








La nanociencia: Síntesis, aplicación agrícola e impacto ambiental

Zarate-Escobedo, Johana¹; López-Herrera, Amelia¹; Villegas-Velázquez, Itzel¹; Vicencio-Salas-Solís, Columba¹; Mendieta-Morales, Abigail¹; Carrillo López, Luis Manuel¹; Zavaleta-Mancera, Hilda Araceli^{1*}

¹ Colegio de Postgraduados, Campus Montecillo, Carretera México-Texcoco km 36.5, Montecillo, Texcoco, Estado de México, México, C.P. 56264.

* Autor para correspondencia: arazavaleta@colpos.mx

Problema

El termino nanociencia está relacionado con el estudio de los objetos y fenómenos que ocurren en estructuras de 1 a 100 nm. Un área emergente es el uso de la nanotecnología en la solución de problemas agrícolas, con la finalidad de optimizar los procesos de manera sustentable. Hace más de 10 años nuestro grupo de investigación ha hecho contribuciones importantes relacionadas con la síntesis verde de nanopartículas (NPs), el efecto toxico de estas NPs al ambiente y su aplicación en el sector agrícola. La aplicación de nanoestructurados en la solución de problemas agrícolas ha sido poco explorado y aún menos el efecto nocivo de estas al ambiente. Por ejemplo, el uso desmedido de fertilizantes ha llevado a la contaminación de los mantos freáticos, el uso indiscriminado de plaguicidas ha conducido a la exposición de niveles tóxicos para las personas, animales y el medio ambiente. Por lo anterior la nanotecnología promete soluciones inteligentes y soluciones ambientalmente amigables, que tienen que ser investigadas.

Solución planteada

El grupo de investigación, perteneciente a las líneas de generación y aplicación del conocimiento (LGAC): “Cambio Climático, estrés en plantas y mitigación” e “Innovación en la Producción Agrícola Sustentable” ha abierto la pauta al estudio de las ventajas y/o riesgo potencial de las NPs metálicas en el sector agrícola, permitiendo aportar información innovadora sobre la síntesis verde de NPs, aplicación como anti-microbianos y en ornamentales, así como la evaluación del impacto ambiental.

Síntesis de nanopartículas

La síntesis de NPs se refiere a la formación de partículas con tamaños entre 1 y 100 nm. Un nanómetro es la milmillonésima parte de un metro (1×10^{-9}), en perspectiva, el ancho promedio de un cabello humano es de 80 mil nm. Estas partículas presentan propiedades

Cómo citar: Zarate-Escobedo, J., López-Herrera, A., Villegas-Velázquez, I., Vicencio-Salas - Solís, C., Mendieta-Morales, A., Carrillo López, L.M., & Zavaleta-Mancera, H.A. (2024). La nanociencia: Síntesis, aplicación agrícola e impacto ambiental. *Agro-Divulgación*, 4(6). <https://doi.org/10.54767/ad.v4i6.418>

Editores académicos: Dra. Ma. de Lourdes C. Arévalo Galarza y Dr. Jorge Cadena Iñiguez.

Publicado en línea: Diciembre 2024.

Agro-Divulgación, 4(6). Noviembre-Diciembre. 2024. pp: 11-17.

Esta obra está bajo una licencia de Creative Commons Attribution-Non-Commercial 4.0 International



sorprendentes, debido a su alta relación superficie/volumen, lo que les confiere propiedades únicas. Existen tres métodos fundamentales para la síntesis de NPs metálicas: métodos físicos, químicos y biológicos. Los métodos físicos y químicos suelen ser más costosos y tóxicos. Por ello, la síntesis verde ha demostrado ser un método biológico sostenible que utiliza extractos naturales de plantas (como tallos, raíces, hojas, semillas, frutos y flores) y/o microorganismos (como bacterias, hongos y algas) (Figura 1).

Beneficio de las NPsAg en la eliminación de agentes microbianos

Existe evidencia científica de la actividad fungicida y bactericida de las NPsAg, las cuales, se adhieren a la superficie de la membrana celular fúngica o bacteriana, alterando procesos moleculares y fisiológicos que inhiben el crecimiento o inducen la muerte celular. Es importante destacar que el tamaño y la forma de las NPsAg influyen en su eficacia. El hongo *Fusarium circinatum* Nirenberg & O'Donnell, causa la enfermedad de secadera y pudrición de raíz en pinos (*Pinus* spp.) y ocasiona pérdidas mayores a 40% de la producción de planta. Nuestro equipo de trabajo detectó que la concentración de 10 mg NPsAg L⁻¹ presenta actividad inhibitoria contra *Fusarium circinatum* en condiciones *in vitro* (Figura 3A, B). Además encontramos actividad antibacteriana, a partir de 50 mg de NPsAg L⁻¹ *in vitro* contra la bacteria *Erwinia amylovora*, conocida como “fuego bacteriano”, un patógeno con resistencia a antibióticos, devastador para la producción de peras y manzanas (Figura 3C).

Aplicación de NPsAg en plantas ornamentales

La calidad de las plantas ornamentales, como tallos florales o follajes sin raíz, depende de la longevidad que alcancen en su vida postcosecha antes de marchitarse. Con la finalidad de retrasar su senescencia o envejecimiento y alargar su vida comercial, se han empleado soluciones preservantes. En las flores de corte se generan heridas susceptibles a infección por microorganismos, los cuales provocan en la planta el bloqueo de los vasos de xilema y reducen el transporte de agua. En postcosecha se pueden utilizar soluciones con la finalidad de alargar la vida en florero; soluciones pulso (altas concentraciones por

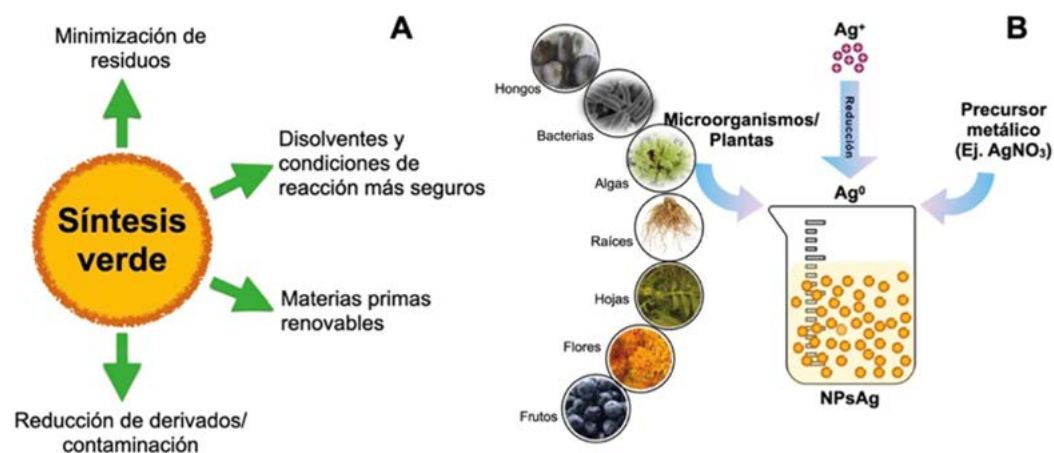
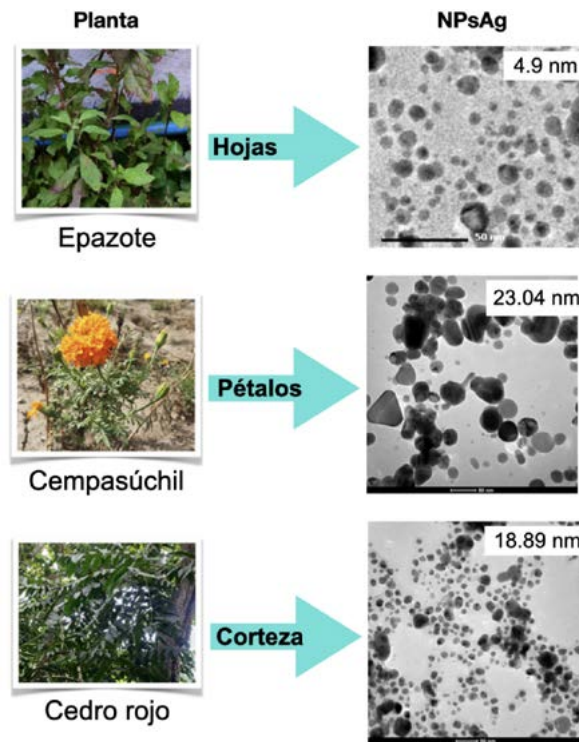


Figura 1. Síntesis biológica de nanopartículas (NPs) metálicas. A) Principios básicos de la síntesis verde; B) Representación del método de síntesis verde para la preparación de NPsAg.



Nuestros estudios revelan el potencial de extractos acuosos de: epazote (*Chenopodium ambrosioides* L.), pétalos de cempasúchil (*Tagetes erecta* L.) y corteza de cedro rojo (*Cedrela odorata* L.). Su efectividad radica en el contenido de fenoles, flavonoides, vitaminas, alcaloides, terpenoides, taninos y ácidos orgánicos, los cuales no solo reducen los iones de plata (Ag^+) a nanopartículas de plata (NPsAg) sino que también son excelentes compuestos de cobertura que estabilizan a las NPs en el tiempo. Este método de síntesis es sencillo, económico, rápido y ecológico.

Figura 2. Síntesis verde de NPsAg con extractos vegetales. Imágenes de NPsAg obtenidas mediante microscopía electrónica de transmisión (MET). Tamaños medios de NPsAg ($n=500$).

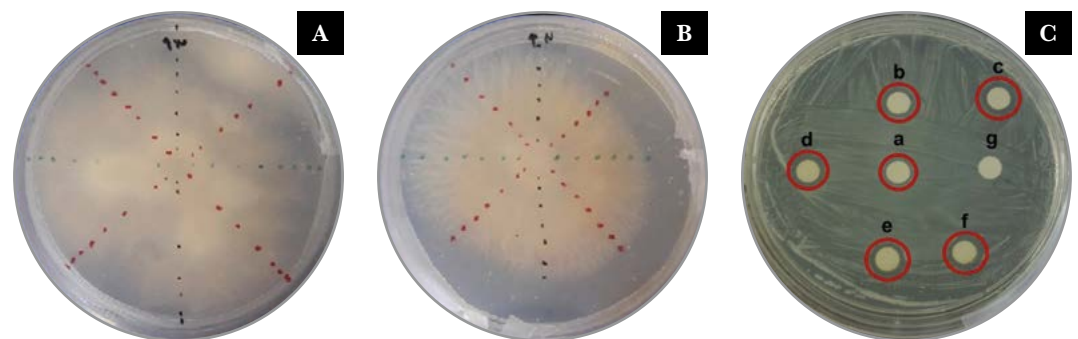


Figura 3. Actividad microbiana in vitro de NPsAg. A) *Fusarium circinatum* sin NPsAg. B) *Fusarium circinatum* con 10 mg NPs L^{-1} , se observa inhibición de crecimiento. Método de envenenamiento de alimento al día 8. C) *Erwinia amylovora* con diferentes concentraciones de NPsAg utilizando el método Kirby Bauer. a, 25 mg L^{-1} ; b, 50 mg L^{-1} ; c, 100 mg L^{-1} ; d, 200 mg L^{-1} ; e, 360 mg L^{-1} ; f, $360 \text{ mg AgNO}_3 \text{ L}^{-1}$ (control positivo); g, agua desionizada (control negativo). Las líneas rojas indican el crecimiento del hongo. Los círculos rojos delimitan la zona de inhibición de la bacteria.

un periodo de horas o no más de 3 días), florero (concentraciones bajas en las soluciones durante la vida florero) o asperjadas. Nuestro grupo de investigación estudió las NPsAg en las flores de corte: rosa `Freedom´ (*Rosa* L.), clavel (*Dianthus caryophyllus* L.) y alstroemeria `Fogo´ (*Alstroemeria* L.) para estudiar su efecto biocida como inhibidor de la producción de etileno considerada la hormona del envejecimiento (Figura 4).

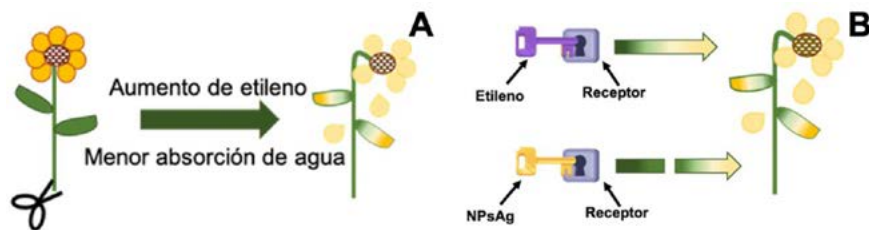


Figura 4. Flores de corte y mecanismo de acción del etileno en la senescencia del tallo floral. A) Efecto del corte de la raíz en el aumento de la producción de etileno y bloqueo microbiano de xilema que reduce la absorción de agua; B) receptores proteínicos llave-cerradura: etileno unido a su receptor desencadenando senescencia y NPsAg unidas al receptor de etileno, retrasando la senescencia del tallo floral.

En rosa y clavel, las NPsAg redujeron la población de microorganismos en las soluciones florero y el bloqueo de los vasos de xilema, favoreciendo el transporte de agua y aumentando la vida de florero. En contraste en tallos de alstroemeria, no se observó efecto debido a la baja sensibilidad al etileno que presenta esta especie (Cuadro 1).

Las NPsAg y su impacto ambiental

El impacto ambiental de las NPsAg es un tema relevante en el sector agrícola. Aunque las NPsAg generan beneficios, los efectos adversos en el ambiente requieren de estudios en plantas con simbiosis, la cual se refiere a la interacción beneficiosa de dos organismos. La liberación de NPsAg en aguas residuales o su acumulación en el suelo pueden afectar

Cuadro 1. Aplicación de NPsAg en la vida florero de plantas ornamentales.

Ornamental	Problema	Método de aplicación	Concentración (mg NPsAg L ⁻¹)	Resultados
Rosa L. (<i>Rosa</i> sp. cv. Freedom)	Sensible a etileno. Obstrucción vascular por microorganismos.	Solución florero	1, 5 y 10	Disminución de la población de microorganismos en las soluciones florero. Disminución de la oclusión vascular en la base de los tallos. Mayor tiempo de apertura floral. Aumento de la vida florero hasta 7 días. (Figura 5).
Clavel (<i>Dianthus caryophyllus</i> L.)	Sensible a etileno Obstrucción vascular por microorganismos.	Solución florero	50	Disminución de la población de microorganismos e Inhibición del bloqueo microbiano del xilema en la base de los tallos. Porcentaje de supervivencia de las flores del 67 % al día 21 (Figura 5).
Alstroemeria L. 'Fogo'	Vida florero de 15 a 21 días, amarillamiento de hojas desde el día 5.	Solución pulso	0, 4, 8, 16, 32, 50, 66, 94, 132	No hay retraso de la senescencia en hoja y flor (Figura 6).
		Solución pulso + Solución florero	0, 25 y 50 + 0 y 0.5	
		Solución asperjada	0 y 50	

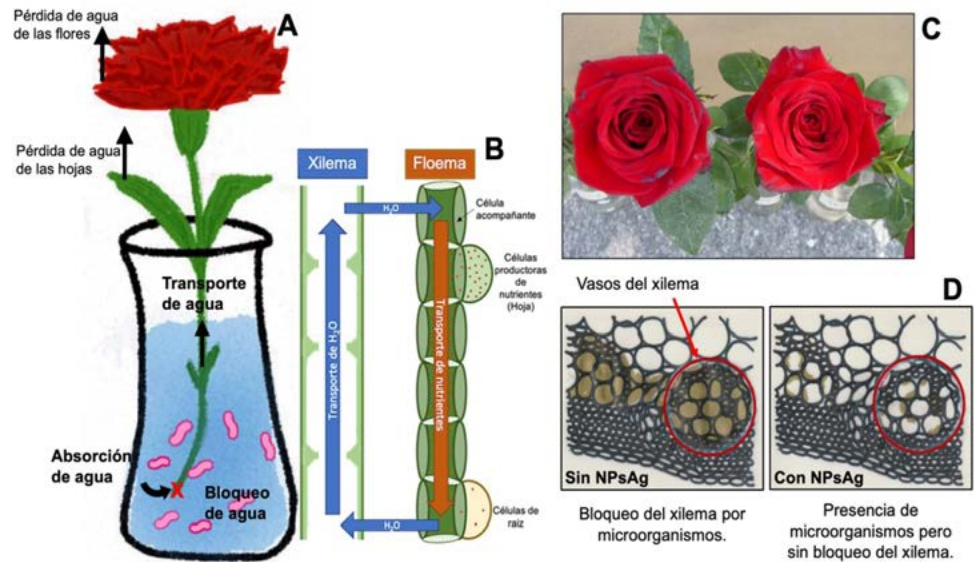


Figura 5. Las NPsAg y el aumento de la vida florero de plantas ornamentales. A) Absorción de agua por los tallos florales y pérdida por evapotranspiración foliar. El bloqueo microbiano del xilema en los tallos florales, generan menor absorción de agua; B) Sistema de transporte de agua y nutrientes en plantas; C) NPsAg en soluciones florero para alargar la vida de la rosa; D) Representación de la inhibición del bloqueo del xilema por microorganismos después de su exposición a soluciones florero con NPsAg.

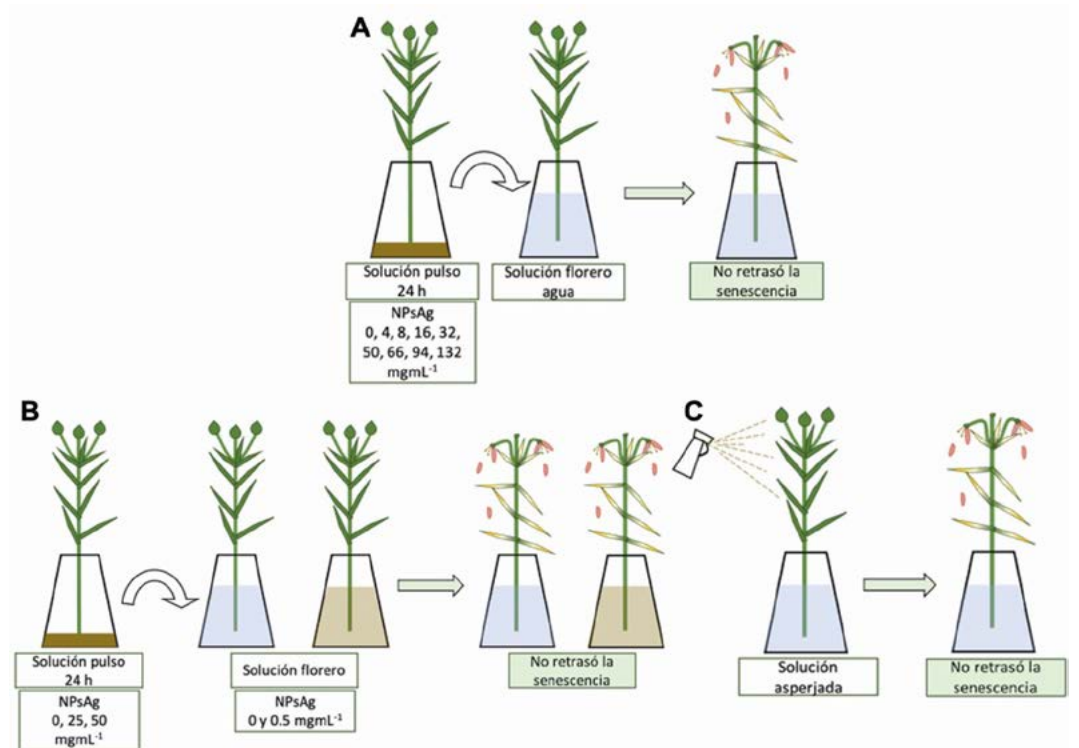


Figura 6. Experimentos con nanopartículas de plata (NPsAg) en *Alstroemeria L.* 'Fogo'. A) Experimento 1, se probaron 0, 4, 8, 16, 32, 50, 66, 94, 132 mg NPsAg mL⁻¹ aplicadas en solución florero por 24 h; B) Experimento 2, se probaron 0, 25, 50 mg NPsAg mL⁻¹ en solución florero por 24 h, se transfirieron a una solución florero con 0 y 0.5 mg NPsAg mL⁻¹ durante la vida florero; C) Experimento 3, 50 mg NPsAg mL⁻¹ se asperjaron al inicio del experimento.

a los organismos acuáticos y terrestres. Nuestro objetivo fue estudiar el comportamiento e interacción de las NPsAg con plantas acuáticas y terrestres. Un aspecto novedoso se centra en la toxicidad de las NPsAg, como contaminantes emergentes. El helecho acuático *Azolla filiculoides* Lam., tiene simbiosis con la cianobacteria *Anabaena azollae* Strass., para fijar N_2 atmosférico además es una planta bio-remediadora de metales y compuestos orgánicos. Las NPsAg son tóxicas para *A. filiculoides*, en concentraciones elevadas ($100 \text{ mg NPsAg L}^{-1}$). La toxicidad se refleja en la reducción del crecimiento, daños estructurales en los tejidos de la raíz. Técnicas de Microscopía Electrónica Avanzada permitieron encontrar hallazgos novedosos que indican que muchas NPsAg se acumulan sobre la rizodermis, luego estas se disocian en Ag^+ para entrar a la raíz y después pasan por la corteza y se acumulan mayormente en la endodermis, donde forman nuevas NPsAg (Figura 7).

También se estudió el efecto de 1, 10 y $100 \mu\text{g mL}^{-1}$ de NPsAg en el establecimiento de la simbiosis micorrízica arbuscular (*Rhizophagus intraradices*) y el trébol blanco (*Trifolium repens* L.). Se observó un efecto dosis-respuesta, por ejemplo $10 \mu\text{g NPsAg mL}^{-1}$ aumentó el número de esporas y el porcentaje de colonización, incrementando el desarrollo del hongo micorrízico arbuscular (HMA) en contraste, dosis más altas ($100 \mu\text{g NPsAg mL}^{-1}$), afectan variables agronómicas de crecimiento. Las funciones de los sistemas simbióticos pueden verse comprometidas por el uso a gran escala de las NPsAg, conduciendo a la reducción de la diversidad y función de los HMA en el suelo, los cuales tienen una función esencial en cultivos agrícolas (Figura 8).

En conclusión, las NPsAg tienen aplicaciones innovadoras en el sector agrícola, pero también presentan desafíos ambientales. Estos estudios permitieron aportar información nueva sobre la síntesis verde de NPs, aplicación como anti-microbianos y para alargar la vida postcosecha de ornamentales, así como la evaluación de sus efectos en el ambiente.

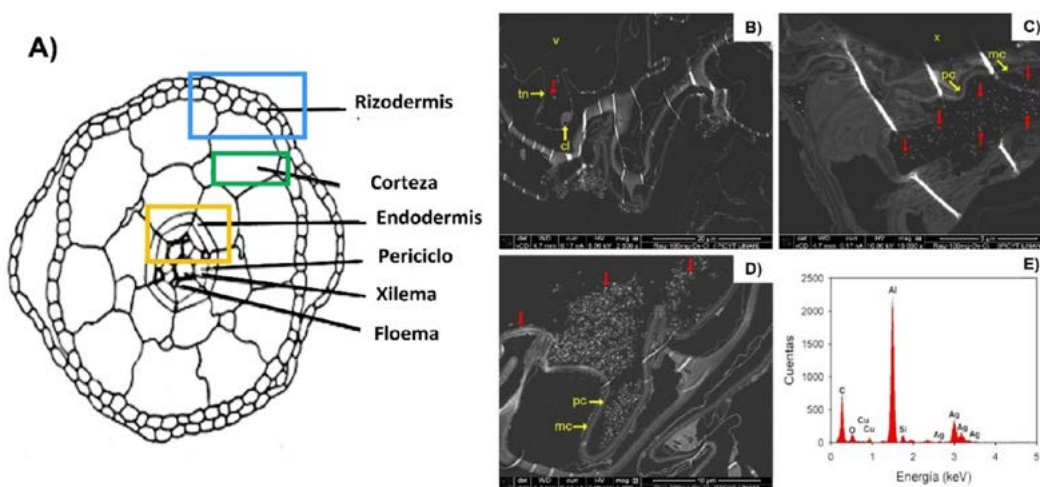


Figura 7. Distribución interna de Ag en la raíz de *A. filiculoides* expuesta a $100 \text{ mg de AgNPs L}^{-1}$ por 8 d. A) recuadros: azul (rizodermis), verde (corteza) y amarillo (endodermis). B-D) Microscopía Electrónica de Barrido de alta resolución (MEB-FIB Dual Beam, modo STEM + BSE). B) Corteza externa, con AgNPs en la vacuola; C) endodermis con abundantes NPsAg; D) abundantes NPsAg fuera de la rizodermis; E) espectro EDS de Ag realizado en las NPs brillantes de C. Cloroplasto (cl), membrana citoplasmática (mc), pared celular (pc), tonoplasto (tn), vacuola (v), xilema (x). Las flechas rojas señalan NPsAg.

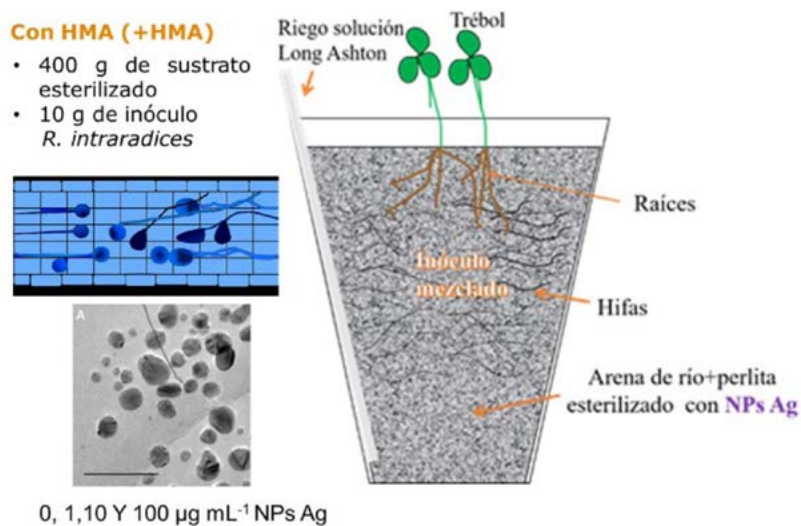


Figura 8. Efecto de nanopartículas de plata (NPs Ag), en el establecimiento de la simbiosis micorrícica arbuscular de *Rhizophagus intraradices* con *Trifolium repens* L.

Innovación, impactos e indicadores

Nivel de innovación	Descripción	Transferido	Impacto		Indicador general de políticas públicas	Indicadores específicos	Subindicador
			Sector	Ámbito			
Innovación frugal	Desarrollo de un método eficiente y amigable con el ambiente para la síntesis de nanopartículas de plata (NPsAg). Beneficio de las NPsAg en la eliminación de agentes microbianos.	Congresos Conferencias	Primario: Agricultura Aprovechamiento forestal	Conocimiento y manejo	Ciencia y Tecnología	Competitividad	Cuatro tesis doctorales. Cuatro artículos científicos JCR 6 Resúmenes de congreso
Innovación sostenible	Aplicación de NPsAg para alargar la vida de florero de tallos florales. Conocimiento del efecto ambiental del desecho de NPsAg en plantas	Productores Congresos	Primario: Agricultura Procesos de Investigación, Desarrollo e Innovación (I+D+i)	Económico Ambiental	Ciencia y Tecnología Responsabilidad ambiental	Competitividad y comercio	Cuatro tesis doctorales. Una tesis de maestría. Cuatro artículos científicos.