



Fundación
Miguel Lillo
Tucumán
Argentina

doi

Micorrizas y otros hongos endófitos radiculares en siete especies vegetales nativas de los Valles Calchaquíes (Tucumán, Argentina)

Mycorrhizae and other root endophytic fungi in seven native plant species from the Calchaquíes Valleys (Tucumán, Argentina)

Álvarez, María de los A.^{1*}; María I. Mercado¹; Patricia L. Albornoz^{1,2}

¹ Instituto de Morfología Vegetal, Fundación Miguel Lillo. Miguel Lillo 251. (T4000JFE) San Miguel de Tucumán. Tucumán. Argentina.

² Cátedra de Anatomía Vegetal, Facultad de Ciencias Naturales e IML, UNT. Miguel Lillo 205. (T4000JFE) San Miguel de Tucumán. Tucumán. Argentina.

* Autor correspondiente: <malvarez@lillo.org.ar>

Resumen

Las interacciones simbióticas entre plantas y hongos son fundamentales para la adaptación de especies vegetales en ambientes áridos. Este estudio documentó la presencia de hongos endófitos radiculares en siete especies nativas de los Valles Calchaquíes (Tucumán, Argentina), región caracterizada por suelos alcalinos, baja disponibilidad de nutrientes y estrés hídrico. Se analizaron raíces de *Atriplex cordobensis*, *Flourensia fiebrigii*, *Larrea cuneifolia*, *Lippia turbinata*, *Portulaca grandiflora*, *Zinnia peruviana* y *Zuccagnia punctata* mediante técnicas de tinción convencionales. Los resultados revelaron que todas las especies establecieron asociaciones micorrícicas y en algunos casos con hongos endófitos septados oscuros (HESO) o desconocidos (HESD). Los análisis edáficos mostraron suelos alcalinos (pH 7,16–9,80), pobres en nitrógeno (0,01–0,08%) y fósforo (5,8–15,6 ppm). Este estudio confirmó la presencia de asociaciones micorrícicas y de otros tipos de hongos endófitos en las raíces de siete

► Ref. bibliográfica: Álvarez, M. de los A.; Mercado, M. I.; Albornoz, P. L. 2025. Micorrizas y otros hongos endófitos radiculares en siete especies vegetales nativas de los Valles Calchaquíes (Tucumán, Argentina). *Lilloa* 62 – Suplemento N° 2: "Interacciones biológicas en un mundo cambiante": 277-293. doi: <https://doi.org/10.30550/j.lil/2156>

► Recibido: 31 de marzo 2025 – Aceptado: 18 de junio 2025 – Publicado: 27 de junio 2025.

► URL de la revista: <http://lilloa.lillo.org.ar>



OPEN ACCESS

► Esta obra está bajo una Licencia Creative Commons Atribución – No Comercial – Sin Obra Derivada 4.0 Internacional.

especies nativas de los Valles Calchaquíes, una región caracterizada por suelos alcalinos, con bajos niveles de nitrógeno y fósforo disponible.

Palabras clave: Endófitos; micorrizas; plantas xerófitas; septados oscuros.

Abstract

Symbiotic interactions between plants and fungi are crucial for the adaptation of plant species in arid environments. This study documented the presence of root endophytic fungi in seven native species from the Calchaquíes Valleys (Tucumán, Argentina), a region characterized by alkaline soils, low nutrient availability, and water stress. Roots of *Atriplex cordobensis*, *Flourensia fiebrigii*, *Larrea cuneifolia*, *Lippia turbinata*, *Portulaca grandiflora*, *Zinnia peruviana*, and *Zuccagnia punctata* were analyzed using conventional staining techniques. The results revealed that all species established mycorrhizal associations, and in some cases, also associations with dark septate endophytes (DSE) or unknown septate endophytes (USD). Edaphic analyses showed alkaline soils (pH 7.16–9.80) with low nitrogen (0.01–0.08%) and phosphorus (5.8–15.6 ppm). This study confirmed the presence of mycorrhizal associations and other types of endophytic fungi in the roots of seven native species from the Calchaquíes Valleys, a region characterized by alkaline soils with low levels of available nitrogen and phosphorus.

Keywords: Dark septate; endophytes; mycorrhizae; xerophytic plants.

INTRODUCCIÓN

Las raíces de las plantas albergan comunidades complejas y heterogéneas, en las cuales los elementos fúngicos desempeñan funciones esenciales (Glynou *et al.*, 2016; Jumpponen *et al.*, 2017; Vandenkoornhuyse *et al.*, 2002). Las micorrizas constituyen asociaciones simbióticas mutualistas entre las raíces de plantas vasculares y los hongos. Esta asociación, le proporciona numerosos beneficios a la planta, incluyendo mayor tolerancia frente a factores de estrés bióticos y abióticos (Galindo-Flores *et al.*, 2015; Hosseini Moghaddam *et al.*, 2021). A su vez, el hongo adquiere fotosintatos producidos por la planta y un entorno estable que facilita su reproducción y supervivencia (Smith y Smith, 2011). Tradicionalmente las micorrizas se clasifican en dos grandes grupos: las micorrizas arbusculares (MA) y las ectomicorrizas (EcM) (Galindo-Flores *et al.*, 2015; Huey *et al.*, 2020).

Por su parte, las MA se clasifican según su morfología en los tipos *Arum* y *Paris*. El tipo *Arum* se caracteriza por presentar hifas inter e intracelulares que forman arbusculos; mientras que, el tipo *Paris* exhibe hifas intracelulares que forman circunvoluciones o ‘coils’, pudiendo o no desarrollar arbusculos (Nagaraj *et al.*, 2015).

Además, en las raíces pueden encontrarse otros hongos endófitos no micorrícicos, como los hongos endófitos septados oscuros (HESO), grupo polifilético que posee hifas septadas, melanizadas intercelulares y esclerocios intracelulares (Fracchia *et al.*, 2011; García *et al.*, 2012; Jumpponen *et al.*, 2017; Miranda *et al.*, 2019). Por otra parte, diversos autores han descripto la existencia de otros hongos endófitos denominados septados desconocidos (HESD), los cuales presentan un patrón de colonización similar a los HESO, aunque carecen de estructuras melanizadas (Lizarraga *et al.*, 2018; Alborno *et al.*, 2022; Romagnoli *et al.*, 2024).

En la actualidad, se observa un creciente interés por los HESO, ya que pueden establecer asociaciones mutualistas similares a las micorrizas; desempeñando roles multifuncionales en la planta huésped, mejorando la absorción de nutrientes, aumentando la tolerancia al estrés biótico y abiótico, y manteniendo las relaciones hídricas esenciales para la supervivencia de la planta (García *et al.*, 2012; Lugo *et al.*, 2018; Miranda *et al.*, 2019; Zuo *et al.*, 2020).

Los hongos endófitos micorrícicos y HESO son relevantes para la supervivencia de plantas xerófitas que habitan ambientes áridos y semiáridos (con elevada irradiación solar, con déficit hídrico y de nutrientes) (Sun *et al.*, 2012; Lugo *et al.*, 2015.; Zhou *et al.*, 2015; Miranda *et al.*, 2019; Zuo *et al.*, 2020). Por su parte, las plantas se adaptan a estas condiciones mediante cambios morfológicos y fisiológicos, donde las asociaciones simbióticas juegan un rol fundamental (Villagra *et al.*, 2011; Duval *et al.*, 2015; Gairola *et al.*, 2018; Zuo *et al.*, 2020). A su vez, la diversidad de hongos endófitos y los componentes de las comunidades fúngicas dependen principalmente de factores ambientales (Hosseyni Moghaddam *et al.*, 2021).

El conocimiento sobre la presencia de hongos endófitos radiculares (micorrizas y endófitos septados) en plantas adaptadas a ambientes áridos, ofrece una oportunidad para explorar la diversidad y distribución de estas interacciones simbióticas (Steidinger *et al.*, 2019), lo que contribuirá a una mejor comprensión de la supervivencia de las plantas en dichos entornos. Las simbiosis radiculares entre hongos y plantas nativas han sido estudiadas en otros ecosistemas áridos de la Argentina (Cofré *et al.*, 2019; Lugo *et al.*, 2023); sin embargo, no hay reportes de estas interacciones en los Valles Calchaquies.

Por lo expuesto, el objetivo de este trabajo fue documentar la presencia hongos endófitos radiculares en especies arbustivas y herbáceas que presentan diferentes ciclos de vida y hábitos de crecimiento, en la región de los Valles Calchaquies (Tucumán, Argentina).

MATERIALES Y MÉTODOS

Sitio de estudio

En la provincia biogeográfica del Monte, Localidad de Amaicha del Valle, Departamento de Taí del Valle (Tucumán, Argentina), se seleccionaron cuatro sitios de muestreo. En el área de estudio se recolectaron los sistemas radiculares completos de un total de siete especies, considerando tres individuos por especie (Tabla 1). Además, se recolectaron ejemplares completos para ser depositados como material de referencia en el herbario LIL. Cabe destacar que no todas las especies estuvieron presentes de forma simultánea en todos los sitios, ya que la composición vegetal varía entre ellos.

El clima en la provincia biogeográfica del Monte se clasifica como desértico frío según Köppen-Geiger, con zonas marginales clasificadas como estepario frío (Cabrera, 1976; Bianchi y Cravero, 2010). El régimen de precipitaciones es de 80-250 mm anuales, con distribución estival (70% concentrado en diciembre-marzo) (Bianchi *et al.*, 2005). Presenta variabilidad interanual alta, con sequías prolongadas y eventos torrenciales esporádicos (Villagra *et al.*, 2011), amplitud térmica diaria entre 15-25°C con noches frías y días cálidos y amplitud térmica anual con temperaturas máximas entre 35-40°C (verano) y mínimas de -5 a -10°C (invierno) (Bianchi y Cravero, 2010). La radiación solar es de 2500-2800 horas/anuales, con alta irradiación UV (Villagra *et al.*, 2011). Evapotranspiración potencial de 1500-2000 mm/año (Villagra *et al.*, 2011), presentando un déficit hídrico permanente, con suelos frecuentemente en capacidad de marchitez (Álvarez *et al.*, 2021).

Material vegetal

Las especies fueron seleccionadas según su abundancia en cada sitio y por ser representativas de la provincia biogeográfica del Monte. Se clasificaron de acuerdo a sus diferentes ciclos de vida, hábitos de crecimiento y estrategias de supervivencia en el ambiente árido (Tabla 1).

Table 1. Especies estudiadas, clasificación según ciclo de vida de la planta, hábito de crecimiento, adaptaciones al hábitat, status y sitio de recolección.

Tabla 1. Studied species, classification according to plant life cycle, growth habit, habitat adaptations, status and collection site.

Especie	Familia	Ciclo de vida	Hábito de crecimiento	Adaptación al hábitat	Status	Sitio
<i>Atriplex cordobensis</i> Gand. & Stuck	Chenopodiaceae	Perenne	Subarbusto	Xerófita y halófita	Nativa	3
<i>Flourensia fiebrigii</i> S.F. Blake	Asteraceae	Perenne	Arbusto	Xerófita	Nativa	1
<i>Larrea cuneifolia</i> Cav.	Zygophyllaceae	Perenne	Arbusto	Xerófita	Endémica	2
<i>Lippia turbinata</i> Griseb.	Verbenaceae	Perenne	Arbusto	Mesoxerófita	Nativa	4
<i>Portulaca grandiflora</i> Hook	Portulacaceae	Anual	Hierba	Xerófita	Nativa	1
<i>Zinnia peruviana</i> (L.) L.	Asteraceae	Anual	Hierba	Mesoxerofita	Endémica	1
<i>Zuccagnia punctata</i> Cav.	Fabaceae	Perenne	Arbusto	Xerófita	Endémica	2

Material de referencia

- ARGENTINA. Prov. Tucumán, Sitio 1, Dpto. Taí del Valle, Localidad Ampimpa, 26°36'29,9"S-64°50'41,3"O, 2224 m snm, 03-III-2024. *Flourensia fiebrigii* S.F.Blake., (Asteraceae), *Álvarez y Mercado* S/N (LIL); *Portulaca grandiflora* Hook., (Portulacaceae) *Álvarez y Mercado* S/N (LIL); *Zinnia peruviana* (L.) L., (Asteraceae); *Álvarez y Mercado* S/N (LIL).
- ARGENTINA. Prov. Tucumán Sitio 2, Dpto. Taí del Valle, Localidad Amaicha del Valle, 26°35'29,9"S-65°52'05,3"O, 2226 m snm, 03-III-2024. *Larrea cuneifolia* Cav., (Zygophyllaceae) *Álvarez y Mercado* S/N (LIL) y *Zuccagnia punctata* Cav., (Fabaceae) *Álvarez y Mercado* S/N (LIL).
- ARGENTINA. Prov. Tucumán, Sitio 3, Dpto. Taí del Valle, Localidad de Tío Punco, 26°33'04,0"S-65°57'53,2"O, 1840 m snm, 03- III-2024, *Atriplex cordobensis* Gand. & Stuck (Chenopodiaceae); *Álvarez y Mercado* S/N (LIL).
- ARGENTINA. Prov. Tucumán, Sitio 4. Dpto. Taí del Valle, Localidad El Pichao, 26°20'47,9"S-66°00'54,1"O, 2048 m snm, 03-III-2024 *Lippia turbinata* Griseb., (Verbenaceae) *Álvarez y Mercado* S/N (LIL).

Identificación de hongos endófitos radiculares

Para determinar la presencia de EcM, las raíces fueron lavadas y observadas bajo un estereomicroscopio Zeiss (Stemi 305, Carl Zeiss Ltd, Herts, UK). Posteriormente se realizaron cortes transversales de 15 μ m de espesor con micrótopo rotatorio Thermo ScientificTM HM 325 (Mercado y Ponessa, 2021). Las secciones obtenidas fueron decoloradas con hipoclorito de sodio 50%, lavadas con agua destilada, teñidas con coloración doble sucesiva de azul astra-safranina y finalmente montadas en agua-glicerina (1:1, v/v). Las observaciones se realizaron en microscopio óptico Zeiss (Carl Zeiss Ltd, Herts, UK).

Para determinar la presencia de hongos MA y otros endófitos, los sistemas radiculares completos fueron lavados con agua, clarificados con hidróxido de potasio 10%, luego acidificados con ácido clorhídrico 0,1N y posteriormente teñidos con azul de anilina (0,05% p/v) (Phillips y Hayman, 1970; Grace y Stribley, 1991). Se seleccionaron 30 fragmentos de 1 cm de longitud, por cada individuo/especie, los que fueron montados en agua glicerina (1:1, v/v). Las observaciones se realizaron en microscopio óptico mencionado anteriormente. Las fotografías se tomaron con cámara digital Zeiss (Axiocam ERc 5s).

Análisis de suelo

Para evaluar las características edáficas, en cada sitio se tomaron tres muestras de suelo a 20 cm de profundidad. Las mismas fueron mezcladas y homogeneizadas para obtener una muestra compuesta de 500 g. Dichas muestras fueron almacenadas en bolsas plásticas a 4°C hasta su análisis en el servicio privado de análisis de suelos. Las variables fisicoquímicas evaluadas fueron: pH (método potenciométrico con pHchímetro ORP ST2200-F con electrodo ST320 Ohaus); conductividad eléctrica (CE), (dS/m = mmhos/cm con conductímetro de Digicom, 2006); materia orgánica (% = 10g/kg), por el método de Walkley y Black (1934) modificado por Eyherabide *et al.* (2014); fósforo disponible (ppm = mg/kg) (Bray y Kurtz, 1945); nitrógeno total (%), (método de Kjeldhal modificado por Kuss *et al.*, 2007); cationes Na⁺ - K⁺, mediante el fotómetro de llama Arcano F640 (cmol+/kg = meq/100gr); cationes Ca²⁺ - Mg²⁺ mediante EDTA (cmol+/kg = meq/100gr) y textura con el método de Bouyoucos (1962).

RESULTADOS

Las siete especies estudiadas establecieron interacciones simbióticas con hongos micorrícicos, en algunos casos, coexistiendo con HESO y/o HESD (Tabla 2).

En *Portulaca grandiflora*, *Zinnia peruviana* y *Zuccagnia punctata*, se determinó la presencia de EcM, MA y HESD (Tabla 2). Las tres especies mencionadas exhibieron EcM de morfología simple (Fig. 1A-C). En corte transversal de raíz se observa la presencia de un manto insipiente e hifas intercelulares formando la red de Hartig en los primeros estratos celulares del parénquima cortical (Fig.1D-E).

Tabla 2. Micorrizas y endófitos septados oscuros y desconocidos en siete especies de la provincia biogeográfica del Monte.

Table 2. Mycorrhizae, dark and unknown septate endophytes in seven species of the Monte biogeographic province.

Especies vegetales	Presencia de EcM	Presencia de MA	Morfología de MA	Presencia de HESO	Presencia de HESD
<i>A. cordobensis</i>	-	+ ²	<i>Arum-Paris</i>	-	+
<i>F. fiebrigii</i>	-	+ ¹	<i>Arum-Paris</i>	+	+
<i>L. cuneifolia</i>	-	+ ¹	<i>Arum</i>	+	+
<i>L. turbinata</i>	-	+ ¹	<i>Arum-Paris</i>	+	-
<i>P. grandiflora</i>	+	+ ¹	<i>Arum</i>	-	+
<i>Z. peruviana</i>	+	+ ¹	<i>Arum-Paris</i>	-	+
<i>Z. punctata</i>	+	+ ¹	<i>Arum</i>	-	+

+ Indica presencia; - indica ausencia; 1vesículas; 2células auxiliares intracelulares. EcM: ectomicorriza; MA: micorrizas arbusculares; HESO: hongos endófitos septados oscuros; HESD: hongos endófitos septados desconocidos.

+ indicates presence; - indicates absence; 1vesicles; 2intracellular auxiliary cells. EcM: ectomycorrhizae; MA: arbuscular mycorrhizae; HESO: dark septate endophytes; HESD: unknown septate endophytes.

Estas especies presentaron MA tipo *Arum* con vesículas (Tabla 2, Fig. 2B y D), *Z. peruviana* además mostró MA tipo *Paris* y esporas intracelulares.

Por su parte, en *Atriplex cordobensis*, *Flourensia fiebrigii* y *Lippia turbinata*, se observaron MA, coexistiendo los tipos morfológicos *Arum* y *Paris* (Tabla 2, Fig. 2A, C), con presencia de vesículas en *F. fiebrigii* y *L. turbinata*; y células auxiliares en *A. cordobensis* (Fig. 2 E-F). En *F. fiebrigii* se evidenciaron además esporas (Tabla 2). Finalmente, *Larrea cuneifolia* exhibió MA tipo *Arum* y vesículas (Tabla 2).

En cuanto a los hongos endófitos septados, se registró la presencia de HESO en *F. fiebrigii*, *L. cuneifolia* y *L. turbinata* (Tabla 2, Fig. 3A) y de HESD en *A. cordobensis*, *F. fiebrigii*, *L. cuneifolia*, *P. grandiflora*, *Z. peruviana* y *Z. punctata* (Tabla 2, Fig. 3B-C).

En la Tabla 3 se presenta el análisis de suelos que revela que los sitios 1, 2 y 3 son alcalinos, especialmente el sitio 3 (pH 9,8), mientras que el 4 tiende a la neutralidad (pH 7,16). Los sitios 1 y 2 presentan salinidad moderada (1,10 y 1,82 dS/m respectivamente). Todos tienen bajo contenido de materia orgánica. Los sitios 1 y 2 presentan además bajo contenido de fósforo y nitrógeno, mientras que los sitios 3 y 4 son moderadamente pobres en esos elementos.

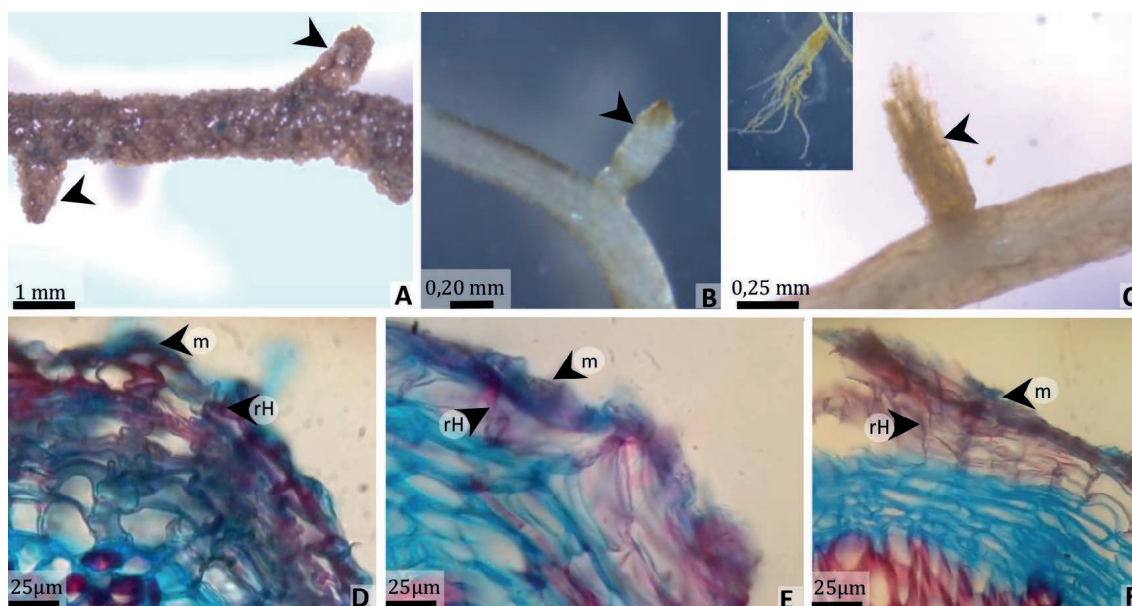


Fig 1. Ectomicorizas de morfología simple. A-C) Aspecto general. A) *Zuccagnia punctata*. B) *Zinnia peruviana*. C) *Portulaca grandiflora*, en inserto se muestran variantes de la morfología. D-F) Manto y red de Hartig en corte transversal de raíz. D) *Z. punctata*. E) *Z. peruviana*. F) *P. grandiflora*. Álvarez y Mercado S/N (LIL). Referencias: m, manto; rH, red de Hartig.

Fig. 1. Ectomycorrhizae of simple morphology. A-C) General appearance. A) *Zuccagnia punctata*. B) *Zinnia peruviana*. C) *Portulaca grandiflora*, insets show morphological variations. D-F) Mantle and Hartig net in root cross-section. D) *Z. punctata*. E) *Z. peruviana*. F) *P. grandiflora*. Álvarez and Mercado S/N (LIL). References: m, mantle; rH, Hartig net.

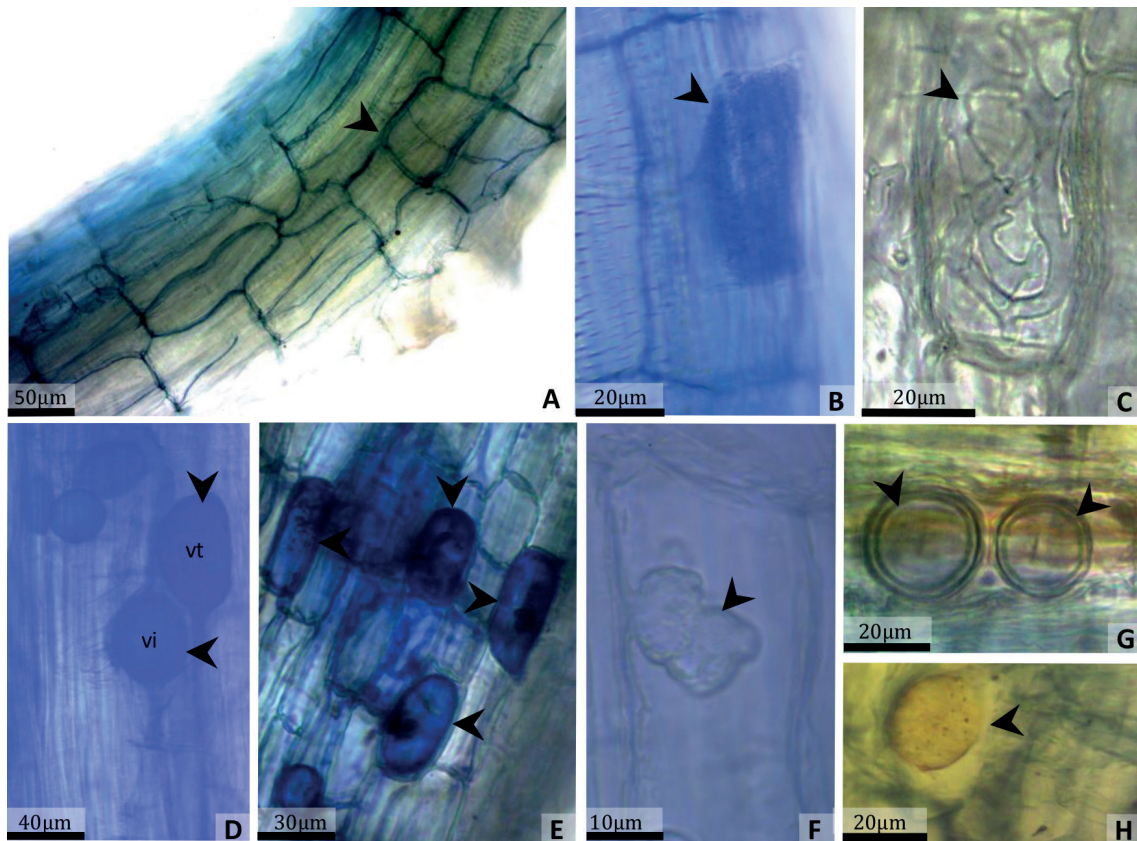


Fig. 2. Micorrizas arbusculares en la región del parenquima cortical de raíces clarificadas. A) Hifas intercelulares (flecha) en raíz de *Flourensia fiebrigii*. Aspecto general. B) Hongo micorrízico arbuscular, morfología tipo *Arum* (flecha) en *Z. peruviana*. C) Hongo micorrízico arbuscular, morfología tipo *Paris* (flecha) en *F. fiebrigii*. D) Vesículas intercalares y terminales en *Z. punctata*. E) Vesículas intracelulares (flecha) en *F. fiebrigii*. F) Células auxiliares intra celulares (flecha) en *Atriplex cordobensis*. G) Esporas intracelulares (flecha) en *F. fiebrigii*. H) Espora intracelular (flecha) en el parénquima cortical de *Z. peruviana*. Álvarez y Mercado S/N (LIL). Referencias: vi, vesícula intercalary; vt, vesícula terminal.

Fig. 2. Arbuscular mycorrhizae in the cortical parenchyma region of cleared roots. A) Inter-cellular hyphae (arrow) in the root of *Flourensia fiebrigii* root. General appearance. B) Arbuscular mycorrhizal fungus, *Arum*-type morphology (arrow) in *Z. peruviana*. C) Arbuscular mycorrhizal fungus, *Paris*-type morphology (arrow) in *F. fiebrigii*. D) Intercalary and terminal vesicles (arrows) in *Z. punctata*. E) Intracellular vesicles (arrow) in *F. fiebrigii*. F) Intracellular auxiliary cells (arrow) in *Atriplex cordobensis*. G) Intracellular spores (arrow) in *F. fiebrigii*. H) Intracellular spore (arrow) in the cortical parenchyma of *Z. peruviana*. Álvarez and Mercado S/N (LIL). References: vi, intercalary vesicle; vt, terminal vesicle.

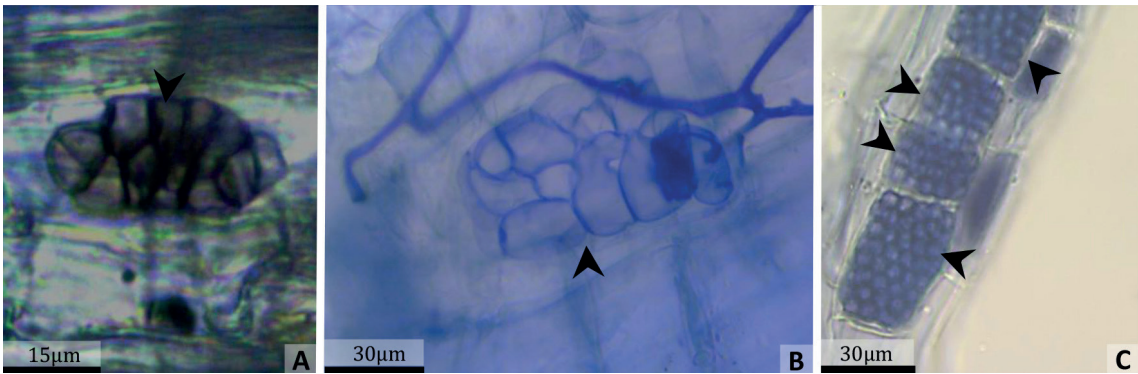


Fig. 3. Microesclerocios de hongos endófitos septados oscuros y desconocidos en células del parénquima cortical. A) *F. fiebrigii*. B) *Z. peruviana*. C) *P. grandiflora*. Álvarez y Mercado S/N (LIL).

Fig. 3. Microsclerotia of dark septate and unknown endophytic fungi in cortical parenchyma cells. A) *F. fiebrigii*. B) *Z. peruviana*. C) *P. grandiflora*. Álvarez and Mercado S/N (LIL).

Tabla 3. Características edáficas de los sitios muestreados en la provincia biogeográfica del Monte.
Table 3. Edaphic characteristics of the sampled sites in the Monte biogeographic province.

Sitio	1	2	3	4
pH	8,90	8,23	9,80	7,16
CE dS/m (mmhos/cm)	1,10	1,82	0,36	0,11
CO ₃ Ca	++	+++	++	-
MO (%)	0,83	1,16	0,23	0,67
N total % (ppm)	0,05	0,08	0,01	0,04
P (ppm)	5,80	9,70	15,60	11,50
TEXTURA	Areno limosa	Franca arenosa	Areno limosa	Areno limosa
ARCILLA (%)	9,99	4,99	3,74	2,49
LIMO (%)	20,00	26,25	21,25	22,50
ARENA (%)	70,01	68,76	75,01	75,01
CIC (meq/100g)	6,00	6,75	4,15	3,50
Na (meq/100g)	2,07	1,68	2,39	0,22
K (meq/100g)	0,38	1,09	0,61	0,29
Ca (meq/100g)	-	-	-	2,00
Mg (meq/100g)	1,33	1,58	2,08	1,83

CE: conductividad eléctrica; MO: materia orgánica; N: nitrógeno; P: fósforo; CIC: capacidad de intercambio catiónico; Na: sodio; K: potasio; Ca: calcio; Mg: magnesio.

CE: electrical conductivity; MO: organic matter; N: nitrogen; P: phosphorus; CIC: cation exchange capacity; Na: sodium; K: potassium; Ca: calcium; Mg: magnesium.

DISCUSIÓN

El presente estudio documenta la presencia de hongos endófitos radiculares en siete especies vegetales nativas de Argentina, pertenecientes a seis familias, que crecen en los Valles Calchaquíes, provincia biogeográfica del Monte. Entre estas especies, *L. cuneifolia* y *Z. punctata* se encuentran en la lista Roja preliminar de plantas endémicas de Argentina, en categorías 1 y 3 respectivamente (Secretaría de Ambiente y Desarrollo Sustentable [SAyDS], 2010). La presencia de estos hongos es clave para la supervivencia de la vegetación en ecosistemas áridos, que se caracterizan por suelos con bajo contenido de materia orgánica, alta alcalinidad y disponibilidad limitada de nutrientes esenciales (Lugo *et al.*, 2015; Miranda *et al.*, 2019). El análisis edáfico reveló que los sitios analizados presentan suelos alcalinos, predominantemente arenosos, con baja capacidad de intercambio catiónico, bajas concentraciones de materia orgánica, fósforo y nitrógeno respectivamente, lo que sugiere una limitada disponibilidad de nutrientes y agua. Características que según Bashan *et al.* (2007), Montaña Arias *et al.* (2008), García *et al.* (2012), Rincón *et al.* (2015), Lugo *et al.* (2018), Zuo *et al.* (2020), Hosseyni Moghaddam *et al.* (2021) favorecen la simbiosis con hongos micorrícicos y otros endófitos fúngicos ya que desempeñan un papel clave en la absorción de estos elementos.

Los sitios 1 y 2 se caracterizan por presentar los valores más bajos de materia orgánica, nitrógeno total y fósforo, además de una alta conductividad eléctrica; esto coincide con la coexistencia de EcM, MA y HESD en *P. grandiflora*, *Z. peruviana* y *Z. punctata*. La baja disponibilidad de fósforo, por debajo de 20 ppm en el suelo, constituye un umbral crítico que promueve la dependencia de las plantas a asociaciones micorrícicas para optimizar la adquisición de nutrientes. Sin embargo, cada especie vegetal puede tener un nivel óptimo de fósforo soluble a partir del cual se estimularía fuertemente la colonización (Hirata *et al.*, 1988).

La presencia de EcM en especies herbáceas como *P. grandiflora* y *Z. peruviana* es un hallazgo, ya que estas asociaciones son más frecuentes en plantas leñosas (Smith y Read, 2008; Tedersoo y Brundrett, 2017; Brundrett y Tedersoo, 2018). Sin embargo, existen reportes de la presencia de EcM en otras herbáceas como *Eriogonum* spp., *Salsola* spp. y *Cistanthe* spp. que respaldan este hallazgo (Allen *et al.*, 2003; Molina-Montenegro *et al.*, 2016; Zhang *et al.*, 2018). Pagano *et al.* (2012) citaron la presencia de MA y HESO para *Z. peruviana* de la región del Chaco, en este trabajo se reporta por primera vez, la presencia de EcM y HESD, además de caracterizar los tipos morfológicos *Arum* y *Paris* de MA.

La presencia de hongos MA en las siete especies estudiadas, junto con la coexistencia de los tipos morfológicos *Arum* y *Paris* en varias de ellas (*A. cordobensis*, *F. fiebrigii* y *L. turbinata*) sugiere una plasticidad en el establecimiento de la simbiosis, incluyendo la posibilidad del hongo de presentar diferentes morfotipos acorde a las especies vegetales y a las condiciones ambientales, lo que brindaría una ventaja en suelos con deficiencias minerales (Smith y Smith, 2011).

En cuanto al hallazgo de HESO en *F. fiebrigii*, *L. cuneifolia* y *L. turbinata*, es consistente con estudios previos que destacan el papel de estos endófitos en la tolerancia a condiciones de salinidad, estrés hídrico y deficiencia de nutrientes de ecosistemas áridos (Lugo *et al.*, 2018; Miranda *et al.*, 2019; Zuo *et al.*, 2020), como los Valles Calchaquíes. *Atriplex cordobensis*, *F. fiebrigii*, *P. grandiflora*, *Z. peruviana* y *Z. punctata* presentaron HESD, que podrían desempeñar un rol similar.

Las asociaciones simbióticas con hongos MA y otros endófitos, serían particularmente importantes en especies anuales, como *Z. peruviana* y *P. grandiflora*, ya que permitirían maximizar la absorción de recursos en el corto período en el que transcurre su ciclo de vida (Allen *et al.*, 2003; Smith y Read, 2008; Rincón *et al.*, 2015; Lugo *et al.*, 2018; Steidinger *et al.*, 2019; Zuo *et al.*, 2020).

La presencia simultánea de hongos MA, EcM y HESO en plantas xerófitas y mesoxerófitas optimiza la absorción de nutrientes y agua, como demuestran estudios en ambientes áridos (Smith y Read, 2008; Zuo *et al.*, 2020; Lugo *et al.*, 2015).

Es interesante mencionar que las especies estudiadas presentan usos medicinales (Barboza *et al.*, 2009; Maroyi, 2023) y se encuentran amenazadas por la pérdida de hábitat, contaminación ambiental y la sobreexplotación debido a su creciente demanda farmacéutica (Porwal *et al.*, 2020; Mofokeng *et al.*, 2022; Yang *et al.*, 2023). En este sentido, Bothe *et al.* (2010), Chaudhary *et al.* (2022) y Alzarhani *et al.* (2024) enfatizan la falta de información sobre el rol ecológico de los hongos MA en la supervivencia de especies amenazadas, particularmente en ambientes hostiles con suelos degradados o en áreas impactadas por el cambio climático.

Futuras investigaciones deberían profundizar el papel funcional que cumplen las interacciones de hongos simbióticos, tanto MA como otros endófitos, en la supervivencia y desarrollo de estas plantas medicinales, endémicas y nativas, lo que permitirá tomar decisiones estratégicas para su uso y conservación.

CONCLUSIÓN

Esta investigación nos permitió explorar asociaciones fúngicas en un amplio espectro taxonómico vegetal con diferentes adaptaciones a condiciones extremas dentro de un mismo ambiente. Se demuestra la presencia de hongos micorrícicos y otros endófitos en siete especies de plantas nativas de los Valles Calchaquíes, donde los suelos alcalinos y pobres en nutrientes limitan el crecimiento vegetal. La presencia de EcM en las especies herbáceas *P. grandiflora* y *Z. peruviana* es un hallazgo, ya que este tipo de micorrizas es característica de plantas leñosas. La coexistencia de múltiples simbioses (MA, EcM, HESO, HESD) sugiere una estrategia en el ensamblaje funcional para maximizar la adquisición de recursos.

AGRADECIMIENTOS

Esta investigación fue financiada por Fundación Miguel Lillo, proyecto FMLCAV-B-0002-1.

CONFLICTO DE INTERÉS

Los autores declaran no tener conflictos de interés.

BIBLIOGRAFÍA

- Albornoz, P. L., Catania, M. D. V. y Suárez, G. M. (2022). Presencia de micorrizas arbusculares y endófitos septados en *Plagiochasma rupestre* (Ayttoniaceae, Marchantiophyta) del Chaco Serrano (Tucumán, Argentina). *Lilloa* 59 (2) :189-197. <https://doi.org/10.30550/j.lil/2022.59.2/2022.08.10>
- Allen, M. F., Swenson, W., Querejeta, J. I., Egerton-Warburton, L. M. y Treseder, K. K. (2003). Ecology of mycorrhizae: A conceptual framework for complex interactions among plants and fungi. *Annual Review of Phytopathology* 41 (1): 271-303. <https://doi.org/10.1146/annurev.phyto.41.052002.095518>
- Álvarez, J. A., Villagra, P. E., Cesca, E. M. y Easdale, T. A. (2021). Water dynamics at the soil-plant-atmosphere interface in the Monte Desert: Physiological and ecological adaptations. *Journal of Arid Environments* 184: 104312. <https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2020.104312>
- Alzarhany, A. K., Clark, D. R. y van der Heijden, M. G. A. (2024). Mycorrhizal networks enhance resilience of endangered plants to climate stress. *Nature Plants* 10 (2): 123-135. <https://doi.org/10.1038/s41477-023-01595-7>
- Barboza, G. E., Cantero, J. J., Núñez, C. y Ariza Espinar, L. (2009). Medicinal plants: A general review and a phytochemical and ethnopharmacological screening of the native Argentine Flora. *Kurtziana* 34 (1-2): 7-365.
- Bashan, Y., Salazar, B. G., Moreno, M., Lopez, B. R. y Linderman, R. G. (2007). Restoration of giant cardon cacti in barren desert soil amended with common compost and inoculated with *Azospirillum brasilense*. *Biology and Fertility of Soils* 43 (1): 112-119. <https://doi.org/10.1007/s00374-006-0082-9>
- Bianchi, A. R. y Cravero, S. C. (2010). *Atlas climático digital de la República Argentina*. INTA.
- Bianchi, A. R., Yañez, C. E. y Acuña, L. R. (2005). *Base de datos mensuales de precipitaciones del Noroeste Argentino*. INTA-CIRN.
- Bothe, H., Turnau, K. y Regvar, M. (2010). The potential role of arbuscular mycorrhizal fungi in protecting endangered plants and habitats. *Mycorrhiza* 20 (7): 445-457. <https://doi.org/10.1007/s00572-010-0332-4>

- Bouyoucos, G. J. (1962). Hydrometer method improved for making particle size analyses of soils. *Agronomy Journal* 54 (5): 464-465. <https://doi.org/10.2134/agronj1962.00021962005400050028x>
- Bray, R. H. y Kurtz, L. T. (1945). Determination of total, organic, and available forms of phosphorus in soils. *Soil Science* 59 (1): 39-45. <https://doi.org/10.1097/00010694-194501000-00006>
- Brundrett, M. C. y Tedersoo, L. (2018). Evolutionary history of mycorrhizal symbioses and global host plant diversity. *New Phytologist* 220 (4): 1108-1115. <https://doi.org/10.1111/nph.14976>
- Cabrera, A. L. (1976). Regiones fitogeográficas argentinas. *Enciclopedia Argentina de Agricultura y Jardinería* 2 (1): 1-85.
- Chaudhary, V. B., Akland, K. y Johnson, N. C. (2022). Do arbuscular mycorrhizal fungi act as ecosystem engineers in threatened plant habitats? *Frontiers in Ecology and Evolution* 10: 842134. <https://doi.org/10.3389/fevo.2022.842134>
- Cofré, M. N., Soteras, F., Iglesias, M. del R., Velázquez, S., Abarca, C., Risio, L., Ontivero, E., Cabello, M. N., Domínguez, L. S. y Lugo, M. A. (2019). Biodiversity of Arbuscular Mycorrhizal Fungi in South America: A Review. En M. C. Pagano y M. A. Lugo (Eds.). *Mycorrhizal Fungi in South America* (pp. 49-76). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-030-15228-4_3
- Duval, V. S., Benedetti, G. M., Campo, A. M., Duval, V. S., Benedetti, G. M. y Campo, A. M. (2015). Relación clima-vegetación: Adaptaciones de la comunidad del jarillal al clima semiárido, Parque Nacional Lihué Calel, provincia de La Pampa, Argentina. *Investigaciones geográficas* 88: 33-44.
- Eyherabide, M., Saínz Rozas, H. R., Echeverría, H. E. y Barbieri, P. A. (2014). Comparación de métodos para determinar carbono orgánico en suelos de la región pampeana argentina. *Ciencia del Suelo* 32 (1): 13-21.
- Fracchia, S., Krapovickas, L., Aranda-Rickert, A. y Valentinuzzi, V. S. (2011). Dispersal of arbuscular mycorrhizal fungi and dark septate endophytes by *Ctenomys cf. knighti* (Rodentia) in the northern Monte Desert of Argentina. *Journal of Arid Environments* 75 (11): 1016-1023. <https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2011.04.034>
- Gairola, S., Al Shaer, K. I., Al Harthi, E. K. y Mosa, K. A. (2018). Strengthening desert plant biotechnology research in the United Arab Emirates: A viewpoint. *Physiology and Molecular Biology of Plants* 24 (4): 521-533. <https://doi.org/10.1007/s12298-018-0551-2>
- Galindo-Flores, G., Castillo-Guevara, C., Campos-López, A. y Lara, C. (2015). Caracterización de las ectomicorrizas formadas por *Laccaria trichodermophora* y *Suillus tomentosus* en *Pinus montezumae*. *Botanical Sciences* 93 (4): 855-863. <https://doi.org/10.17129/botsci.200>
- García, I., Mendoza, R. y Pomar, M. C. (2012). Arbuscular mycorrhizal symbiosis and dark septate endophytes under contrasting grazing modes

- in the Magellanic steppe of Tierra del Fuego. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 155: 194-201. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2012.04.020>
- Glynou, K., Ali, T., Buch, A., Haghi Kia, S., Ploch, S., Xia, X., Çelik, A., Thines, M., y Maciá-Vicente, J. G. (2016). The local environment determines the assembly of root endophytic fungi at a continental scale. *Environmental Microbiology* 18 (8): 2418-2434. <https://doi.org/10.1111/1462-2920.13112>
- Grace, C. y Stribley, D. P. (1991). A safer procedure for routine staining of vesicular-arbuscular mycorrhizal fungi. *Mycological Research* 95 (8): 1160-1162. [https://doi.org/10.1016/S0953-7562\(09\)80005-1](https://doi.org/10.1016/S0953-7562(09)80005-1)
- Hirata, H., Masunaga, T. y Koiwa, H. (1988). Respose of chickpea grown on ando-soil to vesicular arbuscular mycorrhizal infection in relation to the level of phophorus application. *Soil Science and Plant Nutrition* 34: 441-449.
- Hosseyini Moghaddam, M. S., Safaie, N., Tedersoo, L. y Hagh-Doust, N. (2021). Diversity, community composition, and bioactivity of cultivable fungal endophytes in saline and dry soils in deserts. *Fungal Ecology* 49: 101019. <https://doi.org/10.1016/j.funeco.2020.101019>
- Huey, C. J., Gopinath, S. C., Uda, M. N. A., Zulhaimi, H. I., Jaafar, M. N., Kasim, F. H. y Yaakub, A. R. W. (2020). Mycorrhiza: A natural resource assists plant growth under varied soil conditions. *Biotech* 10 (5): 1-9. <https://doi.org/10.1007/s13205-020-02188-3>
- Jumpponen, A., Herrera, J., Porras-Alfaro, A. y Rudgers, J. (2017). Biogeography of root-associated fungal endophytes. En: L. Tedersoo (Ed.), *Biogeography of Mycorrhizal Symbiosis* (pp. 195-222). https://doi.org/10.1007/978-3-319-56363-3_10
- Kuss, A. V., Kuss, V. V., Lovato, T. y Flores, J. P. C. (2007). Fixação biológica de nitrogênio e fertilização nitrogenada em soja no Sul do Brasil. *Revista Brasileira de Ciência do Solo* 31 (5): 1055-1061. <https://doi.org/10.1590/S0100-06832007000500018>
- Lizarraga, S. V., Perez, G. A., Ruiz, A. I., Salazar, S. M., Díaz Ricci, J. C. y Albornoz, P. L. (2018). Rendimiento frutal de tres variedades de *Fragaria ananassa* en relación con el grado de colonización por micorrizas arbusculares y otros endófitos fúngicos, Tucumán, Argentina. Respuesta histológica radical a la interacción. *Revista agronómica del noroeste argentino* 38 (2): 145-154.
- Lugo, M. A., Menoyo, E., Allione, L. R., Negritto, M. A., Henning, J. A. y Anton, A. M. (2018). Arbuscular mycorrhizas and dark septate endophytes associated with grasses from the Argentine Puna. *Mycologia* 110 (4): 654-665. <https://doi.org/10.1080/00275514.2018.1492846>
- Lugo, M. A., Ontivero, R. E., Iriarte, H. J., Yelikbayev, B. y Pagano, M. C. (2023). The Diversity of Arbuscular Mycorrhizal Fungi and Their Associations in South America: A Case Study of Argentinean and Brazilian Cattle Raising Productive Ecosystems: A Review. *Diversity* 15 (9): 1006. <https://doi.org/10.3390/d15091006>

- Lugo, M. A., Reinhart, K. O., Menoyo, E., Crespo, E. M. y Urcelay, C. (2015). Plant functional traits and phylogenetic relatedness explain variation in associations with root fungal endophytes in an extreme arid environment. *Mycorrhiza* 25 (2): 85-95. <https://doi.org/10.1007/s00572-014-0592-5>
- Maroyi, A. (2023). Medicinal plants threatened by overharvesting for traditional medicine in Africa: A case study of Zimbabwe. *Journal of Ethnopharmacology* 306: 116165. <https://doi.org/10.1016/j.jep.2023.116165>
- Mercado, M. I. y Ponessa, G. I. (2021). Nuevo soporte para obtención de cortes de material vegetal en micrótopo rotativo. *Dominguezia* 37 (1): 29-35.
- Miranda, V., Rothen, C., Yela, N., Aranda-Rickert, A., Barros, J., Calcagno, J. y Fracchia, S. (2019). Subterranean desert rodents (Genus *Ctenomys*) create soil patches enriched in root endophytic fungal propagules. *Microbial Ecology* 77 (2): 451-459. <https://doi.org/10.1007/s00248-018-1227-8>
- Mofokeng, M. M., Du Plooy, C. P., Araya, H. T., Amoo, S. O., Mokgehele, S. N., Pofu, K. M. y Mashela, P. W. (2022). Medicinal plant cultivation for sustainable use and commercialization of high-value crops. *South African Journal of Science* 118 (3-4): 12190. <https://doi.org/10.17159/sajs.2022/12190>
- Molina-Montenegro, M. A., Oses, R., Torres-Díaz, C., Atala, C. y Gianoli, E. (2016). Fungal endophytes associated with roots of nurse cushion species have positive effects on native and invasive beneficiary plants in an alpine system. *Perspectives in Plant Ecology, Evolution and Systematics* 21: 31-40. <https://doi.org/10.1016/j.ppees.2016.05.003>
- Montaño Arias, A. M. M., Camargo Ricalde, S. L., García Sánchez, R. y Monroy Ata, A. (2008). Arbuscular mycorrhizae in arid and semiarid ecosystems. DF, México: Mundi-Prensa, INE-SEMARNAT, UAM-Iztapalapa, FES-Zaragoza-UNAM, 460.
- Nagaraj, K., Priyadharsini, P. y Muthukumar, T. (2015). Mycorrhizal and septate endophytic fungal associations in gymnosperms of southern India. *Anales de Biología* 37: 8. <http://dx.doi.org/10.6018/analesbio.37.8>
- Pagano, M. C., Lugo, M., Araújo, F., Ferrero, M., Menoyo, E. y Steinaker, D. (2012). Native species for restoration and conservation of biodiversity in South America. En: L. Marin y D. Kovac (Eds.), *Native species* (pp. 1-55). Nova Science Publishers.
- Phillips, J. M. y Hayman, D. S. (1970). Improved procedures for clearing roots and staining parasitic and vesicular-arbuscular mycorrhizal fungi for rapid assessment of infection. *Transactions of the British Mycological Society* 55 (1): 158-161.
- Porwal, O., Singh, S. K., Patel, D. K., Gupta, S. y Katekhaye, S. (2020). Cultivation, collection and processing of medicinal plants. En J. Ahmad (Ed.), *Bioactive phytochemicals: Drug discovery to product development* (pp. 14-30). Bentham Science Publishers.

- Rincón, A., Ruiz-Díez, B., Fernández-Pascual, M. y Probanza, A. (2015). Ectomycorrhizal fungi as biofertilizers in forestry. *Applied Microbiology and Biotechnology* 99 (11): 4651-4664. <https://doi.org/10.1007/s00253-015-6565-6>
- Romagnoli, G., Arana, M. D. y Albornoz, P. L. (2024). Micorrizas arbusculares y endófitos septados en tres especies de Thelypteridaceae de ambientes riparios de las Yungas (Tucumán, Argentina). *Boletín de la Sociedad Argentina de Botánica* 59 (3): 335-340. <https://doi.org/10.31055/1851.2372.v59.n3.44734>
- Secretaría de Ambiente y Desarrollo Sustentable. (2010). *Resolución 84/2010: Flora y fauna silvestre*. Ecofield. Recuperado de https://www.ecofield.net/Legales/Florayfauna/res84-10_SAyDS.htm
- Smith, S. E. y Read, D. J. (2008). *Mycorrhizal symbiosis* (3rd ed.). Academic Press.
- Smith, S. E. y Smith, F. A. (2011). Roles of arbuscular mycorrhizas in plant nutrition and growth: New paradigms from cellular to ecosystem scales. *Annual Review of Plant Biology* 62: 227-250. <https://doi.org/10.1146/annurev-arplant-042110-103846>
- Steidinger, B. S., Crowther, T. W., Liang, J., Van Nuland, M. E., Werner, G. D. A., Reich, P. B. y Peay, K. G. (2019). Climatic controls of decomposition drive the global biogeography of forest-tree symbioses. *Nature* 569 (7756): 404-408. <https://doi.org/10.1038/s41586-019-1128-0>
- Sun, Y., Wang, Q., Lu, X., Okane, I. y Kakishima, M. (2012). Endophytic fungal community in stems and leaves of plants from desert areas in China. *Mycological Progress* 11 (3): 781-790. <https://doi.org/10.1007/s11557-011-0790-x>
- Tedersoo, L. y Brundrett, M. C. (2017). Evolution of ectomycorrhizal symbiosis in plants. En: Tedersoo, L. (Eds.), *Biogeography of Mycorrhizal Symbiosis* (pp. 407-467). https://doi.org/10.1007/978-3-319-56363-3_19
- Vandenkoornhuyse, P., Baldauf, S. L., Leyval, C., Straczek, J. y Young, J. P. W. (2002). Extensive fungal diversity in plant roots. *Science* 295 (5562): 2051. <https://doi.org/10.1126/science.295.5562.2051>
- Villagra, P. E., Giordano, C., Alvarez, J. A., Bruno Cavagnaro, J., Guevara, A., Sartor, C., Passera, C. B. y Greco, S. (2011). Ser planta en el desierto: Estrategias de uso de agua y resistencia al estrés hídrico en el Monte Central de Argentina. *Ecología Austral* 21 (1): 29-42.
- Walkley, A. y Black, I. A. (1934). An examination of the Degtjareff method for determining soil organic matter, and a proposed modification of the chromic acid titration method. *Soil Science* 37 (1): 29-38.
- Yang, X., Chen, J. y Zhang, L. (2023). Pharmaceutical demand as a driver of plant extinction risk: A global assessment. *Biological Conservation* 280: 109975. <https://doi.org/10.1016/j.biocon.2023.109975>
- Zhang, Y., Li, X. y Chen, Y. (2018). Mycorrhizal associations in the desert: A review. *Journal of Arid Environments* 156: 1-8. <https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2018.04.011>

- Zhou, H., Zhao, W., Zheng, X. y Li, S. (2015). Root distribution of *Nitraria sibirica* with seasonally varying water sources in a desert habitat. *Journal of Plant Research* 128 (4): 613-622. <https://doi.org/10.1007/s10265-015-0728-5>
- Zuo, Y., Su, F., He, X. y Li, M. (2020). Colonization by dark septate endophytes improves the growth of *Hedysarum scoparium* under multiple inoculum levels. *Symbiosis* 82 (3): 201-214. <https://doi.org/10.1007/s13199-020-00713-9>