

Efecto de Nanopartículas Metálicas y Derivadas del Carbón en la Fisiología de Semillas

¹Norma Angélica Ruiz Torres, ¹Josué Israel García López², ³Ricardo Hugo Lira Saldivar, ⁴Ilena Vera Reyes y ⁵Bulmaro Méndez Arguello.

¹Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro. Calzada Antonio Narro #1923. Buenavista, Saltillo, Coah.

²Asistente de Proyecto. Centro de Investigación en Química Aplicada (CIQA) Blvd. Enrique Reyna Hermosillo 140, Saltillo, Coah., CP 25100. ³Catedras CONACYT-CIQA, Saltillo, Coah., CP 25100. ⁵Investigador Posdoctoral CONACYT-CIQA. Saltillo, Coah., CP 25100.

Introducción

La nanotecnología (NT) es el estudio, diseño, creación, síntesis, manipulación, manejo, operación y aplicación de materiales, aparatos y sistemas a nano escala. Esta tiene un gran potencial, ya que puede mejorar la calidad de vida a través de sus aplicaciones en diversos campos como lo son la agricultura y la tecnología de los alimentos (Buzea *et al.*, 2007; Walker y Bucher 2009).

En la actualidad la NT ha generado gran interés en el desarrollo de productos de uso agrícola, ya que representa una excelente oportunidad para aminorar el uso de agroquímicos sintéticos, con la posibilidad de reducir el impacto ambiental que se ha venido dando en las últimas décadas. Es así como la NT aplicada a la agricultura tiene por objetivo formular productos con ingredientes activos de tamaño nanométrico, lo cual los hace más eficientes y de fácil disponibilidad, además de minimizar las pérdidas al aplicar el producto.

La NT tiene también el potencial de revolucionar los sistemas agroalimentarios, a través de la utilización eficiente del agua, la protección contra insectos y enfermedades, proporcionando nuevas herramientas para la biología molecular y celular, creando nuevos materiales para la detección y protección del medio ambiente. Esta observación se centra en las estrategias modernas utilizadas para el manejo del agua, el uso de pesticidas sintéticos

tradicionales y el potencial de los nanomateriales en la agricultura sustentable como un enfoque moderno en la nueva revolución verde (Lira-Saldivar *et al.*, 2014).

En este mismo sentido, Chinnamuthu y Boopathi (2009) indican las diversas áreas de aplicación de la NT en la agricultura: 1. Almacenamiento de energía, producción y conversión (módulos fotovoltaicos), 2. Incremento de la productividad agrícola (zeolitas nanoporosas para la liberación prolongada y eficiente de fertilizantes), 3. Nanocápsulas para la liberación puntual de pesticidas, 4. Nanosensores para monitorear la calidad del suelo y la vitalidad de la planta, 5. Nanosensores para la detección de plagas y de fitopatógenos y 6. Uso como pesticidas.

Los avances en la nanotecnología se están integrando en la biología que se ha llevado al surgimiento de una nueva disciplina apasionante llamada nanobiotecnología (Razzaq *et al.*, 2015). Las nanopartículas (NPs) son agregados atómicos o moleculares con al menos una dimensión entre 1 y 100 nm (Ball, 2002; Roco, 2003), que se pueden modificar drásticamente en sus propiedades físico-químicas en comparación con el material a granel (Nel *et al.*, 2006).

La mayoría de los estudios reportados apuntan a los efectos positivos de las NPs sobre el crecimiento de plantas. El uso cuidadoso y juicioso de la NT puede garantizar la seguridad alimentaria, a través del incremento en la producción del sector primario, ya que su principal efecto es la mejora en el crecimiento de plantas y rendimiento de la cosecha. No obstante, se requiere la experimentación exhaustiva para establecer la concentración adecuada, el tamaño y la forma de aplicación (Razzaq *et al.*, 2016). Con el fin de entender los posibles beneficios de la aplicación de la nanotecnología a la agricultura, uno de los primeros objetivos es analizar el efecto de la aplicación de NPs en semillas y en plantas.

Efecto de las NPs en la germinación de las semillas

La calidad de la semilla es un concepto basado en la valoración de diferentes atributos, cada uno con la finalidad de mejorar el establecimiento de la planta en condiciones de campo, entre estos se encuentran la calidad genética, la fisiológica, la física y la sanitaria (Basra, 1995; Copeland y McDonald, 1995; Marcos-Filho, 1998). Cuando la semilla cuenta con estos cuatro atributos, los agricultores tienen mayores perspectivas de producir un cultivo saludable con rendimientos mejorados.

La calidad de las semillas abarca la suma de todas las propiedades o características las cuales determinan el potencial de comportamiento de las semillas o lotes de semillas y establecimiento del cultivo (Velázquez, 2015). Una semilla de alta calidad es importante para la obtención de un cultivo con buena densidad de población y un rápido desarrollo de plantas aún bajo condiciones de estrés, aunque hay otros factores como la lluvia, las prácticas agronómicas, la fertilidad del suelo y el control de plagas que también son decisivos (FAO, 2011).

La calidad fisiológica de un lote de semillas implica que además de ser viables, estas germinen y generen plántulas con sus estructuras esenciales desarrolladas normalmente. Es así como la calidad fisiológica y, en particular el vigor de semilla, se relacionan con la tasa y uniformidad de la germinación, desarrollo de plántulas y establecimiento en campo. El vigor involucra la capacidad que tiene un organismo para la biosíntesis de energía y compuestos metabólicos, como proteínas, ácidos nucleicos, carbohidratos y lípidos. Todo ello asociado a la actividad celular, la integridad de las membranas celulares y el transporte o utilización de sustancias de reserva (Bewley, 1986; Bewley y Black, 1994).

El vigor de la semilla permite discriminar entre lotes de semillas con diferentes potenciales de germinación, capaces de producir plántulas normales, vigorosas, sanas, que se

establecen en el campo bajo diferentes condiciones ambientales (Heydecker, 1972; Delouche, 1976; Perry, 1984).

Sin embargo, la calidad de las semillas se restringe con el transcurso del tiempo y la tasa de deterioro depende de las condiciones ambientales durante el almacenamiento y el tiempo en que estas permanecen almacenadas. El primer componente de la calidad fisiológica que muestra señales de deterioro es el vigor de las semillas, seguido de una reducción en la germinación y de un mayor porcentaje de plántulas anormales (Ferguson, 1995).

Chinnamuthu y Boopathi (2009) mencionan que las NPs pueden ser usadas en el manejo de las semillas e indican una variedad de aplicaciones, entre las que incluyen la imbibición con nano-encapsulaciones de cepas específicas de bacterias a lo cual denominan “semillas inteligentes”, asegurando el establecimiento en campo, mejorando la productividad de los cultivos. Estos autores también indican que la NT ofrece como herramienta la aplicación de NPs, que mejoran la germinación de las semillas y los parámetros fisiológicos relacionados, para optimar la capacidad de absorción, degradación de reservas y división celular.

Otros autores (Hashemi y Mousa, 2013; Ulla y Arshad, 2014) mencionan que las semillas tratadas con materiales a nano escala, generan un cambio en la dinámica de la germinación, observándose un incremento en el porcentaje de germinación y el índice de velocidad de emergencia. El periodo de germinación se acelera debido a la mayor disponibilidad de agua, y el porcentaje de germinación final se incrementa, lo cual indica condiciones adecuadas para el crecimiento de las semillas. La clave para el aumento de la tasa final de germinación de las semillas es la penetración de nanomateriales en la semilla (Khodakovskaya et al. 2009).

El efecto de las NPs comienza a manifestarse desde la germinación de las semillas, reflejándose en una mayor emergencia y uniformidad que se observa en la germinación final, debido principalmente a la penetración de nanomateriales en la semilla, que permiten aumentar la imbibición de agua y micronutrientes, acelerando la degradación de reservas, y beneficiando a las primeras etapas del proceso germinativo. En estudios realizados por Mahmoodzadeh et al. (2012), se evidencian los efectos de titanio a nanoescala con partículas de TiO_2 , reportando una promoción de la germinación del 75 % con la aplicación de NPs (20 nm de tamaño de partícula a 2000 mg L^{-1} de concentración).

Con respecto a la germinación en semillas de trigo Reyhaneh et al. (2013), dieron a conocer la existencia del efecto de las NPs con TiO_2 , señalando que el porcentaje de germinación se mejoró en un 9% tras la exposición a 5 ppm. Los autores mencionan que el tamaño de nano TiO_2 puede aumentar la absorción de nutrientes aprovechables por la semilla, mejorando la velocidad de germinación. Savithramma et al. (2012) demostraron que la tasa de germinación de semillas tratadas con NPs de plata es 28 % mayor que la del control. De acuerdo a los autores, la contribución de las NPs fue facilitar el movimiento de agua y nutrientes a través de la cubierta de la semilla para acelerar la germinación de semillas y crecimiento de plántulas.

Abbasi et al. (2016) indican que las NPs de plata y sílice pueden tener un efecto positivo sobre la germinación de semillas y rasgos iniciales de crecimiento. La introducción de NPs en la germinación de semillas y crecimiento de plántulas podría tener un impacto significativo y por lo tanto, se puede utilizar para aplicaciones agrícolas para un mejor crecimiento y rendimiento. Krishna y Natarajan (2014) indican que las NPs de Zinc (ZnO), plata (Ag) y dióxido de titanio (TiO_2) mejoran la velocidad de germinación en semillas de cacahuete. Los efectos beneficiosos de las NPs podrían atribuirse a una mayor producción de enzimas responsables de las reacciones metabólicas. Por otra parte, podrían incrementar los niveles de ácido indolacético (AIA), en las raíces o brotes, que a su vez pueden incrementar el vigor de las semillas y por ende el crecimiento de plántulas.

Las NPs debido a sus características físico-químicas, son algunos de los posibles candidatos para modular el estado redox y el cambio de la germinación de las semillas, el crecimiento, el rendimiento y la calidad de las plantas (Mukherjee y Mahapatra, 2009). La aplicación de NPs estimula la germinación de la mayoría de las especies, sin embargo esta respuesta depende de la concentración y el genotipo (Hatami et al., 2014). Por lo tanto existe la posibilidad de aplicar una amplia gama de NPs para mejorar las características fisiológicas y morfológicas de los cultivos (Mingyu *et al.*, 2007).

Trabajos desarrollados en diversas especies de plantas confirman que al menos las NPsZnO promueven la germinación y crecimiento de plántulas (Siddiqui et al., 2014). Como ejemplo se puede citar el estudio realizado por Prasad et al. (2012), donde indican que en semillas de cacahuete una concentración de 1000 mg L^{-1} de NPsZnO promueve la germinación, así como la elongación de raíz y tallo.

En contraste (Saeid y Hojjat, 2016), mencionan que la aplicación de NPs de plata no influyó sobre la germinación en semillas de genotipo de lentejas, aunque la interacción de la semilla con las NPs disparó el crecimiento de la longitud de la raíz y la acumulación de materia seca. Por lo tanto, el efecto de las NPs en semillas y plantas puede ser positivo o negativo. Una preocupación para la aplicación de nanomateriales en la germinación de las semillas es su fitotoxicidad (Monica y Cremonini, 2009).

Almutairi y Alharbi estudiaron el efecto de NPsAg en el porcentaje de germinación, la tasa de germinación, longitud de raíz, peso fresco y peso seco en plántulas melón, maíz y calabaza. Evaluaron siete concentraciones (0.05, 0.1, 0.5, 1.0, 1.5, 2.0 y 2.5 mg/ml) de AgNPs en semillas durante el proceso de germinación. Las tres especies respondieron de manera diferente, en semillas tratadas de melón y calabacita se incrementó el porcentaje de germinación, en relación a la semilla no tratada. Las NPsAg mostraron efecto tóxico, inhibición del crecimiento de radícula de maíz, mientras que en melón y calabacita se

presentó promoción con ciertas concentraciones de NPsAg. Este estudio demostró que puede presentarse efectos negativos y positivos en la germinación, dependiendo de la respuesta del cultivo.

Efecto de los nanotubos de carbono (NTC) en la germinación de las semillas

Natarajan y Tarafdar (2011) mencionan que la semilla es el principal insumo que define la productividad en campo de cualquier cultivo. Como ejemplo señalan que en la India, de manera convencional, la semilla se analiza en laboratorio para determinar el porcentaje de germinación y posteriormente se distribuye a los agricultores para su siembra. El porcentaje de germinación en laboratorio puede ser de 80-90 %, sin embargo esto raramente se observa en campo, debido a la insuficiente humedad en el suelo en sistemas de temporal, que comprende el 60 % de las áreas destinadas a la siembra, por lo que ya consideraban adecuado desarrollar tecnologías para este tipo de agricultura. La idea es crear un método innovador que mejore la germinación en sistemas de siembra que dependen del temporal.

En este sentido, los nanotubos de carbono (NTC) son nano-materiales ampliamente usados en ciencias biológicas y de materiales, por lo que los NTC de pared simple o de pared múltiple son usados para transportar agua, nutrientes y medicamentos. Como los NTC poseen una extensa superficie, tienen el potencial de regular la humedad bajo condiciones de estrés, por lo que pueden llegar a resolver el problema en sistemas de siembra en temporal.

Khodakovskaya et al. (2009) encontraron que los NTC penetran las semillas de tomate y afectaron su germinación y tasa de desarrollo. El porcentaje de germinación se incrementó al aplicar NTC (10-40 mg/mL) en comparación al testigo. Métodos analíticos indicaron que los NTC pueden penetrar la testa y apoyar la absorción de agua al interior de las semillas, proceso que puede afectar la germinación y desarrollo de plántulas de tomate.

En un estudio realizado por Rahimi et al. (2016), en semillas de *Alnus subcordata* (especie nativa de Irán) bajo condiciones de estrés, se encontró que la aplicación de NTC incrementa el índice de vigor de las semillas, las longitudes de raíz y tallo y la acumulación de materia seca. Atribuyendo esto, al incremento del vigor en la semilla por la aplicación de NTC, que posiblemente mejora el potencial hídrico de la semilla y su metabolismo, reflejándose en plántulas de mayor porte.

En contraste, Mushtaq (2011) estudió el efecto de Fe_3O_4 , TiO_2 y NPs de carbón en semillas de pepino (*Cucumis sativus*), en la tasa de germinación, elongación de la semilla, e índice de germinación. Usaron concentraciones de 0 a 5000 $\mu\text{g}/\text{mL}$, encontraron reducción en el desarrollo de la raíz y en menor grado en el porcentaje de germinación.

Efecto de las NPs en el vigor de semillas

El vigor se considera también la habilidad para la emergencia en condiciones ambientales desfavorables y el desempeño de las semillas posterior al almacenamiento, particularmente en la retención de la capacidad germinativa (Hampton y Tekrony, 1995). La velocidad de emergencia es asimismo uno de los conceptos más característicos del vigor de la semilla, la calidad fisiológica incluye mecanismos intrínsecos de la semilla que determinan su capacidad de germinar, emerger y desarrollar estructuras esenciales para producir una plántula normal bajo condiciones de estrés.

El vigor en las semillas es por lo tanto el potencial biológico que favorece el establecimiento rápido y uniforme, incluso en condiciones desfavorables de campo (Gonzales et al., 2008). Por otra parte, Navarro (2009) indica que el vigor se puede considerar como la interacción de aquellas propiedades bióticas y abióticas que influyen en las semillas y que determinan su nivel de actividad y su comportamiento en el tiempo: las expresiones de

viabilidad, la dormancia, la germinación y la emergencia. Por ello, el vigor no se puede desvincular como parte esencial de la calidad de las semillas.

Las semillas presentan el mayor vigor y potencial germinativo cuando alcanzan la madurez fisiológica, de modo que es importante realizar pruebas, y con ello determinar el efecto de las NPs en el vigor, bajo diferentes condiciones (laboratorio e invernadero). Juárez *et al.* (2016) indican que el uso de NPs en la agricultura puede ser favorable, mejorando el crecimiento de plántulas, rendimiento y calidad del fruto.

De acuerdo a lo anterior, Almutairi y Alharbi (2015) mencionan que el uso de nanomateriales se ha incrementado consecuencia de su impacto positivo en sectores de la economía incluyendo la agricultura, poniendo de manifiesto que el uso de las NPs favorece la velocidad de germinación y el crecimiento de plántulas. En complemento, Vasanth *et al.* (2016) señalan que el potencial de las NPs mejora la germinación y el crecimiento de plántulas, e inhibe el desarrollo de patógenos. De acuerdo con Shankamma *et al.* (2015), mencionan que las semillas expuestas a NPs de Fe_2O_3 mostraron una mayor longitud de plúmula y de radícula (vigor de plántula), observando que las NPs aplicadas se acumulan principalmente en los pelos radicales de la raíz y la zona media de la planta.

Estudios realizados en semillas de girasol se encontró que la aplicación de NPs de silicio tiene un efecto positivo en la germinación, vigor, emergencia y crecimiento de plántulas. Es importante considerar que los pre-tratamientos con NPs en semillas se apliquen antes de la siembra, para mejorar la germinación y generar un fortalecimiento efectivo en plántulas. En este sentido, Azimi *et al.* (2016) señalan que la aplicación de SiO_2 , acelera el establecimiento temprano de las plántulas, que a su vez mejora el crecimiento de las plantas y la acumulación de materia seca.

Acorde con lo anterior Anusuya y Nibiya (2016), mencionan que la aplicación NPs conteniendo el biopolímero quitosan más plata (Ag-CS), causaron que las NPs tuvieran un

efecto promotor del crecimiento en semillas de garbanzo, encontrando plántulas con mayor longitud de plúmula y de radícula, y mayor acumulación de peso seco, estos parámetros son considerados indicadores de vigor. En cuanto al contenido de pigmento, las plántulas tratadas con NPs mostraron un notable aumento de la clorofila. Un aumento consiguiente de la actividad enzimática incluyendo α , β -amilasa, ascorbato peroxidasa (APX), peroxidasa (POD) y catalasa (CAT).

El empleo de NPs para estimular la germinación y vigor de semillas, mejora el rendimiento de los cultivos aproximadamente en un 16 % con una dosis adecuada, sin embargo el nivel de respuesta depende del tipo de nanomaterial, su aplicación potencial y el genotipo. Bajo este punto de vista, es recomendable no solo evaluar la respuesta de diversos genotipos a la aplicación de NPs durante la germinación, sino ir más allá para conocer la capacidad de estos a etapas subsecuentes (Buu et al., 2014).

Actualmente tenemos estudios en proceso realizándose en el CIQA y la UAAAN con semillas de tomate, en donde se aplicaron tratamientos por 24 h en cajas Petri y sobre papel filtro, con diferentes niveles de NPsCu y MPsCuSO₄ (micro partículas de CuSO₄) en concentraciones de: 0, 0.5, 1.0, 5.0, 10.0 y 50 ppm, y posteriormente se sembró la semilla entre papel Anchor. Los resultados indican que las NPsCu a 5 y 10 ppm promovieron el vigor de germinación de las semillas, superando estadísticamente ambos tratamientos al testigo.

Por otra parte, el tratamiento con 10 ppm incrementó la longitud del tallo y el tratamiento con 5 ppm la longitud de radícula, en ambas variables los resultados mostraron diferencias estadísticas con respecto al testigo. Estas variables son indicadores del vigor de las plántulas, mostrando que las NPsCu a concentraciones bajas tienen la capacidad de promover el crecimiento, lo cual se puede llevar a cabo por medio de mayor división y/o elongación celular. En un estudio similar llevado a cabo en semillas de chile ancho, se observó resultados similares a los obtenidos en semillas de tomate, ya que el tratamiento correspondiente a 5 ppm NPsCu, presentó mayor vigor de germinación y longitud de

radícula, que el resto de los tratamientos, superando al testigo en 45.8 % en vigor de germinación.

En semilla de melón, al evaluar NPsCu y MPsCuSO₄ (ambos a 0, 0.5, 1.0, 5.0, 10.0 y 50 ppm), se obtuvieron resultados diferentes, ya que mayor longitud de radícula se observó con 10 y 50 ppm MPsCuSO₄ (14.61 y 14.91 cm, respectivamente) con relación al testigo que obtuvo 9.75 cm en promedio. Por otra parte, al ensayar semilla de pepino con NPsCu y MPsCuSO₄ (0, 0.5, 1.0, 5.0, 10.0 y 50 ppm), se observó mayor longitud de radícula con 1.0 y 5.0 ppm NPsCu (14.68 y 14.73 cm, respectivamente) en comparación al testigo que obtuvo 11.25 cm (Figura 1).

En los bioensayos anteriores (chile, tomate y pepino) se observó que la aplicación de NPsCu a dosis bajas, promueve el vigor de germinación y el desarrollo del tallo y/o radícula. Sin embargo, se están realizando nuevos estudios para corroborar esta información.



Figura 1. Bioensayos con semillas de pepino (NPs 1.0 ppm) y de melón (MPsCuSO₄ 10 ppm).

La aplicación de nanopartículas y su fitotoxicidad

Los mecanismos de nanotoxicidad siguen siendo desconocidos, sin embargo, están estrechamente relacionados con el producto químico, composición, estructura química, tamaño de partícula y área de superficie (Aslani, 2014). La toxicidad de los NPs puede atribuirse a las siguientes dos acciones: (1) una toxicidad química en base a la liberación de iones (tóxicos); (2) el estrés o estímulos causados por la superficie, el tamaño y/o forma de las partículas. Se ha confirmado que la solubilidad de las NPs de óxido afectan significativamente la respuesta del cultivo (Brunner *et al.*, 2006). Zhang *et al.* (2015) han investigado la fitotoxicidad de las NPs de ZnO sobre la germinación de semillas de maíz (*Zea mays L.*) y de pepino (*Cucumis sativus L.*). En la prueba de elongación de la raíz, todas las plántulas fueron afectadas al ser expuestas a una concentración de 1,000 mg L⁻¹. Las investigaciones de Sayed y Joner (2010) determinaron el potencial de toxicidad de las NPs de hierro (Fe), utilizando tres tipos de tamaño de partícula (1 a 20 nm), sobre la germinación de dos especies (cebada y lino).

Las NPs de hierro afectaron la germinación, sin embargo el crecimiento de brotes resultó más sensible a este tipo de condiciones. Woo-Mi *et al.* (2008) estudiaron los efectos de las NPs cobre (Cu) para dos especies frijol (*Phaseolus vulgaris*) y trigo (*Triticum sativum*), las pruebas se llevaron a cabo en medios de agar para evitar la precipitación de las NPs, utilizando concentraciones que van de 450 a 722 mg/L. Los resultados indican que *Phaseolus vulgaris* fue más sensible al incremento de las NPs de Cu, teniendo efectos significativos desde la germinación, crecimiento de planta y rasgos toxicidad. Al aumentar la concentración, se observó una gran aglomeración de partículas en las células por medio de espectroscopia.

En complemento a lo antes señalado Kaduková *et al.* (2015) reportan que las NPs de plata (Ag) inhiben en gran medida la germinación de semillas y afecta el desarrollo de plantas. En estudios realizados en plantas de trigo, evaluaron el efecto del tiempo (24, 48, 72,

96 h) y la aplicación de diferentes dosis de NPs con Al_2O_3 (0, 5, 25, 50 mg/ml), se encontró que la elongación de la raíz se redujo en 40.2 % en 5 mg/ml, 50.6 % en 25 mg/ml y 54.5 % en 50 mg/ml después de 90 h. El análisis histoquímico reveló la acumulación de lignina, deposición callosa, y el daño celular en la corteza de la raíz. Por otra parte, los resultados indican que las NPs Al_2O_3 indujeron la fragmentación del ADN considerado como uno de los marcadores importantes de muerte celular programada (Yanik y Vardar, 2015).

De acuerdo con Wang *et al.* (2016) las plantas sometidas a altas concentraciones de NPs sufren pérdida en la capacidad de la germinación, reducción en la tasa relativa de crecimiento, menor viabilidad del polen, modifica la expresión de genes y altera la generación de especies reactivas de oxígeno. Andersen *et al.* (2016) mencionan que la aplicación de NPs tiene diferentes efectos importantes sobre la planta, la germinación y el crecimiento temprano de la raíz pueden considerarse parámetros de evaluación para los efectos potenciales a la alta exposición de NPs. Raskar y Laware (2014) explican que las semillas sometidas a bajas concentraciones de NPs pueden mejorar la germinación, sin embargo, a concentraciones más altas el porcentaje de germinación final puede disminuir considerablemente.

Thuesombat *et al.* (2014) evaluaron los posibles efectos de los diferentes NPs de plata tamaño (20, 30-60, 70, 120 y 150 nm de diámetro) en el arroz jazmín, *Oryza sativa L.* a diferentes concentraciones (0, 1, 10, 100 y 1000 mg/L), sobre la germinación de semillas y crecimiento de las plántulas. Los resultados revelan que la germinación de semillas y el crecimiento de plántulas disminuyeron paulatinamente con el aumento en tamaños y concentraciones de NPs. Los resultados del análisis de tejidos demostraron que la mayor captación de NPs se encontró en semillas tratadas con 20 nm, localizándose principalmente en la raíz.

Narendhran *et al.* (2016) realizaron un estudio comparativo de NPs sintetizadas químicamente (ZnO) y biológicamente (nano-ZnO), para determinar el efecto sobre la

germinación de semillas de ajonjolí (*Sesamum indicum*) y encontraron que las NPs sintetizadas químicamente disminuyeron de forma significativa la germinación, mientras que las sintetizadas biológicamente no tienen efectos adversos sobre la germinación de semillas. Las ventajas de utilizar o bio-fabricar NPs, puede tener un efecto más eficiente en la germinación y también puede actuar como agente antibacteriano, teniendo un impacto positivo en el aspecto ambiental del desarrollo agrícola. A pesar de que las aplicaciones de la NT son muy vastas, los usos actuales en el sector agrícola aún son escasos, de tal manera no se conoce acerca de cómo las poblaciones de plantas crónicamente expuestas responden al tratar de adaptarse a un nuevo factor de estrés antropogénico, como lo son las NPs de ingeniería (Karimullina et al., 2015).

Sin embargo, desde el punto de vista toxicológico, el área de la superficie y el tamaño de partícula son características importantes de las NPs en su efecto fitotóxico. Begum et al. (2011) indican que al reducir el tamaño de las partículas, el área de la superficie incrementa, lo cual permite una mayor proporción de sus átomos o moléculas estar expuestas, más que en el interior. Este incremento en el área de la superficie determina el número potencial de grupos reactivos. El cambio en las propiedades estructurales y fisicoquímicas de las partículas de ingeniería, con la reducción en el tamaño de la partícula, pueden ser responsables de interacciones del material y resultar en efectos tóxicos. Una de las primeras observaciones del efecto de las propiedades de la superficie de las NPs de ingeniería, mostró mayor toxicidad que las partículas finas de materiales similares en base a su masa.

En contraparte, otros autores mencionan que el efecto promotor o inhibidor del crecimiento de las NPs en las plantas está no únicamente relacionado con su concentración, tamaño y las propiedades inherentes del elemento involucrado, sino también con la función fisiológica y bioquímica que desempeña en la planta, esto es, si actúa como micronutriente como es el caso del cobre, zinc y hierro (Wang et al., 2015).

Aunado a lo anterior, Rizwan et al. (2016) indican que numerosos estudios han mostrado que las NPs metálicas, afectan el crecimiento, rendimiento y la calidad de importantes cultivos agrícolas. Mencionan que las NPs alteran la nutrición mineral, la fotosíntesis y causan estrés oxidativa e inducen genotoxicidad en los cultivos. La actividad de las enzimas antioxidantes incrementa en respuesta a una baja concentración de NPs y se redujo con toxicidad alta de NPs en los cultivos.

Conclusiones

De acuerdo a la literatura revisada y a estudios realizados se muestra que las NPs pueden tener efectos tanto positivos como negativos en la germinación y en el vigor de las semillas. Se ha observado que las NPs a dosis bajas promueven el crecimiento de plántulas, ya sea de tallo o de la raíz y en algunas especies de ambas estructuras. Se requiere de realizar más bioensayos para corroborar la información obtenida en especies hortícolas.

Literatura citada

- Abbasi, M., A. Ghorbani, and M. Moameri. (2016). Effects of silica and silver nanoparticles on seed germination traits of *thymus kotschyanus* in laboratory conditions. *Journal of Rangeland Science* 6(3):222-231.
- Almutairi, Z.M. and A. Alharbi. (2015). Effect of silver nanoparticles on seed germination of crop plants. *International Scholarly and Scientific Research & Innovation* 9(6) Scholar.waset.org/1999.1/10001458
- Almutairi, Z.M., and A. Alharbi. (2015). Effect of silver nanoparticles on seed germination of crop plants. *International Journal of Biological, Biomolecular, Agricultural, Food and Biotechnological Engineering* 9(6):586-590.
- Andersen, P., G. King, M. Plocher, M. Storm, L. Pokhrel, M.G. Johnson, and P.T. Rygielwicz. (2016). Germination and early plant development of ten plant species exposed to titanium dioxide and cerium oxide nanoparticles. *Environmental Toxicology and Chemistry* 35(9):2223-2229.
- Anusuya, S. and K. Nibiya. (2016). Silver-chitosan nanoparticles induced biochemical variations of chickpea (*Cicer arietinum* L.). *Biocatalysis and Agricultural Biotechnology*. 8:39-44.
- Aslani, F., S. Bagheri, N. Muhd Julkapli, A. Shukor Juraimi, F. S. Golestan Hashemi, and A. Baghdadi. (2014). Effects of engineered nanomaterials on plants growth: An

- Overview. The Scientific World Journal Volume 2014, Article ID 641759, 28 p.
<http://dx.doi.org/10.1155/2014/641759>
- Azimi, R., G. Heshmati, and R. Kavandi. (2016). Evaluation of SiO_2 nanoparticle effects on seed germination in *Astragalus squarrosus*. *Journal of Rangeland Science* 6(2):135-143.
- Azimi, R., H. Feize, and M. Khajeh. (2013). Can bulk and nanosized titanium dioxide particles improve seed germination features of wheatgrass (*Agropyron desertorum*). *Notulae Scientia Biologicae* 5(3):325-331.
- Ball, P. (2002). Natural strategies for the molecular engineer. *Nanotechnology* 13:15 – 28.
- Basra, A.S. (1995). Seed quality; basic mechanisms and agricultural implications. Basra, A. S. (ed.) Food Products Press. Preface. New York, USA. Vol. 49 (12), pp. 3907–3919.
- Bewley, J. D. (1986). Membrane changes in seeds as related to germination and the perturbations resulting from deterioration in seed storage. In: *Physiology of the seed deterioration*. (M.B. McDonald Jr. & C.J. Nelson Eds.). CCSA: Madison, USA. p. 22.
- Bewley, J. D. and Black, M. (1994). *Seeds: Physiology of development and germination*. 2nd Ed. Plenum Press. New York, USA. 367 p.
- Brunner, T. J., P. Wick, P. Spohn, P. Grass, and R.N. Limbach. (2006). In vitro cytotoxicity of oxide nanoparticles: comparison to asbestos, silica, and the effect of particle solubility. *Environ. Sci. Technol.* 40:4374-4381.
- Buu, Q., T. Hien, H. Chau, X. Tin, T. Van, T. Duong, and T. Ha. (2014). Effects of nano crystalline powders (Fe, Co and Cu) on the germination, growth, crop yield and product quality of soybean (Vietnamese species DT-51). *Vietnam Academy of Science and Technology* 5:1-7.
- Buzea, C., I.I. Pacheco, and K. Robbie (2007) *Nanomaterials and nanoparticles: sources and toxicity*. *Biointerphases* 2:17–71.
- Chinnamuthu, C.R. and M. Boopathi. (2009). *Nanotechnology and Agroecosystem*. *Tamil Madras Agric. J* 96(1-6):17-31.
- Chinnamuthu, C.R., and M. Boopathi, P. (2009). *Nanotechnology and agroecosystem*. *Madras Agric. J.* 96(1-6): 17- 31.
- Contreras, S. (2002). The international seed industry. In: *Proceedings International Seed Seminar: Trade, Production and Technology*. pp. 1-9.
- Copeland, L.O. and M.B. McDonald. (1995). *Principles of seed science and technology*. 3rd. ed. Chapman and Hall. New York, USA. 409 p.
- Dervishi, E., Mahmood, M., Yang Xu, Zhongrui Li, Watanabe, F. and A.S. Biris. (2009). Carbon nanotubes are able to penetrate plant seed coat and dramatically affect seed germination and plant growth. *ACS Nano* 3, 3221–3227.
- FAO (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura). (2011). *Semillas en emergencia*. Manual técnico. Roma, Italia. 81 p.
- Ferguson, J. (1995). An introduction to seed vigor testing. In: *Seed vigor testing seminar*. Zurich: International Seed Testing Association. Copenhagen Denmark. p. 1–9.
- González, G., F.M. Mendoza, J. Covarrubias, N. Morán, and J.A. Acosta. (2008). Rendimiento y calidad de semilla de frijol en dos épocas de siembra en la región del bajío. *Agricultura Técnica en México* 34(4):421.430.

- Hampton, J.G. and D.M. Tekrony. (1995). Handbook of vigour test methods. 3rd Edition. International Seed Testing Assoc. Zürich, Switzerland. 117 p.
- Hashemi, E. and M. Mosavi. (2013). Effect of anatase nanoparticles (TiO₂) on parsley seed germination (*Petroselinum crispum*) In Vitro. Biol Trace Elem Res 155:283–286.
- Hatami, M., M. Ghorbanpour, and H. Salehiarjomand. (2014). Nano-anatase TiO₂ modulates the germination behavior and seedling vigourity of some commercially important medicinal and aromatic plants. J. Biol. Environ. Sci. 8(22):53-59.
- Juárez, A., H. Ortega-Ortíz, F. Pérez-Labrada, G. Cadenas-Pliego, and A. Benavides-Mendoza. (2016). Cu Nanoparticles absorbed on chitosan hydrogels positively alter morphological, production, and quality characteristics of tomato. Journal of Applied Botany and Food Quality 89:183-189.
- Kaduková, J., O. Velgosová, A. Mražíková, R. Marcinčáková, and E. Tkáčová. (2015). Assessment of biologically synthesized Ag nanoparticles toxicity against *E. coli*, *Staphylococcus aureus*, *Parachlorella kessleri* and *Sinapis alba*. Nova Biotechnologica et Chimica 14(1):69-77.
- Karimullina, E., E. Antonova, V. Pozolotina, A. Tokarev, and S. Minko. (2015). The toxicity of engineered nanoparticles on seed plants chronically exposed to low level environmental radiation. Russian Journal of Ecology 46(3):236-245.
- Karimullina, E., E. Antonova, V. Pozolotina, A. Tokarev, and S. Minko. (2015). The toxicity of engineered nanoparticles on seed plants chronically exposed to lowlevel environmental radiation. Russian Journal of Ecology 46(3):236-245.
- Kashem, M. A., and S. Kawai. (2007). Alleviation of cadmium phytotoxicity by magnesium in Japanese mustard spinach. Soil Science and Plant Nutrition. Vol. 53 (3), pp. 246–251.
- Khodakovskaya, M., M. Mahmood, Y. Xu, Z. Li, F. Watanabe, and A.S. Biris. (2009). Carbon nanotubes are able to penetrate plant seed coat and dramatically affect seed germination and plant growth ACS Nano 3(10):3221-3227.
- Krishna, K. and N. Natarajan. (2014). Customizing zinc oxide, silver and titanium dioxide nanoparticles for enhancing groundnut seed quality. Indian Journal of Science and Technology 7(9):1376-1381.
- Lira-Saldivar, R.H., A. Hernández-López, L.A. Valdez-Aguilar, L. Ibarra-Jiménez, A. Cárdenas-Flores, and M. Hernández-Suárez. (2014). *Azospirillum brasilense* and *Glomus intraradices* co-inoculation stimulate growth and yield of cherry tomato under shade house conditions. Phytan Int. J. Exp. Botany. 83: 133-138.
- Mahapatra, A. (2009). Effect of coinage metal nanoparticles and zwitterionic surfactant on reduction of [Co(NH₃)₅Cl](NO₃)₂ by iron(III). Colloid Surface. 350: 1-7.
- Mahmoodzadeh, H., M. Nabavi, and H. Kashefi. (2013). Effect of nanoscale titanium dioxide particles on the germination and growth of canola (*Brasica napus*). Journal of Ornamental and Horticultural Plants 3(1):25-32.
- Marcos-Filho, J. (1998). New approaches to seed vigor testing. *Scientia Agricola*. No. 55. p. 27-33.
- Mingyu, S., W. Xiao, L. Chunxiang, Q. Xiaoqing, L. Liang, C. Hao, and H. Fashui. (2007). Promotion of energy transfer and oxygen evolution in spinach photosystem II by nano-anatase TiO₂. Biol Trace Elem Res 119:183–192.

- Monica, R.C., and R. Cremonini. (2009). Nanoparticles and higher plants. *Caryologia* 62(2): 161-165.
- Mukherjee, M. and A. Mahapatra. (2009). Effect of coinage metal nanoparticles and zwitterionic surfactant on reduction of $[\text{Co}(\text{NH}_3)_5\text{Cl}](\text{NO}_3)_2$ by iron (III). *Colloid Surface*. 350: 1-7.
- Mushtaq, Y.K. (2011). Effect of nanoscale Fe_3O_4 , TiO_2 and carbon particles on cucumber seed germination. Vol. 46, 1732-1735. doi: 10.1080/10934529.2011.633403.
- Narendhran, S., P. Rajiv, and R. Sivaraj. (2016). Toxicity of ZnO nanoparticles on germinating *Sesamum indicum* (Co-1) and their antibacterial activity. *Bull. Mater. Sci* 39(2):415.421.
- Navarro, M. (2009). Comportamiento interactivo de la germinación, la dormancia, la emergencia y el crecimiento inicial como atributos biológicos para evaluar el vigor de las semillas de *Albizia lebbbeck* (L.) Benth. PhD Thesis. Universidad Agraria de La Habana. Cuba. 101 p.
- Nel, T., L. Madler, and N. Li. (2006). Toxic potential of materials at the nanolevel. *Science* 311:622 – 627.
- Rahimi, D., D. Kartoolinejad, K. Nourmohammadi, and R. Naghdi. (2016). Increasing drought resistance of *Alnus subcordata* C.A. Mey seeds using a nano priming technique with multi-walled carbon nanotubes. *Journal of Forest Science* 62(6):269–278.
- Raskar, S.V., and S.L. Laware. (2014). Effect of zinc oxide nanoparticles on cytology and seed germination in onion. *International Journal of Current Microbiology and Applied Sciences* 3(2):467-473.
- Razzaq, A., R. Ammara, H.M. Jhazab, T. Mhamood, A. Hafeez, and S. Hussain. (2016). A novel nanomaterial to enhance growth and yield of wheat. *Journal of Nanoscience and Technology* 2(1):55–58.
- Rizwana, M., A. Shafaqat, M. Farooq Qayyumb, Y. Sik Okc, M. Adrees, M. Ibrahima, M. Zia-ur-Rehmand, M. Faride, F. Abbas. (2016). Effect of metal and metal oxide nanoparticles on growth and physiology of globally important food crops: A critical review. *Journal of Hazardous Materials*. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhazmat.2016.05.061>
- Roco, M. C. (2003). Broader societal issue of nanotechnology". *Journal of Nanoparticle Research*. 5: 181 – 189.
- Ruffini, M., L. Giorgettib, L. Bellanib, S. Mucciforac, S. Bottegaa, and C. Spanò. (2016). Root responses to different types of TiO_2 nanoparticles and bulk counterpart in plant model system *Vicia faba* L. *Environmental and Experimental Botany* 130:11-21.
- Saeid, S. (2015). Effect of nano silver on seed germination and seedling growth in fenugreek seed. *International Journal of Food Engineering* 1(2):106-110.
- Saeid, S. (2016). The effect of silver nanoparticle on lentil seed germination under drought stress. *International Journal of Farming and Allied Sciences* 5(3):208-212.
- Saeid, S. and H. Hojjat. (2016). Effects of silver nanoparticle exposure on germination of Lentil (*Lens culinaris* Medik.). *International Journal of Farming and Allied Sciences* 5(3):248-252.

- Salah, M., Y. Fu, Q. Hu, A. Nawas, Y. Guan, Z. Li, Y. Huang, and J. Hu. (2016). Seed priming with polyethylene glycol induces antioxidative defense and metabolic regulation of rice under nano-ZnO stress. *Environ. Sci. Pollut. Res.* p. 1-14.
- Savithamma, N., S. Ankanna, and G. Bhumi. (2012). Effect of nanoparticles on seed germination and seedling growth of *Boswellia ovalifoliolata* and endemic and endangered medicinal tree taxon. *Nano vision* 2:61-68.
- Sayed, Y. and J. Joner. (2010). Impact of Fe and Ag Nanoparticles on Seed Germination and Differences in Bioavailability During Exposure in Aqueous Suspension and Soil. *Bioforsk Soil and Environment.* p. 42-49.
- Shankamma, K., S. Yallappa, M.B. Shivanna, and, J. Manjanna. (2015). Fe₂O₃ magnetic nanoparticles to enhance *S. lycopersicum* (tomato) plant growth and their biomineralization. *Appl. Nanosci.* p. 1-8.
- Subramanian, K.S. and J. C. Tarafdar. (2011). Prospects of nanotechnology in Indian farming. *Indian Journal of Agricultural Sciences* 81 (10): 887–93.
- Thuesombat, P., S. Hannongbua, S. Akasi, and S. Chadchawan. (2014). Effect of silver nanoparticles on rice (*Oryza sativa* L. cv. KDML 105) seed germination and seedling growth *Ecotoxicology and Environmental Safety* 104:302-309.
- Ullah, S. and M. Arshad. (2014). Exposure-Response of *Triticum aestivum* to titanium dioxide nanoparticles application: seedling vigor index and micronuclei formation. *Institute of Environmental Sciences and engineering* 20(1):57-61.
- Vasanth, N., G. Melchias, and P. Kumaravel. (2012). Evaluation of silver bio-nanoparticles synthesized with the mediation of *Zizyphus jujuba* fruit extract on bactericidal compatibility and seed viability 6(7):6125-6135.
- Velázquez, H. (2014). Estudio fisiológico en familias prolíficas de un lote de producción de semilla de la variedad de maíz JAGUAN. Tesis de Maestría Profesional. Programa de Maestría en Tecnología de Granos y Semillas. Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro. Buenavista, Saltillo, Coahuila. 13 p.
- Walker, N.J., and J.R. Bucher. (2009). A 21st century paradigm for evaluating the health hazardous of nanoscale materials? *Toxicol. Sci.* 110:251-254.
- Wang, S., H. Liu, Y. Zhang, H. Xin. (2015). The effect of CuO NPs on reactive oxygen species and cell cycle gene expression in roots of rice. *Environmental Toxicology and Chemistry.* 34(3): 554-561.
- Wang, Z., L. Xu, J. Zhao, X. Wnag, J. White, and B. Xing. (2016). CuO nanoparticle interaction with *Arabidopsis thaliana*: toxicity, parent-progeny transfer, and gene expression. *Environmental Science & Technology.* 50:6008-6016.
- Woo-Mi, L., Y. Joo, H. Yoon, and H. Seok. (2008). Toxicity and bioavailability of copper nanoparticles to the terrestrial plants mung bean (*Phaseolus radiatus*) and wheat (*Triticum aestivum*): plant agar test for water-insoluble nanoparticles. *Environmental Toxicology and Chemistry* 27(9):1915-1921.
- Yank, F. and F. Vardar. (2015). Toxic effects of aluminum oxide (Al₂O₃) nanoparticles on root growth and development in *Triticum aestivum*. *Water Air Soil Pollut.* p. 3-13.

Zhang, R., H. Zhang, Ch. Tu, X. Hu, L. Li, Y. Lou, and P. Christie. (2015). Phytotoxicity of ZnO nanoparticles and the released Zn (II) ion to corn (*Zea mays L.*) and cucumber (*Cucumis sativus L.*) during germination. *Environ Sci. Pollut. Res.* p. 1-10.