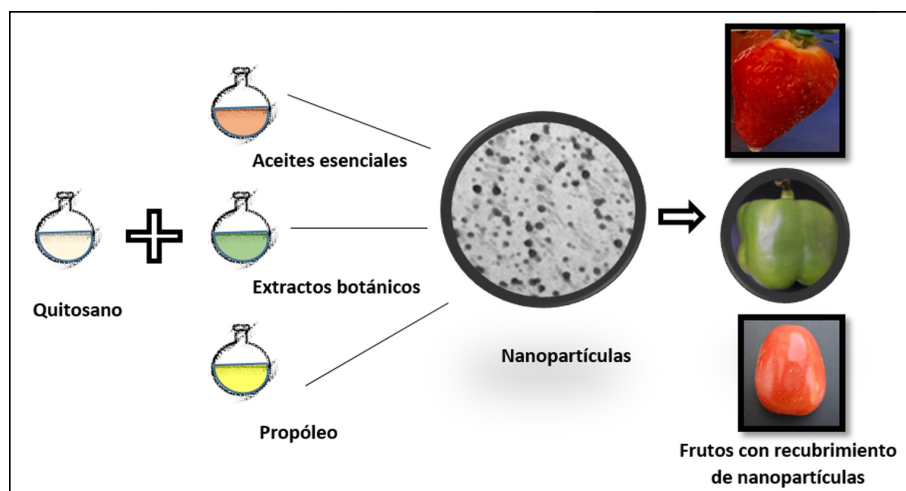


FIGURA 1

Aplicación de recubrimientos con nanopartículas de quitosano y agentes naturales para la conservación de productos hortofrutícolas

Fuente: elaboración propia.

4. REPERCUSIONES DE LA NANOTECNOLOGÍA EN EL APROVECHAMIENTO DEL QUITOSANO Y AGENTES NATURALES DENTRO DEL SECTOR AGRÍCOLA

La aplicación de nanopartículas de quitosano y agentes naturales encapsulados en la agricultura se ha centrado en proteger los cultivos contra el ataque de plagas y fitopatógenos y en conservar la calidad e inocuidad de los productos hortofrutícolas para su comercialización.

Entre las ventajas del encapsulamiento de los agentes naturales está el aumento de su vida útil y disponibilidad, una liberación controlada y mejor estabilidad ante factores externos como luz ultravioleta, humedad relativa y temperatura. Además, con la encapsulación mejoran sus propiedades fisicoquímicas al aumentar su solubilidad y disminuir su volatilización o evaporación. En consecuencia, se tiene mayor eficiencia de los compuestos (Worrall *et al.*, 2018). Por otra parte, utilizar el quitosano en la síntesis de nanopartículas permite que los agentes naturales encapsulados se absorban más fácilmente por la epidermis de hojas, tallos y frutos (Malerba y Cerena, 2016). En cuanto a la conservación de frutos y vegetales previo a su consumo se han desarrollado nanorrecubrimientos y empaques con nanopartículas para optimizar el transporte y almacenamiento de los productos empacados que disminuyen las pérdidas económicas durante su comercialización y garantizan la calidad e inocuidad de los productos a lo largo de la cadena alimentaria (Kim *et al.*, 2018), por lo que evitan la entrada de microorganismos y crean una barrera para retardar la pérdida de humedad al reducir el intercambio gaseoso y los procesos de oxidación involucrados en la degradación de los productos (Flores-López *et al.*, 2016).

Pese a los beneficios expuestos, la nanotecnología aún se considera una tecnología emergente, lo que conlleva a una serie de limitaciones en las investigaciones y conocimientos que se tienen hasta el momento. En cuanto a la toxicidad de las nanopartículas, se ha establecido su biocompatibilidad para rangos entre 150 y 300 nm. Sin embargo, sólo se han realizado estudios en modelos animales en periodos cortos sin considerar la biodistribución o biodegradabilidad. Sonin *et al.* (2020) investigaron sobre la toxicidad de nanopartículas de quitosano mediante la administración intravenosa a dosis de 1, 2 y 4 mg/kg en ratas. Los resultados mostraron principalmente acumulación en hígado y pulmones con sólo un pequeño efecto citotóxico antiplaquetario y anticoagulante después de 30 min de administración. No se observó hemólisis ni leucocitosis ni se produjeron cambios hematológicos ni bioquímicos durante el periodo de administración de 14 días, lo que indica una buena tolerancia de las ratas a las nanopartículas de quitosano. Por otra parte, Buzea *et al.* (2007) enfatizan que no todas las nanopartículas producen toxicidad; no obstante, ésta depende de diversos factores como lo es su tamaño, agregación, composición, funcionalización de su superficie, entre otras.

A su vez, Garavand *et al.* (2020) reportan una ligera citotoxicidad del quitosano en diferentes líneas celulares dependiendo de su peso molecular y de su grado de desacetilación. Referen, además, que al utilizar nanopartículas de quitosano en alimentos éstas podrían colapsar durante el almacenamiento con la consecuente liberación del agente activo encapsulado en la matriz alimentaria y alterar sus atributos sensoriales y por tanto su aceptabilidad. Por otra parte, el efecto citotóxico y la actividad antifúngica in vivo de nanobiocompuestos de ácido quitosano-pirrol-2-carboxílico (CS-PCA) fue estudiada por Gálvez-Irriqui *et al.* (2021). En semillas de lechuga, el CS-PCA mostró una fuerte fitotoxicidad. Por otro lado, el nanobiocompuesto mostró un efecto fungistático hasta el tercer día en frutos de tomate inoculados con *Aspergillus niger* y almacenados a 25 °C. En contraste, Hernández-López *et al.* (2020), al evaluar la toxicidad de nanopartículas y cubiertas nanoestructuradas de quitosano y α -pineno en ratones, no encontraron efectos citotóxicos ni genotóxicos en eritrocitos ni cambios en los parámetros bioquímicos de la función hepática. De ahí que, el uso y aplicación de nanopartículas de quitosano y agentes naturales en la agricultura implica algunos desafíos regulatorios respecto a su funcionalidad y eficacia, además de posibles riesgos que pueden afectar a los componentes del agroecosistema, así como en la cadena alimenticia (Elmer y White, 2018).

5. ESTATUS ACADÉMICO, INDUSTRIAL Y LEGISLATIVO EN EL DESARROLLO Y APLICACIÓN DE NANOPARTÍCULAS DE QUITOSANO Y AGENTES NATURALES

La nanotecnología se considera una herramienta útil para la agricultura y la seguridad agroalimentaria que permitirá enfrentar los desafíos agrícolas emergentes relacionados principalmente con el cambio climático, el constante crecimiento de la población y una mayor producción de alimentos inocuos bajo un esquema sostenible de los recursos naturales (Pandita, 2020). Sin embargo, la nanoagrotecnología aún no logra alcanzar el potencial deseado debido al creciente interés en la bioseguridad asociada a esta tecnología y a lo desafiante que resultan las investigaciones al respecto, por lo que es fundamental que sectores como el académico, industrial y gubernamental intervengan de manera conjunta para lograr la sostenibilidad de esta tecnología (Worrall *et al.*, 2018).

En ese sentido, las investigaciones enfocadas a la nanotecnología en el sector agrícola son reducidas y tienden hacia los sectores de salud, electrónico, tecnologías de la información, energía, entre otros (Unidad de Inteligencia de Negocios, 2018). Por otra parte, el conocimiento generado hasta el momento estriba principalmente en nanopartículas metálicas como plata, dióxido de titanio, carbono, etc., y de materiales nanofabricados. A su vez, se enfoca mayormente a su síntesis, aplicaciones, etc., y en un mínimo a sus potenciales riesgos (Foladori *et al.*, 2013). Lo mismo ocurre comercialmente, ya que, en 2018, del total de productos nanotecnológicos producidos, sólo el 3% correspondió a productos del sector agrícola (Unidad de Inteligencia de Negocios, 2018) centrados sobre todo en el uso de pesticidas sintéticos, fertilizantes, hormonas y agentes de crecimiento. Esto puede atribuirse a la disminución de inversiones y de empresas

enfocadas en la investigación y desarrollo en este rubro debido a las escasas ganancias que obtienen respecto a otros sectores (Chugh *et al.*, 2021). En cuanto a los organismos reguladores y políticas gubernamentales, tan sólo la Unión Europea y Suiza han establecido disposiciones legislativas específicas para el sector de la nanoagrotecnología y la alimentación. Aun cuando se cuenta con organismos internacionales que están asumiendo desafíos en esta dirección, las leyes y normativas existentes no son suficientemente específicas para todas las categorías de nanoprodutos, ni vinculantes para quienes son dirigidas, aunado a la falta de una plataforma pública e internacional en la que se compartan puntos de vista y opiniones para optimizar las medidas regulatorias existentes y confluyan en un marco regulatorio internacional (Mishra *et al.*, 2017).

En la figura 2 se muestran las aplicaciones y desafíos agrícolas con el uso de este tipo de nanopartículas.

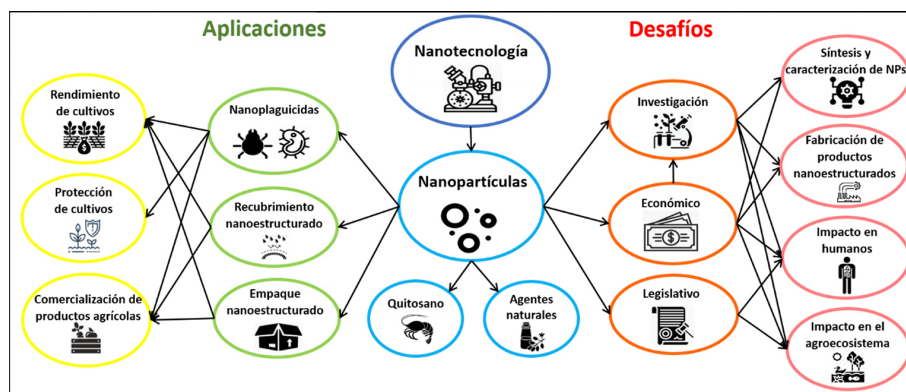


FIGURA 2

Aplicaciones y desafíos agrícolas asociados en el uso de nanopartículas de quitosano y agentes naturales

Fuente: elaboración propia.

CONCLUSIONES

Este artículo presenta una revisión del uso de tecnologías emergentes mediante la aplicación de recubrimientos nanoestructurados a base de quitosano y agentes naturales para la preservación de frutos y hortalizas. A la fecha, los resultados demuestran que su aplicación puede ser una alternativa al uso de agentes químicos; sin embargo, su experimentación ha sido en su mayor parte en laboratorio, por lo que aún es necesario dedicar esfuerzos para su evaluación en estudios comerciales, de toxicidad y también el aprovechamiento de esta tecnología a través de su escalamiento.

PROSPECTIVA

En un futuro la nanotecnología tendrá el potencial para contribuir con aplicaciones innovadoras al hacer más competente la conservación de productos agrícolas al transformar las prácticas convencionales como el control de fitopatógenos, el almacenamiento y el empaque de los productos hortofrutícolas. Para establecer los objetivos y orientar las investigaciones nanotecnológicas que promuevan el desarrollo en el sector de la conservación de productos agrícolas es fundamental conjuntar esfuerzos entre disciplinas debido a la gran diversidad y complejidad del tema. Además, las investigaciones deben centrarse en la bioseguridad de su uso a través de la comprensión sistemática de sus interacciones y efectos con los diferentes sistemas biológicos, en su movilización y acumulación a través de estos sistemas y en la evaluación de los riesgos y toxicidad durante toda la cadena de producción y consumo de los productos hortofrutícolas. Asimismo, es deseable involucrar a los diferentes sectores que intervienen en la producción agrícola con la finalidad de que las propuestas y soluciones se adapten a las necesidades y limitaciones específicas que tienen.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al Conacyt por el apoyo al grupo de investigación del Laboratorio de Tecnología Postcosecha de Productos Agrícolas del Centro de Desarrollo de Productos Bióticos-IPN (CEPROBI-IPN), así como a los árbitros de la revista que con sus comentarios mejoraron sustancialmente el contenido del artículo.

REFERENCIAS

- Almuhayawi, M. S. (2020). Propolis as a novel antibacterial agent. *Saudi Journal of Biological Sciences*, 27, 3079-3086. <https://doi.org/10.1016/j.sjbs.2020.09.016>
- Altemimi, A., Lakhssassi, N., Baharlouei, A., Watson, D., & Lightfoot, D. (2017). Phytochemicals: Extraction, isolation, and identification of bioactive compounds from plant extracts. *Plants*, 6(4), 42. <https://doi.org/10.3390/plants6040042>
- Buzea, C., Pacheco, I. I., & Robbie, K. (2007). Nanomaterials and nanoparticles: Sources and toxicity. *Biointerphases*, 2(4), 1-55. <https://doi.org/10.1116/1.2815690>
- Cárdenas, C., Pozo, W., Rojas, M., Roque, A., & Mihai, R. (2016). Antifungal activity of two botanical extracts on rose crop (*Rosa L. Sp.*), against *Sphaerotheca Pannosa var. Rosae*. *Agriculture and Agricultural Science Procedia*, 10, 465-474. <https://doi.org/10.1016/j.aaspro.2016.09.017>
- Chandrasekaran, M., Kim, K. D., & Chun, S. C. (2020). Antibacterial activity of chitosan nanoparticles: A review. *Processes*, 8(9), 1173. <https://doi.org/10.3390/pr8091173>
- Chugh, G., Siddique, K. H. M., & Solaiman, Z. M. (2021). Nanobiotechnology for Agriculture: Smart Technology for Combating Nutrient Deficiencies with Nanotoxicity Challenges. *Sustainability*, 13(4), 1-20. <https://doi.org/10.3390/su13041781>
- Correa-Pacheco, Z. N., Bautista-Baños, S., Ramos-García, M. L., Martínez-González, M. C., & Hernández-Romano, J. (2019). Physicochemical characterization of and antimicrobial activity of edible propolis-chitosan nanoparticles film. *Progress in Organic Coatings*, 137(105326), 1-14. <https://doi.org/10.1016/j.porgcoat.2019.105326>
- Divya, K., & Jisha, M. S. (2018). Chitosan nanoparticles preparation and applications. *Environmental Chemistry Letters*, 16, 101-112. <https://doi.org/10.1007/s10311-017-0670-y>
- Elmer, W., & White, J. C. (2018). The future of nanotechnology in plant pathology. *Annual Review of Phytopathology*, 56(1), 111-133. <https://doi.org/10.1146/annurev-phyto-080417-050108>
- El-Mohamedy, R., Abd El-Aziz, M., & Kamel, S. (2019). Antifungal activity of chitosan nanoparticles against some plant pathogenic fungi in vitro. *Agricultural Engineering International*, 21(4), 201-209.
- Flores-López, M. L., Cerqueira, M. A., de Rodríguez, D. J., & Vicente, A. A. (2016). Perspectives on utilization of edible coatings and nano-laminate coatings for extension of postharvest storage of fruits and vegetables. *Food Engineering Reviews*, 8, 292-305. <https://doi.org/10.1007/s12393-015-9135-x>
- Foladori, G., Bejarano, F., & Invernizzi, N. (2013). Nanotecnología: gestión y reglamentación de riesgos para la salud y medio ambiente en América Latina y El Caribe. *Trabalho, Educação e Saúde*, 11(1), 145-167. <https://doi.org/10.1590/S1981-77462013000100009>
- Gálvez-Irqui, A., García-Romo, J., Cortez-Rocha, M., Burgos-Hernández, A., Burboa-Zazueta, M., Luque-Alcaraz, A., Calderón-Santoyo, M., Argüelles-Monales, W., & Plascencia-Jatomea, M. (2021). Phytotoxicity, cytotoxicity, and in vivo antifungal efficacy of chitosan nanobiocomposites on prokaryotic and eukaryotic cells. *Environmental Science and Pollution Research*, 28, 3051-3065. <https://doi.org/10.1007/s11356-020-10716-0>
- Garavand, F., Cacciotti, I., Vahedikia, N., Rehman, A., Tarhan, Ö., Akbari-Alavijeh, S., Shaddel, R., Rashidinejad, A., Nejatian, M., Jafarzadeh, S., Azizi-Lalabadi, M., Khoshnoudi-Nia, S., & Mahdi J. S. (2020). A comprehensive review on the nanocomposites loaded with chitosan nanoparticles for food packaging. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 5, 1-34. <https://doi.org/10.1080/10408398.2020.1843133>

- González-Saucedo, A., Barrera-Necha, L. L., Ventura-Aguilar, R. I., Correa-Pacheco, Z. N., Bautista-Baños, S., & Hernández-López, M. (2019). Extension of the postharvest quality of bell pepper by applying nanostructured coatings of chitosan with *Byrsonima crassifolia* extract (L.) Kunth. *Postharvest Biology and Technology*, 149, 74-82. <https://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2018.11.019>
- Hasheminejad, N., & Khodaiyan, F. (2020). The effect of clove essential oil loaded chitosan nanoparticles on the shelf life and quality of pomegranate arils. *Food Chemistry*, 309, 1-10. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2019.12.5520>
- Hernández-López, G., Santamaría, L., & Barrera-Necha, L. (2020). Toxicological and genotoxicological evaluation of chitosan nanoparticles loaded with pinene in a murine model. *International Journal of Green and Herbal Chemistry*, 9(4), 437-448. <https://doi.org/10.24214/IJGHC/GC/9/4>
- Hu, Z., & Gänzle, M. (2019). Challenges and opportunities related to the use of chitosan as a food preservative. *Journal of Applied Microbiology*, 126, 1318-1331. <https://doi.org/10.1111/jam.14131>
- Kim, D. Y., Kadam, A., Shinde, S., Saratale, R. G., Patra, J., & Ghodake, G. (2018). Recent developments in nanotechnology transforming the agricultural sector: A transition replete with opportunities. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 98(3), 849-864. <https://doi.org/10.1002/jsfa.8749>
- Lira Saldivar, R. H., Méndez Argüello, B., De los Santos Villareal, G., & Vera Reyes, I. (2018). Potencial de la nanotecnología en la agricultura. *Acta Universitaria*, 28 (2), 9-24. <https://doi.org/10.15174/au.2018.1575>
- Malerba, M., Cerana, R. (2016). Chitosan effects on plant systems. *International Journal of Molecular Sciences*, 17(7), 996. <https://doi.org/10.3390/ijms17070996>
- Martínez-González, M. C., Bautista-Baños, S., Correa-Pacheco, Z. N., Corona-Rangel, M. L., Ventura-Aguilar, R. I., Del Río-García, J. C., & Ramos-García, M. L. (2020). Effect of nanostructured chitosan/propolis coatings on the quality and antioxidant capacity of strawberries during storage. *Coatings*, 10(2), 90. <https://doi.org/10.3390/coatings10020090>
- Mishra, S., Keswani, C., Abhilash, P. C., Fraceto, L. F., & Singh, H.B. (2017). Integrated approach of agri-nanotechnology: Challenges and future trends. *Frontiers in Plant Science*, 8, 471. <https://doi.org/10.3389/fpls.2017.00471>
- Mishra, A. P., Devkota, H. P., Nigam, M., Adetunji, C. O., Srivastava, N., Saklani, S., & Khaneghah, A. M. (2020). Combination of essential oils in dairy products: A review of their functions and potential benefits. *LWT-Food Science and Technology*, 133, 110116. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2020.110116>
- Pandita, D. (2020). Nano-enabled agriculture can sustain “Farm to Fork” Chain. In K. Hakeem & T. Pirzadah (Eds.), *Nanobiotechnology in Agriculture* (pp. 35-61). https://doi.org/10.1007/978-3-030-39978-8_3
- Rozman, N., Yenn, T., Ring, L., Nee, T., Hasanolbadori, M., & Abdullah, S. (2019). Potential antimicrobial applications of chitosan nanoparticles (ChNP). *Journal of Microbiology and Biotechnology*, 29(7), 1009-1013. <https://doi.org/10.4014/jmb.1904.04065>
- Unidad de Inteligencia de Negocios. (2018). *El mundo de la nanotecnología. Situación y prospectiva para México*. <https://ethic.com.mx/docs/estudios/El-mundo-nanotecnologia-Situacion-prospectiva-Mexico.pdf>
- Sonin, D., Pochkaeva, E., Zhuravskii, S., Postnov, V., Korolev, D., Vasina, L., Kostina, D., Mukhametdinova, D., Zelinskaya, I., Skorik, Y., & Galagudza, M. (2020). Biological safety and biodistribution of chitosan nanoparticles. *Nanomaterials*, 10(810), 1-23. <https://doi.org/10.3390/nano10040810>
- Worrall, E. A., Hamid, A., Karishma, T. M., Neena, M., & Pappu, H. R. (2018). Nanotechnology for plant disease management. *Agronomy*, 8(129), 285. <https://doi.org/10.3390/agronomy8120285>