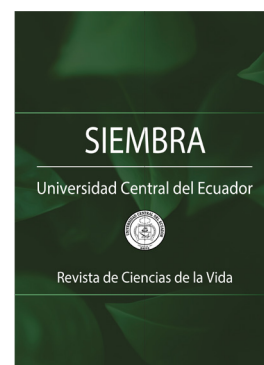


Efecto de biofertilizantes a base de microorganismos de montaña sobre la colonización micorrícica y el rendimiento de lechuga y zanahoria, en la Patagonia argentina

Effect of biofertilizers based on mountain microorganisms on mycorrhizal colonization and yield of lettuce and carrot crops, in Argentinean Patagonia

María Cecilia Mestre¹, Facundo Fioroni², Leila Yamila Heinzle³, Leandro Sisón-Cáceres⁴, Andrea Cardozo⁵, Verónica Chillo⁶, Veronica El Mujtar⁷, Natalia Fernández⁸



Siembra 11 (2) (2024): e6815

Recibido: 28/06/2024 / Revisado: 28/07/2024 / 23/08/2024 / Aceptado: 26/09/2024

¹ Instituto Andino Patagónico de Tecnologías Biológicas y Geoambientales (IPATEC) - Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas - Universidad Nacional del Comahue. Av. Pioneros 2350. CP8400. Bariloche, Río Negro, Argentina.

mestremc@comahue-conicet.gov.ar
<https://orcid.org/0000-0002-4681-075X>

² Instituto de Investigaciones en Recursos Naturales, Agroecología y Desarrollo Rural (IRNAD) - Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas - Universidad Nacional de Río Negro. Río Negro, Argentina

ffioroni@unrn.edu.ar
<https://orcid.org/0000-0002-2704-384X>

³ Instituto de Investigaciones Forestales y Agropecuarias de Bariloche (IFAB), Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas - Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria. Agencia de Extensión Rural INTA de El Bolsón. Mármol 1950. 8430. El Bolsón, Río Negro, Argentina.

heinzle.leila@inta.gov.ar
<https://orcid.org/0000-0002-8174-3097>

⁴ Instituto de Investigaciones Forestales y Agropecuarias de Bariloche (IFAB), Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas - Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria. Agencia de Extensión Rural INTA de El Bolsón. Mármol 1950. 8430. El Bolsón, Río Negro, Argentina.

sison.leandro@inta.gov.ar
<https://orcid.org/0009-0008-2249-1046>

⁵ Instituto de Investigaciones Forestales y Agropecuarias de Bariloche (IFAB), Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas - Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria. Agencia de Extensión Rural INTA de El Bolsón. Mármol 1950. 8430. El Bolsón, Río Negro, Argentina.

cardozo.andrea@inta.gov.ar
<https://orcid.org/0000-0002-9910-826X>

⁶ Instituto de Investigaciones Forestales y Agropecuarias de Bariloche (IFAB), Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas - Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria. Agencia de Extensión Rural INTA de El Bolsón. Mármol 1950. 8430. El Bolsón, Río Negro, Argentina.

chillo.veronica@inta.gov.ar
<https://orcid.org/0000-0003-0902-3044>

⁷ Instituto de Investigaciones Forestales y Agropecuarias de Bariloche (IFAB), Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas - Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria. Modesta Victoria 4450. 8400. Bariloche, Río Negro, Argentina.

elmujtar.veronica@inta.gov.ar
<https://orcid.org/0000-0003-0401-2423>

⁸ Instituto Andino Patagónico de Tecnologías Biológicas y Geoambientales (IPATEC) - Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas - Universidad Nacional del Comahue. Av. Pioneros 2350. CP8400. Bariloche, Río Negro, Argentina.

Universidad Nacional del Comahue, Centro Regional Universitario Bariloche. Quintral 1250. 8400. Bariloche, Río Negro, Argentina.

natifermandez@comahue-conicet.gov.ar
<https://orcid.org/0000-0001-6483-0407>

*Autor de correspondencia:
 mestremc@comahue-conicet.gov.ar

Resumen

La co-innovación en el desarrollo de prácticas productivas que permitan disminuir el uso de insumos externos y ser amigables con el ambiente es una de las principales búsquedas en agroecología. Específicamente, disminuir el uso de fertilizantes importados y/o de síntesis química es una de las principales inquietudes de productores hortícolas de la Comarca Andina del Paralelo 42° en la Patagonia argentina. Este estudio evaluó el impacto de biofertilizantes, derivados de microorganismos de montaña recolectados de bosques nativos, sobre la colonización micorrícica y el rendimiento en cultivos de lechuga y zanahoria. Se evaluó el uso de “bioestimulante” y “supermagro” elaborados artesanalmente en comparación con la fertilización tradicional utilizada en tres chacras: una con manejo convencional y dos con manejo agroecológico. Los resultados mostraron que las chacras agroecológicas presentaron mayores niveles de colonización micorrícica en comparación con la convencional. En lechuga, la aplicación de supermagro incrementó la colonización micorrícica en las chacras agroecológicas, mientras que en zanahoria, los efectos de los distintos tratamientos fueron menos evidentes. El rendimiento de lechuga mostró una ligera disminución con supermagro respecto a la fertilización tradicional del productor o al bioestimulante; mientras que para zanahoria, el bioestimulante favoreció el rendimiento, especialmente en las chacras agroecológicas. El uso de biofertilizantes locales se perfila como una alternativa promisoriosa para mantener o mejorar la productividad de cultivos hortícolas intensivos. Estos bioinsumos no solo fomentan el funcionamiento del suelo, sino que también reducen la dependencia de insumos externos, contribuyendo a una transición hacia prácticas más sostenibles y resilientes.

Palabras clave: biopreparados, hongo micorrícico arbuscular, agroecología, fertilización química, bioinsumos.

Abstract

A main objective of agroecology is the development of productive practices that reduce the use of external inputs and are environmentally friendly. This is achieved through co-innovation. In particular, reducing the use of imported and/or chemically synthesized fertilizers represents

SIEMBRA

<https://revistadigital.uce.edu.ec/index.php/SIEMBRA>

ISSN-e: 2477-8850

Periodicidad: semestral

vol. 11, núm 2, 2024

siembra.fag@uce.edu.ec

DOI: <https://doi.org/10.29166/siembra.v11i2.6815>



Esta obra está bajo una licencia internacional Creative Commons Atribución-NoComercial

a significant concern among vegetable producers in the Andean Region along the 42nd parallel in Argentine Patagonia. This study evaluated the impact of biofertilizers derived from mountain microorganisms collected from native forests on mycorrhizal colonization and from yields from lettuce and carrot crops. The study specifically examined the use of artisanal “bioestimulante” and “supermagro” compared to established farmers’ fertilization practices. Trials were conducted in three fields, one under conventional management and two under agroecological practices. Results demonstrated that agroecological fields exhibited elevated levels of mycorrhizal colonization compared to conventional management. The application of supermagro increased mycorrhizal colonization in agroecological lettuce fields, while the effects of different treatments on carrots were less pronounced. The application of supermagro resulted in a slight reduction in lettuce yield compared to the established farmer’s fertilization or Bioestimulante. Conversely, the bioestimulante treatment demonstrated a favorable impact on carrot yield, particularly in the context of agroecological fields. The utilization of locally sourced biofertilizers represents a promising avenue for maintaining or enhancing the productivity of intensive vegetable crops. These bioinputs enhance soil functionality and reduce reliance on external inputs, contributing to a transition towards more sustainable and resilient practices.

Keywords: bio-preparations, arbuscular mycorrhizal fungi, agroecology, chemical fertilization, bioinputs.

1. Introducción

En la actualidad, uno de los desafíos de la agricultura es disminuir el impacto ambiental negativo generado por el uso de agroquímicos sintéticos sin reducir los rendimientos de producción. Una alternativa ampliamente difundida es el uso de fertilizantes orgánicos y bioinsumos formulados en base a microorganismos que favorezcan el crecimiento vegetal. Esto puede lograrse mediante la aplicación de combinaciones de microorganismos seleccionados que aportan diferentes beneficios al suelo y las plantas (Kumar et al., 2024), o de comunidades de microorganismos presentes en enmiendas orgánicas u otros bioinsumos (Azevedo et al., 2017) que actúan como probióticos para las plantas (Gavelienè et al., 2021). La elaboración artesanal de bioinsumos intraprediales, más conocidos como *biopreparados*, se ha difundido a partir de experiencias y observaciones de los pequeños agricultores que fabrican y aplican estos productos a partir de recetas caseras transmitidas de generación en generación (Venegas-Jaque y Mestre, 2021). La aplicación de biopreparados para mejorar la fertilidad del suelo constituye una práctica de manejo agroecológico clave, ya que contribuye a disminuir la dependencia de insumos externos, bajar los costos de producción y reducir el impacto ambiental asociado al uso de agroquímicos sintéticos (Lassevich et al., 2020). Por ello, su aplicación efectiva contribuye a la construcción de sistemas de producción más sustentables y resilientes (Altieri, 1999). Uno de los componentes cruciales de los biopreparados son los microorganismos, que se introducen con la hojarasca, estiércol, agua u otros insumos utilizados para su elaboración (Restrepo Rivera y Hensel, 2009). Un punto fundamental es que la elaboración *in situ* de biopreparados busca preservar y aprovechar las capacidades de la microbiota nativa de los sitios de producción o la región circundante, la cual se encuentra adaptada a las condiciones ambientales y al ecosistema microbiológico del lugar (Venegas-Jaque et al., 2021). Además de impactar en el crecimiento y rendimiento vegetal, el uso de biopreparados puede afectar las comunidades de microorganismos del suelo asociadas a los cultivos, por ejemplo, las micorrizas.

Las *micorrizas* son una asociación simbiótica mutualista entre las raíces de la mayoría de las plantas vasculares y diferentes hongos del suelo, que se caracterizan por el movimiento bidireccional de nutrientes entre los hongos y la planta que colonizan. Las micorrizas contribuyen al establecimiento y crecimiento de las plantas siendo en muchas ocasiones indispensables para su desarrollo, ya que adquieren una serie de ventajas adaptativas y de resistencia a patógenos y/o condiciones ambientales adversas. Además, los hongos que forman esta simbiosis son capaces de movilizar nutrientes del suelo, por lo que son considerados elementos clave de los ciclos de nutrientes y en diversos procesos ecosistémicos (Smith y Read, 2008). Las micorrizas más abundantes en sistemas naturales y productivos a nivel mundial son las *micorrizas arbusculares*. Dados los diversos beneficios que suelen otorgar a las plantas, los *hongos formadores de micorrizas arbusculares [HMA]* son algunos de los microorganismos más estudiados y utilizados para mejorar y promover el crecimiento vegetal (Adesemoye y Kloepper, 2009), y su presencia en las raíces (colonización micorrícica) está estrechamente ligada a la disponibilidad y balance de nutrientes en el suelo donde se desarrolla la planta (Han et al., 2020).

El presente trabajo se realizó en una región de producción agrícola intensiva de la Patagonia argentina, denominada Comarca Andina del Paralelo 42° [CAP42°]. En esta región los inviernos son fríos y los veranos templados, por lo que los cultivos y la producción en general se ven fuertemente condicionados por la estacio-

nalidad. En la CAP42°, la actividad fruti-hortícola se caracteriza por productores que cultivan diversas especies a pequeña y mediana escala, con un predominio de la producción de tipo familiar y asociativa. Estos productores muestran un gran interés por la implementación de modelos productivos con enfoque agroecológico, con uso reducido o nulo de productos de síntesis química para el manejo de plagas y de la fertilidad del suelo. A partir de la pandemia del SARS-CoV-2 (o COVID-19), cobró mayor importancia la participación activa de los consumidores en la búsqueda de alimentos saludables, mercados de proximidad y/o precios justos, generando oportunidades para valorizar las producciones que son respetuosas con el ambiente, en particular en el plano local (Frank et al., 2022). Paralelamente, la aplicación de biopreparados elaborados a partir de *microorganismos eficientes de montaña [MM]* está cobrando cada vez mayor importancia en la región de la CAP42° (Cardozo et al., 2020). Esto se debe a que es una tecnología de fácil adopción, dada su practicidad de elaboración, el efecto positivo en la productividad vegetal y calidad del suelo, su bajo costo, y su contribución a disminuir la dependencia de insumos externos para la producción. Esta tecnología es ampliamente utilizada en otras regiones del mundo, pero de incipiente desarrollo en la región de la CAP42°, existiendo escasos estudios del impacto que su uso tiene tanto en el suelo y sus microorganismos como en el rendimiento de los cultivos.

En este contexto, el objetivo principal del trabajo fue estudiar el efecto del uso de diferentes biopreparados en la colonización por micorrizas y el rendimiento de cultivos de lechuga y zanahoria, comúnmente producidos en la CAP42°. Se consideró que la colonización por micorrizas es un indicador de buena salud del suelo, del cultivo y de su sanidad. Para ello, se comparó el uso de dos biopreparados formulados en base a MM con respecto a la fertilización usual de cada unidad productiva en dos chacras agroecológicas y una chacra con uso convencional de fertilizantes químicos.

2. Materiales y Métodos

2.1. Área de estudio

El área de estudio corresponde a la Comarca Andina del Paralelo 42° [CAP42°], en la Patagonia argentina. Esta es una unidad territorial ubicada en la zona cordillerana de las provincias de Río Negro y Chubut. Es una región de clima templado-frío, con temperaturas medias de 6,1 °C - 22,6 °C de octubre a marzo y de 1,2 °C - 12,2 °C de abril a septiembre. La precipitación anual es de 900 mm³, con precipitaciones medias de 39 mm³ en primavera-verano y de 113 mm³ en otoño-invierno (Servicio Meteorológico Nacional, 2023). En esta región la temporada de producción hortícola se extiende entre octubre y mayo.

2.2. Elaboración de biopreparados

En la primavera se colectó hojarasca en áreas del bosque andino patagónico, cercano a la ciudad de El Bolsón, Río Negro, Argentina. La elaboración de los biopreparados se realizó en forma secuencial (Figura 1), la hojarasca se utilizó como fuente de microorganismos para la elaboración de MM sólido; el MM sólido se utilizó como precursor para elaborar biofertilizante líquido; y este último se utilizó en la elaboración del supermagro y el bioestimulante.

Para la elaboración de MM *sólido* se utilizaron 60 kg de hojarasca mezclada con 30 kg de semilla de trigo, 5 kg de azúcar y agua hasta alcanzar aproximadamente 40 % de humedad. La preparación se colocó en un contenedor de HDPE de 200 L que se mantuvo a la sombra en un invernadero de estructura metálica con cobertura de policarbonato durante aproximadamente 45 días. El seguimiento del proceso se realizó mediante determinación del pH hasta la madurez (pH cercano a 5,5). Se utilizó este bioinsumo para la preparación del biofertilizante líquido, que se realizó con 5 kg de azúcar de caña disuelta en 200 L de agua, en la que se sumergió una bolsa de tela con 10 kg de MM sólido maduro. Para la elaboración del bioestimulante se utilizaron 5 kg de azúcar, 2 kg de sulfato de magnesio, 300 g de sulfato de potasio, 20 L del biofertilizante líquido preparado previamente, completando con agua hasta alcanzar los 200 L. Finalmente, para la preparación del supermagro se utilizaron 3 L de leche cruda, 50 kg de estiércol fresco de vaca, 8 kg de azúcar, 1 kg de ceniza de madera, 2 kg de sulfato de magnesio, 300 g de sulfato de potasio y 2 L del biofertilizante líquido preparado previamente, completando con agua hasta alcanzar los 200 L. En los tres casos (biofertilizante líquido, bioestimulante y supermagro), se utilizaron contenedores de HDPE de 200 L con trampa de gases, que se mantuvieron a la sombra, y el seguimiento del proceso se realizó mediante determinación del pH hasta la madurez (pH cercano a 3,5),

que demoró aproximadamente 40 días.

2.3. Ensayos agronómicos y aplicación de biopreparados

Se realizaron ensayos agronómicos en lechuga (*Lactuca sativa* var. capitata L.) y en zanahoria (*Daucus carota*) en tres chacras hortícolas diversificadas de la CAP42°. En cada chacra se utilizaron bancales de 8-10 m² por cultivo, organizados en tres bloques de 3 m lineales para cada tratamiento, separados entre sí por 0,5 m de distancia.

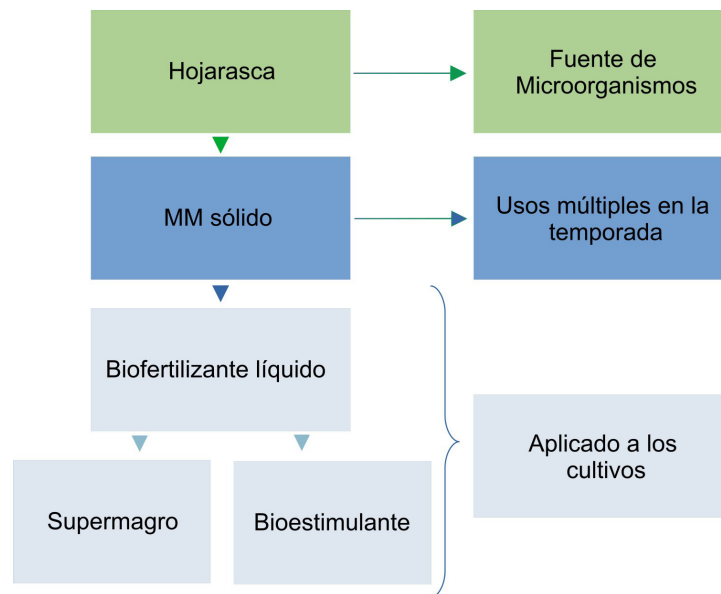


Figura 1. Esquema de elaboración artesanal de los biopreparados intraprediales utilizados en este estudio.
Figure 1. Diagram illustrating artisanal in-farm production of the biopreparations used in the present study.

Para el ensayo de **lechuga** se trabajó en dos de estas chacras ubicadas en el sector de producción hortícola tradicional de la ciudad de El Bolsón: una de ellas con manejo agroecológico [MA1] y la otra con manejo convencional [MC] (Figura 2). En ambas chacras se utilizó el cultivar local de lechuga mantecosa denominado “Mantecosa del Mallín”, partiendo de plantines a razón de 15-18 pl m⁻¹ lineal sembradas a tres bolillos, sumando un total de entre 135 y 162 plantines por chacra. En lechuga, se analizó el primer ciclo de cultivo de la temporada productiva (60 días hasta la cosecha). Para el ensayo de **zanahoria** se trabajó en las dos chacras mencionadas anteriormente y en una tercera rodeada de bosque nativo y con manejo agroecológico reciente [MA2] (Figura 2). Se utilizaron semillas de zanahoria calibradas del semillero Vilmorin-Mikado variedad Nantesa, se sembraron en forma directa cada 3 cm de distancia y se ralearon una vez a mediados del verano (enero), teniendo por bancal cuatro hileras separadas 20 cm entre sí. En este caso, se analizaron las plantas luego de un ciclo productivo completo (140 días hasta la cosecha).

Se consideraron tres tipos de fertilización de los cultivos: la fertilización utilizada tradicionalmente en cada chacra, bioestimulante o supermagro. Las tres chacras de producción tenían diferentes manejos de fertilización (tratamiento tradicional): guano de oveja y guanito pelletizado (fertilizante orgánico 6-15-3 N-P-K) en MA1; guano de oveja en MA2 y fertilizante químico Triple 19 (19-19-19 N-P-K) en MC. La aplicación de los biopreparados al suelo se realizó con regadera, por aplicación quincenal de bioestimulante alternada con aplicaciones quincenales de biofertilizante líquido (tratamiento bioestimulante) o supermagro alternada con aplicaciones quincenales de biofertilizante líquido (tratamiento supermagro).

2.4. Variables consideradas y análisis estadístico

Para evaluar la productividad, se registró el peso fresco de la parte aérea (g) de las lechugas, mientras que para zanahoria se registró el largo (cm), ancho (mm) y peso (g). En ambos casos el rendimiento se expresó como peso promedio (g) por tratamiento. Para analizar la colonización micorrícica, al momento de la cosecha se colectaron las raíces de cinco plantas por tratamiento y chacra y se conservaron en alcohol 70 % hasta realizar

los análisis correspondientes. Las raíces se tiñeron utilizando una modificación sobre la técnica descrita por Phillips y Hayman (1970): clarificación en KOH 10 % por 30 min en baño de agua hirviendo, enjuague con agua, seguida de acidificación con HCl 0,1 N durante 2 min a temperatura ambiente, y tinción con azul tripan 0,05 % por 5 min en baño de agua hirviendo. La colonización micorrícica se cuantificó por el método de interceptación descrito por McGonigle et al. (1990). Para calcular el porcentaje de raíz colonizada, se observaron al menos 300 campos por planta utilizando un microscopio óptico. Se consideró la presencia de arbusculos y vesículas como estructuras diagnósticas de colonización por HMA en las plantas analizadas. En caso de visualizarse estructuras fúngicas intrarradicales no compatibles con micorrizas arbusculares, se registraron como colonización por hongos endófitos radicales [HER].



Figura 2. Fotografía de las tres chacras en las que se realizó el ensayo agrónomo. MA1, chacra con manejo agroecológico; MA2, chacra con manejo agroecológico reciente; MC, chacra con manejo convencional.

Figure 2. Pictures of the three farms where the agronomic trials were conducted. MA1 represents a farm that employs agroecological practices, MA2 depicts a farm that recently adopted such practices, and MC represents a farm that utilizes conventional management techniques.

Se construyeron modelos lineales mixtos generalizados [GLMM] con familia binomial para las variables “colonización por HMA” y “colonización por HER”. La chacra, el tratamiento aplicado y su interacción se incluyeron como variables explicativas. La identificación de la planta se incluyó como un efecto aleatorio; se utilizó la función *cbind* [i.e. *cbind* (número de campos positivos, número total de campos - número de campos positivos)], para asegurar que el modelo representa adecuadamente la naturaleza de los datos. Finalmente, se realizaron comparaciones post hoc de Tukey. Para la evaluación de las variables de productividad de lechuga y zanahoria se realizó una aproximación similar. Se construyeron GLMM para las variables “peso” de lechuga, y para las variables “largo”, “ancho” y “peso” de zanahoria. El tratamiento fue considerado como variable explicativa y la chacra como factor aleatorio.

Todos los análisis estadísticos se realizaron en el software R versión 4.2.2 (R Core Team, 2022). Se utilizó el paquete *lme4* versión 1.1-31 (Bates et al., 2015) para estimar los parámetros del modelo, el paquete *DHARMa* versión 0.4.6 (Hartig, 2020) para verificar los supuestos de los modelos, y el paquete *emmeans* versión 1.8.4-1 para las comparaciones post hoc (Lenth, 2018).

3. Resultados

En **lechuga** se observó que las plantas cultivadas en la chacra con manejo agroecológico [MA1] presentaron un mayor porcentaje promedio de colonización micorrícica (35,5 %) respecto de las cultivadas en la chacra con manejo convencional (MC = 7,4 %). En ambas chacras se halló un efecto significativo de la aplicación de biopreparados sobre la colonización micorrícica, aunque las tendencias fueron opuestas (Figura 3). En MA1, la aplicación de biopreparados incrementó la colonización micorrícica con respecto al manejo de fertilización tradicionalmente aplicado en la chacra, especialmente en el tratamiento con supermagro, mientras que en MC la disminuyó significativamente. No se encontraron diferencias significativas en los porcentajes de colonización por HMA entre la aplicación de bioestimulante y supermagro en ninguna de las chacras analizadas.

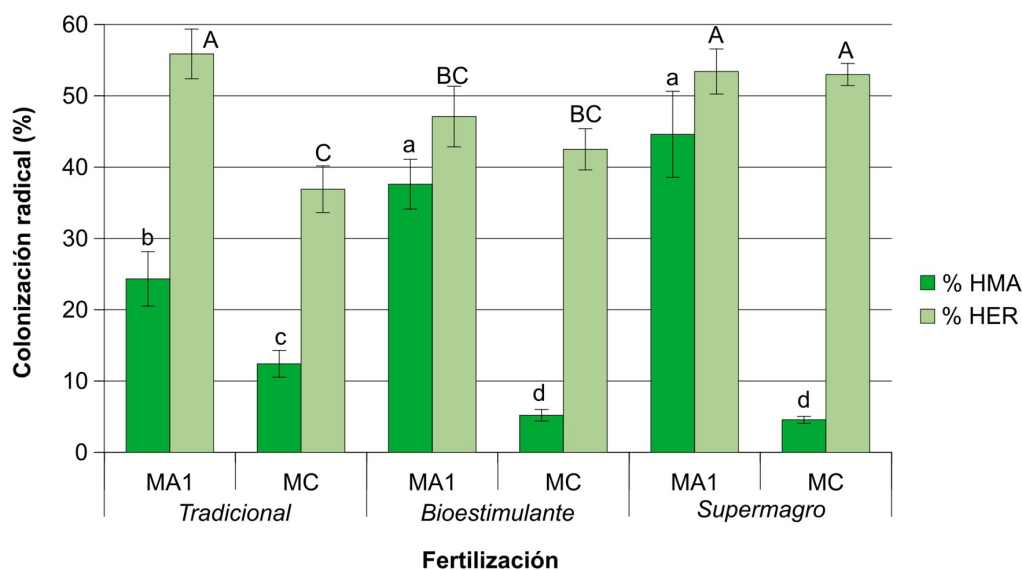


Figura 3. Colonización por hongos formadores de micorrizas arbusculares (%HMA) y hongos endófitos radicales (%HER) en las raíces de lechuga según la fertilización utilizada regularmente en cada chacra (tradicional) o la aplicación de bioestimulante y supermagro en dos establecimientos productivos (MA1 y MC). Las barras indican porcentajes promedio de colonización por HMA y HER por tratamiento ($n = 5$) y las barras de error corresponden al error estándar.

Figure 3. Percentage of roots colonized by arbuscular mycorrhizal fungi (%HMA) and root endophytic fungi (%HER) in lettuce roots according to the fertilization practices employed in each field: Traditional, or the application of Bioestimulante and Supermagro in two production sites (MA1 and MC). Bars represent the mean percentage of HMA and HER colonization per treatment ($n = 5$), and the lines represent the standard error for each treatment.

En ambas chacras también se observó la presencia de HER en las raíces de las lechugas cultivadas (Figura 3). La colonización por HER mostró diferencias significativas para el manejo de la fertilización tradicional de cada chacra, siendo mayor en la chacra con manejo agroecológico (MA1 = 55,88 %) respecto de la chacra con manejo convencional (MC = 36,91 %). En relación con la aplicación de biopreparados, se determinó que los tratamientos con supermagro presentaron valores de colonización por HER, generalmente mayores que aquellos con aplicación de bioestimulante, y también fueron mayores que para la fertilización usual de la chacra con manejo convencional. En esta última se determinó una correlación negativa significativa entre los valores de colonización por HMA y endófitos ($p = -0,519$, $p = 0,047$), indicando que cuanto menores eran los porcentajes de colonización por HMA, mayores eran los de HER.

Respecto del rendimiento, no se encontraron diferencias significativas entre las fertilizaciones aplicadas ($p > 0,05$), y las tendencias fueron diferentes en ambas chacras (Tabla 1). En MA1, las lechugas con aplicación de Supermagro tendieron a presentar pesos menores que las que recibieron bioestimulante o la aplicación tradicional de las chacras, mientras que en MC su peso fue igual o mayor al registrado para la aplicación usual de la chacra.

En el cultivo de **zanahorias** se observó que, en términos generales, las chacras con manejo agroecológico (MA1 y MA2) presentaron mayor colonización por HMA que la chacra MC (Figura 4). En este caso no se hallaron diferencias significativas entre los tratamientos de fertilización aplicados en las diferentes chacras.

La única diferencia encontrada respecto de los tratamientos de fertilización aplicados corresponde a la chacra MA1, donde la aplicación de bioestimulante causó una disminución en la colonización por HMA en comparación con el manejo de fertilidad tradicional de la chacra. A diferencia de las plantas de lechuga, en las de zanahoria no se encontró colonización por HER.

Tabla 1. Rendimiento de lechuga como peso fresco en gramos utilizando la fertilización aplicada regularmente en cada chacra (tradicional), bioestimulante o supermagro en dos chacras productivas (MA1 y MC).
Table 1. Lettuce yield measured as fresh weight in grams, using the established farmer's fertilization treatment-Traditional, Bioestimulante or Supermagro in two productive farms (MA1 and MC).

Fertilización	Manejo	Peso (g)
Tradicional	MA1	155,1 ± 67,3
	MC	135,9 ± 65,1
Promedio		145,5
Bioestimulante	MA1	139,0 ± 67,4
	MC	125,2 ± 46,1
Promedio		132,10
Supermagro	MA1	106,9 ± 49,1
	MC	146,2 ± 47,1
Promedio		126,55

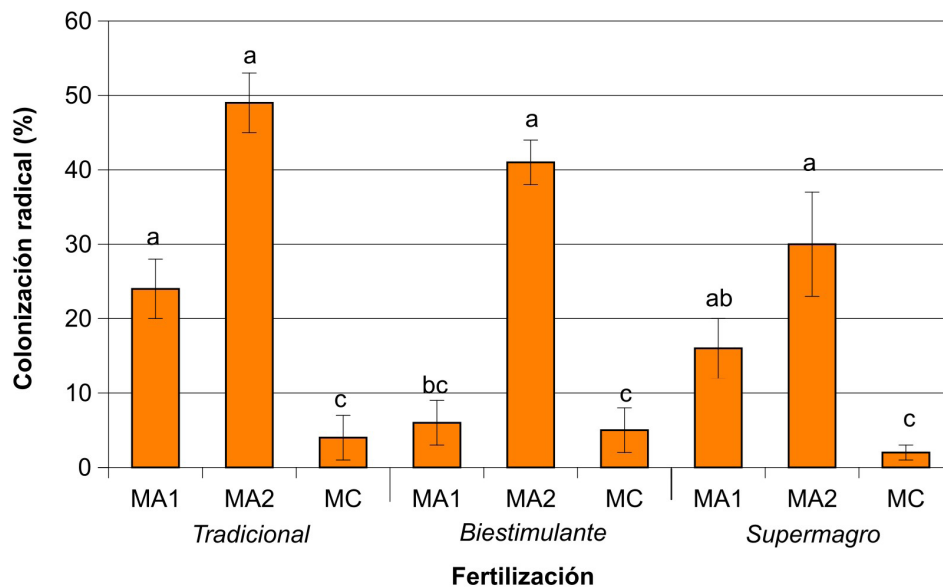


Figura 4. Colonización por hongos formadores de micorrizas arbusculares (%HMA) en las raíces de zanahoria, según la fertilización utilizada regularmente en cada chacra (tradicional), bioestimulante o supermagro en tres establecimientos productivos (MA1, MA2 y MC). No se observó colonización de hongos endófitos radicales (%HER) en las plantas de zanahoria. Las barras indican porcentajes promedio de colonización por HMA y HER por tratamiento (n = 5) y las barras de error corresponden al error estándar.

Figure 4. Percentage of carrot plant roots colonized by arbuscular mycorrhizal fungi (%HMA) determined using the established farmer's fertilization method-Traditional, Bioestimulante, or Supermagro in three productive farms (MA1, MA2, and MC). Root endophytes (%HER) were not observed in any carrot plant. Bars represent the mean percentage of HMA and HER colonization per treatment (n = 5), and the lines represent the standard error for each treatment.

Respecto del rendimiento de zanahorias, se encontraron diferencias significativas entre tratamientos para las tres variables evaluadas, siendo el bioestimulante el tratamiento que produjo mayor productividad en las tres chacras, tanto para peso ($p < 0,01$), como para largo ($p < 0,01$) y ancho de las zanahorias ($p < 0,01$). La variable de mayor importancia productiva, el peso promedio en gramos por zanahoria, fue la que mayor variabilidad mostró entre las chacras (Tabla 2).

Tabla 2. Productividad de zanahorias utilizando la fertilización aplicada regularmente en cada chacra (tradicional), bioestimulante o supermagro.**Table 2.** Carrot productivity using the established farmer's fertilization (Tradicional), Bioestimulante or Supermagro.

Fertilización	Manejo	Peso (gr)	Largo (cm)	Ancho (cm)
Tradicional	MA1	108,6 ± 33,6	16,8 ± 0,92	3,2 ± 0,42
	MA2	109,8 ± 83,2	13,6 ± 1,31	3,8 ± 1,08
	MC	95,8 ± 48,7	14,8 ± 1,83	3,3 ± 0,68
	<i>Promedio</i>	<i>104,7</i>	<i>15,1</i>	<i>3,4</i>
Bioestimulante	MA1	174,0 ± 50,5	18,5 ± 2,42	4,1 ± 0,54
	MA2	145,4 ± 46,1	16,6 ± 1,96	3,9 ± 0,54
	MC	91,0 ± 47,6	16,5 ± 1,61	3,0 ± 0,56
	<i>Promedio</i>	<i>136,8</i>	<i>17,2</i>	<i>3,7</i>
Supermagro	MA1	130,0 ± 34,2	17,8 ± 1,65	3,6 ± 0,58
	MA2	118,4 ± 33,1	15,8 ± 1,11	3,7 ± 0,51
	MC	67,4 ± 24,9	14,1 ± 1,58	2,7 ± 0,43
	<i>Promedio</i>	<i>105,3</i>	<i>15,9</i>	<i>3,3</i>

* En negrita se resaltan los valores promedio significativamente diferentes entre tipos de fertilización. / Results presented in bold highlight significant differences between fertilization treatments.

4. Discusión

Los resultados de este trabajo muestran que la historia de uso del suelo tiene un efecto importante en la colonización por hongos micorrícicos arbusculares [%HMA] y por hongos endófitos radicales [%HER] de las plantas producidas, a veces incluso mayor al efecto de los biopreparados aplicados. En este trabajo no se utilizó inoculación con HMA y ninguno de los establecimientos productivos tenían historia de aplicación de este tipo de bioinsumos. Por este motivo, las micorrizas arbusculares y los HER observados en las raíces de lechuga y zanahoria corresponden a las poblaciones naturales que habitan los suelos de cada chacra. Sin embargo, no se descarta la posibilidad de que los biopreparados aporten esporas de HMA, originalmente presentes en la hojarasca utilizada en la elaboración. La ausencia de colonización por HER en zanahoria contrasta con los porcentajes elevados observados en lechuga. Es posible que las diferencias en la morfología, química radicular y exudados determinen que las raíces de zanahoria en el contexto estudiado sean menos favorables para la colonización por HER en comparación con la lechuga (Smith y Read, 2008), ya que la ausencia de esta colonización fue independiente de la historia de uso del sitio y del tratamiento recibido.

Tanto para lechuga como para zanahoria los porcentajes de colonización por HMA en la chacra que utiliza manejo convencional fueron menores que en las chacras con manejo agroecológico, y la misma tendencia se observó para los HER en lechuga. Se ha determinado que la fertilización química, como la utilizada en la chacra de manejo convencional, tiende a disminuir la colonización por HMA, dado que aporta nutrientes de fácil absorción, y a reducir la necesidad de la planta de formar esta simbiosis, alterando así el ambiente del suelo de manera adversa para estos hongos (Fioroni et al., 2024; Han et al., 2020; Treseder, 2004), lo cual coincide con lo observado en este trabajo. Por otro lado, si bien los HMA residen en el suelo en forma de esporas, estos requieren colonizar las raíces de plantas hospedadoras para completar su ciclo de vida y reproducirse (Smith y Read 2008). Por ende, en suelos altamente modificados por el uso repetido de fertilización química y labranza, en el que además se desarrollan plantas que presentan una menor micorrización, es posible que estos hongos no puedan cumplimentar su ciclo de vida o reproducirse activamente, lo que podría haber llevado a la disminución de la comunidad de HMA, e incluso de HER, en la chacra con manejo convencional. En este sentido, se observó que en la chacra con manejo agroecológico más reciente [MA2] y que se encuentra rodeada por vegetación nativa, las zanahorias presentaron niveles de colonización mayores que en las otras chacras. Esto se asociaría al hecho de que este suelo, con una historia más reciente de uso productivo, aún retenga propiedades del suelo nativo, que tiene una gran abundancia de plantas que forman micorrizas arbusculares (Fontenla et al., 2022) y por tanto una gran disponibilidad de inóculo de HMA capaces de colonizar las plantas producidas.

El efecto de cada biofertilizante sobre la colonización por HMA y por HER estuvo directamente asociado al establecimiento productivo y al tipo de cultivo. Por ejemplo, la aplicación de supermagro tiene efectos positivos en la colonización micorrícica o de HER en lechugas cultivadas en la chacra con manejo agroecológico respecto de la fertilización tradicional de la chacra o de la aplicación de bioestimulante, respectivamente, pero este efecto no se repitió en zanahorias. Otros investigadores observaron que la aplicación de un fertilizante líquido, similar al supermagro utilizado en este trabajo, estimuló la colonización micorrícica en poroto (*Phaseolus vulgaris*) en forma dependiente de la dosis (Azevedo et al., 2017). Por lo tanto, es posible que para promover la colonización por HMA o HER, la dosis de supermagro aplicado (que en este caso fue igual en todas las chacras) deba ajustarse considerando las características fisicoquímicas de los suelos de cada sitio productivo y la especie cultivada.

Desde el punto de vista de los rendimientos, la respuesta al manejo de fertilización fue diferente entre cultivos. En lechuga, bajo la aplicación de supermagro se observó una tendencia a la reducción del rendimiento respecto del manejo tradicional de la chacra o de la aplicación de bioestimulante. En la chacra con manejo convencional [MC], el rendimiento de la producción de lechuga y zanahoria fue similar con cualquiera de los tratamientos de fertilización. En el caso del cultivo de zanahorias, la aplicación de bioestimulante tuvo efectos positivos sobre los tres indicadores de rendimiento, alcanzando los mayores valores en las chacras con manejo agroecológico. Gaveliené et al. (2021) observaron también un efecto positivo del uso de bioestimulantes elaborados a base de sales minerales y microorganismos eficientes sobre el crecimiento de zanahorias (largo, ancho y peso fresco).

En las chacras con manejo agroecológico los niveles de colonización micorrícica no acompañan los niveles de producción de zanahoria. En particular en la chacra de manejo agroecológico con mayor historia de uso del suelo [MA2], la aplicación de bioestimulante resultó en valores de colonización por HMA similares a los valores de la chacra de manejo convencional, pero con rendimientos mayores. Es importante considerar que la relación entre colonización micorrícica y rendimiento de cultivo es indirecta y atravesada por numerosos factores, como, por ejemplo, el tipo de suelo, la historia de uso, la disponibilidad de nutrientes y la interacción con otros microorganismos promotores de crecimiento vegetal presentes en el suelo (Kumar et al., 2024). Además, los biopreparados utilizados podrían aportar microorganismos que regulen o modulen la colonización por HMA o HER, y también tener efectos directos sobre el crecimiento de la planta, como, por ejemplo, bacterias capaces de solubilizar fosfato. Todavía falta avanzar sobre el análisis de las comunidades microbianas presentes en cada uno de los biopreparados utilizados en este trabajo. El efecto casi contrapuesto de los tratamientos de fertilización sobre la colonización micorrícica y el rendimiento de lechuga y zanahoria podría atribuirse al balance general de nutrientes en el suelo y la planta. La planta regula el establecimiento de la colonización micorrícica (Mestre et al., 2022) en función de la disponibilidad de nutrientes (Han et al., 2020). Ante la falta de nutrientes esenciales la planta propicia la colonización micorrícica, pero el establecimiento de esta simbiosis implica la asignación de carbono para el funcionamiento de la micorriza que no es utilizado en crecimiento de biomasa (Han et al., 2020). De todas formas, cabe resaltar que la fertilización aportada por los biopreparados es suficiente para el crecimiento de los cultivos a niveles comparables con la fertilización tradicional de las chacras o incluso mayores, independientemente de los niveles de colonización micorrícica.

5. Conclusiones

En este trabajo se pudo mostrar que el uso de biofertilizantes artesanales de elaboración intrapredial (biopreparados) permite obtener rendimientos de cultivo similares a los obtenidos con fertilizaciones químicas, a la vez que preserva la colonización por hongos formadores de micorrizas arbusculares. Se observaron respuestas diferentes de los cultivos a los distintos biopreparados, asociadas entre otros factores a la historia de uso del suelo de cada establecimiento productivo. Esto apoya la idea de avanzar hacia una agricultura de diseño, donde se ajustan las prácticas y manejos a las necesidades a nivel predial.

El uso de biofertilizantes de producción propia representa una buena alternativa para mantener o mejorar el rendimiento de la producción de lechuga y zanahoria. Además, se presenta como una oportunidad para estimular y/o recuperar la microbiota natural del suelo en predios con larga historia de manejo convencional de la fertilización. En resumen, la investigación subraya la viabilidad y beneficios de incorporar biofertilizantes en sistemas agrícolas, especialmente en contextos periféricos como valles de la Patagonia, con uso intensivo de la tierra, donde promueven la salud del suelo y la eficiencia en el uso de recursos locales.

Agradecimientos

Los autores agradecen a la Tec. E. Trejo por la elaboración y las aplicaciones de los biofertilizantes, y a la Dra. A. Carrón por la colaboración en la cuantificación de micorrizas. A las y los productores hortícolas por la disposición y por abrir las puertas de sus chacras. A la provincia de Río Negro (Argentina) por otorgar el permiso de investigación correspondiente (RS-2023-00204709-GDERNE-SAYCC#SGG).

Financiamiento

Este trabajo fue financiado por el Fondo para la Investigación Científica y Tecnológica (FONCYT) de Argentina, bajo el proyecto PICT APLICADOS CATEGORÍA I- 00135.

Contribuciones de los autores

- María Cecilia Mestre: conceptualización, adquisición de fondos, investigación, administración del proyecto, visualización, redacción – borrador original.
- Facundo Fioroni: análisis formal, investigación, redacción – borrador original.
- Leila Yamila Heinzle: investigación, redacción – borrador original.
- Leandro Sisón-Cáceres: investigación, redacción – borrador original.
- Andrea Cardozo: conceptualización, adquisición de fondos, investigación, redacción – revisión y edición.
- Verónica Chillo: conceptualización, análisis formal, adquisición de fondos, investigación, redacción – borrador original.
- Verónica El-Mujtar: conceptualización, adquisición de fondos, investigación, redacción – revisión y edición.
- Natalia Fernández: conceptualización, adquisición de fondos, investigación, redacción – revisión y edición.

Implicaciones éticas

Los autores declaran que no existen implicaciones éticas.

Conflicto de interés

Los autores declaran que no existen conflictos de interés financieros o no financieros que podrían haber influido en el trabajo presentado en este artículo.

Referencias

- Adesemoye, A. O., y Kloepper, J. W. (2009). Plant–microbes interactions in enhanced fertilizer-use efficiency. *Applied microbiology and biotechnology*, 85(1), 1-12. <https://doi.org/10.1007/s00253-009-2196-0>
- Altieri, M. A. (1999). *Agroecología. Bases científicas para una agricultura sustentable*. Nordan Comunidad. <https://agroeco.org/wp-content/uploads/2010/10/Libro-Agroecologia.pdf>
- Azevedo, L. C. B., Braga Bertini, S. C., Ferreira, B. S., Carneiro, I. S. M., y Dornelles, M. S. (2017). Liquid organic fertilizer sprayed on shoots of *Phaseolus vulgaris* stimulates arbuscular mycorrhiza colonization and phosphate solubilizing microorganisms in soil. *Archives of Agronomy and Soil Science*, 63(10), 1382-1389. <https://doi.org/10.1080/03650340.2017.1281391>
- Bates, D., Mächler, M., Bolker, B., y Walker, S. (2015). Fitting Linear Mixed-Effects Models using lme4. *Journal of Statistical Software*, 67(1), 1-48. <https://doi.org/10.18637/jss.v067.i01>
- Cardozo, A., El Mujtar, V. A., y Alvarez, V. E. (2020). *Elaboración de Biofertilizantes a partir de microorga-*

- nismos del bosque*. INTA-FONTAGRO. <http://hdl.handle.net/20.500.12123/8444>
- Fioroni, F., Naón, S., Fernández, N. V., y Garibaldi, L. A. (2024). The growth and mycorrhization of young *Berberis microphylla* G. Forst. plants are differently affected by organic and inorganic fertilizers, depending on the substrate. *Symbiosis*, 93(1), 69-80. <https://doi.org/10.1007/s13199-024-00990-8>
- Fontenla, S. B., Fernández, N. V., Mestre, M. C., y Puntieri, J. P. (2022). Current knowledge on mycorrhizal symbiosis and endophytes in Northwest Patagonia, Argentina. En M. A. Lugo, y M. C. Pagano (eds.), *Mycorrhizal Fungi in South America: Biodiversity, Conservation, and Sustainable Food Production* (pp. 255-279). Springer Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-031-12994-0_13
- Frank, M., Kaufmann, B., Ejarque, M., Lamaison, M. G., Nessi, M. V., y Amoroso, M. M. (2022). Changing conditions for local food actors to operate towards agroecology during the COVID-19 pandemic. *Frontiers in sustainable food systems*, 6, 866004. <https://doi.org/10.3389/fsufs.2022.866004>
- Gavelienè, V., Šocik, B., Jankovska-Bortkevič, E., y Jurkonienè, S. (2021). Plant microbial biostimulants as a promising tool to enhance the productivity and quality of carrot root crops. *Microorganisms*, 9(9), 1850. <https://doi.org/10.3390/microorganisms9091850>
- Han, Y., Feng, J., Han, M., y Zhu, B. (2020). Responses of arbuscular mycorrhizal fungi to nitrogen addition: a meta-analysis. *Global Change Biology*, 26(12), 7229-7241. <https://doi.org/10.1111/gcb.15369>
- Hartig, F. (2020). *DHARMA: residual diagnostics for hierarchical (multi-level/mixed) regression models*. R package version 0.3. 3.0. <https://cran.r-project.org/web/packages/DHARMA/vignettes/DHARMA.html>
- Kumar, T., Devi, R. A., y Kumar, A. (2024) Comparative studies on the effect of various biofertilizers on the growth, yield, and quality of carrot (*Daucus carota* L.). *Ecology, Environment and Conservation*, 30, S169-S173. <http://doi.org/10.53550/EEC.2024.v30i01s.032>
- Lassevich, D., Trasante, T., García, S., Platero, R., y Bajsa, N. (2020). Caracterización y evaluación agronómica de tres biopreparados: bokashi, supermagro y microorganismos eficientes nativos. *Cadernos de Agroecología*, 15(2). <https://cadernos.aba-agroecologia.org.br/cadernos/article/view/4108>
- Lenth, R. (2018). *emmeans: Estimated Margin2l Means, aka Least-Squares Means*. R package version 1.10.3.90006, <https://rvlenth.github.io/emmeans/>
- McGonigle, T. P., Miller, M. H., Evans, D. G., Fairchild, G. L., y Swan, J. A. (1990). A new method which gives an objective measure of colonization of roots by vesicular-arbuscular mycorrhizal fungi. *New Phytologist*, 115(3), 495-501. <https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.1990.tb00476.x>
- Mestre, M. C., Tamayo Navarrete, M. I., y García Garrido, J. M. (2022). Exploring the yeast-mycorrhiza-plant interaction: *Saccharomyces eubayanus* negative effects on arbuscular mycorrhizal formation in tomato plants. *Plant and Soil*, 479(1), 529-542. <https://doi.org/10.1007/s11104-022-05538-7>
- 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. [https://doi.org/10.1016/S0007-1536\(70\)80110-3](https://doi.org/10.1016/S0007-1536(70)80110-3)
- R Core Team. (2022). R: A Language and Environment for Statistical Computing. R Foundation for Statistical Computing. <https://www.R-project.org/>
- Restrepo Rivera, J., y Hensel, J. (2009). *Manual práctico de agricultura orgánica y panes de piedra*. Corporación Autónoma Regional de Risaralda.
- Servicio Meteorológico Nacional. (2023). *Características: Estadísticas de largo plazo*. <https://www.smn.gov.ar/estadisticas>
- Smith, S. E., y Read, D. (2008). *Mycorrhizal Symbiosis* (3rd ed.). Academic Press. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-370526-6.X5001-6>
- Treseder, K. K. (2004). A meta-analysis of mycorrhizal responses to nitrogen, phosphorus, and atmospheric CO₂ in field studies. *New phytologist*, 164(2), 347-355. <https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.2004.01159.x>
- Venegas-Jaque, P., Cardozo, A., Sisón Cáceres, L. A., y Gasparetti, A. F. (2021). *Elaboración de Biopreparados a partir de microorganismos del bosque para la producción frutihortícola de la Comarca Andina del paralelo 42°*. Comunicación técnica. EEA Bariloche. Agencias de Extensión Rural. AER El Bolsón; no. 91. <http://hdl.handle.net/20.500.12123/9881>
- Venegas-Jaque, P., y Mestre, M. C. (2021). Hacia una fertilización sustentable. Los microorganismos del suelo son esenciales en los ecosistemas naturales. Entonces vale preguntarse, ¿cómo aprovecharlos en la agricultura para abrir camino hacia producciones afines con el entorno socioambiental?. *Desde La Patagonia. Difundiendo Saberes*, 18(32), 2-9. <https://revela.uncoma.edu.ar/index.php/desdelapatagonia/article/view/3640>