

Inoculación de *Neltuma alba* con hongos micorrícicos arbusculares: efectos sobre el crecimiento y las variables edáficas en Entre Ríos, Argentina

Inoculation of *Neltuma alba* with arbuscular mycorrhizal fungi: effects on growth and edaphic variables in Entre Ríos, Argentina

Carla S Salto ^{a*}, Mónica B Sagadin ^b, Leonel Harrand ^a

* Autor de correspondencia: ^a Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA), Estación Experimental Agropecuaria (EEA) Concordia, Estación Yuquerí, Concordia, Entre Ríos, Argentina, tel.: 54 345 4290000, salto.carla@inta.gob.ar

^b Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA), Centro de Investigaciones Agropecuarias, Instituto de Fisiología y Recursos Genéticos Vegetales, Unidad de Estudios Agropecuarios INTA-CONICET, Córdoba, Argentina.

RESUMEN

La especie *Neltuma alba* (algarrobo blanco), nativa de Argentina, posee un gran valor comercial y resulta de interés para la restauración de suelos degradados. Se ha sugerido que la incorporación de hongos micorrícicos arbusculares (HMA) beneficia a las plantas durante su establecimiento en campo. El objetivo del trabajo fue evaluar algunas variables edáficas y el crecimiento en una plantación de *N. alba* inoculada con HMA aislados de la Región Chaqueña Argentina al cabo de seis años de su establecimiento en campo. Los tratamientos consistieron en plantas inoculadas con HMA aislados de dos sitios: Colonia Benítez (CB, provincia de Chaco, sitio húmedo) y Padre Lozano (PL, provincia de Salta, sitio semiárido), además se mantuvo un grupo control sin inocular. Se midieron la sobrevivencia, el diámetro al cuello y la altura total de las plantas y se realizó un muestreo de suelo por tratamiento para determinar las variables físicas, químicas y biológicas. La incorporación de los árboles, independientemente de la inoculación, tuvo efectos positivos sobre las propiedades edáficas evaluadas. Las muestras de suelos de las plantas con el inóculo CB se asociaron a mayores valores de actividad biológica total, conductividad eléctrica, pH, calcio intercambiable y respiración edáfica, mientras que las muestras de suelo correspondientes a plantas con el inóculo PL mostraron un mayor contenido de materia orgánica. Los menores crecimientos se encontraron en plantas de *N. alba* inoculadas con los HMA procedentes de CB en las condiciones ambientales evaluadas.

Palabras clave: micorriza, algarrobo blanco, propiedades del suelo, simbiosis, variables morfológicas.

SUMMARY

Neltuma alba (algarrobo blanco) is a commercially valuable native in Argentina that is of interest for the restoration of degraded soils. Incorporation of arbuscular mycorrhizal fungi (AMF) has been suggested to benefit plants during field establishment. The aim of this study was to evaluate the edaphic properties and growth of *N. alba* plantations inoculated with AMF isolated from the Chaco Region of Argentina six years after field establishment. The treatments consisted of plants inoculated with AMF isolated from two sites: Colonia Benitez (CB, Chaco Province, humid site) and Padre Lozano (PL, Salta Province, semi-arid site). The uninoculated control (TE) group was maintained. Survival, collar diameter, and total plant height were measured. Additionally, composite soil samples were collected per treatment to determine physical, chemical, and biological variables. Regardless of inoculation, the incorporation of trees had positive effects on the evaluated edaphic properties. Soil samples from plants inoculated with CB showed higher values of total biological activity, electrical conductivity, pH, exchangeable calcium, and soil respiration. In contrast, soil samples from plants inoculated with PL showed higher organic matter content. *N. alba* plants inoculated with AMF from CB exhibited the lowest growth rates under the environmental conditions evaluated.

Keywords: mycorrhizae, algarrobo blanco, soil properties, symbiosis, morphological variables.

INTRODUCCIÓN

Entre las herramientas de gestión para la recuperación de suelos degradados, los hongos micorrícicos arbusculares (HMA) constituyen una alternativa potencial dado que forman simbiosis con las raíces del 80 % de las plantas terrestres en diferentes hábitats y, su utilización puede mejorar la productividad de los diferentes cultivos (Salto *et al.* 2018, Parihar *et al.* 2019, Ci *et al.* 2023). Los HMA representan un vínculo clave entre las plantas y los nutrientes minerales del suelo, puesto que facilitan la absorción de nutrientes y de agua, lo que contribuye a incrementar el crecimiento y la tolerancia ante situaciones de estrés biótico o abiótico en las plantas (Casazza *et al.* 2017, Sagadin *et al.* 2018, Saparrat *et al.* 2020). Algunos estudios indican que los HMA pueden mejorar la sobrevivencia y el crecimiento de las plantas en suelos afectados por sales (salinos/alcalinos) y contribuir a restaurar la vegetación (Salto *et al.* 2018, Parihar *et al.* 2019, Ci *et al.* 2023). No obstante, la presencia de sales afecta tanto a las plantas hospedantes como a los HMA al reducir el potencial de colonización, esporulación y crecimiento de las hifas, por lo que la tolerancia al estrés mediada por estos microorganismos depende de la aplicación de inóculos que se adapten a las condiciones locales (Parihar *et al.* 2019).

Se sugiere que los HMA mejoran algunas características del suelo como la agregación, la disponibilidad de nutrientes, la retención de agua, las actividades microbianas y la acidez del suelo (Jamiołkowska *et al.* 2018). A pesar de ello, la simbiosis micorrícica entre los HMA y las plantas es muy compleja y está influenciada por factores como la temperatura, aireación, contenido de fósforo, pH, materia orgánica del suelo y la presencia de especies de plantas hospedantes, entre otros (Kalinhoff 2012, Casazza *et al.* 2017, Parihar *et al.* 2019). Esto se debe a que las distintas especies de HMA difieren en sus preferencias edáficas y nutricionales, en la diversidad de especies hospedantes y también fluctúan en su sensibilidad a los cambios ambientales (Ontivero *et al.* 2023).

En las prácticas de reforestación y restauración, se recomienda el empleo tanto de plantas como HMA nativos, ya que suelen estar más adaptados a las condiciones edafambientales en los que serán introducidos. Sin embargo, esto requiere del conocimiento de cómo los HMA se adaptan y reaccionan al ser introducidos en un nuevo sitio o cómo responden al manejo del suelo (Saparrat *et al.* 2020, Sagadin *et al.* 2023). Asimismo, el cambio en el tipo de cobertura vegetal (conversiones de sistemas agrícolas a forestales o de plantaciones a pastizales naturales recuperados) afecta la mayoría de los atributos y funciones del suelo en diferentes grados (Lupi *et al.* 2021, Morazzo *et al.* 2021).

Las propiedades químicas y biológicas del suelo se consideran indicadores sensibles de la calidad del suelo y reflejan el estado de nutrientes de este. Sin embargo, existen escasos antecedentes sobre los cambios en los parámetros químicos y biológicos del suelo durante la refores-

tación o restauración asociados tanto a la inoculación de HMA como al tiempo de recuperación de estas zonas (Qiu *et al.* 2019).

Las especies del género *Neltuma* (*ex Prosopis*) resultan de gran interés para la restauración de áreas degradadas debido a su rusticidad (Meloni 2014). La especie *Neltuma alba* (Griseb.) C.E. Hughes & G.P. Lewis (algarrobo blanco, Fabaceae) es una leguminosa arbórea de amplia distribución geográfica en Argentina, es una de las especies nativas de mayor valor comercial en términos de sus posibles usos (mueblería, combustible, alimento, entre otros) y contribuye a la recuperación de suelos degradados debido a sus características ecofisiológicas que le permiten desarrollarse en condiciones ambientales donde otras actividades son poco productivas (Meloni 2014, Salto *et al.* 2018, Salto *et al.* 2020).

Aunque *N. alba* puede crecer en ambientes muy adversos, el establecimiento de las plantas en campo es de suma relevancia, dado que los plantines están expuestos a un amplio rango de condiciones ambientales que pueden producir estrés reduciendo su supervivencia y/o crecimiento (Salto *et al.* 2018, Sagadin *et al.* 2018, Salto *et al.* 2020). Estudios recientes, han identificado especies de HMA en suelos con diferentes usos en la región fitogeográfica del Espinal y en suelos de algarrobales de la Región Chaqueña de Argentina. Sin embargo, los datos ecológicos sobre estos microorganismos son escasos o inexistentes en algunas regiones del país (Sagadin *et al.* 2018, Ontivero *et al.* 2023). Esto permitiría aislar HMA con mayor adaptación a condiciones edafoclimáticas específicas para ser introducidos en situaciones de similares características (Sagadin *et al.* 2023). Se ha demostrado que *N. alba* puede ser colonizada por HMA y que la inoculación con estos simbiontes muestra un aporte significativo en el crecimiento y la reducción del empleo de fertilizantes químicos en la producción de plantas en vivero (Sagadin *et al.* 2018, Salto *et al.* 2020, Sagadin *et al.* 2023).

Actualmente, no existe información disponible que involucre el efecto de la inoculación de plantas de *N. alba* con HMA sobre la sobrevivencia y crecimiento de las plantas en condiciones de campo, y de cómo esto afecta los parámetros del suelo a largo plazo. El objetivo del trabajo es evaluar algunas propiedades edáficas (físicas, químicas y biológicas) y el crecimiento en una plantación de *N. alba* inoculada con HMA aislados de la Región Chaqueña Argentina a los seis años de su establecimiento en campo. La hipótesis que se plantea es que la incorporación de los HMA en plantas de *N. alba* beneficia el establecimiento y crecimiento de las plantas, y modifica las condiciones edáficas del sitio de plantación.

MÉTODOS

Área de estudio. El estudio se desarrolló en un establecimiento del departamento Uruguay, en el sudeste de la provincia de Entre Ríos (32° 58' 14,7" S; 58° 14' 35,7" O,

7 m s.n.m.), Argentina. El área corresponde a una llanura aluvial pantanosa, conformada por suelos poco evolucionados, pobremente drenados e intercalados con suelos alcalinos, pertenecientes al subgrupo de los *Halacueptes* y *Haplacueptes*, sujetos a riesgos de erosión y con limitaciones de actividad en el área radical (Engler *et al.* 2008, Bedendo *et al.* 2014). El clima predominante es el templado húmedo de llanura, sin situaciones extremas, una temperatura media anual de 18 °C, con una media de 11 °C en el mes más frío (julio) y de 26 °C en el mes más cálido (enero), y una precipitación media anual de 1.100 mm concentrada en primavera y verano (Engler *et al.* 2008). Originalmente, el área correspondía a un bosque nativo semixorófilo que fue desmontado en la década de los 80 para su utilización agrícola-ganadera hasta el año 2000, aproximadamente.

Descripción del ensayo. Las plantas de *N. alba* utilizadas en la plantación procedieron de un estudio que evaluó el efecto de los HMA durante el proceso de producción de plantas en vivero (Salto *et al.* 2020). Los inóculos mixtos de HMA empleados fueron aislados de muestras de suelos rizosféricos de rodales naturales de *N. alba* de la Región Chaqueña Argentina, procedentes de Colonia Benítez (CB, sitio húmedo, provincia de Chaco, Argentina) y Padre Lozano (PL, sitio semiárido, provincia de Salta, Argentina) (Sagadin *et al.* 2018). Además, se consideró un grupo de plantas sin inocular como tratamiento testigo. Previo a la plantación, se comprobó la micorrización de los plantines, cuyos porcentajes de micorrización promedio fueron de 66 % y 64 % en las plantas tratadas con inóculos CB y PL, respectivamente, mientras que en el tratamiento control se verificó la ausencia de micorrización. La plantación se realizó a 4 m × 3 m con parcelas de 18 plantas (3 × 6) bajo un diseño experimental de bloques completos generalizados con cuatro repeticiones y tres subrepeticiones por bloque.

El aislamiento de las especies de HMA se realizó por el método de plantas trampa, donde las especies utilizadas fueron alfalfa (*Medicago sativa* L.), sorgo (*Sorghum bicolor* (L.) Moench) y algarrobo blanco (*N. alba*), logrando de cada sitio un inóculo mixto conformado por las raíces de las plantas trampa, esporas, hifas y el sustrato utilizado para el crecimiento (Sagadin *et al.* 2018). La identificación morfo-taxonomía de las especies de HMA constituyentes indica que el inóculo PL estuvo compuesto por *Claroideoglobus claroideum* (N.C.Schenck & G.S.Sm.) C.Walker & A.Schüssler, *Claroideoglobus etunicatum* (W.N.Becker & Gerd.) C.Walker & A.Schüssler, *Diversispora spurca* (C.M.Pfeiff., C.Walker & Bloss) C.Walker & A.Schüssler, *Funneliformis mosseae* (T.H. Nicolson & Gerd.) C.Walker & A.Schüssler y *Rhizophagus intraradices* (Schenck & Sm.) C.Walker & A.Schüssler, mientras que el inóculo CB estuvo conformado por *C. claroideum*, *C. etunicatum*, *F. mosseae*, *Funneliformis constrictum* (Trappe) C.Walker & A.Schüssler y *Rhizophagus clarus* (T.H.Nicolson & N.C. Schenck) C.Walker & A.Schüssler (Sagadin *et al.* 2018).

Muestreo y análisis de suelo. Para la determinación de las variables edáficas de los tratamientos, se tomaron en total 12 muestras compuestas de suelo, conformadas cada una por 15 submuestras tomadas al azar, y colectadas a una profundidad de 0-25 cm a los seis años del establecimiento de las plantas en campo. Las muestras se secaron a temperatura ambiente, se tamizaron con malla de 2 mm y se enviaron al Laboratorio de Suelo y Agua de la Estación Experimental Agropecuaria Anguil de INTA para su caracterización. Las determinaciones realizadas fueron: pH (relación suelo/agua 1:2,5, IRAM-SAGPyA 29574:2009), conductividad eléctrica (CE) (en extracto de pasta de saturación, IRAM-SAGyP 29579:2021), fósforo disponible (P) (Bray-Kurtz 1, IRAM-SAGyP 29570-1:2010), nitrógeno total (NT) (Kjeldahl modificado, IRAM-SAGyP 29572:2018), materia orgánica total (MOT) (Walkley y Black, IRAM-SAGyP 29571-2:2011), capacidad de intercambio catiónico (CIC) y cationes intercambiables (en acetato de amonio 1 N a pH 7, IRAM-SAGyP 29577:2016), porcentaje de sodio intercambiable (PSI) y textura (hidrómetro de Bouyoucos, IRAM-SAGyP 29581). Asimismo, en cada tratamiento, se extrajeron tres muestras de suelo sin perturbar para la determinación de la densidad aparente por el método del cilindro. El volumen del cilindro utilizado fue de 100 cm³ y las muestras se tomaron en la parte central de la profundidad de 0-25 cm. En el laboratorio, las muestras se secaron en estufa Gallenkamp Hot Box Oven - Size 2 a 105 °C hasta peso constante para determinar su masa (Blake y Hartge 1986).

Se determinó la actividad microbiana total por la técnica de la hidrólisis del diacetato de fluoresceína (FDA) (Adam y Duncan 2001) y la actividad respiratoria se realizó mediante la técnica de incubación (Schinner *et al.* 1996) en las muestras de suelo. Los controles se hicieron a los 7, 14 y 21 días. Estas determinaciones fueron realizadas en el laboratorio de la Dirección de Suelos y Agua Rural, dependiente del Ministerio de la Producción y el Desarrollo Económico Sostenible de la provincia del Chaco, Argentina.

Se consideró como situación inicial o de referencia, un lote contiguo al ensayo con similares características como guía comparativa para analizar los resultados de las propiedades medidas (Santos *et al.* 2017). Las muestras fueron tomadas a la misma profundidad y se determinaron las propiedades indicadas anteriormente.

Además, se determinó la sobrevivencia inicial y se midieron el diámetro al cuello (DAC, en cm) y altura total (AT, en cm) de las plantas de *N. alba* empleando forcípula y vara telescópica, respectivamente, al primer y sexto año de plantado.

Análisis estadístico. Se realizó un análisis de la varianza por modelos lineales mixtos (considerando heterogeneidad de variancias para los tratamientos) y la comparación de medias se efectuó a través de la prueba DGC cuando se detectaron diferencias significativas ($P \leq 0,05$). Además,

se realizaron los análisis de correlación de Pearson y de componentes principales con los datos estandarizados para evaluar la relación existente entre los parámetros de suelo y la variación entre los diferentes tratamientos. Se utilizó el software InfoStat versión 2020 (Di Rienzo *et al.* 2020) y su interfaz con el software R 3.6.0 (2019).

RESULTADOS

Características generales del sitio. Los resultados muestran diferencias estadísticamente significativas entre la situación inicial y los tratamientos de inoculación para el fósforo disponible (P , $P = 0,0140$), capacidad de intercambio catiónico (CIC, $P = 0,0333$), potasio (K^+ , $P = 0,0021$), sodio (Na^+ , $P = 0,0044$), porcentaje de sodio intercambiable (PSI, $P < 0,0001$) y respiración edáfica ($P = 0,0070$). Dentro del ensayo solo se detectaron diferencias significativas para el sodio intercambiable ($P = 0,0071$) y PSI ($P = 0,0001$).

El contenido de fósforo disponible en el suelo estuvo entre 6,3 y 10,9 ppm y fue significativamente menor en el tratamiento con el inóculo de CB (cuadro 1).

La CIC varió entre 9,1 y 14,4 cmolc kg^{-1} , no obstante, la situación inicial presentó el mayor valor y se diferenció significativamente de los tratamientos de inoculación (cuadro 1). Los niveles de potasio (K^+) detectados en el suelo fueron menores a 0,2 cmolc kg^{-1} , pero el mayor contenido se encontró en la situación inicial y, posterior a la plantación, los valores fueron similares sin diferencias significativas entre los tratamientos. Los valores de sodio intercambiable (Na^+) en el suelo estuvieron entre 0,5 y 1,3 cmolc kg^{-1} y la mayor presencia de este catión se encontró en la situación inicial. El porcentaje de sodio intercambiable (PSI) presentó valores entre 5,4 % y 10,1 % y fue significativamente menor en el tratamiento con el inóculo CB (cuadro 1). Entre los restantes cationes de intercambio no se encontraron diferencias significativas. Se observó que el contenido de calcio (Ca^{++}) en la situación inicial fue mayor con respecto a los tratamientos inoculados. El contenido de magnesio (Mg^{++}) fue superior a 2 cmolc kg^{-1} en todas las situaciones y la mayor concentración se registró en el suelo posterior a la plantación (cuadro 1).

No se detectaron diferencias significativas para materia orgánica total (MOT) y nitrógeno total (NT) en la situación inicial con respecto a los tratamientos de inoculación, aunque fueron levemente menores en la situación inicial. El pH fue neutro a ligeramente alcalino. Los valores de CE fueron bajos en todos los casos y sin diferencias significativas entre tratamientos (cuadro 1). La densidad aparente no difirió entre los tratamientos. Asimismo, el contenido de arcilla, limo y arena fue similar entre los tratamientos sin diferencias significativas (cuadro 1).

La respiración edáfica varió entre 9,6 a 55 mg CO_2 100 gss $^{-1}$ y las diferencias se encontraron entre la situación inicial y los tratamientos de inoculación (cuadro 1). No se detectaron diferencias significativas para la actividad mi-

crobiana total (FDA) ($P = 0,6720$) en las muestras de suelos y sus valores estuvieron entre 211,38 y 172,83 μg FDA gss $^{-1}$, donde el mayor valor se encontró en el tratamiento CB (cuadro 1).

Durante el primer año de establecimiento en campo, no se detectaron diferencias significativas en la sobrevivencia, no obstante, el mayor porcentaje se obtuvo en los plantines inoculados con PL (93,0 %), seguido de aquellos inoculados con CB (91,6 %) y por último el testigo sin inocular (90,7 %). Los mayores crecimientos en diámetro ($P < 0,0001$) y altura ($P = 0,0013$) se detectaron en el tratamiento con PL y el testigo (TE) con respecto al tratamiento de inoculación con CB. A los seis años de la plantación, la sobrevivencia fue de 91,7 % para las plantas con el inóculo PL, de 89,8 % para las plantas inoculadas con CB y de 89,4 % para el testigo sin inocular; además, se encontraron diferencias significativas para el diámetro ($P = 0,0099$) y la altura total ($P = 0,0154$) entre el tratamiento sin inocular (TE) con respecto a los tratamientos inoculados (cuadro 1).

Análisis de componentes principales. Mediante el análisis de componentes principales se evaluó el comportamiento de las variables edáficas con relación a los tratamientos de inoculación y la situación inicial. Los dos primeros ejes canónicos explicaron el 95,7 % de la variabilidad total. El 79,5 % de la varianza fue explicada por la componente principal 1 (CP 1), la cual mostró una asociación positiva con los cationes intercambiables (excepto el magnesio), PSI, CIC, pH, el contenido de limo y arcilla. En oposición, se proyectaron negativamente el contenido de arena, la densidad aparente (Dap), CE, la materia orgánica total (MOT) y el nitrógeno total (NT) del suelo (figura 1). Además, la CP 1 separó los tratamientos de inoculación de la situación inicial. Asimismo, el tratamiento PL se vinculó con el porcentaje de materia orgánica total y el contenido de arena, mientras que el tratamiento CB se asoció a CE, NT y densidad aparente (Dap). El CP 2 explicó el 16,2 % de la variabilidad y se definió por el fósforo disponible (P) y el contenido de magnesio, en contraposición, se encontró al nitrógeno total (NT) y CE (figura 1).

Al considerar solo la relación entre las propiedades edáficas y los tratamientos de inoculación a través del análisis de componentes principales, se observó que la CP 1 explicó el 62,4 % de la variabilidad total y permitió discriminar entre el tratamiento CB con respecto a PL y TE (figura 2). La CP 1 se asoció positivamente con CE, actividad microbiana total (FDA), calcio, nitrógeno total (NT) y densidad aparente (Dap). Por otra parte, el PSI, fósforo disponible (P) y el sodio se correlacionaron de forma negativa con la primera componente. La segunda componente se asoció de manera positiva con la materia orgánica total, potasio (K) y contenido de arena y, de manera negativa, con el contenido de limo, CIC, pH y respiración del suelo (figura 2).

El suelo con las plantas inoculadas con CB presentó mayores valores de FDA, calcio, CE y los menores valores en PSI, fósforo disponible (P) y sodio intercambiable

Cuadro 1. Características de las muestras de suelo y variables de crecimiento promedio al primer y sexto año de las plantas de *Neltuma alba* en los diferentes tratamientos. CB: inóculo de Colonia Benítez, PL: inóculo de Padre Lozano, TE: tratamiento sin inocular. Errores estándares entre paréntesis.

Soil samples characterization and average growth variables at the first and sixth years of *Neltuma alba* plants in different treatment. CB: inoculum from Colonia Benítez, PL: inoculum from Padre Lozano, TE: treatment without inoculation. Standard errors in parentheses.

Variable	Tratamiento							
	CB		PL		TE		Situación Inicial	
P (ppm)	6,36 (± 0,60)	b	8,39 (± 1,75)	a	8,89 (± 0,90)	a	8,77 (± 0,18)	a
NT (%)	0,09 (± 0,01)		0,09 (± 0,01)		0,09 (± 0,01)		0,08 (± 0,01)	
pH (1:2,5)	6,89 (± 0,42)		6,72 (± 0,24)		6,78 (± 0,16)		7,87 (± 0,85)	
CE (dS m ⁻¹)	0,53 (± 0,09)		0,44 (± 0,09)		0,43 (± 0,09)		0,37 (± 0,09)	
MOT (%)	1,64 (± 0,20)		1,72 (± 0,20)		1,63 (± 0,20)		1,51 (± 0,20)	
CIC (cmolc kg ⁻¹)	10,29 (± 0,63)	b	10,19 (± 0,63)	b	10,58 (± 0,63)	b	12,09 (± 0,63)	a
Ca ⁺⁺ (cmolc kg ⁻¹)	5,37 (± 0,62)		5,18 (± 0,62)		5,14 (± 0,62)		7,44 (± 0,62)	
Mg ⁺⁺ (cmolc kg ⁻¹)	3,10 (± 0,28)		3,13 (± 0,28)		3,25 (± 0,28)		2,86 (± 0,28)	
Na ⁺ (cmolc kg ⁻¹)	0,58 (± 0,11)	b B	0,75 (± 0,15)	a A	0,79 (± 0,12)	a A	1,32 (± 0,56)	a
K ⁺ (cmolc kg ⁻¹)	0,12 (± 0,02)	b	0,12 (± 0,02)	b	0,11 (± 0,02)	c	0,23 (± 0,02)	a
PSI (%)	5,62 (± 0,98)	b B	7,37 (± 1,45)	a A	7,40 (± 0,99)	a A	10,14 (± 3,66)	a
Resp. (mg CO ₂ 100 gss ⁻¹)	24,75 (± 7,01)	b	9,63 (± 1,38)	b	16,50 (± 5,38)	b	55,00 (±5,83)	a
FDA (µg FDA gss ⁻¹)	211,38 (± 32,63)		182,28 (± 32,63)		172,83 (± 32,63)		165,55 (±32,63)	
Dap (g cm ⁻³)	1,56 (± 0,04)		1,56 (± 0,04)		1,55 (± 0,04)		1,54 (± 0,04)	
Arcilla (%)	12,00 (± 1,11)		12,00 (± 1,11)		13,00 (± 1,11)		13,43 (± 1,11)	
Limo (%)	23,00 (± 1,46)		22,50 (± 1,46)		23,00 (± 1,46)		25,05 (± 1,46)	
Arena (%)	65,00 (± 1,70)		65,50 (± 1,70)		64,00 (± 1,70)		61,53 (± 1,70)	
Textura	Franco arenosa							
Variables de crecimiento a 1 año								
DAC (cm)	0,66 (± 0,05)	B	0,78 (± 0,05)	A	0,81 (± 0,05)	A	--	
AT (cm)	60,20 (± 3,12)	B	68,26 (± 3,11)	A	67,07 (± 3,12)	A	--	
Variables de crecimiento a los 6 años								
DAC (cm)	5,37 (± 0,95)	B	5,99 (± 0,94)	B	6,67 (± 0,95)	A	--	
AT (cm)	198,38 (± 30,27)	B	218,06 (± 30,04)	B	237,69 (± 30,18)	A	--	

P: fósforo disponible; NT: nitrógeno total; pH en agua; CE: conductividad eléctrica; MOT: materia orgánica total; CIC: capacidad de intercambio catiónico; Ca, Mg, Na y K: cationes intercambiables de calcio y magnesio, sodio y potasio, respectivamente; PSI: porcentaje de sodio intercambiable; Resp.: respiración edáfica promedio, FDA: diacetato de fluoresceína; Dap: densidad aparente del suelo; Textura. DAC: diámetro al cuello; AT: altura total. Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($P \geq 0,05$). Letras minúsculas para el análisis con situación inicial y las mayúsculas para el análisis sin la situación inicial.

P: available phosphorus; NT: total nitrogen; pH in water; EC: electrical conductivity; MOT: total organic matter; CIC: cation exchange capacity; Ca, Mg, Na and K: exchangeable cations of calcium and magnesium, sodium and potassium, respectively; PSI: percent exchangeable sodium; Resp.: average edaphic respiration, FDA: fluorescein diacetate; Dap: bulk density of the soil; Texture. DAC: collar diameter; AT: total height. Means with a common letter are not significantly different ($P \geq 0.05$). Lowercase letters for the analysis with initial situation and uppercase letters for the analysis without the initial situation.

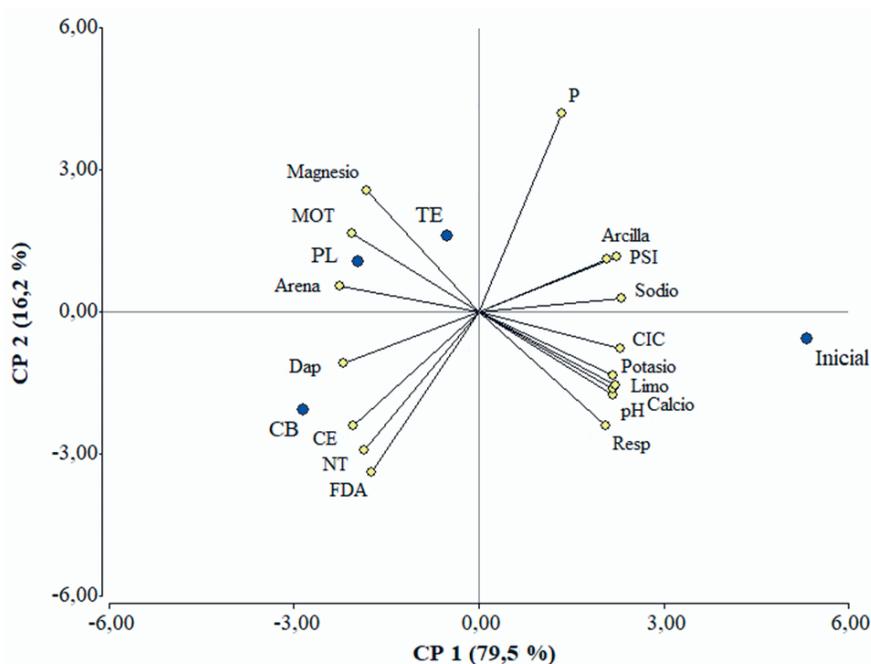


Figura 1. Gráfico biplot correspondiente al análisis de componentes principales para una profundidad de 0 a 25 cm del sitio previo (Inicial) y postplantación del ensayo de inoculación con hongos micorrícicos arbusculares (HMA): inóculo CB, inóculo PL y testigo sin inocular (TE) con las variables de suelo medidas.

Biplot graph corresponding to the principal component analysis for a depth of 0 to 25 cm from the pre-planting (Initial) and post-planting site of the arbuscular mycorrhizal fungi (AMF) inoculation trial: inoculum CB, inoculum PL and uninoculated control (TE) with the soil variables measured.

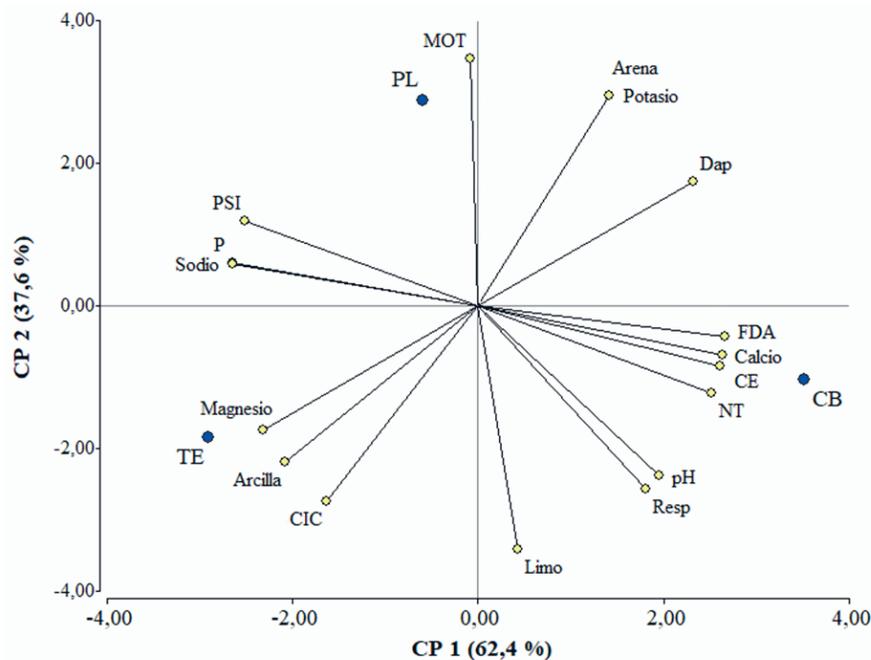


Figura 2. Gráfico biplot correspondiente al análisis de componentes principales para una profundidad de 0 a 25 cm del ensayo de inoculación con hongos micorrícicos arbusculares (HMA): inóculo CB, inóculo PL y testigo sin inocular (TE) con las variables de suelo medidas.

Biplot graph corresponding to the principal component analysis for a depth of 0 to 25 cm of the arbuscular mycorrhizal fungi (AMF) inoculation trial: inoculum CB, inoculum PL and uninoculated control (TE) with the soil variables measured.

(figura 2). El suelo del tratamiento PL estuvo asociado a un mayor contenido de materia orgánica total y menor contenido de limo, mientras que el suelo del testigo sin inocular presentó los mayores valores de magnesio, porcentaje de arcilla y CIC y menores valores en densidad aparente, potasio y contenido de arena (figura 2).

Los coeficientes de correlación para el diámetro al cuello (DAC), altura total (AT) y las variables edáficas evaluadas se presentan en el cuadro 2. El DAC se encontró fuerte y positivamente correlacionado con el sodio intercambiable (Na⁺), PSI, densidad aparente (Dap) y fósforo disponible (P) (cuadro 2 y figura 3). La altura total estuvo fuertemente correlacionada con la densidad aparente, PSI y el sodio intercambiable y en menor medida con el fósforo disponible y pH. Además, ambos parámetros de crecimiento se correlacionaron negativamente con el nitrógeno total (NT) y materia orgánica total del suelo (MOT) (cuadro 2).

El nitrógeno total se correlacionó negativamente con el pH y el PSI. La materia orgánica total tuvo una correlación significativa y negativa con el pH, PSI y la densidad apa-

rente, mientras que presentó una correlación positiva con el nitrógeno total (cuadro 2 y figura 3).

DISCUSIÓN

Las plantas inoculadas con HMA muestran una mayor sobrevivencia que las no inoculadas a los 12 meses y a los seis años de crecimiento en campo. Resultados similares fueron encontrados por Kalinhoff (2012) en *Piscidia carthagenensis* Jacq., que resalta la importancia del uso de inóculos de HMA para facilitar el establecimiento de las plantas en suelos degradados. No obstante, las respuestas iniciales de crecimiento no necesariamente son un indicador confiable de un buen desempeño a largo plazo de la inoculación (Kalinhoff 2012).

Los valores de fósforo disponible encontrados concuerdan con lo planteado por Sainz Rozas *et al.* (2011), quienes señalan que los suelos de esta región presentan niveles de fósforo bajos (< 10 ppm). El contenido de fósforo en el suelo desempeña un papel regulador en los procesos de crecimiento de la planta y la eficacia de la simbiosis, así

Cuadro 2. Correlación de Pearson entre los parámetros de crecimiento y las variables fisicoquímicas y biológicas medidas en el ensayo de inoculación.

Pearson correlation between growth parameters and physicochemical and biological variables measured in the inoculation trial.

	DAC	AT	P	NT	pH	CE	MOT	CIC	Na ⁺	Ca ⁺⁺	Mg ⁺⁺	K ⁺	PSI	Resp	FDA	Dap	Arc	Limo	Are	
DAC	1																			
AT	0,98*	1																		
P	0,74*	0,70*	1																	
NT	-0,62*	-0,60*	-0,68*	1																
pH	0,64*	0,70*	0,55	-0,83*	1															
CE	0,52	0,61*	0,27	-0,60*	0,92*	1														
MOT	-0,63*	-0,61*	-0,43	0,82*	-0,73*	-0,59*	1													
CIC	0,02	-0,01	-0,04	0,60*	-0,46	-0,36	0,56	1												
Na ⁺	0,86*	0,78*	0,76*	-0,51	0,34	0,16	-0,53	0,14	1											
Ca ⁺⁺	0,08	0,19	0,16	-0,11	0,47	0,46	0,16	0,07	-0,20	1										
Mg ⁺⁺	0,38	0,33	0,29	0,24	-0,16	-0,09	0,15	0,79*	0,51	-0,21	1									
K ⁺	0,24	0,21	0,08	0,34	-0,19	-0,04	0,23	0,68*	0,37	-0,06	0,80*	1								
PSI	0,85*	0,77*	0,79*	-0,65*	0,45	0,23	-0,64*	-0,09	0,97*	-0,18	0,33	0,22	1							
Resp	-0,13	-0,01	-0,31	-0,23	0,46	0,53	-0,33	-0,57*	-0,44	0,22	-0,53	-0,52*	-0,34	1						
FDA	-0,37	-0,41	-0,31	0,43	-0,45	-0,44	0,15	0,39	-0,21	-0,17	0,14	0,30	-0,31	-0,18	1					
Dap	0,87*	0,85*	0,56	-0,61*	0,68*	0,61*	-0,66*	-0,04	0,72*	0,24	0,19	0,30	0,72*	-0,05	-0,12	1				
Arc	0,61*	0,51	0,31	-0,27	0,06	0,04	-0,42	0,33	0,70*	-0,48	0,59*	0,38	0,59*	-0,35	0,09	0,55	1			
Limo	-0,49	-0,51	-0,54	0,94*	-0,83*	-0,66*	0,75*	0,77*	-0,30	-0,14	0,42	0,44	-0,48	-0,42	0,53	-0,49	-0,05	1		
Are	-0,04	0,04	0,20	-0,53	0,59*	0,48	-0,29	-0,82*	-0,25	0,43	-0,72*	-0,60*	-0,04	0,56*	-0,46	-0,01	-0,65*	-0,73*	1	

Variables con correlaciones significativas: * = $P \leq 0,05$.

Variables with significant correlations: * = $P \leq 0,05$.

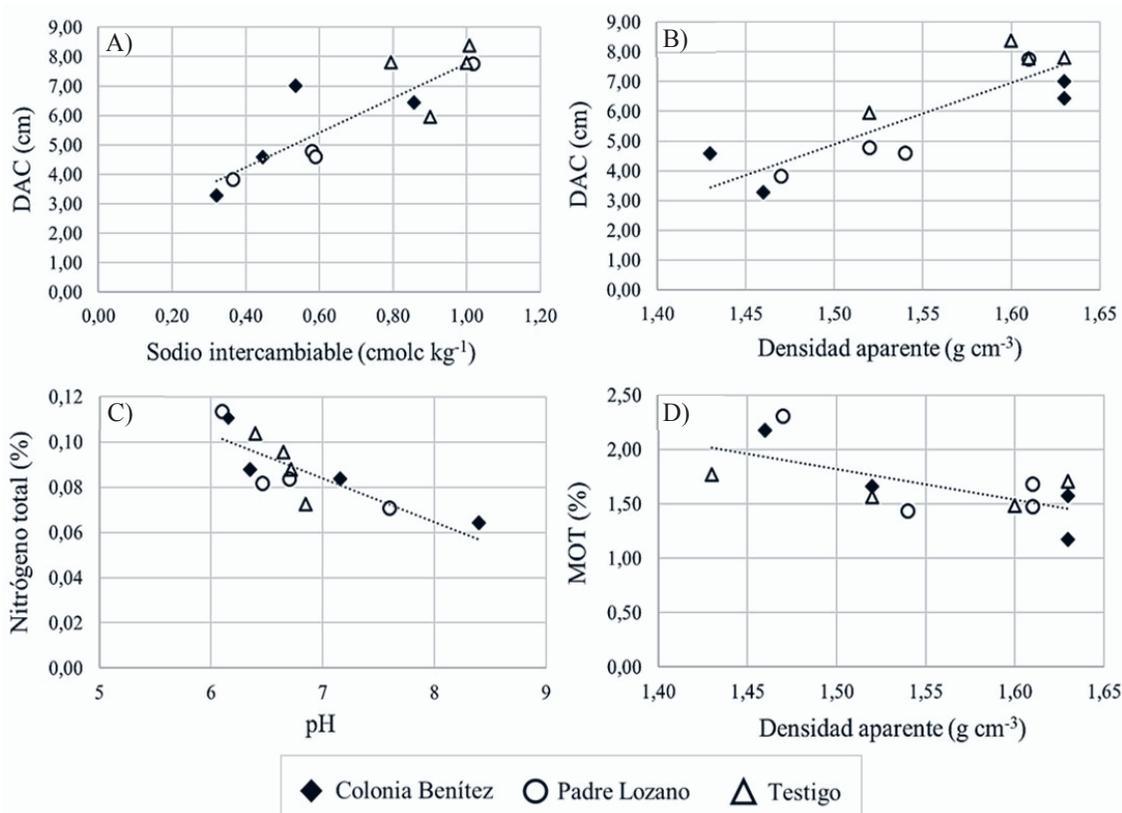


Figura 3. Correlaciones entre: A) diámetro al cuello y sodio intercambiable; B) diámetro al cuello y densidad aparente del suelo; C) nitrógeno total y pH; D) materia orgánica total y densidad aparente del suelo en los distintos tratamientos.

Correlations between: A) collar diameter and exchangeable sodium; B) collar diameter and bulk density of the soil; C) total nitrogen and pH; D) total organic matter and bulk density of the soil in the different treatments.

como la regulación del nivel de colonización de la raíz por las hifas de HMA (Jamiólkowska *et al.* 2018). De acuerdo con Qiu *et al.* (2019) y Ci *et al.* (2023), los HMA aumentan el contenido de fósforo disponible del suelo. No obstante, en nuestra investigación los mayores valores en el suelo se encontraron en el testigo sin inocular y en la situación inicial.

Los HMA, en simbiosis con las raíces de las plantas, facilitan la captación de nutrientes y la acumulación de biomasa de muchos cultivos en suelos con bajo contenido de fósforo (Kalinhoff 2012, Saparrat *et al.* 2020). Sin embargo, esto no fue observado en nuestro estudio, especialmente en las parcelas que estuvieron inoculadas con CB, donde se obtuvieron los menores crecimientos y el menor contenido de fósforo en suelo, en comparación al testigo sin inocular. Este efecto depresor del crecimiento también fue observado por Salto *et al.* (2020) en plantines de *N. alba* inoculados con los HMA procedentes de CB durante la producción de plantas en vivero. En *Artemisia ordosica* Krasch., Wang *et al.* (2023) mencionan que la inoculación con *Funneliformis mosseae* causa una depresión en el crecimiento de la altura y la biomasa de las plantas, especialmente en condiciones

de baja disponibilidad de agua y nutrientes en el suelo, y que esta reducción de crecimiento aumenta a medida que las plantas crecen. La reducción del crecimiento en plantas hospedantes inducidas por HMA se presenta en entornos donde los costos de la asociación superan los beneficios para las plantas, y el resultado de esta asociación puede variar de mutualismo a antagonismo según las condiciones ambientales (Jin *et al.* 2017, Wang *et al.* 2023). Entre las condiciones ambientales se citan la variabilidad genética y el origen geográfico de los HMA, especies de hongos poco eficaces, los nutrientes del suelo, pH, las prácticas de manejo empleadas, o puede darse una competencia o reemplazo con HMA propios del lugar donde se han establecido las plantas (Jin *et al.* 2017, Faggioli y Symanczik 2018, Jamiólkowska *et al.* 2018, Sagadin *et al.* 2023).

De acuerdo con Siqueira *et al.* (1998) la inoculación con HMA en plantas de café (*Coffea* sp.) produce mayores crecimientos en diámetro y altura hasta 19 meses después del trasplante a campo y, en los años posteriores, los efectos disminuyen debido a que especies locales de HMA colonizan las raíces de las plantas inoculadas y no inoculadas. En *Piscidia carthagenensis* se indica que el

efecto de la inoculación se mantiene hasta once meses de crecimiento en campo (Kalinhoff 2012).

Los valores de pH del suelo encontrados fueron levemente inferiores a lo reportado por Lupi *et al.* (2021) para esta zona de estudio. El pH tiene influencia en la disponibilidad de los nutrientes para las plantas, en la descomposición de la materia orgánica y en el comportamiento de los microorganismos del suelo (Jamiólkowska *et al.* 2018). La mayoría de los microorganismos prosperan en pH neutros (6-7); sin embargo, el pH influye también sobre el establecimiento y desempeño de la simbiosis con HMA, por lo que las respuestas pueden ser variables de acuerdo con la tolerancia de cada especie a las condiciones de acidez o alcalinidad del suelo (Sagadin *et al.* 2018). Según Jamiólkowska *et al.* (2018), el pH del suelo que oscila entre 4,5 y 7,5 no tiene ningún impacto en la actividad simbiótica de los HMA en las raíces de las plantas y su efecto solo se limita a las etapas de esporulación y germinación de las esporas.

Por otra parte, Macedo *et al.* (2008) mencionan los efectos benéficos que genera la incorporación de especies forestales fijadoras de nitrógeno y la inoculación con HMA con relación a la recuperación de los niveles de carbono y nitrógeno en suelos degradados. En nuestro estudio se observó que, aunque hubo un leve incremento en el rango de valores de materia orgánica y nitrógeno total, sus niveles fueron bajos para los distintos tratamientos. Los valores de materia orgánica fueron inferiores a lo reportado por Lupi *et al.* (2021) para un suelo "Halacuept" típico bajo vegetación nativa en esta región, y sugieren que la alcalinidad condiciona la productividad primaria del bosque, la distribución vertical de las raíces de las plantas y genera cambios en la cantidad de carbono orgánico del suelo. También, Morazzo *et al.* (2021) mencionan que la presencia de especies forestales produce cambios en las propiedades físicas y químicas del suelo, como el pH, la CIC, la MO, porosidad, capacidad de retención de agua y el estado de los nutrientes (reservas de N y P). Asimismo, Ci *et al.* (2023) señalan que, en un suelo salino-alcalino, la aplicación de HMA aumenta el contenido de materia orgánica del suelo, sin embargo, en un suelo sin restricciones, los HMA no producen ningún cambio significativo. Además, Qiu *et al.* (2019) indican un aumento significativo del carbono orgánico y nitrógeno total en los suelos recuperados con *Amorpha fruticosa* L. e inoculados con HMA en un periodo de recuperación de siete años.

Los valores de CE registrados fueron bajos y no son limitantes para su uso productivo (Alconada Magliano 2020). En ese sentido, Salto *et al.* (2018) sugieren que, en ausencia de inoculación, *N. alba* es tolerante a la salinidad ($CE \leq 44 \text{ dS m}^{-1}$), no obstante, las plantas inoculadas con CB y PL presentan una mayor tolerancia en suelos con conductividad eléctrica de hasta 50 dS m^{-1} .

Los valores de densidad aparente fueron levemente superiores a lo reportado por Lupi *et al.* (2021) y estuvieron dentro del rango de referencia para este tipo de

textura (Porta *et al.* 1999). Además, presentó una fuerte correlación positiva con las variables de crecimiento de *N. alba*, con el sodio intercambiable y el PSI. Esta propiedad resulta un buen indicador ya que está vinculada a otras variables, como la compactación, porosidad y capacidad de infiltración, que son fundamentales para la circulación de agua y aire en el suelo, el establecimiento de las plantas y el manejo del suelo (Sandler 2019).

Los valores de CIC fueron de bajos a moderados y dentro del rango indicado para este tipo de textura (Alconada Magliano 2017). La CIC del suelo influye en la estructura y estabilidad del suelo y, esto último también está influenciado, al menos en parte, por la abundancia de HMA (Casazza *et al.* 2017). Contrariamente a lo observado por Qiu *et al.* (2019), el contenido de potasio disponible disminuyó con respecto a la situación inicial, sin embargo, en los tratamientos inoculados el contenido de potasio fue levemente superior al tratamiento testigo.

Los niveles de sodio detectados en nuestro estudio fueron de moderados a elevados (Alconada Magliano 2020). El sodio actúa como dispersante, lo que afecta negativamente la estabilidad estructural del suelo. En consecuencia, los poros se vuelven inestables, disminuye la permeabilidad y el drenaje, lo que puede afectar el desarrollo radicular, pero en general se considera que los problemas estructurales de suelo comienzan con PSI superiores al rango 5-8 (Alconada Magliano 2017, Alconada Magliano 2020).

Los efectos adversos de las sales sobre el crecimiento vegetal dependen del grado de tolerancia de la especie y están asociadas a la disminución del potencial hídrico del suelo, la toxicidad de los iones y/o el desbalance nutricional (Meloni 2014). Se ha reportado que la micorrización disminuye la deficiencia nutritiva provocada por antagonismos iónicos, lo que permite un mayor crecimiento de las plantas micorrizadas (Ci *et al.* 2023). No obstante, Meloni (2014) plantea que *N. alba* tiene un eficiente mecanismo adaptativo que le permite absorber y almacenar sodio en las raíces y utilizarlo para el ajuste osmótico, lo que posibilita el mantenimiento de la turgencia celular y, por ende, el crecimiento. Sagadin *et al.* (2018) indican que el sodio influye en la micorrización, porque afecta el crecimiento y viabilidad de las hifas, y en particular, en el inóculo procedente de CB, la presencia de sodio en el suelo afecta su capacidad para colonizar las raíces. También, Casazza *et al.* (2017) sugieren que los HMA están afectados por los parámetros de suelo relacionados con la presencia de sales (CE, Mg^{++} y Na^+). Teniendo en cuenta estas consideraciones, el mayor crecimiento en las plantas sin inocular de nuestro estudio probablemente se debe a la capacidad de respuesta que posee *N. alba* frente a la presencia de sales.

La respiración edáfica fue baja y presentó una correlación moderada y positiva con la conductividad eléctrica y, moderada y negativa con CIC, Mg^{++} y K^+ . Las bajas tasas de respiración edáfica en general indican que existe poca materia orgánica en el suelo o que la actividad microbiana del suelo es particularmente pobre, ya que existen

otras propiedades como temperatura, humedad, aireación y textura, que limitan la actividad biológica y la descomposición de la materia orgánica y, por lo tanto, la mineralización y disponibilidad de los nutrientes para las plantas y organismos del suelo (Martínez y Ortega 2022). En ese sentido, Koritschoner *et al.* (2019) plantean que el contenido de arena y arcilla, los cationes intercambiables, el fósforo extractable, la CE y la materia orgánica del suelo son los principales parámetros que explican la variabilidad de la respiración microbiana.

La hidrólisis del diacetato de fluoresceína (FDA) permite inferir la actividad biológica del suelo, siendo un parámetro sensible a las prácticas de manejo y degradado por numerosas enzimas (proteasas, lipasas y esterases) (Di Barbaro *et al.* 2020). Sin embargo, Silberman (2016) indica que la actividad biológica del suelo tiene alta dependencia ambiental (precipitaciones) y baja sensibilidad al cambio del uso del suelo. La mayor actividad biológica del suelo se encontró en los tratamientos inoculados con HMA y son similares a los reportados por Sánchez *et al.* (2011) para diferentes suelos de la provincia de Entre Ríos.

CONCLUSIONES

La incorporación de los árboles de *Neltuma alba*, independientemente de la inoculación, presenta efectos positivos en las propiedades edáficas evaluadas al cabo de seis años.

Las muestras de suelos de las plantas con el inóculo de Colonia Benítez (CB) se asocian a mayores valores de actividad biológica total, conductividad eléctrica, pH, calcio intercambiable y respiración del suelo y a menores valores de PSI, sodio intercambiable y fósforo disponible. Las muestras de suelo correspondiente a plantas con el inóculo de Padre Lozano (PL) se asocian a un mayor contenido de materia orgánica.

La inoculación de *Neltuma alba* con HMA aislados de la Región Chaqueña Argentina benefician el establecimiento inicial de las plantas. Sin embargo, no promueve mejoras en el crecimiento con respecto a las plantas sin inocular bajo las condiciones ambientales evaluadas. El menor crecimiento en diámetro y altura total se presenta en las plantas de *Neltuma alba* inoculadas con HMA de Colonia Benítez (CB).

CONTRIBUCIÓN DE AUTORES

CSS y LH estuvieron a cargo de la conceptualización, diseño experimental, metodología, recolección de muestras, análisis, discusión e interpretación de resultados y redacción del manuscrito. MBS contribuyó en la provisión de los inóculos de HMA, la conceptualización, el acondicionamiento y mediciones en laboratorio, redacción del manuscrito. Todos los autores prepararon el manuscrito.

FINANCIAMIENTO

Este trabajo fue financiado por el Proyecto Nacional 2019-PE-E1-I016-001 “Desarrollo de una silvicultura sostenible de bosques implantados de alta productividad” del Programa Nacional Forestal del Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA).

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a la estancia “El Potrero de San Lorenzo” del Grupo Bermejo por su colaboración para el desarrollo del ensayo.

REFERENCIAS

- Adam G, H Duncan. 2001. Development of a sensitive and rapid method for the measurement of total microbial activity using fluorescein diacetate (FDA) in a range of soils. *Soil Biology & Biochemistry* 33: 943-951. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0038-0717\(00\)00244-3](https://doi.org/10.1016/S0038-0717(00)00244-3)
- Alconada Magliano MM. 2017. Interpretación de perfiles edáficos como parte de un paisaje a fin de definir manejos sustentables. Consultado 17 may. 2023. Disponible en https://aulavirtual.agro.unlp.edu.ar/pluginfile.php/35474/mod_resource/content/1/GUIA%20DE%20%20%20INTERPRETACION%20DE%20PERFILES.pdf
- Alconada Magliano MM. 2020. Capítulo 3: Suelos salinos y sódicos. In Alconada Magliano MM, JW Lanfranaco eds. Suelo en el paisaje. Parte II. Condiciones de Abastecimiento. 1ª ed. La Plata, Buenos Aires, Argentina. p. 74-143.
- Bedendo D, G Schulz, G Pausich, F Tentor. 2014. Cartas de Suelos de Entre Ríos. Consultado 12 abr. 2023. Disponible en: <https://geo.inta.gob.ar/>
- Blake GR, KH Hartge. 1986. Bulk Density. In: Klute A ed. Methods of soil analysis. Part 1. Physical and Mineralogical Methods. Madison, Wisconsin, USA. p. 363-375.
- Casazza G, E Lumini, E Ercole, F Dovana, M Guerrina, A Arnulfo, L Minuto, A Fusconi, M Mucciarelli. 2017. The abundance and diversity of arbuscular mycorrhizal fungi are linked to the soil chemistry of screes and to slope in the Alpine paleo-endemic *Berardia subacaulis*. *PLoS ONE* 12(2): e0171866. DOI: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0171866>
- Ci D, F Qin, Z Tang, G Zhang, J Zhang, T Si, J Yang, Y Xu, T Yu, M Xu, K He. 2023. Arbuscular mycorrhizal fungi restored the saline-alkali soil and promoted the growth of Peanut roots. *Plants* 12(19): 3426. DOI: <https://doi.org/10.3390/plants12193426>
- Di Barbaro G, H Andrada, E Del Valle, C Brandán de Weht. 2020. Actividad biológica de suelos cultivados con topinambur inoculados con *Azospirillum brasilense* y hongos micorrízicos. *Revista FAVE-Ciencias Agrarias* 19(1): 33-41. DOI: <https://doi.org/10.14409/fa.v19i1.9451>
- Di Rienzo JA, F Casanoves, MG Balzarini, L González, M Tablada, CW Robledo. 2020. InfoStat. Centro de Transferencia InfoStat, FCA, Universidad Nacional de Córdoba, Argentina. Consultado 6 abr. 2023. Disponible en: <http://www.infostat.com.ar>
- Engler P, M Rodríguez, R Cancio, M Handloser, LM Vera. 2008. Zonas agroecológicas homogéneas de Entre Ríos. Des-

- cripción ambiental, socioeconómica y productiva. Estudios socioeconómicos de la sustentabilidad de los sistemas de producción y recursos naturales n° 6. Buenos Aires, Argentina, 150 p.
- Faggioli VS, S Symanczik. 2018. Capítulo 3: Servicios ecosistémicos provistos por hongos formadores de micorrizas y efecto de las prácticas de manejo en cultivos de base agroecológica. In Ullé J, BM Diaz eds. El suelo como reactor de los procesos de regulación funcional de los agroecosistemas. Buenos Aires, Argentina. p. 87-106.
- Jamiolkowska A, A Księżniak, A Gałazka, B Hetman, M Kopacki, B Skwaryło-Bednarz. 2018. Impact of abiotic factor on development of the community of arbuscular mycorrhizal fungi in the soil: a review. *International Agrophysics* 32: 133-140. DOI: <https://doi.org/10.1515/intag-2016-0090>
- Jin L, Q Wang, Q Wang, X Wang, AC Gange. 2017. Mycorrhizal-induced growth depression in plants *Symbiosis* 72: 81-88. DOI: <https://doi.org/10.1007/s13199-016-0444-5>.
- Kalinhoff CG. 2012. Influencia de las micorrizas arbusculares sobre el crecimiento y respuesta a la sequía de *Piscidia carthagensis* Jacq.: implicancias en la recuperación de un bosque seco de la península de Macanao, Isla de Margarita. Tesis Doctoral. Universidad Central de Venezuela, Caracas, Venezuela. 200 p.
- Koritschoner J, FG Kurina, EA Rampoldi, S Hang, S. 2019. Caracterización regional de la respiración microbiana de suelo. Congreso Internacional de Cambio Climático. Instituto Superior de Estudios Ambientales (ISEA). Córdoba, Argentina. 7 p. Consultado 6 abr. 2023. Disponible en <https://eidipa.congresos.unc.edu.ar/wp-content/blogs.dir/45/files/sites/45/2021/04/Trabajo-23-CCCKoritschoner.pdf>
- Lupi A, HS Steinbach, E Ciarlo, R Romaniuk, VRN Cosentino, H Rimski-Korsakov, CR Álvarez. 2021. Organic carbon stored in soils under different land uses and soil textures in southeast Argentinean Mesopotamia. *Geoderma Regional* 27 e00435. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.geodrs.2021.e00435>
- Macedo MO, AS Resende, PC Garcia, RM Boddey, CP Jantalia, S Urquiaga, EFC Campello, AA Franco. 2008. Change in soil C and N stocks and nutrients dynamics 13 years after recovery of degraded land using leguminous nitrogen-fixing trees. *Forest Ecology and Management* 255: 1516-1524. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2007.11.007>
- Martínez MM, R Ortega. 2022. La respiración es un indicador sensible e integrador de la calidad de suelos. Que factores inciden y como se mide. Consultado 30 de may. 2023. Disponible en <https://mundoagro.cl/la-respiracion-es-un-indicador-sensible-e-integrador-de-la-calidad-de-suelos-que-factores-inciden-y-como-se-mide/>
- Meloni DA. 2014. Respuestas fisiológicas de plántulas de *Prosopis alba* G, sometidas a estrés salino. Tesis de doctorado. Santiago del Estero, Argentina. Facultad de Ciencias Forestales, Universidad Nacional de Santiago del Estero. 105 p.
- Morazzo G, DR Riestra, E Leizica, L Alvarez, E Noellemyer. 2021. Afforestation with different tree species causes a divergent evolution of soil profiles and properties. *Frontiers in Forest and Global Change* 4:685827. DOI: <https://doi.org/10.3389/ffgc.2021.685827>
- Ontivero RE, L Risio Allione, F Castellarini, MA Lugo. 2023. Composición de comunidades de hongos micorrícicos arbusculares en diferentes usos de suelo en el Caldenal, Argentina. *Ecología Austral* 33: 95-107. DOI: <https://doi.org/10.25260/EA.23.33.1.0.1955>
- Parihar M, A Rakshit, HB Singh, K Rana. 2019. Diversity of arbuscular mycorrhizal fungi in alkaline soils of hot sub humid eco-region of Middle Gangetic Plains of India. *Acta Agriculturae Scandinavica* 69(5): 386-397. DOI: <https://doi.org/10.1080/09064710.2019.1582692>
- Porta J, M López-Acevedo, C Roquero. 1999. Edafología para la agricultura y el medio ambiente. Ed. Mundi-Prensa. Madrid. 807 p.
- Qiu L, Y Bi, B Jiang, Z Wang, Y Zhang, Y Zhakypbek. 2019. Arbuscular mycorrhizal fungi ameliorate the chemical properties and enzyme activities of rhizosphere soil in reclaimed mining subsidence in northwestern China. *Journal of Arid Land* 11(1): 135-147. DOI: <https://doi.org/10.1007/s40333-018-0019-9>
- Sagadin MB, CS Salto, MN Cabello, CM Luna. 2023. Respuesta micorrícica a la aplicación de inóculos de hongos micorrícicos arbusculares nativos en simbiosis con *Neltuma alba*. *Quebracho* 31 (1,2): 79-92.
- Sagadin MB, MI Monteoliva, CM Luna, MN Cabello. 2018. Diversidad e infectividad de hongos micorrícicos arbusculares nativos provenientes de algarrobales del Parque Chaqueño argentino con características edafoclimáticas contrastantes. *Agriscientia* 35(2):19-23. DOI: <https://doi.org/10.31047/1668.298x.v35.n2.21001>
- Sainz Rozas H, HE Echeverría, H Angelini. 2011. Fósforo extractable en suelos agrícolas de las regiones pampeana y extrapampeana de Argentina. *Informaciones Agronómicas* N° 4: 14-18. IPNI. 4p. Consultado 30 de may. 2023. Disponible en [http://www.ipni.net/publication/ia-lacs.nsf/0/6D8FCB6FAE2CE012852579820073471F/\\$FILE/14.pdf](http://www.ipni.net/publication/ia-lacs.nsf/0/6D8FCB6FAE2CE012852579820073471F/$FILE/14.pdf)
- Salto CS, M Sagadin, C Luna, AM Lupi, S Kees, M Zarate. 2018. Empleo de hongos micorrícicos arbusculares nativos como estrategia para la mitigación del estrés salino en *Prosopis alba*, XXXII Jornadas Forestales de Entre Ríos. Consultado 22 nov. 2022. Disponible en <https://www.jornadasforestales.com.ar/jornadas/2018/Micorrizas-Salto-et-al.pdf>
- Salto CS, MB Sagadin, CM Luna, GPJ Oberschelp, L Harrand, MN Cabello. 2020. Interaction between mineral fertilization and arbuscular mycorrhizal fungi improve nursery growth and drought tolerance of *Prosopis alba* seedlings. *Agroforestry Systems* 94: 103-111. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10457-019-00371-x>
- Sánchez CI, CI Musante, MC Benintende, SM Benintende. 2011. Actividades enzimáticas β -glucosidasa e hidrólisis de diacetato de fluoresceína en suelos de Entre Ríos. Efecto del secado de muestra sobre su determinación. *Revista científica agropecuaria* 15(1-2): 7-16.
- Sandler RV. 2019. Indicadores de sustentabilidad del suelo basados en la estructura y funcionamiento de la fauna edáfica. Tesis de doctorado. Universidad Nacional de General Sarmiento, Buenos Aires, Argentina. 232 p.
- Santos DJ, M Wilson, MM Ostinelli. 2017. Metodología de muestreo de suelo y ensayos a campo. Protocolos básicos comunes. 2da. Edición. Entre Ríos, Argentina. Ediciones INTA. 157 p.
- Saparrat CN, MF Ruscitti, MC Arango. 2020. Micorrizas arbusculares: biología y aplicaciones en el sector agro-forestal. 1ª ed. La Plata, Argentina. 134 p.
- Schinner F, R Öhlinger, E Kandeler, R Margesin. 1996. Methods in soil biology, Springer Berlin, Heidelberg, 1st edition. 93 p. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-3-642-60966-4>

- Silberman JE. 2016. Diversidad microbiana y materia orgánica del suelo en sistemas silvopastoriles de la Región Chaqueña. Tesis de doctorado. Universidad Nacional de La Plata, Facultad de Ciencias Agrarias y Forestales. La Plata, Buenos Aires. 198 p.
- Siqueira JO, OJ Saggin-Junior, WW Flores-Aylas, PTG Guimarães. 1998. Arbuscular mycorrhizal inoculation and superphosphate application influence plant development and yield of coffee in Brazil. *Mycorrhiza* 7: 293-300. DOI: <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-95162013005000006>
- Wang M, Z Wang, M Guo, L Qu, A Biere. 2023. Effects of arbuscular mycorrhizal fungi on plant growth and herbivore infestation depend on availability of soil water and nutrients. *Frontiers in Plant Science Section Plant Symbiotic Interactions* 14. DOI: <https://doi.org/10.3389/fpls.2023.1101932>

Recibido: 26/12/2023
Aceptado: 05/05/2024