

EFFECTO DE NANOPARTICULAS DE PLATA SOBRE EL CRECIMIENTO DE TRIGO (*Triticum aestivum* L.) Y LA DISPONIBILIDAD DE FÓSFORO EN PRESENCIA/AUSENCIA DE FERTILIZACIÓN FOSFATADA EN UN ANDISOL

Mauricio Molina-Roco¹, Catalina Fernández¹, Carolina Mercado¹, Karen Manquián-Cerda² y Nicolás Arancibia-Miranda^{2,3}

¹Escuela de Agronomía, Universidad Mayor. Campus Huechuraba, Camino La Pirámide #5750, Huechuraba, Santiago 8580745, Chile. mauricio.molina@umayor.cl

²Facultad de Química y Biología, Universidad de Santiago de Chile. Av. B. O'Higgins #3363, Santiago, Chile

³Center for the Development of Nanoscience and Nanotechnology (CEDENNA). Santiago 9170124, Chile.

Resumen

En Chile, la mayor superficie de las siembras de trigo se concentra en regiones cuyos suelos corresponden, principalmente, a suelos derivados de cenizas volcánicas, los cuales presentan normalmente deficiencias de fósforo (P). Las nanopartículas de plata (AgNPs) pueden llegar a los suelos a través del uso de aguas residuales y/o lodos provenientes del tratamiento de aguas domiciliarias. Son escasos los estudios del efecto de estos materiales sobre el crecimiento vegetal y el P en suelos cultivados. Los objetivos de este trabajo fueron: i) estudiar el efecto de diferentes dosis de AgNPs en la disponibilidad del P en un Andisol en presencia/ ausencia de fertilización fosfatada y ii) determinar el efecto de las AgNPs sobre el crecimiento de trigo harinero. El estudio se realizó en condiciones de invernadero. Se montó un ensayo en macetas en el que se cultivó trigo por 46 días en maceteros de 1,5 L, usando tres plantas por maceta y cuatro repeticiones. Se estableció un arreglo factorial en que se evaluaron dos dosis de P (0 y 234 mg kg⁻¹) y cuatro de AgNPs (0, 18, 120 y 420 mg kg⁻¹). Se midió crecimiento de las plantas a lo largo del tiempo y, al final del ensayo, se determinó la producción de materia seca y el P disponible (P-Olsen) en el suelo. Se realizó comparación múltiple de medias y las diferencias se determinaron usando la prueba de LSD (p<0,05). Cuando se aplicó P via fertilización, la menor dosis de AgNPs (18 mg kg⁻¹) causó un efecto estimulante en el crecimiento particularmente en altura y materia seca. A mayores concentraciones se produce una evidente disminución del crecimiento (p<0,05). Las dos dosis mayores de AgNPs en tratamientos con fertilización de P tendieron a aumentar en contenido de P-Olsen en el suelo. Sin embargo, el aumento en el contenido del P disponible no tuvo relación con el crecimiento vegetal, debido al efecto fitotóxico que se observó a las mayores dosis de NPs. El pH del suelo no mostró diferencias estadísticas entre tratamientos, por lo cual no tuvo influencia en los cambios de disponibilidad de P observados. De igual modo, es importante medir otras variables físico-químicas del suelo para estudiar en mayor detalle las diferencias que existen en la reactividad del pool de P nativo y el pool de P agregado al suelo en presencia de AgNPs.

Palabras clave: trigo (*Triticum aestivum* L.), suelos volcánicos, nanomateriales, P-Olsen

1. Introducción

En Chile los suelos derivados de cenizas volcánicas, Andisoles y Ultisoles, tienen relevancia debido a la intensa actividad silvoagropecuaria que se desarrolla en ellos, siendo parte fundamental en la economía del país (Vistoso, 2017). Estos suelos representan aproximadamente el 60% de las tierras cultivables de la nación (Escudey et al., 2001). Entre las características físico-químicas de los Andisoles se encuentra: pH ácido (4,5-6,5) presencia de Alofán, óxidos de Fe y Al, alto contenido de materia orgánica y carga superficial variable (Sadzawka y Carrasco, 1985; Escudey et al., 2001). Estas características condicionan la elevada capacidad de retención de P en coloides de suelos, lo que se traduce en una reducida eficiencia de uso de fertilizantes fosfatados, la que puede ser incluso inferior al 10% del P aplicado (Besoain y Sadzawka, 1999). Los valores de P disponible (P-Olsen) observados en suelos volcánicos cultivados y sin cultivar son inferiores en relación a otros tipos de suelos, y se encuentran, normalmente, bajo el límite de suficiencia (Molina et al., 2012).

Las partículas de tamaño nanométrico comprendido entre 1 y 100 nm son denominadas nanopartículas (NPs). Estas son de gran interés debido a sus propiedades únicas y diferentes a las de los mismos materiales a escala no nanométrica, conferidas por la alta relación superficie-volumen, lo que los hace biológicamente más activos, pudiendo ocasionar reacciones atípicas e inesperadas (Nowack y Bucheli, 2007). Debido a su amplio uso, los nanomateriales han generado una gran preocupación por los efectos que puedan tener en el ser humano y en el medio ambiente. Las NPs metálicas, especialmente de plata (AgNPs), son las más utilizadas en diferentes tipos de productos debido a su acción biocida (Pradas del Real et al., 2017). Hoy en día las AgNPs tienen prevalencia en más de 240 productos de uso por el ser humano (<http://www.nanotechproject.org>). De esta manera, las AgNPs pueden llegar a los suelos cultivados a través del uso de aguas residuales y/o lodos provenientes del tratamiento de aguas domiciliarias generados por la actividad antropogénica (Doolette et al., 2015).

Algunos autores advierten que las NPs de metal y óxidos de metal pueden ser más tóxicas, siendo su depósito a largo plazo una amenaza hacia los recursos suelo-agua, sin embargo, sus efectos aún son desconocidos (Thul y Sarangi, 2015). Así se ha observado que las AgNPs pueden modular el crecimiento vegetal, ya sea estimulando el crecimiento como disminuyéndolo (fitotóxicidad). Esto se ha observado en especies como maíz (*Zea mays*), frejol (*Phaseolus vulgaris*), sorgo (*Sorghum bicolor*), rábano (*Raphanus sativus*) y trigo, usando, principalmente, sustratos diferentes al suelo como medio de crecimiento (Salama, 2012; Lee et al., 2012; Zuverza-Mena et al., 2016; Iqbal et al., 2019). Pocos estudios han investigado el efecto de las NPs sobre la disponibilidad de nutrientes en el suelo. En relación con el P, se ha observado que NPs de CeO₂ y TiO₂ reaccionan con el P en el suelo aumentando o bajando su disponibilidad (P-Olsen) dependiendo del tipo de suelo y/o tipo de óxido (Duncan y Owens, 2019). Es esencial considerar tales reacciones y efectos al evaluar el impacto ambiental potencial de los AgNPs en sistemas agroambientales. De acuerdo con los antecedentes señalados, los objetivos del presente estudio fueron: i) estudiar el efecto de diferentes dosis de AgNPs en la disponibilidad del P en un Andisol en presencia/ ausencia de fertilización fosfatada y ii) determinar el efecto de las AgNPs sobre el crecimiento de trigo harinero. }

2. Materiales y Métodos

El estudio se llevó a cabo bajo condiciones de invernadero entre los meses de Agosto y Octubre de 2019. Se cultivaron plantas de trigo harinero de primavera (*Triticum aestivum* L. var. veronica) en macetas de plástico de 1,5 L de capacidad. Se utilizó un suelo de tipo Andisol (0 – 20 cm de profundidad), de bajo nivel de P disponible, recolectado en la localidad de Nueva Braunau (-41,31° Lat. S, -73,08° Long.), Región de los Lagos, Chile. Las propiedades físicas y químicas del suelo utilizado se presentan en la Tabla 1.

Tabla 1. Propiedades químicas y físicas del suelo.

Parámetro	Unidades	Valor
pH (agua)		6,0
Materia orgánica	%	8,9
Nitrógeno disponible (N)	mg kg ⁻¹	40
Fósforo disponible (P)	mg kg ⁻¹	8
Potasio disponible (K)	mg kg ⁻¹	143
Suma de bases	cmol kg ⁻¹	8,30
Aluminio intercambio (Al)	cmol kg ⁻¹	0,06
Densidad aparente	g ml ⁻¹	0,85
Arena	%	41
Limo	%	40
Arcilla	%	19
Clase textural ^a		Franca

^aClasificación USDA.

El suelo fue homogenizado, secado al aire, y tamizado a 6 mm para posteriormente llenar las macetas con 1,1 kg de suelo hasta un volumen de 1,3 L, de acuerdo con la densidad aparente del suelo. Se utilizaron tres dosis de AgNPs y dos controles sin AgNPs en combinación con la presencia o ausencia de P, lo que constituyó seis tratamientos en total (Tabla 2). Estas concentraciones se seleccionaron como representación de escenarios ambientales de baja, media y alta contaminación por NPs (Prada del Real et al., 2016). Las AgNPs fueron sintetizadas según lo propuesto por Coutris et al. (2012). Se usó AgNO₃ como fuente de Ag, además de un agente reductor (NaBH₄) y un estabilizador (citrato de sodio). En la Figura 1 se muestra la microscopía electrónica de transmisión (TEM, HITACHI modelo HT7700) de las AgNPs obtenidas, las cuales poseen una morfología pseudoesférica de tamaño promedio de 20 nm, lo que es inferior a otros métodos de síntesis tradicionales.

Tabla 2. Dosis de AgNPs y P utilizadas en los tratamientos.

Tratamientos	AgNPs (mg kg ⁻¹)	P (mg kg ⁻¹)
Control	0	0
Control-P	0	234 ^a
NPs1-P0	18	0
NPs2-P0	120	0
NPs3-P0	420	0
NPs1-P1	18	234
NPs2-P1	120	234
NPs3-P1	420	234

^aEquivalente a 150 kg P₂O₅ ha⁻¹

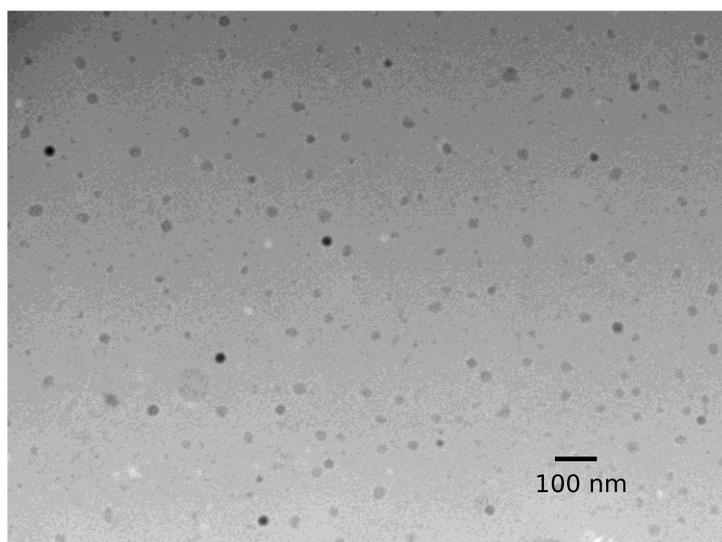


Figura 1. Microscopía electrónica de transmisión (TEM, Trasmision electron microscopy) mostrando AgNPs utilizadas en el estudio.

El suelo se fertilizó y enriqueció con AgNPs tomando el suelo del tercio superior (aprox. 300 gr) de cada maceta, el cual se extendió sobre una bolsa plástica y se aplicó de manera homogénea la dosis de AgNPs correspondiente de cada tratamiento tomando alícuotas de una suspensión stock. Todos los tratamientos recibieron una fertilización base (al trasplante) usando urea y cloruro de potasio. El P en los tratamientos correspondientes fue aplicado también al trasplante usando superfosfato triple. Una segunda aplicación de urea se realizó 26 días después del trasplante. La fertilización total fue equivalente (por volumen) a 220, 150 y 185 kg ha⁻¹ de N, P₂O₅, y K₂O. Se seleccionó una dosis alta de fertilización fosfatada considerando una dosis de mantención más parte de fertilización de corrección.

Una vez finalizada la fertilización y la aplicación de AgNPs, se agregó suficiente agua destilada para llevar el suelo a la capacidad cercana al campo. Una vez regado, se realizó trasplante de plántulas de trigo (dos hojas verdaderas) dejando tres plantas por macetas (unidad experimental). Se utilizaron cuatro repeticiones por tratamiento (Figura 7). Todos los riegos posteriores (una a dos veces por semana) se realizaron con agua destilada manteniendo el suelo con un contenido de humedad cercano a un 70- 80% de su capacidad de campo. Durante el periodo se realizaron mediciones de altura, diámetro y número de hojas de las plantas. Al final del ensayo se realizó corte de las plantas para determinar materia seca aérea (70°C a 48h), y un muestreo de suelo de cada maceta para determinar P disponible por el método de Olsen con acidez ajustada (Sadzawka et al., 2006; Rodriguez et al., 1994). El pH y conductividad eléctrica (CE) en suspensión de las muestras se determinaron mediante métodos estándar usando una relación suelo:agua de 1:2,5 p/v (Sadzawka et al., 2006).

El diseño experimental fue de bloques completos al azar. Se consideraron dos mesones dentro del invernadero cada uno de los cuales representó un bloque. En cada bloque se ubicaron aleatoriamente dos repeticiones de cada tratamiento, las cuales fueron rotadas de posición semanalmente durante el experimento. Se realizó análisis de varianza (ANDEVA) y comparación múltiple de medias. Se consideró un arreglo factorial de 2 factores (dosis de AgNPs y dosis de P). La comparación de medias se realizó utilizando la prueba de diferencia mínima significativa (DMS) protegida utilizando un valor de $p < 0,05$. Los análisis se realizaron en software SAS Studio.

3. Resultados y Discusión

3.1 Crecimiento de las plantas

Las plantas de trigo en los tratamientos fertilizados con P presentaron, en general, mayor crecimiento en altura (Figura 2A), diámetro (Figura 2B) y número de hojas (Figura 2C) a lo largo del periodo experimental independiente de la dosis de AgNPs. Las diferencias en número de hojas fueron mayores entre los 27 y 38 días, y tendieron a desaparecer hacia el final del experimento. Estos datos coinciden con estudios en donde el trigo responde positivamente a la fertilización fosfatada en suelos deficitarios, aumentando el crecimiento de la parte aérea, y observándose retraso en crecimiento y/o desarrollo en ausencia de fertilización (Elliot et al., 1997). Se observó interacción dosis de NPs x dosis de P ($p < 0,05$) sobre la altura de las plantas en diferentes fechas de medición (Tabla 3). Las mayores diferencias en altura se observaron hacia el final del ensayo. En presencia de fertilización con P, se observó que la dosis menor de AgNPs (18 mg kg⁻¹) tendió a aumentar el crecimiento de las plantas de trigo, sin embargo, el aumento de las dosis a 120 y 420 mg kg⁻¹ provocaron una disminución en altura, diámetro de tallo y número de hojas (Tabla 3, Figura 2). Algunos de los tratamientos presentaron diferencias significativas en altura de plantas ($p < 0,05$) en relación con el tratamiento con mayor crecimiento (NPs1-P1) Estos datos son concordantes con estudios realizados donde se observó que en frejol y maíz el efecto de las AgNPs fue positivo aumentando su crecimiento con concentraciones 20 a 60 mg kg⁻¹, y disminuyéndolo entre 80 y 100 mg kg⁻¹. Esta inhibición se atribuye a la acumulación y la captación de AgNPs por las raíces (Salama et al., 2012). La fitotoxicidad estaría causada por que las NPs

impedirían el normal desarrollo celular y absorción de nutrientes (Lee et al., 2012; Zuversa-Mena et al., 2016; Pradas del Real et al., 2017)

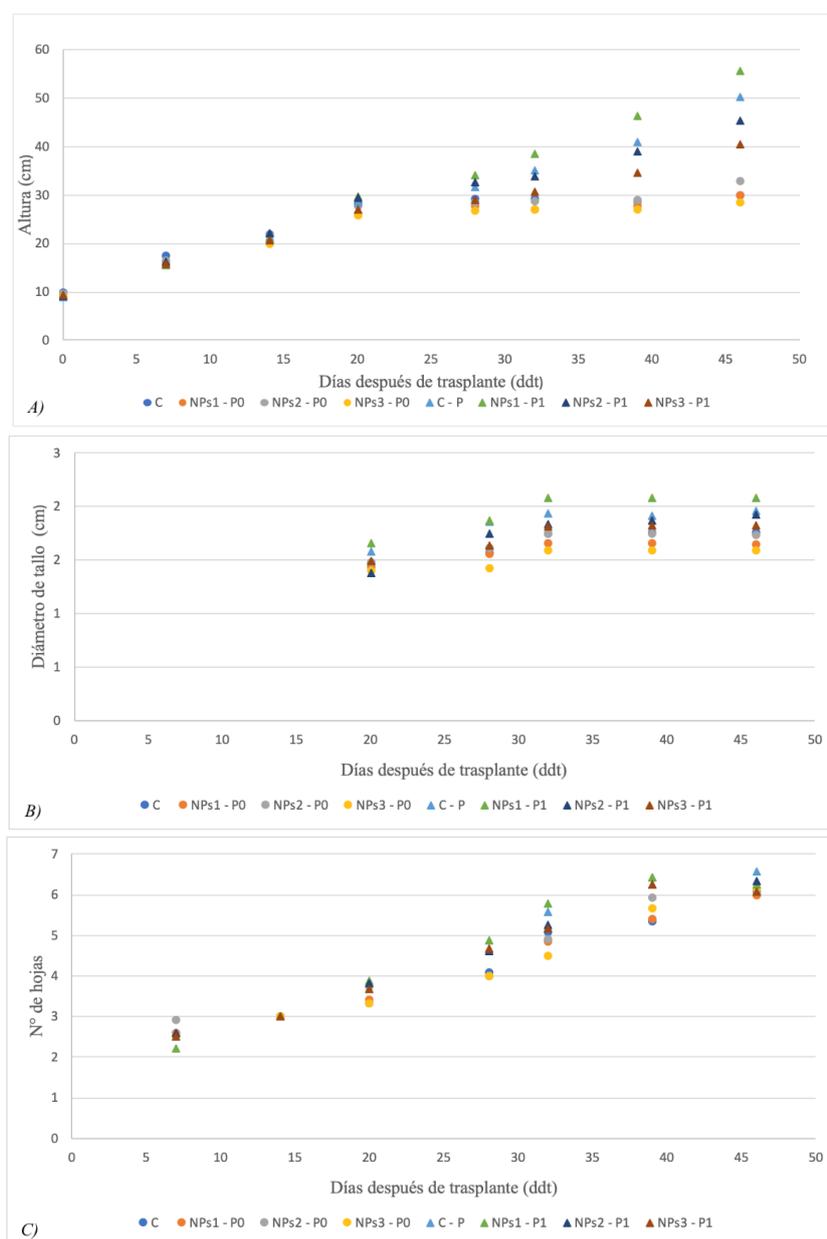


Figura 2. Efecto de la presencia/ausencia de la fertilización fosfatada y dosis de AgNPs sobre las plantas de trigo en tres variables de crecimiento: (A) altura, (B) diámetro de tallo y (C) número de hojas. Los valores son el promedio de cuatro réplicas. C: control sin P, NP1-P0, NP2-P0, NP3-P0: tratamientos sin P y con distintas dosis de AgNPs (18, 120, 420 mg kg⁻¹), C-P: control fertilizado (234 mg kg⁻¹), NP1-P, NP2-P1, NP3-P1: tratamientos con P y con distintas dosis de AgNPs (18, 120, 420 mg kg⁻¹).

Tabla 3. Análisis factorial para el efecto de la dosis de AgNPs y de P sobre la altura de plantas en dos fechas de medición.

Dosis de AgNPs (mg kg ⁻¹)	32 ddt			46 ddt		
	Dosis de P (mg kg ⁻¹)		Promedio	Dosis de P (mg kg ⁻¹)		Promedio
	0	234		0	234	
0	29,3cd	35,0ab	32,2	29,9d	50,3ab	40,1
18	27,0d	38,6a	32,8	29,8d	55,6a	42,7
120	28,8d	33,9abc	31,4	32,9cd	45,3ab	39,1
420	26,9cd	30,7bcd	28,8	28,5d	40,3bc	34,4
Promedio	28,0	34,6		30,2	47,8	

Para cada fecha, letras diferentes al lado de cada valor indican diferencias significativas entre los tratamientos según prueba de DMS ($p < 0,05$). ddt: días después del trasplante.

En ausencia de fertilización con P no se observó efecto de la dosis de AgNPs sobre el crecimiento de las plantas. Los resultados observados para los parámetros de crecimiento se observan de manera más marcada en la producción de materia seca (MS) de las plantas (Figura 3). También se observó interacción significativa dosis de NPs x dosis de P ($p < 0,05$) sobre esta variable. Cuando existió fertilización con P, la dosis más baja de AgNPs tendió a aumentar la MS con relación al control con P y sin NPs. Al aumentarse la dosis de AgNPs se produce una baja significativa ($p < 0,05$) en la producción de MS. En ausencia de P, no se observó efecto significativo de la dosis de AgNPs.

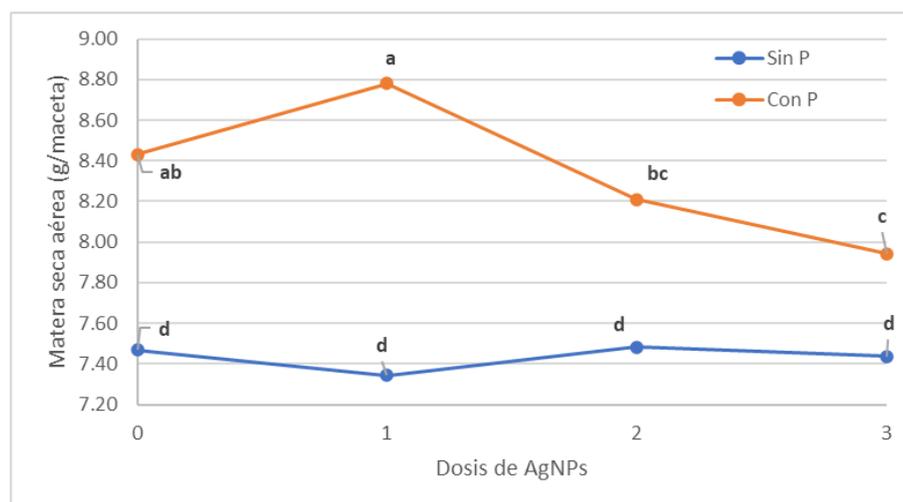


Figura 3. Efecto de la dosis de AgNPs y de P sobre la producción de materia seca de plantas al final del experimento. Los puntos muestran el promedio de cuatro repeticiones. Letras diferentes sobre cada punto indican diferencias significativas entre los tratamientos según prueba de DMS ($p < 0,05$). Dosis de AgNPs 0, 1, 2, 3: 0, 18, 120, 420 mg kg⁻¹, respectivamente.

Recientemente, Iqbal et al. (2019) estudiaron el efecto de AgNPs en la regulación del crecimiento del trigo bajo estrés por calor. Se aplicaron diferentes concentraciones de AgNPs (25, 50, 75 y 100 mg l⁻¹) a las plantas de trigo en etapa trifoliada. La exposición al estrés por calor (35-40°C) afectó negativamente el crecimiento morfológico de la planta de trigo en ausencia de AgNPs. Por el contrario, los resultados registraron que concentraciones de 50 y 75 mg l⁻¹ de AgNPs protegió las plantas de trigo contra el estrés por calor mejorando la longitud de la raíz, de brotes y el peso fresco y peso seco de la planta en comparación con el control. Lo que indica que, en determinadas condiciones, dosis bajas de AgNPs pueden regular el crecimiento de trigo, favoreciéndolo, como se observó en el presente estudio.

3.2 Fósforo (P) disponible en el suelo

Los resultados mostraron una interacción significativa ($p < 0,05$) de la dosis de AgNPs y de P sobre el P-Olsen en el suelo. Se observaron diferencias significativas en las concentraciones de P-Olsen entre algunos tratamientos en presencia/ausencia de fertilización fosfatada. En los tratamientos fertilizados con P, el P-Olsen tendió a aumentar a medida que la dosis de AgNPs aumentaba (Figura 4). Este aumento fue de hasta un 60% con las dosis más altas de NPs (420 mg kg⁻¹) con relación al control con P y sin NPs. Sin embargo, los niveles de P siguen siendo todavía bajos, es decir, menores a 10 mg kg⁻¹ (Havlin et al., 2005). Por el contrario, en suelos donde no se agregó P al sistema, las concentraciones de P-Olsen tendieron a ser más bajas con relación al control sin P ni NPs. Duncan et al. (2019) observaron en un estudio de incubación que, dependiendo del tipo de suelo, el P-Olsen nativo aumentó o disminuyó en el tiempo en presencia de NPs de TiO₂ o CeO₂ en comparación con los suelos control sin NPs. En ese estudio se planteó la hipótesis de que los efectos antimicrobianos de ambas NPs alteraron la actividad de los microbios solubilizadores de P. Cabe señalar que la disponibilidad del P para el cultivo está determinada por sus reacciones con los constituyentes del suelo. Se ha descrito que en presencia de altas concentraciones de Ag es posible que se formen fosfato de Ag (Ag₃PO₄) que bajan la solubilidad del P (Lindsay, 2001). Esto podría estar ocurriendo en los tratamientos con aplicación de P. Sin embargo, esto debe ser evaluado mediante estudios de especiación química acoplados otros análisis de suelo. Por otra parte, se determinó el pH del suelo al final del experimento. Los resultados indicaron que no existió efecto significativo ($p > 0,05$) de los factores sobre el pH (Tabla 4) ni sobre la CE (datos no mostrados), lo que indica que el pH no influenció en este experimento la disponibilidad de P. El aumento en el contenido del P disponible presentado en algunos tratamientos a las mayores dosis de AgNPs no tuvo relación con el crecimiento vegetal, debido al efecto fitotóxico que se observó a esas dosis de NPs. De todas formas, nuestros resultados confirman que los dos pools de P, el pool nativo y el pool de P adicionado con la fertilización, presentan distinta reactividad o interacción en el suelo en presencia de AgNPs.

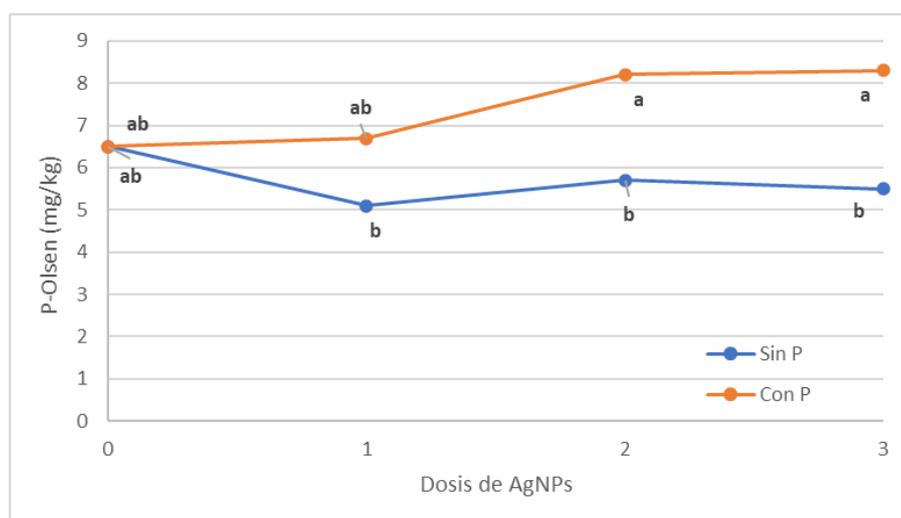


Figura 4. Efecto de la dosis de AgNPs y de P sobre el P disponible en el suelo al final del experimento. Los puntos muestran el promedio de cuatro repeticiones. Letras diferentes sobre cada punto indican diferencias significativas entre los tratamientos según prueba de DMS ($p < 0,05$). Dosis de AgNPs 0, 1, 2, 3: 0, 18, 120, 420 mg kg^{-1} , respectivamente.

Tabla 4. Análisis factorial para el efecto de la dosis de AgNPs y de P sobre el pH del suelo al final del experimento.

Dosis de AgNPs (mg kg^{-1})	Dosis de P (mg kg^{-1})		Promedio
	0	234	
0	5,83	5,75	5,75
18	5,87	5,77	5,75
120	5,75	5,82	5,75
420	5,83	5,82	5,80
Promedio	5,77	5,75	

4. Conclusiones

Los resultados indicaron que el crecimiento de las plantas, especialmente la altura, y la producción de MS aérea se vieron afectadas por la dosis de AgNPs y de P aplicado. Cuando se aplicó P via fertilización, la dosis más baja de AgNPs (18 mg kg^{-1}) estimuló el crecimiento de las plantas de trigo, pero a mayores dosis de NPs, el crecimiento comienza a disminuir, mostrando un efecto fitotóxico. La presencia de AgNPs a las dos mayores dosis modificó ($p < 0,05$) la disponibilidad de P (P-Olsen) de manera diferente en los tratamientos con y sin fertilización fosfatada, lo que indica la presencia de dos pools de P con diferente reactividad en presencia de AgNPs. Se realizarán posteriores análisis de P a nivel de la planta para evaluar el efecto de las NPs sobre la fitodisponibilidad y examinar posibles cambios en la eficiencia de absorción de P.

5. Agradecimientos

Este trabajo fue financiado por el Proyecto FONDECYT regular n°1191018, Chile.

6. Referencias bibliográficas

Besoain, E. y Sadzawka, M.A. 1999. Fenómenos de retención de fósforo en los suelos volcánicos y sus consecuencias. En: Las Rocas Fosfóricas y sus Posibilidades de Uso Agrícola en Chile. (Eds. Besoain, Rojas y Montenegro). Colección Libros INIA N° 2. Santiago, Chile. p. 23-36.

Coutris, C., Jautris, E., Helen, D. 2012. Aging and soil organic matter content affect the fate of silver nanoparticles in soil. *Science of the total environment*, 420: 327- 333.

Doolette, C. L., McLaughlin, M. J., Kirby, J. K., and Navarro, D. A. 2015. Bioavailability of silver and silver sulfide nanoparticles to lettuce (*Lactuca sativa*): Effect of agricultural amendments on plant uptake. *Journal of Hazardous Materials*, 300: 788–795.

Duncan, E., and Owens, G. 2019. Metal oxide nanomaterials used to remediate heavy metal contaminated soils have strong effects on nutrient and trace element phytoavailability. *Science of the Total Environment*, 678: 430–437.

Elliot, D., Reuter, D., Reddy, G., and Abbot, R. 1997. Phosphorus nutrition of spring wheat (*Triticum aestivum* L.) 1. Effect of phosphorus supply on plant symptoms, yield, components of yield, and plant phosphorus uptake. *Journal Agriculture Research*, 48: 855-867.

Escudey, M., Galindo, G., Förster, J. E., Briceño, M., Chang, A., and Foster, J. E. 2001. Chemical forms of phosphorus of volcanic ash-derived soils in Chile. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 32: 601–616.

Havlin, J., Beaton, J., Tisdale, S., Nelson., W. 2005. Soil fertility and fertilizers: an introduction to nutrient management. Saddle River, New Jersey. 514p.

Iqbal, M., Raja, N. I., Mashwani, Z. U. R., Hussain, M., Ejaz, M., & Yasmeen, F. 2019. Effect of silver nanoparticles on growth of wheat under heat stress. *Iranian Journal of Science and Technology, Transaction A: Science*, 43(2): 387–395.

Lee, W. M., Kwak, J. Il, and An, Y. J. 2012. Effect of silver nanoparticles in crop plants *Phaseolus radiatus* and *Sorghum bicolor*: Media effect on phytotoxicity. *Chemosphere*, 86(5): 491–499.

Lindsay, W. 2001. Chemical equilibria in soils. Colorado state university, Fort collins. 450p.

Molina, M., Ortega, R., and Escudey, M. 2012. Evaluation of the AB-DTPA multiextractant in Chilean soils of different origin with special regard to available phosphorus. *Archives of Agronomy and Soil Science*, 58: 789-803.

Nowack, B., and Bucheli, T. D. 2007. Occurrence, behavior, and effects of nanoparticles in the environment. *Environmental Pollution*, 150(1): 5–22.

Pradas del Real, A., Castillo-Michel, H., Kaegi, R., Sinnet, B., Magnin, V., Findling, N., Villanova, J., Carrière, M., Santaella, C., Fernández, A., Levard, C., Sarret, G. 2016. Fate of Ag-NPs in sewage sludge after application on agricultural soils. *Environmental Science and Technology*, 50(4): 1759–1768.

Pradas del Real, A. E., Vidal, V., Carrière, M., Castillo-Michel, H., Levard, C., Chaurand, P., & Sarret, G. 2017. Silver nanoparticles and wheat roots: A complex interplay. *Environmental Science and Technology*, 51(10): 5774–5782.

Rodríguez, J., Self, J., and Soltanpour. 1994. Optimal conditions for phosphorus analysis by the ascorbic acid-molybdenum blue method. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 58: 866-870.

Sadzawka, A., Carrasco, M., Grez, R., Mora, M., Flores, H., y Neaman, A. 2006. *Métodos de análisis recomendados para los suelos de Chile*. Santiago, Chile, 53pp.

Sadzawka M. A. y Carrasco M. A. 1985. Química de los suelos volcánicos. En: *Suelos volcánicos de Chile* (Ed. J. Tosso). INIA, Santiago, Chile: Inia. p. 337-431.

Salama H.M.H. 2012. Effects of silver nanoparticles in some crop plants, common bean (*Phaseolus vulgaris* L.) and corn (*Zea mays* L.) *International Research Journal of Biotechnology*, 3(10): 190-197.

Thul S., and Sarangi B. 2015. Implications of Nanotechnology on Plant Productivity and Its Rhizospheric Environment. En: *Nanotechnology and Plant Sciences* (Eds. Siddiqui M. H., Al-Whaibi M. H., Mohammad F.), 1era edición. Springer, Suiza. p. 37-53.

Vistoso G., Erika; Sandaña P., y Iraira, S. 2017. Fertilización fosfatada de praderas en suelos Trumaos de la Región de Los Lagos. Colección de Libros INIA No 37. Instituto de Investigaciones Agropecuarias, Centro Regional de Investigación Remehue, Osorno, Chile. 124pp.

Zuverza-Mena, N., Armendariz, R., Peralta-Videa, J. R., and Gardea-Torresdey, J. L. 2016. Effects of Silver Nanoparticles on Radish Sprouts: Root Growth Reduction and Modifications in the Nutritional Value. *Frontiers in Plant Science*, 7: 1–11.