



universidad  
de león



**FACULTAD DE CIENCIAS BIOLÓGICAS Y AMBIENTALES**

**MICORRIZAS APLICADAS EN AGRICULTURA:  
UNA ALTERNATIVA**

**MYCORRHIZAE APPLIED IN AGRICULTURE:  
AN ALTERNATIVE**

**Autor:** Carlos Verdugo Arranz

**Tutor:** Ana B. Fernández Salegui

**GRADO EN CIENCIAS AMBIENTALES**

**Julio, 2022**

## Índice

1.- INTRODUCCIÓN .....	1
1.1. MICORRIZAS.....	1
1.2. TIPOS DE MICORRIZAS .....	2
1.3. PROBLEMÁTICA EN AGRICULTURA ECOLÓGICA .....	6
1.4. JUSTIFICACIÓN .....	9
2.- OBJETIVOS E HIPÓTESIS .....	10
3.- MATERIAL Y MÉTODOS .....	10
4.- RESULTADOS Y DISCUSIÓN .....	11
4.1.- APLICACIONES .....	12
4.2.- CULTIVOS Y ESPECIES FÚNGICAS .....	16
4.2.1- ESPECIES FÚNGICAS .....	16
4.2.2- ESPECIES VEGETALES .....	18
4.3.- SITUACIÓN ACTUAL DEL EMPLEO DE MICORRIZAS EN AGRICULTURA .	21
5.- CONCLUSIONES .....	23
6.- REFERENCIAS.....	24

## RESUMEN

Las interacciones entre plantas y hongos llevan dándose desde prácticamente la colonización de las primeras de la superficie terrestre, es más, los ecosistemas no serían como hoy los conocemos sin estas interacciones. Las micorrizas son asociaciones simbióticas entre unos hongos específicos y la mayoría de las raíces de las plantas. Por su parte, el empleo de las micorrizas en agricultura aún está por desarrollar, por lo que en este trabajo se recoge, sintetizada, la información disponible en la bibliografía global de los últimos 13 años. Así, podemos tener una visión panorámica de los efectos que tienen las diferentes micorrizas sobre los cultivos simbioses, respecto a los factores bióticos propios de las micorrizas y abióticos. Las interacciones entre hongos y plantas pueden conferir a los cultivos un grado de desarrollo equiparable al empleo de insumos químicos. En agricultura ecológica, se proponen este tipo de técnicas como una alternativa.

Estudiando e implementando esta capacidad natural de los organismos para asociarse, se pueden conseguir avances importantes en el reto que supone la creciente demanda de alimentos, presentándose así las micorrizas como una alternativa sostenible para afrontar el futuro, fijando el objetivo en propiciar el equilibrio de los ecosistemas, para que las especies, incluida la nuestra, sean resilientes y viables.

Palabras clave: Agricultura, endomicorrizas, micorrizas, restauración, rizosfera.

## ABSTRACT

The plants and fungi interactions exist since the first earth surface colonization carried out by the plants. The ecosystems will be very different as they are nowadays without this interactions. The mycorrhizae are symbiotic association between a specific type of fungi and the majority of the plant's root system. The use of mycorrhizae in agriculture is still undeveloped. This paper summarizes the global documentation of the subject in the last 13 years. The purpose of this paper is to provide a wide picture of the types of mycorrhizae and their effects on the industrial crops. The propension of the mycorrhizae fungi to colonise the plants is also summarized. The plant-fungi interactions may provide a similar development as the provided by the equivalent chemical products. One of the lines of work in organic agriculture is the use of mycorrhizae as substitute of the chemical inputs. This is conditioned by the region climate, soil composition, and the type and variant of the mycorrhizae.

The growing world population creates a growing food demand. The study, development and implementation of this techniques will provide a sustainable source of food. This will also keep the sustainability of the world ecosystems and the species contained in them, including the human being.

Key words: Endomycorrhizae, farming, mycorrhizae, rhizosphere, restoration.



# 1.- INTRODUCCIÓN

En la actualidad la agricultura depende, en gran medida, del uso de fertilizantes químicos y fitosanitarios; en este sentido, la agricultura ecológica se presenta como una alternativa a este escenario, empleando técnicas más sostenibles y respetuosas con el medio ambiente. Para ello, un buen conocimiento de la rizosfera ayuda a minimizar costes y sacar el mayor partido posible a los cultivos. Se conoce como rizosfera al ambiente dinámico generado por las comunidades microbianas en su interacción con las raíces y el suelo. Este término fue acuñado en 1904 por el científico alemán Lorenz Hiltner. Actualmente, la mejora en el conocimiento de estas interacciones entre microorganismos, suelo y planta, se reconoce como imprescindible para el desarrollo sostenible de los agrosistemas, la fertilidad del suelo y la producción de cultivos (Johansson *et al.*, 2004; Maldonado, 2010).

Pese a todo, aun se considera en muchas ocasiones que las plantas son organismos aislados. Esto no es así, sino que están inmersos en un suelo en el que existen gran cantidad de interacciones entre los diferentes actores que tienen a este como soporte, como artrópodos, anélidos y demás microfauna, comunidades bacterianas y fúngicas (donde se enmarcan las micorrizas), entre otros. Por ello es especialmente interesante conocer cómo funcionan dichas interacciones con el objeto de propiciar y/o potenciar aquellas favorables a los cultivos.

## 1.1. MICORRIZAS

Las micorrizas son asociaciones simbióticas mutualistas entre ciertos hongos del suelo y la mayoría de raíces de plantas. Su nombre proviene del griego *Mykes*=hongo y del latín *Rhiza*=raíz y parece ser una evolución como mecanismo de supervivencia para ambos, dándoles oportunidad de sobrevivir en ambientes y condiciones no favorables (Björkman, 1970).

Esta asociación micorrícica se presenta en la mayoría de raíces de la vegetación mundial, Trappe (1981) estima que el 95% de las especies vasculares presentan micorrizas, aunque este tipo de interacción la podemos encontrar desde los organismos menos desarrollados como los briófitos hasta las especies vasculares más desarrolladas. Otros autores concluyen que todas las gimnospermas lo presentan, así como el 83% de las dicotiledóneas y el 79% de las monocotiledóneas (Wilcox, 1989). El término fue aplicado por primera vez para describir las interacciones entre plantas terrestres y determinados hongos del suelo, y fue descrito por el alemán Albert Bernard Frank en 1885.

La interacción entre el hongo y la planta se basa en una reciprocidad beneficiosa para ambos organismos (Fernández, 2008):

- Como beneficios para las plantas, los hongos micorrícicos protegen la raíz de la infección de otros hongos perjudiciales, al tener el nicho ocupado, otros hongos no pueden acceder. Además, las hifas o mantos hifales (en el caso de aparecer) generan un ambiente en la rizosfera capaz de mantener mejor la humedad y evita, a causa de mejorar el drenaje, la lixiviación de nutrientes. Otro aporte beneficioso de estos hongos es que, al generar estructuras a través de sus hifas, llegan a lugares del suelo donde las raíces no pueden, por lo que el acceso a agua y nutrientes por parte de la planta también se incrementa. Por último, se sabe también que debido a la presencia de ciertos hongos micorrícicos se estimulan otros agentes (bacterias, otros hongos no micorrícicos, microfauna) presentes en la rizosfera que segregan hormonas vegetales que promueven el crecimiento de la planta o bien segregan otro tipo de sustancias que alteran la estructura de algunos nutrientes en formas complejas, degradándolos parcialmente y poniéndoles así a disposición de la planta. Con todo ello, el desarrollo tanto aéreo como subterráneo de las plantas micorrizadas se multiplica frente a las plantas no micorrizadas.
- Por su parte, la planta provee al hongo de fotosintatos como glucosa y fructosa, que le proveen de la materia orgánica necesaria para su desarrollo.

## 1.2. TIPOS DE MICORRIZAS

Fue el mismo patólogo alemán, Frank, quien también en el año 1985 propuso la primera clasificación de estos hongos, dividiéndolos en micorrizas ectótrofas y endótrofas. Posteriormente, Melin (1923) propuso redefinir los términos como micorriza ectoendotrófica y pseudomicorriza, pero esta redefinición generó gran cantidad de confusiones y, décadas más tarde, Peyronel *et al.* (1969) propusieron los términos que se emplean en la actualidad: Endomicorrizas, ectomicorrizas y ectoendomicorrizas, siendo finalmente considerados estos últimos como un subgrupo dentro de las endomicorrizas.

Por lo tanto, podemos clasificar las micorrizas en dos grandes grupos (Figura 1):

- **Ectomicorrizas**, cuya característica definitoria por excelencia es la no penetración de las hifas del hongo en las células de la raíz del hospedador (Figura 2). En este tipo de micorrizas, se forman unas estructuras específicas denominadas:

a.- Manto hifal, que rodea la raíz y que no es otra cosa que una cubierta o capa que recubre la parte externa de las raíces de las plantas hospedadoras

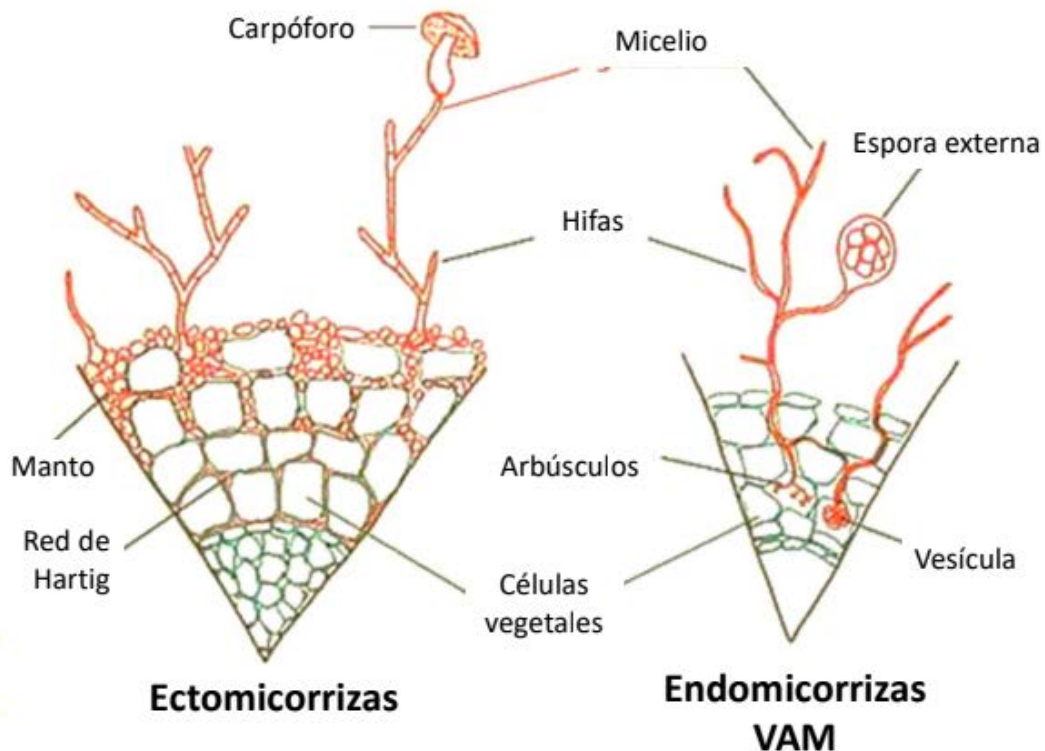


Figura 1. Diferencias en la colonización y desarrollo entre ectomicorrizas y endomicorrizas. Fuente: Australian Centre for International Agricultural Research (Brundrett *et al.*, 1996).

b.- Red de Hartig (Hartig, 1878), que es un entramado de hifas (filamentos fúngicos) que recorren los intersticios de las células dentro de la raíz, pero sin penetrar dentro de las células vegetales. Las divisiones de hongos que forman este tipo de asociación son las Ascomycotas y las Basidiomycotas, y sus hospedadores son árboles y arbustos, por lo que es una clase de hongos con gran interés forestal (Tabla 1).

- **Endomicorrizas**, que son el otro gran grupo planteado para la división del complejo mundo que representan las micorrizas. Este grupo es el que mayor presencia tiene en los ecosistemas (Cué y Torres, 2014) y a su vez se divide en seis subgrupos (Tabla 1, Figura 2):

- **Ectendomicorrizas**, que aun siendo un subgrupo de las endomicorrizas queda considerado, por sus diferencias significativas, como un grupo en la clasificación propuesta por Peyronel *et al.* (1969). Se caracteriza porque las hifas del micelio sí que penetran en las células vegetales de la raíz, formando unos ovillos en espiral conocidos como arbúsculos y cuya función es el intercambio de nutrientes entre el hongo y la planta. Esta información está apoyada también por trabajos bastante anteriores como los de Gallaud en 1905. Además, puede presentar o no manto hifal; este subgrupo, las ectoendomicorrizas, engloba las divisiones Ascomycota y Basidiomycota (comunes con las ectomicorrizas pero con la peculiaridad de que hay ocasiones en las que no se forma el manto hifal) y micorriza árboles y arbustos, por lo que también tiene gran interés forestal (Fernández, 2008; Franco, 2019) (Tabla 1).
- **Endomicorrizas Arbutoides**, que además de formar ovillos en espiral dentro de las células de la raíz (arbúsculos), forman manto hifal. Los *Basidiomycetes* son la división de hongo que presenta este tipo de endomicorriza y, en este caso, sólo colonizan especies del orden de los Ericales.
- **Endomicorrizas Monotropoides**, presentan manto hifal de micelio casi incoloro, y forma haustorios (que son estructuras que algunos hongos introducen en las células vegetales de su hospedador sin romper la membrana plasmática para alimentarse), sin ramificación dentro de las células de la raíz, la división de hongos micorrícicos monotropoides son también *Basidiomycetes* pero en este caso sólo micorriza dentro de los ericales con representantes de la familia Monotropaceae.
- **Endomicorrizas Ericoides**, cuyo micelio forma ovillos espirales (arbúsculos) dentro de las células de la raíz; los *Ascomycetes* son los hongos micorrícicos de este subgrupo (aunque hay excepciones en los que también se encuentran hongos de la división *Ascomycetes*) y únicamente colonizan a plantas del orden de los Ericales.
- **Endomicorrizas Orquidioides**, son otro de los subgrupos que no presenta manto hifal, ni ovillos en espiral ni haustorios dentro de las células, el micelio es casi incoloro; estos hongos sólo micorrizan con orquídeas (familia *Orchidaceae*) y son de la división *Basidiomycetes*.



○ **Endomicorrizas Arbusculares**, no presentan manto hifal pero sí que presentan haustorios de fina ramificación u ovollos en espiral, los denominados arbusculos dentro de las células. Estos arbusculos son zonas de alta actividad metabólica. Además, pueden presentar o no vesículas en o entre las células de la raíz, que son estructuras de almacenamiento de sustancias lipídicas (Aguilera *et al.*, 2007). Los hongos micorrícicos de este subgrupo son los de la división *Glomeromycota*. Este grupo está conformado por unos pocos géneros (34), y poco más de 300 especies que se unen a gran cantidad de raíces de plantas (se calcula que el 80% de las plantas terrestres conocidas a día de hoy presentan micorrizas debido a estos hongos), desde árboles y arbustos hasta gramíneas, herbáceas, incluso en musgos y helechos. El orden de los Glomerales, que comprende 146 especies, es el más ampliamente reconocido por sus actuales y potenciales usos en agricultura. Se conocen también como micorrizas formadoras vesículo arbusculares o VAM.

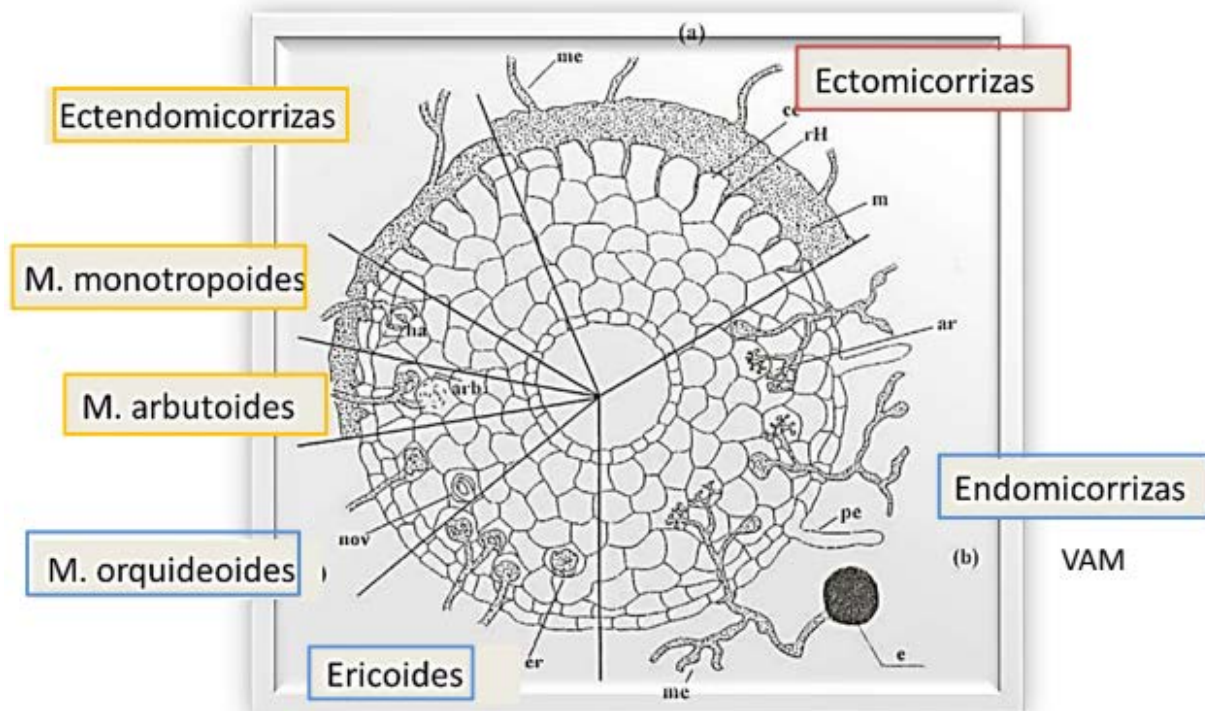


Figura 2. Tipos de hongos micorrizógenos según su forma de colonización. Fuente: Australian Centre for International Agricultural Research. (Brundrett et al., 1996)

Las micorrizas son un ejemplo de cómo podemos atender algunas de estas interacciones para conseguir un suelo más sano y productivo, desencadenando una serie de procesos que finalmente confieren mayor calidad, salud y concentración de nutrientes asimilables por las plantas, reduciendo si no eliminando los aportes de compuestos sintéticos. Por ello, las micorrizas abren la puerta a un sinfín de aplicaciones, desde el control y recuperación de suelos degradados a mejoras en la eficiencia de parcelas agrícolas.

De este modo, el costo de la colonización de VAM es de entre el 4-20% de carbono fijado fotosintéticamente por la planta hospedadora, que es lo que su socio fúngico consume. Históricamente, estos costos deben haber sido contrarrestados por los beneficios para la planta colonizada. Por lo tanto, la colonización por VAM debe ser beneficiosa en un entorno agronómico solo si las demandas de carbono son compensadas con un ahorro en los costes de producción de los cultivos (Sawers *et al.* 2008).

### **1.3. PROBLEMÁTICA EN AGRICULTURA ECOLÓGICA**

Las micorrizas arbusculares ayudan al establecimiento de las plantas en terrenos con limitación de nutrientes o agua, ya que facilitan de forma importante la captación de los mismos por parte de las raíces de las plantas. Además, ayudan a mejorar considerablemente la estructura del suelo. Con todo ello, las principales aplicaciones de las micorrizas arbusculares se centran en ayudar a reconstruir suelos degradados, al establecimiento de la vegetación en estos medios y a favorecer el desarrollo de plantas de interés agrícola reduciendo considerablemente la utilización de fertilizantes químicos, razón por la cual se les conoce como biofertilizantes.

Pese al gran interés que suscitan, a la hora de llevar a la práctica estos conocimientos teóricos relativos a las micorrizas arbusculares, nos encontramos con una gran cantidad de obstáculos, por lo que se debe entender que la capacidad de adaptación por nuestra parte es crucial. Es por ello que, durante varios lustros y debido al interés personal y profesional en entender la forma de emplear las micorrizas de forma eficiente y sostenible, fui acumulando conocimientos fruto de la propia curiosidad, preguntando a gran cantidad de agricultores experimentados, así como a mi propia familia, la cual ha dependido durante más de cinco décadas del cultivo de la tierra. Existen otros trabajos, en otras zonas geográficas, donde se le presta especial atención a los lazos culturales que unen las labores agrícolas tradicionales con el empleo de micorrizas generación tras generación (Dunin, 2020).

En este apartado se aglutinan los diferentes problemas que a priori podemos encontrarnos, y que no es más que una pequeña clasificación de aquellas preocupaciones y apuntes de interés provenientes de toda clase de agricultores, así como de algunos autores que se enfrentaron con situaciones con alguna similitud:

- El suelo es un elemento vivo, por lo que lo que las actuaciones antrópicas realizadas sobre el mismo, tanto física o químicamente, producirá su alteración. Es por lo tanto muy importante realizar análisis del suelo con el objetivo de conocer sus componentes físicos, químicos y biológicos (Garzón, 2016). Con esa base podremos orientarnos mejor a la hora de seleccionar las especies de micorriza, que por regla general serán del grupo de las micorrizas arbusculares y, más concretamente, de la división *Glomeromycota*.
- Además, la simbiosis entre VAM y plantas son interacciones biológicas complejas; su impacto varía en diferentes condiciones ambientales y depende de la combinación específica de planta y hongo involucrado. En consecuencia, el uso rentable de esta simbiosis en un contexto agrícola requiere de la selección de una adecuada combinación de planta hospedadora, socio fúngico y práctica agrícola para equilibrar costos y beneficios (Sawers *et al.*, 2008).
- En el mercado actual existe una oferta de productos micorrizógenos muy reducida. Aunque es cierto que la oferta va aumentando paulatinamente, aun no es algo generalizado. Esto es un problema que tiene su justificación: Los procesos para hacer preparaciones de micorrizas a gran escala conllevan unos costes económicos, además de que el proceso en sí es bastante delicado. Sin embargo, a pequeña escala, el coste es menos elevado y el manejo del producto es mucho más sencillo, lo cual reduce el riesgo de que la preparación se estropee. Además de todo esto, aunque hay algunas clases de hongos bastante generalistas (para cereales, para hortalizas, etc.) no siempre dan el resultado que se espera en todas las parcelas, debido a que se deben controlar los diferentes parámetros del suelo y no siempre es fácil tener en cuenta todas las variables. Generalmente estas variables se mantienen estables en extensiones de decenas de kilómetros cuadrados, por lo que es posible acabar cercando aquellas cepas, prioritariamente autóctonas, que den los resultados esperados. Dentro de la problemática, se plantea crear preparaciones propias para uso en parcelas propias, pues de ese modo se pueden ver y valorar resultados de un modo más fehaciente, además, las autoridades competentes en materia de producción ecológica permiten (e incluso fomentan) este tipo de prácticas. Esta actividad se fija como una recomendación.

Tabla 1. Clasificación de los hongos formadores de micorriza de acuerdo a su división, características y tipo de planta que colonizan (Fernández, 2008).

TIPOS	Ectomicorrizas					Endomicorrizas				
	Ectomicorrizas	Arbutoides	Monotropoides	Ericoides	Orquidioides	Arbusculares				
<b>CARACTERES</b>	Manto hifal rodeando la raíz. El hongo no penetra más allá de los espacios intercelulares de la corteza. Nunca entra en la célula.	Presente en el manto hifal. Forma ovillos espirales dentro de las células.	Presente en el manto hifal. Forma haustorios sin ramificación dentro de las células. Micelio casi incoloro.	Manto hifal ausente. Forma ovillos espirales dentro de las células.	Manto hifal ausente. Forma haustorios sin ramificación u ovillos espirales dentro de las células. Micelio casi incoloro.	Sin manto hifal. Forma haustorios de fina ramificación u ovillos en espiral dentro de las células. Forma o no vesículas en o entre las células.				
<b>CLASES DE HONGOS</b>	Ascomycetes Basidiomycetes Phycomycetes	Basidiomycetes	Basidiomycetes	Ascomycetes Basidiomycetes	Basidiomycetes	Glomeromycota				
<b>HOSPEDEROS (GENERALES)</b>	Árboles y arbustos	Árboles y arbustos	Solo en Ericales Monotropaceae	Solo en Ericales	Solo en Orchidaceae	Árboles, arbustos gramíneas, herbáceas, algas, Bryophyitas y Pteridophyitas				

- Parcelas de experimentación. Dado que la implementación de micorrizas en cultivos es una práctica pionera en muchas zonas, se debe tener en cuenta que un porcentaje de la extensión cultivable accesible debería destinarse durante años a la realización de pruebas, cuyo resultado puede a veces no ser favorable en lo que a producción se refiere. En este sentido, y respecto a la propia experiencia, el Instituto Tecnológico Agrario de Castilla y León (ITACYL) se esfuerza en crear, atender y estudiar algunas de estas parcelas de experimentación, no sin el apoyo de agricultores locales que aportan sus conocimientos y, en muchas ocasiones, algunos terrenos y maquinaria para las labores necesarias. No obstante, los estudios de este instituto a cerca del empleo de micorrizas aún están en el tintero.
- Monocultivo. La práctica generalizada tanto en convencional como en ecológico es cultivar una única especie por parcela. Esto indudablemente tiene sus ventajas técnicas, pero ecológicamente hablando es contraproducente y la comunidad biológica del suelo se ve resentida. La propuesta al respecto pasa por crear “bordes vivos”, es decir, tener un margen de menos de un metro en el perímetro de cada parcela, facilitando la colonización de estos espacios por especies autóctonas que mejoran la calidad de las comunidades de insectos, microfauna, hongos, etc. También se propone el empleo de abonos verdes (mezcla de semillas que se plantan sin intención de cosecharlas, si no para que en su proceso de crecimiento aporten a la tierra aquello de lo que sufre carencias) y cultivos mixtos que sean compatibles y que se puedan cosechar a la vez.

#### **1.4. JUSTIFICACIÓN**

En el contexto actual, en el que reina la incertidumbre, se plantea el empleo de micorrizas arbusculares para la optimización de los cultivos agrícolas. Si bien hay muchos beneficios y aplicaciones asociados al uso de micorrizas, la aceptación no es la deseada debido, en gran medida, a la falta de información entre agricultores y demás actores del panorama agrícola. En este trabajo se pretende arrojar algo de luz sobre las aplicaciones y efectos reales del empleo de éstas, sintetizando los conocimientos almacenados en la bibliografía desde 2008 hasta el 2021.

Éste trabajo emana también del afán de construir un modelo agrícola sostenible: son varios años trabajando por cambiar en la práctica el modelo agrícola de una empresa familiar, desde la transición de agricultura convencional a ecológica en el año 2009, hasta la actual transición de hacer que la producción agrícola, además de ecológica, sea también sostenible. Por lo

tanto, lo que aquí se sintetiza se ofrece también como un marco para aquellas personas que deseen los mismos objetivos, como una base sobre la que apoyarse o guiarse en el gran reto que supone hacer de la agricultura algo sostenible, teniendo en cuenta el aumento exponencial de la población y la intrínseca demanda de alimentos que esto provoca.

## **2.- OBJETIVOS E HIPÓTESIS**

Los principales objetivos de esta memoria son:

- Realizar una revisión bibliográfica sobre la utilización de micorrizas en agricultura.
- Analizar las principales especies utilizadas, tanto de hongos como de plantas.
- Evaluar los efectos que tienen las diferentes micorrizas sobre los cultivos, teniendo en cuenta para ello los parámetros climáticos y edáficos de cada lugar.
- Evaluar el efecto en la micorrización de las distintas técnicas de cultivo, así como de las distintas formas de fertilización.

Siendo el objetivo general analizar el estado del empleo de las micorrizas con el fin de que sirva de punto de partida de su utilización en agricultura ecológica.

## **3.- MATERIAL Y MÉTODOS**

La revisión bibliográfica sobre cómo interactúan las micorrizas respecto a cultivos agrícolas y demás elementos vivos del suelo se llevó a cabo mediante la búsqueda de artículos científicos que hayan sido publicados en los últimos 13 años. Para la búsqueda de estos artículos o libros relacionados con los objetivos de la revisión, se han usado algunas de las bases de datos más conocidas, como Science Direct, Scopus, Springerlink y Scholar Google, en las cuales se han introducido en el buscador las siguientes palabras clave: endomicorrizas, micorrizas, rizosfera, agricultura y desertificación, tanto en español como en inglés. Se introdujeron diferentes combinaciones empleando para ello los comandos booleanos “OR” y “AND”, generando las diferentes combinaciones posibles entre los distintos términos empleados con ambos comandos por separado.

La información se ha extraído de manera objetiva y ha sido seleccionada en base al objeto de estudio, habiéndose realizado una posterior selección analizando la información vertida en el

resumen/abstract y descartando parte del material consultado por no resultar suficientemente relevante. Del mismo modo, se extrajeron algunos artículos de gran interés para la revisión de la bibliografía de artículos consultados a través de las bases de datos. Posteriormente se ha resumido, reagrupado y ordenado de la forma más útil para su comprensión.

## 4.- RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Una vez analizada la lista resultante de artículos, se obtuvieron 128 artículos de los cuales se seleccionaron 26.

Analizando la nacionalidad de los trabajos seleccionados, se observa que en América y, especialmente en Latinoamérica (Figura 3), hay gran cantidad de estudios a cerca de las micorrizas y sus interacciones, aunque en cada vez más países europeos y asiáticos empiezan a interesarse por el tema.

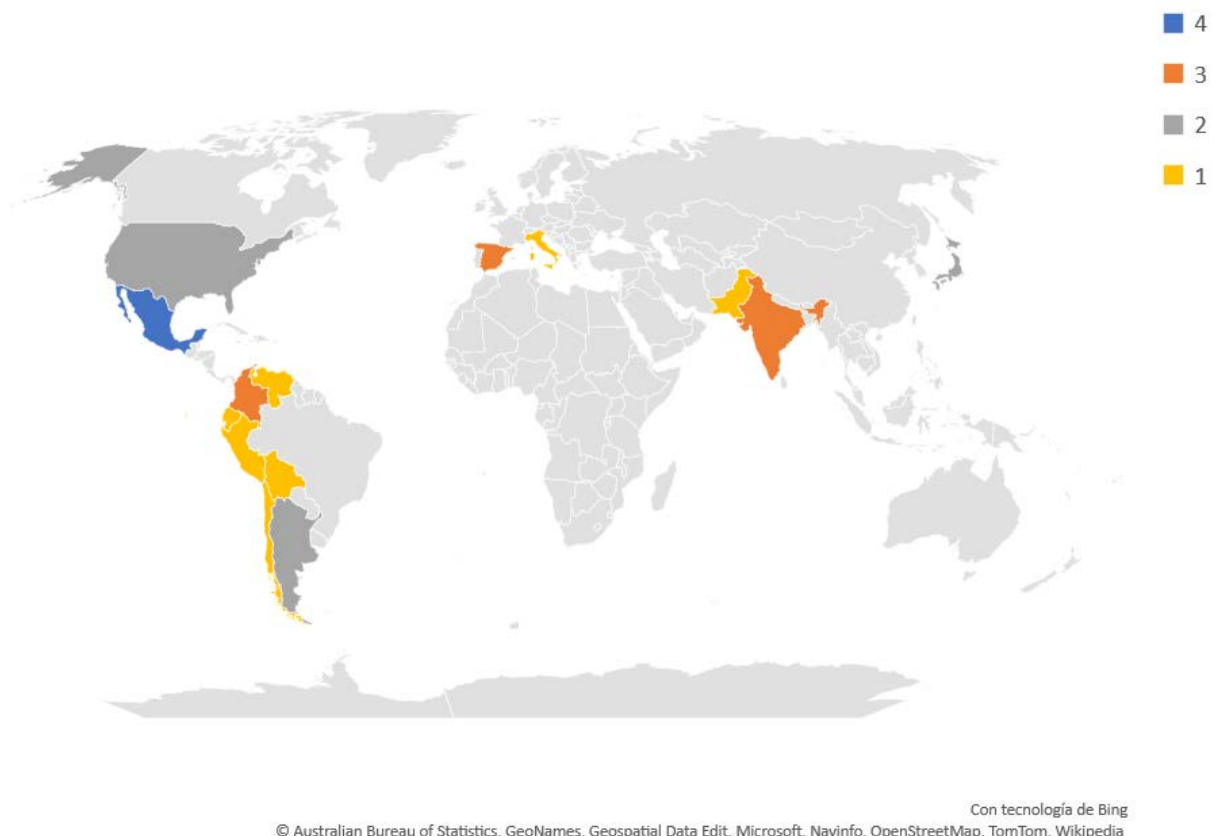


Figura 3. Distribución de los artículos seleccionados, por nacionalidades.

Si analizamos las plantas con las que se trabaja en dichos artículos seleccionados, gran parte de ellos se centran en plantas de interés agrícola, siendo las especies más estudiadas el

pimiento (*Capsicum annuum* L.) y la berenjena (*Solanum melongena* L.), seguido de los cereales de inviernos (*Hordeum vulgare* L., *Triticum* sp. L., *Secale cereale* (L.) M. Bieb.) y el cultivo de tomate (*Solanum lycopersicum* L.), seguido por la cebolla (*Allium cepa* L.) y la patata (*Solanum tuberosum* L.) (Figura 4).

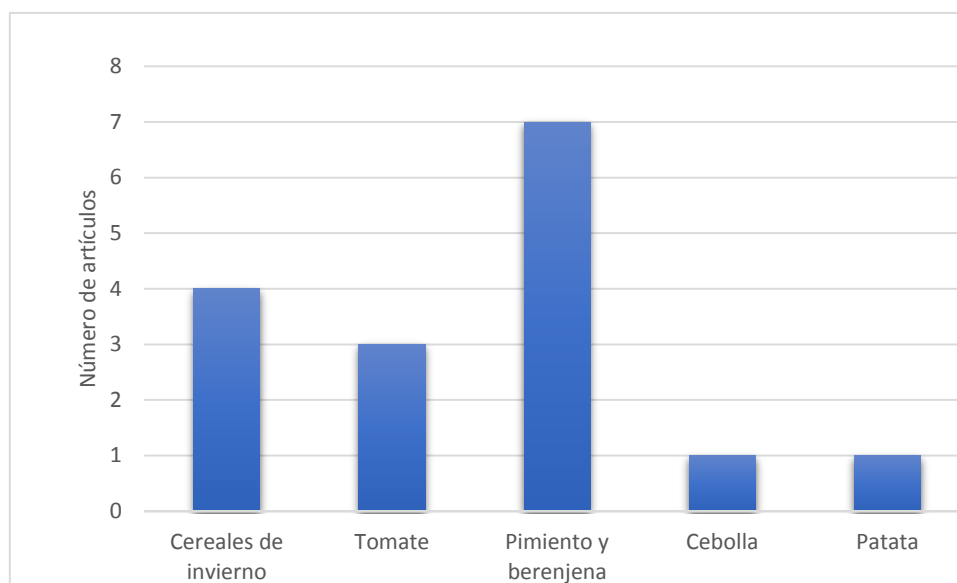


Figura 4. Principales cultivos objeto de estudio en los artículos seleccionados.

#### 4.1.- APLICACIONES

La bibliografía disponible en la actualidad vierte una gran cantidad de ejemplos de los beneficios que las micorrizas generan, tanto desde el punto de vista de las plantas como del de los hongos, así como en los ecosistemas en general, habiéndose demostrado cómo la presencia de micorrizas acelera los procesos naturales propios de las sucesiones de vegetación hasta un estado clímax o maduro. La principal aplicación de las micorrizas la encontramos en agricultura. Del total de artículos seleccionados, son 16 los artículos que se centran en agricultura (Tabla 2). Es cierto que el uso de micorrizas no es una práctica muy habitual entre los agricultores, generalmente por falta de información, falta de productos (insumos) en el mercado y también por falta de legislación sobre el tema. No obstante, con la incorporación de nuevas generaciones de agricultores, los conocimientos sobre el tema cada vez se van extendiendo más y cada vez tiene más calado entre los agricultores ecológicos (es más complicado en la agricultura convencional, pues en muchas ocasiones se emplean insecticidas y fungicidas que no son compatibles con las micorrizas). Tan es así que cada año aparecen nuevos insumos verificados por los diferentes entes de control, como por ejemplo el



CAECYL (Consejo de Agricultura Ecológica de Castilla y León) u otros consejos autonómicos, que finalmente responden ante el Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación. Más allá del incipiente acogimiento del uso de micorrizas en el campo, se suceden los estudios, tanto en invernadero como en tierra de cultivo, que abren camino a que estas prácticas cada vez sean más normales.

Tabla 2. Relación de artículos seleccionados según las aplicaciones de las micorrizas estudiadas en los mismos.

Autor/es	Año	Aplicación
Kile <i>et al.</i>	2008	Evaluación del empleo de micorrizas arbusculares ( <i>Glomus fasciculatum</i> ) en tomate ( <i>Solanum lycopersicum</i> ).
Aguilera Gómez <i>et al</i>	2007	Micorrizas arbusculares
Rojas Rodríguez y Ortuño	2007	Evaluación de micorrizas arbusculares ( <i>Glomus fasciculatum</i> ) y su interacción con cebolla ( <i>Allium cepa</i> ) y patata a ( <i>Solanum tuberosum</i> ).
Fernández	2008	Tipos de micorrizas. Breve panorámica de biofertilizantes micorrizógenos a nivel mundial.
Sawers	2008	Interacción entre cereales y micorrizas.
Heikham <i>et al</i>	2009	Estado nutricional. Restauración de espacios degradados y mejora de parcelas de cultivo.
Antunes <i>et al.</i>	2009	Influencia de <i>Glomus intraradices</i> en formato comercializado sobre parcelas agrícolas.
Maldonado Chávez <i>et al</i>	2010	Efectos de las micorrizas en la rizosfera
Rodríguez <i>et al</i>	2011	Estudio del hongo micorrícico <i>Glomus cubense</i> .
Vannette <i>et al</i>	2013	Estado fitosanitario.
Faggiolo <i>et al</i>	2013	Respuesta de cereales de invierno a la inoculación con micorrizas.
Itilier Salazar <i>et al</i>	2014	Restauración de suelos.
Cué García y Torres García	2014	Valoración agroecológica de las micorrizas vesículo arbusculares
Khalil Gardezi <i>et al</i>	2015	Restauración de espacios, biorremediación y aplicaciones en cultivos.
Garzón	2016	Micorrizas arbusculares para el uso sostenible del suelo.
Rehman Khan <i>et al</i>	2017	Estudio del hongo micorrícico <i>Glomus mosseae</i>
FAO	2018	Enfoque agroecológico.
Catalán Salas	2018	Cultivo de cebada ( <i>Hordeum vulgare</i> ) en Huesca
Franco	2019	Fisiología del estrés abiótico en plantas. Restauración de espacios degradados.
Tian. <i>et al</i>	2019	Efecto de <i>Glomus intraradices</i> en la diversidad microbiana de la rizosfera.
Dunin Borkowski	2019	Herencia cultural sobre las micorrizas
Begum <i>et al</i>	2019	Micorrizas arbusculares y su implicación en la tolerancia del estrés abiótico.
Martínez Medina <i>et al</i>	2019	Relación entre <i>Solanum lycopersicum</i> (tomate) y <i>Rhizophagus irregularis</i> .
Pérez Redondo	2019	Potencial micorrícico en parcelas agrícolas en Huesca
Belinchón Moreno	2020	Evaluación de la micorrización en berenjena y pimiento.
Kumar <i>et al</i>	2021	Micorremediación aplicada a agricultura.

- **Control y mejora de estrés salino.** Otros autores sintetizan cómo afectan las micorrizas al **estado nutricional** de las plantas en un ambiente de estrés salino (Heikham et al, 2009), en la tabla 3 se muestran algunos casos. Dado que, en estos ambientes, que pueden ser el resultado de intrusiones salinas en zonas costeras y/o malas prácticas agrícolas, uso de fertilizantes químicos, exceso de laboreo, entre otros, las plantas ven retrasado su crecimiento y su acumulación de biomasa. Las razones de este retardo son principalmente la baja disponibilidad de nutrientes en el suelo y el excesivo gasto energético por parte de la planta para contrarrestar la toxicidad del NaCl. Sin embargo, se concluyó que la micorrización con *Glomus mosseae*, mejoró notablemente la aptitud física de la planta, produciendo un mejor y más rápido crecimiento, de la mano de un incremento en la acumulación de biomasa (Heikham et al, 2009).

Los propios autores del documento anotan que existen otros trabajos (Al-Karaki, 2000, Cantrell y Linderman, 2001; Giri *et al.*, 2003; Sannazzaro *et al.*, 2007; Zuccarini y Okurowska, 2008), que concluyen de forma similar sobre el efecto positivo de la micorrización en ambientes de estrés salino. Se incluye a continuación la tabla 3 en la que se muestran los resultados, respecto a diferentes cultivos, del efecto que tiene la micorrización de diferentes especies del género *Glomus* sobre las plantas en un ambiente de estrés salino.

- **Estado fitosanitario.** Por su parte, otros trabajos demuestran como la micorrización mejora el **estado fitosanitario** de las especies del género *Asclepias* (Vannette *et al.*, 2013). Así, demuestran como las micorrizas actúan de forma directa sobre la expresión y la composición de los exudados que las plantas generan como protección “bajo el suelo” (es decir, exudados radiculares que previenen y/o combaten patógenos y microfauna principalmente) y “sobre suelo” (que se refiere a la parte aérea y cuyos exudados tienen por objetivo reducir o prevenir la presión ejercida por los herbívoros). Concretamente estos autores se centran en el exudado de un esteroide denominado cardenólido, y para llegar a concluir que efectivamente existe una correlación positiva entre la micorrización y la cantidad y calidad de los exudados, los autores evaluaron los efectos de la micorrización en ocho especies que presentan naturalmente diferentes niveles del esteroide.

Como conclusión, los autores señalan que, aun habiendo quedado demostrado que la micorrización ejerce un efecto beneficioso respecto al estado fitosanitario de la planta, los resultados difieren mucho entre unas especies y otras, por lo que debe/n de haber otro/s factores que influyan en la colonización micorrícica. Explorando las interacciones ecológicas y/o moleculares de tal variación se puede llegar a tener una mejor comprensión de como los microorganismos fitoestimulantes influyen en interacciones multitróficas.

Tabla 3. Algunos ejemplos de incremento/disminución de la absorción de nutrientes en plantas micorrizadas bajo estrés por salinidad. Heikham et al (2009)

Nutrient	Range of salinity*	Plant	Fungus	Effect
<b>Phosphorus</b>	0-24,6 dS m <sup>-1</sup> (0-200mM)	<i>Glycine max</i>	<i>Glomus etunicatum</i>	Increase
	1,2-9,5 dS m <sup>-1</sup>	<i>Acacia nilotica</i>	<i>Glomus fasciculatum</i>	Increase
	0-19,12 dS m <sup>-1</sup> (0-150mM)	<i>Citrus karma</i>	<i>Mixed inoculum of Glomus sp. And Gigaspora sp.</i>	Increase
	0-6,10 dS m <sup>-1</sup> (0-3g kg <sup>-1</sup> )	<i>Gossypium arboreum</i>	<i>Glomus mosseae</i>	Increase
	3-10 dS m <sup>-1</sup> (0,3-1,0 S m <sup>-1</sup> )	<i>Acacia auriculiformis</i>	<i>Glomus macrocarpum and Glomus fasciculatum</i>	Increase
	0-13,19 dS m <sup>-1</sup> (0-100mM)	<i>Zea mays</i>	<i>Glomus mosseae</i>	Increase
	1,4-7,4 dS m <sup>-1</sup>	<i>Lycopersicon esculentum</i>	<i>Glomus mosseae</i>	Increase
<b>Nitrogen</b>	4-8 dS m <sup>-1</sup>	<i>Cajanus cajan</i>	<i>Glomus mosseae</i>	Increase
	0-19,12 dS m <sup>-1</sup> (0-150mM)	<i>Citrus karma</i>	<i>Mixed inoculum of Glomus sp. and Gigaspora sp.</i>	Increase
	15,8 dS m <sup>-1</sup> (1,58 S m <sup>-1</sup> )	<i>Sesbania aegyptiaca</i>	<i>Glomus macrocarpum</i>	Increase
<b>Potassium</b>	0-7,56 dS m <sup>-1</sup> (0-3 g L <sup>-1</sup> )	<i>Ocimum basilicum</i>	<i>Glomus intraradices</i>	Increase
	0-24,6 dS m <sup>-1</sup> (0-200mM)	<i>Glycine max</i>	<i>Glomus etunicatum</i>	Increase
<b>Calcium</b>	0-24,6 dS m <sup>-1</sup> (0-200mM)	<i>Glycine max</i>	<i>Glomus etunicatum</i>	Increase
	0,72-7,39 dS m <sup>-1</sup>	<i>Musa sp.</i>	<i>Glomus clarum</i>	Increase
<b>Magnesium</b>	15,8 dS m <sup>-1</sup> (1,58 S m <sup>-1</sup> )	<i>Sesbania aegyptiaca</i>	<i>Glomus macrocarpum</i>	Increase
<b>Sodium</b>	1,2-9,5 dS m <sup>-1</sup>	<i>Acacia nilotica</i>	<i>Glomus fasciculatum</i>	Increase
	0-6,10 dS m <sup>-1</sup> (0-3g kg <sup>-1</sup> )	<i>Gossypium arboreum</i>	<i>Glomus mosseae</i>	Increase
	0,12 dS m <sup>-1</sup>	<i>Acacia auriculiformis</i>	<i>Glomus macrocarpum and Glomus fasciculatum</i>	Increase
	0-7,56 dS m <sup>-1</sup> (0-3 g L <sup>-1</sup> )	<i>Ocimum basilicum</i>	<i>Glomus intraradices</i>	Decrease
	0-24,6 dS m <sup>-1</sup> (0-200mM)	<i>Glycine max</i>	<i>Glomus etunicatum</i>	Decrease
	1,4-7,4 dS m <sup>-1</sup>	<i>Lycopersicon esculentum</i>	<i>Glomus mosseae</i>	Decrease
<b>Chloride</b>	0-6,10 dS m <sup>-1</sup> (0-3g kg <sup>-1</sup> )	<i>Gossypium arboreum</i>	<i>Glomus mosseae</i>	Increase
	0-7,56 dS m <sup>-1</sup>	<i>Ocimum basilicum</i>	<i>Glomus intraradices</i>	Decrease
<b>Copper</b>	1,2-9,5 dS m <sup>-1</sup>	<i>Acacia nilotica</i>	<i>Glomus fasciculatum</i>	Increase
	1,4-7,4 dS m <sup>-1</sup>	<i>Lycopersicon esculentum</i>	<i>Glomus mosseae</i>	Decrease
<b>Zinc</b>	0-24,6 dS m <sup>-1</sup> (0-200mM)	<i>Glycine max</i>	<i>Glomus etunicatum</i>	Increase
	1,4-7,4 dS m <sup>-1</sup>	<i>Lycopersicon esculentum</i>	<i>Glomus mosseae</i>	Decrease

\*The range of salinity within Brackets is the actual salt concentrations used by the authors.

- **Restauración de espacios degradados:** Los procesos naturales que hacen que un ecosistema avance requiere de periodos de tiempo elevados, sobre todo si medimos ese tiempo en escala humana. Por el contrario, degradar un ecosistema a causa de actividades humanas es un proceso mucho más rápido. Para mitigar, reducir o, en el mejor de los casos, revertir el impacto o deterioro causado por actividades antrópicas se pueden llevar a cabo gran cantidad de actuaciones que, según el caso, conllevará más o menos esfuerzo en tiempo y dinero. Con todo, lo que se busca en una restauración es devolver al ecosistema su funcionalidad, y para ello, no queda otra opción que proveer o restaurar aquello que se dañó.

Para ello son imprescindibles las especies vegetales adecuadas. Las micorrizas, en este caso, ayudan a esas plantas que son reintroducidas o soportar el estrés propio de las primeras etapas de colonización de un ambiente degradado, acelerando muy notablemente el proceso de adaptación de la cubierta vegetal inicial (Itilier *et al*, 2014), así como el propio proceso de adaptación de unidades vegetales más complejas que precisan de las iniciales para llevar al ecosistema a su máxima eficiencia. Tan es así que se ha postulado que la micorriza jugó un papel crucial en la invasión, así como en la subsecuente colonización de las primeras plantas en los hábitats terrestres (Read, 1998; Wilkinson, 2001; Brundett, 2002).

Respecto al trabajo realizado por Kumar et al (2021) se entiende la micorremediación como un proceso natural que involucra un alto volumen de biomasa, por lo que puede ser modelado fácilmente y requiere un esfuerzo menor. Por su parte, las capacidades de biorremediación son específicas para el individuo (hongo) y grupo de contaminantes (Tabla 3). En el proceso de metabolización de contaminantes influyen también factores como la temperatura, la humedad, la condición de los nutrientes, etc. Además, hay algunas precauciones previas que deben considerarse para tener éxito en la micorremediación, como la actividad fúngica y la actividad catabólica de las enzimas producidas. Estas enzimas deben de tener la capacidad de transformar los contaminantes y reducir su concentración hasta niveles aceptados por la regulación pertinente, es decir, deben tener una tasa de biorremediación adecuada. Por otro lado, se debe tener en cuenta el nivel de toxicidad de los subproductos generados, así como el nivel de adaptabilidad ambiental y antropogénica de las especies fúngicas y la viabilidad económica de la ingeniería de procesos. El enfoque a futuro debe mantener el foco en aquellos procesos donde, empleando especies hiperacumuladoras, permitan perspectivas realistas de cosecha y/o aprovechamiento de subproductos. Por último, los autores comentan el desafío que plantea el cambio climático, pues inciden en la importancia de seleccionar especies presentes de forma natural en cada caso práctico, y esto se ve severamente afectado por los cambios en el ambiente a escala global.

## **4.2.- CULTIVOS Y ESPECIES FÚNGICAS**

### **4.2.1- ESPECIES FÚNGICAS**

#### ***Saccharomyces* sp**

Especie de la familia Sacharomycetaceae, y perteneciente a la división Ascomycota. Estos organismos unicelulares han sido empleados históricamente con fines alimentarios y medicinales entre otros, por lo que se les ha estudiado en múltiples ocasiones y épocas.

Además, es una familia cosmopolita, por lo que aparece en la mayor parte del mundo. Entre sus aplicaciones, se emplea como micorrizante en multitud de especies vegetales, principalmente en árboles y arbustos, pero también en algunas herbáceas. Estos hongos, se pueden emplear en cultivos, bien en solitario o bien mezclados con otras especies fúngicas (Faggioli *et al*, 2013).

***Endogone* sp. Link**

Especie de la familia Endogonaceae, y perteneciente a la división Zygomycota. Esta especie aparece en suelos pobres, aportando con sus hifas estabilidad al suelo y permitiendo como consecuencia el desarrollo de especies herbáceas de ciclo corto. Las especies del género *Endogone* no son capaces de colonizar medios ricos en fósforo, por lo que aún dentro de una misma zona geográfica, sólo aparecerán en aquellas con niveles bajos en fósforo, aportando este nutriente donde se desarrollan y ofreciendo un cierto equilibrio que permite el desarrollo de plantas de bajo porte y herbáceas (Faggioli *et al*, 2013). También aparece en otros ecosistemas pobres en nutrientes, pero más maduros, micorrizando con árboles y arbustos (Yamamoto *et al*, 2017).

***Glomus intraradices* N.C. Schenck & G.S. Sm.**

Actualmente *Rhizophagus irregularis* (N.C. Schenck & G.S. Sm.) C. Walker & A. Schüßler (Bánki, 2022). Especie de la familia Glomeraceae, perteneciente a la división Glomeromycota. Esta especie es un hongo micorrízico arbuscular presente en Europa, América del Sur y del Norte, África, Asia y Australia, por lo que se la puede considerar una especie cosmopolita por su amplia distribución (Rui-Rui *et al*, 2020). Aparece micorrizando diferentes especies vegetales, habiéndose comprobado que mejoran la actividad radicular de las plantas, oxidando alcoholes y catalizando otras reacciones cuyo fin es transformar sustancias del suelo en otras más simples que sean asimilables por las plantas (Tian *et al*, 2019).

Es uno de los hongos micorrícicos más comercializados, con aplicaciones, principalmente, en horticultura y en investigaciones científicas sobre micorrizas arbusculares. (Martínez-Medina *et al*, 2019). Las principales ventajas de la micorrización con este hongo vienen de la mano de la resistencia que confiere a las plantas frente a factores abióticos.

***Glomus mosseae* (T.H. Nicolson & Gerd.) Gerd. & Trappe**

De la familia *Glomeraceae* y perteneciente a la división Glomeromycota, actualmente renombrado como *Funneliformis mosseae* (T.H. Nicolson & Gerd.) C. Walker & A. Schüßler

(Bánki, 2022). Esta especie aparece en numerosas ocasiones asociada con todo tipo de plantas terrestres, creando una simbiosis en la que el hongo provee de fósforo a la planta hospedadora en condiciones de déficit de este nutriente en el medio (Begum et al, 2019). Además, tiene un gran potencial bioprotector (Rehman *et al*, 2017).

#### ***Glomus cubense* Y. Rodr. & Dalpé**

De la familia *Glomeraceae* y perteneciente a la división Glomeromycota. Esta especie, aun enmarcándose en el orden de los Glomerales, no tiene parientes cercanos, por lo que podemos considerarla como un fruto de la propia evolución, a la que encontramos en ambientes naturales asociada con cereales y hortalizas de bajo porte. La singularidad de esta especie puede deberse a que su origen se encuentra en Cuba, por lo que al ser una isla y estar de forma natural aislado, pudo generar diferencias más exclusivas (Rodríguez *et al*, 2011).

### **4.2.2- ESPECIES VEGETALES**

Respecto a los cultivos hortícolas en vivero, los hongos micorrícicos arbusculares pueden potenciar el control biológico de agentes microbianos (Alarcón *et al*, 2018).

#### **Cereales de invierno**

En este grupo se incluyen cebada, trigo y centeno (*Hordeum vulgare*, *Triticum* sp., *Secale cereale*, respectivamente).

Debido a las características ambientales de cada zona y año, los estudios de campo que tratan de extraer conclusiones sobre el efecto de la micorrización deben aportar datos de las condiciones ambientales del experimento, ya que el equilibrio que se da entre la planta, la micorriza y el ambiente es muy delicado y variable (Sawers *et al.*, 2008). El desarrollo de los cultivos de invierno en campo se ven severamente afectados por el momento de siembra, las precipitaciones o aportes de agua en sus primeras etapas, así como temporadas de heladas fuertes en sus primeras semanas después de germinar (Catalán, 2018). Debido a esto, algunos experimentos no pueden extraer información concluyente. Así, encontramos ejemplos en los que ni la cebada, ni el trigo, ni el centeno vieron incrementada su biomasa por la inoculación en base sólida de dolomita con *Saccharomyces* sp. (en concentración de  $1 \times 10^5$  un  $g^{-1}$ ) junto con *Endogone* sp. (con una concentración de  $1 \times 10^5$  un  $g^{-1}$ ), empleando una dosis de  $5 \text{ g kg}^{-1}$  (Faggioli *et al.*, 2013). Si bien es cierto que los mismos autores observaron cómo las plantas de centeno acumularon el doble de biomasa en los primeros 30 días que el cultivo testigo sin micorrizar (Faggioli *et al.*, 2013). Por su parte el trigo, aun sin obtener mejores rendimientos

en acumulación de materia seca, demostró una gran afinidad a la inoculación, micorrizando de forma muy consistente. Por último, contrariamente a lo que se esperaba, la inoculación tuvo un impacto significativo en la cantidad de fósforo disponible (Pérez, 2019), reduciéndolo a niveles menores que el testigo (Faggioli *et al.*, 2013; Khalil, 2015). Sin embargo, autores anteriores mencionan mejoras en la adquisición del nutriente en ambientes de baja disponibilidad de fósforo como una de las principales ventajas atribuidas a las micorrizas (Koide y Mosse, 2004). En la búsqueda de las razones a las que se debe la dependencia micorrizógena negativa, se observaron otros experimentos similares empleando como inoculante la especie *Glomus intraradices*, donde se concluyó que, en suelos ricos en fósforo, emplear técnicas de micorrización puede ser contraproducente, obteniéndose resultados positivos respecto a la disponibilidad de este nutriente sólo en suelos con niveles bajos del mismo (Antunes *et al.*, 2009).

#### **Tomate** (*Solanum lycopersicum*)

Se han observado respuestas positivas respecto al empleo de micorrizas en el cultivo de tomate (Álvarez *et al.*, 2008), de esta manera, se reportó un incremento tanto de la colonización como de la masa del endófito, siendo estos incrementos variables en los distintos ensayos respecto a emplear únicamente micorrización o añadir abonos minerales NPK. Así se corroboró cómo el empleo de micorrizas reduce el aporte de abonos químicos e incluso los puede llegar a sustituir por completo. Estos experimentos se dieron en un suelo Cambisol Crómico (FAO-Unesco, 1988) y empleando como agente micorrizante *Glomus fasciculatum*, especie cosmopolita presente en la gran mayoría de suelos (Kile *et al.*, 2008). Otros experimentos anteriores llevados a cabo en la Rioja vienen a confirmar cómo el empleo de micorrizas tiene un efecto positivo en el cultivo y la producción de tomate, en esta ocasión sobre un suelo Pardo grisáceo Ócrico sin carbonato (FAO-Unesco, 1988) y con cepas propias de dicho suelo: *Glomus mosseae*, *Glomus intraradices* y *Glomus cubense*. En este caso todas las cepas estudiadas mostraron incrementos en la producción muy significativos respecto al testigo, obteniendo el mejor resultado los tratamientos con *Glomus cubense* (Ferrer *et al.*, 1992).

#### **Pimiento** (*Capsicum annuum*) y **berenjena** (*Solanum melongena*)

Tanto el pimiento como la berenjena pertenecen a la familia de las Solanáceas, y requieren un manejo agrícola muy parecido. Sus raíces se ven colonizadas por prácticamente las mismas especies de hongos micorrizógenos, dependiendo del suelo y clima en que se desarrollen (Moreno, 2020). Así, Moreno (2020) analizó en un reciente trabajo cómo influye la



micorrización de ambas especies con *Rhizophagus irregularis*, en un clima mediterráneo propio del levante de la península Ibérica. El objeto de estudio se centraba en observar diferencias en el desarrollo de las plantas con y sin micorrización en un ambiente de estrés abiótico como es la sequía, mas también se comprobó el efecto de la micorrización en las plantas bajo estrés biótico (plaga de araña roja que sucedió de forma accidental y afectó a todo el conjunto estudiado). Con todo, se concluyó que, bajo un riego óptimo, las diferencias entre aquellos organismos inoculados y los que no lo estaban eran significativas en general, aunque las diferencias observadas individualmente no siempre fueron significativas; no obstante, dichas diferencias sí que se tornaron significativas cuando las plantas de pimiento y berenjena se vieron sometidas a condiciones de estrés abiótico y biótico. Además, y con gran interés agronómico, se observó una mayor producción de fruto, lo cual puede ser clave, según el autor, en un ambiente muchas veces impredecible en el que igualmente se deben aumentar las cosechas para hacer frente a la gran demanda de alimentos sin perjuicio de futuras cosechas por impactos negativos sobre el suelo. El empleo de micorrizas se muestra como una prometedora vía a futuro.

Por otra parte, existen otros estudios respecto al cultivo de pimiento y berenjena. Es cierto que aún hay poca bibliografía sobre el empleo de micorrizas en estas especies, pero los ya existentes arrojan una luz muy prometedora e incitan a seguir investigando, ya que existen evidencias de que del estudio de esta forma de cultivar se puedan conseguir, con los años, mejores cosechas con un impacto ambiental muchísimo menor. Así, se estudió la capacidad de la simbiosis formada por el hongo *Rhizophagus irregularis* y las plantas de berenjena y pimiento para equilibrar el potencial osmótico de la célula en condiciones estresantes, mediante la medida de la concentración de prolina, habiéndose obtenido ya resultados positivos y prometedores (Nedorost *et al.*, 2012; Tallapragada *et al.*, 2016; Swetha y Padmavathi, 2019). También, mediante la evaluación del contenido de pigmentos fotosintéticos, se pretendía evaluar el efecto de la simbiosis en el mantenimiento de la fotosíntesis, consiguiéndose evidencias positivas sobre este aspecto en condiciones de estrés abiótico en plantas de berenjena y pimiento (Nedorost *et al.*, 2012; Tallapragada *et al.*, 2016; Swetha y Padmavathi, 2019).

#### Cebolla (*Allium cepa*)

Respecto a experimentos desarrollados en Cochabamba (Bolivia) por Rojas y Ortuño (2007), se observa cómo el cultivo de cebolla responde de forma marcadamente positiva a la



inoculación de *Glomus fasciculatum*. Así, se comprobó que tanto las parcelas únicamente micorrizadas, como aquellas que además de la micorriza se les aportó otros tipos de materia orgánica (gallinaza y humus de lombriz), tuvieron mejores desarrollos que la planta testigo (con aportes de fertilización química NPK). Por su parte, el empleo de micorrizas con humus de lombriz y gallinaza resultó significativamente más caro que el empleo de otros tratamientos convencionales, no obstante, el rendimiento fue mucho mayor, por lo que, a efectos de rendimiento económico, el empleo de micorrizas, humus de lombriz y gallinaza resultó el más eficiente.

#### Patata (*Solanum tuberosum*)

En Cochabamba (Bolivia) también se realizaron pruebas de micorrización en plantas de patata, empleando *Glomus fasciculatum* como agente micorrizante, dejando un testigo con abonado químico NPK y otras pruebas empleando sólo micorriza, micorriza con humus de lombriz y una última empleando únicamente humus de lombriz como abono orgánico. En el cultivo de patata se encontró que los tratamientos influyeron poco sobre la producción y calidad del producto respecto al testigo (abonado químicamente), no obstante, y siendo las producciones muy similares, el empleo de micorrizas y humus de lombriz resultó significativamente más barato que el empleo de abonos inorgánicos, lo que se tradujo en un rendimiento económico mayor evitando el impacto que los fertilizantes químicos causan en el medio ambiente (Rojas y Ortuño, 2007).

### **4.3.- SITUACIÓN ACTUAL DEL EMPLEO DE MICORRIZAS EN AGRICULTURA**

A día de hoy las micorrizas no son muy empleadas en agricultura, no obstante, sí que se sabe de sus beneficios sobre los cultivos (Álvarez *et al.*, 2008; Nedorost *et al.*, 2012; Tallapragada *et al.*, 2016; Swetha y Padmavathi, 2019; Moreno, 2020), y algunos agricultores lo han empleado alguna vez. Los resultados son favorables o inocuos, no hay constancia de impactos negativos sobre los cultivos (más allá del coste del insumo). También es cierto que, en agricultura ecológica, estas prácticas son más habituales.

Las preparaciones comerciales son escasas, y las que hay, contienen micorrizas de carácter cosmopolita, cuya cepa ha sido aislada generalmente en Rusia o EE.UU, por lo que no siempre funciona en todos los suelos ni en todos los climas (Moreno, 2020).

Con todo, el empleo de micorrizas es una alternativa, quizás en un futuro podamos sacarle partido y ayudar con ello a proveer de alimentos más saludables y de menos impacto ambiental. También puede ocurrir que sea demasiado complejo o costoso el proceso para hacer llegar, en forma de insumos, las micorrizas a los agricultores, y que finalmente quede relegado su empleo a pequeñas asociaciones de agricultores.

## **5.- CONCLUSIONES**

- 1.- El empleo de micorrizas requiere de un estudio y un conocimiento profundo de las características del suelo donde se pretenden aplicar, así como del clima que impera esa zona y el cultivo con el que se pretende asociar.
- 2.- Las micorrizas, bien sean aplicadas junto con fertilizantes orgánicos o no, son capaces de reducir e incluso eliminar los aportes de fertilizantes químicos, igualando e incluso superando las producciones y reduciendo a su vez los costos en insumos.
- 3.- No siempre es adecuado el empleo de micorrizas, pudiendo, en algunas ocasiones, ser contraproducente su empleo para la viabilidad del cultivo. Es muy importante atender a las características del suelo y al clima a la hora de valorar el empleo de una micorriza.
- 4.- El empleo de micorrizas, con o sin aportes de abonos orgánicos, tiene un comportamiento en campo mucho más respetuoso, con muchos menos impactos negativos en el medio que otras alternativas convencionales.
- 5.- El empleo y el estudio de las micorrizas aplicadas en parcelas de cultivo tiene aún mucho margen para la investigación, por lo que se propone realizar más pruebas en parcelas de cultivo, así como en invernadero, sin olvidar el estudio del propio hongo y sus numerosas interacciones con la planta y el tipo de suelo y climatología.
- 6.- En aquellos lugares donde se consiga igualar o superar la producción de alimentos respecto a las prácticas convencionales, se podrá cubrir una parte de la creciente demanda global de alimentos, fomentando una alimentación saludable y contribuyendo a su vez a generar redes locales de consumo y, por lo tanto, comunidades menos dependientes, más estables y saludables.

## 6.- REFERENCIAS

- Aguilera, J. I., Olalde, V., Arriaga, M. R. y Contreras, R. (2007). Micorrizas arbusculares. *Ciencia Ergo Sum*. Vol 14 (3): 300-306.
- Alarcón, A. (2008). Los hongos micorrízicos arbusculares como biotecnología en la propagación y manejo de plantas en viveros. *Agroproductividad* 1(1): 19-23.
- Al-Karaki, G, N. (2000). Growth of mycorrhizal tomato and mineral acquisition under salt stress. *Mycorrhiza* 10: 51–54.
- Antunes, P. M., Koch, A. M., Dunfield, K. E., Hart, M. M., Downing, A., Rilling, M. C. y Klironomos, J. N. (2009). Influence of commercial inoculation with *Glomus intraradices* on the structure and functioning of an AM fungal community from an agricultural site. *Plant Soil*. Vol. 317. Pags. 257-266.
- Bánki, O., Roskov, Y., Döring, M., Ower, G., Vandepitte, L., Hobern, D., Remsen, D., Schalk, P., DeWalt, R. E., Keping, M., Miller, J., Orrell, T., Aalbu, R., Adlard, R., Adriaenssens, E. M., Aedo, C., Aesch, E., Akkari, N., Alfenas-Zerbini, P., *et al.* (2022). Catalogue of Life Checklist (Version 2022-06-23). *Catalogue of Life*. <https://doi.org/10.48580/dfpx>
- Begum N., Qin, C., Abass Ahanger, M., Raza, S., Ishfaq Khan, M., shraf, M. Ahmed, N., y Zhang, L. (2019). Role of arbuscular mycorrhizal fungi in plant growth regulation: implication in abiotic stress tolerance. *Frontiers in Plant Science* 10, 1068.
- Björkman, E. (1970). Forest tree mycorrhiza—the conditions for its formation and the significance for tree growth and afforestation. *Plant and Soil*, 32(1-3): 589-610.
- Brundett, M.C. (1996). Mycorrhizas in the Kakadu region of tropical Australia. *Plant and soil*. 184, 159-171
- Brundett, M.C. (2002). Coevolution of roots and mycorrhizas of land plants. *New Phytol*. 154: 275-304.
- Cantrell, I.C. y Linderman, R.G. 2001. Preinoculation of lettuce and onion with VA mycorrhizal fungi reduces deleterious effects of soil salinity. *Plant and Soil* 233: 269–281.
- Catalán, G. (2018). Estudio comparativo de los efectos de dos estrategias de fertilización sobre el desarrollo de un cultivo de cebada y sobre las propiedades del suelo. Escuela Politécnica Superior de Huesca (EPS). Universidad de Zaragoza (Ined.).
- Cué, J. L. y Torres García, A. (2014). Valoración agroecológica de las micorrizas vesículo arbúsculares. Escuela Superior Politécnica del Chimborazo. Universidad Técnica del Norte. Riobamba, Ecuador (Ined.).
- Dunin Borkowski, A. S. (2020). Agricultura tradicional de orillado en el cauce de las quebradas en el bosque estacionalmente seco de la costa norte del Perú: estudio de caso Jaguay Negro y Casitas. *Espacio y Desarrollo*, Vol 34, pags 163-173.
- Faggioli, V. S., Gudiño, S., Baigorria, T., Boccolini, M., & Cazorla, C. R. (2013). Respuesta de cereales de invierno a la inoculación con micorrizas sobre la producción de materia seca y absorción de fósforo del suelo. *INTA, Estación experimental agropecuaria Marcos Juárez: Universidad Nacional Villa María, Córdoba. mycorrhizal fungi increase biomass in woody species of a semiarid environment. Tree Physiology*, 38(1), 25-36.
- Fernández, R (2008) “Las micorrizas: Desenterrando un tesoro”, *Revista Agricultura Orgánica ACTAF*, Volumen 1, Páginas 22-25.
- Ferrer, R., Furrázola, E., Herrera R. y García, M. (1992). Influencia de varias cepas de hongos MVA solas o combinadas sobre el crecimiento de tres variedades de tomate. *VIII Seminario Científico del INCA Y I Taller de Biofertilizantes en los Trópicos, La Habana*, p. 48.
- Franco, J., D. (2019). Efectos beneficiosos de las micorrizas sobre las plantas. Bioscrips. Universidad de Sevilla (Ined.).
- Frank, A. B. (1885). Uber di auf werzelsymbiose beruhende Ernährung gewisser Baume durch unterirdischplize. *Ber. Dtsch. Bot. Ges.* 3: 128-145.
- Gallaud I. (1905). Etudes aur les mycorrhizes endotrophes. *Revue Generale de Bolamque*, 479-500.
- Garzón, L. P. (2016). importancia de las micorrizas arbusculares (ma) para un uso sostenible del suelo en la

- amazonia colombiana. *Revista Luna Azul*, núm. 42, pags. 217-234. Universidad de Caldas.
- Giri, B., Kapoor, R. y Mukerji, K.G. (2003). Influence of arbuscular mycorrhizal fungi and salinity on growth, biomass and mineral nutrition of *Acacia auriculiformis*. *Biology and Fertility of Soils* 38: 170–175.
- Hartig, T. (1878). *Anatomie und physiologie der holzpflanzen: Dargestellt in der entstehungsweise und im entwicklungsverlaufe der einzelzelle, der zellsysteme, der pflanzenglieder und der gesamtpflanze*. J. Springer.
- Heikham, E., Rupam, K., and Bhoopander G. (2009). *Arbuscular mycorrhizal fungi in alleviation of salt stress: a review*. Applier Mycology Laboratory, Department of Botany, University of Delhi, India.
- Hiltner, L. (1904). Über neuere Erfahrungen und Probleme auf dem Gebiete der Bodenbakteriologie unter besonderer Berücksichtigung der Gründüngung und Brache. *Arb DLG* 98:59-78
- Itilier, M., Ceccon, E., Cuenca, G., Hernández, I., Muñoz, A. A., Hernández, D., Martínez, E., Dalmasso, A. y Pérez, D. (2014). Aspectos ecológicos, microbiológicos y fisiológicos de la restauración de ambientes degradados de zonas áridas. Aportes de investigaciones de Argentina, Chile, Venezuela y México Aspectos ecológicos, microbiológicos y fisiológicos de la restauración de ambientes degradados de zonas áridas. Aportes de investigaciones de Argentina, Chile, Venezuela y México.
- Johansson, J. F., Paul, L. R., y Finlay, R. D. (2004). Microbial interactions in the mycorrhizosphere and their significance for sustainable agriculture. *FEMS Microbiology Ecology*, 48(1), 1–13.
- Khalil Gardezi, A., Márquez Berber, S. R. y Ayala Garay, A. V.(2015). Los usos y beneficios de las micorrizas en agricultura. *Tecnología y Desarrollo*. 243- 265
- Kile, P. A., González, Y. y Reyes, D. (2008). Evaluación del empleo de micorrizas vesículo arbusculares combinadas con diferentes niveles de nitrógeno en tomate. *Centro Agrícola*, 35(4), 15-18.
- Koide, R.T. y Mosse, B. (2004). A history research on arbuscular mycorrhiza. *Mycorrhiza* 14: 145-163
- Kumar, A., Yadav, A. N., Mondal, R., Kour, D., Subrahmanyam, G., Shabnam, A. A., ... & Malyan, S. K. (2021). Myco-remediation: a mechanistic understanding of contaminants alleviation from natural environment and future prospect. *Chemosphere*, 284, 131325.
- Lu, R., Hu, Z., Zhang, Q., Li, Y., Min W., Xian-Ling, W., Xue, Y., Jie-Ting; Z., Li-Qin J., Yuan-Xiao, Chang-Lian, P. (2020). The effect of *Funneliformis mosseae* on the plant growth, Cd translocation and accumulation in the new Cd-hyperaccumulator *Sphagneticola calendulacea*. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 203, 110988.
- Maldonado-Chávez, E., Rivera-Cruz, M. C., Izquierdo-Reyes, F., & Palma-López, D. J. (2010). Effects of rizosphere, microorganisms and fertilization on bioremediation and phytoremediation of soils with new and weathered crude oil. *Universidad y ciencia*, 26(2), 121-136.
- Martínez-Medina, A., Pescador, L., Fernández, I., Rodríguez-Serrano, M., García, J. M., Romero-Puertas, M. C. y Poo, M. J. (2019). Nitric oxide and phytohemoglobin PHYOGB1 are regulatory elements in the *Solanum lycopersicum*- *Rhizophagus irregularis* mycorrhizal symbiosis. *New Phytologist*, 223(3): 1560-1574.
- Melin, E. (1923). Experimentelle Untersuchungen über die Konstitution und Ökologie der Mykorrhizen von *Pinus silvestris* und *Picea abies*. *Mykol Untersch Ber von R Falck*, 2, 73-330.
- Moreno, J. (2020). Evaluación del efecto de la micorrización en plantas de berenjena y pimiento crecidas en condiciones de estrés abiótico. Universitat Politècnica de Valencia(Tesis Doctoral, Ined.).
- Nedorost, L.; Vojtiskova, J. y Pokluda, R. (2012). Influence of watering regime and mycorrhizal inoculation on growth and nutrient uptake of pepper (*Capsicum annuum* L.). *VII International Symposium on Irrigation of Horticultural Crops*. 559-564.
- Pérez, M. (2019). Potencial micorrízico y microorganismos fúngicos cultivables en suelos de agricultura ecológica de la Hoya de Huesca. Escuela Politécnica Superior. Universidad de Zaragoza Trabajo de Fin de Grado).
- Peyronel, B., Fassi, B., Fontana, A., Trappe, J.M. (1969). Terminology of mycorrhizae. *Mycologia* 61: 410-411.
- Read, D. (1998) Plants un the web. *Nature* 396: 22-23.

- Rehman, A., Javed, N., Sahi, S. T., Mukhtar, T., Khan, S. A., & Ashraf, W. (2017). *Glomus mosseae* (Gerd & Trappe) and neemex reduce invasion and development of *Meloidogyne incognita*. *Pakistan J. Zool*, 49(3), 841-847.
- Rodríguez, Y., Dalpé, Y., Séguin, S., Fernández, K., Fernández, F., & Rivera, R. A. (2011). *Glomus cubense* sp. nov., an arbuscular mycorrhizal fungus from Cuba. *Mycotaxon*, 118(1), 5.
- Rojas, K., & Ortuño, N. (2007). Evaluación de micorrizas arbusculares en interacción con abonos orgánicos como coadyuvantes del crecimiento en la producción hortícola del Valle Alto de Cochabamba, Bolivia. *Acta nova*, 3, 697-719.
- Sannazzaro, A.I., Echeverria, M., Alberto, E.O., Ruiz, O.A., Menéndez, A.B. (2007). Modulation of polyamine balance in *Lotus glaber* by salinity and arbuscular mycorrhiza. *Plant Physiology and Biochemistry* 45: 39-46.
- Sawers, R.H., Gutjahr, C. y Paszkowski, U. (2008). Cereal micorriza: an ancient symbiosis in modern agricultura. *Trends in Plant Science* 13 (2): 93-97.
- Swetha, S. y Padmavathi, T. (2019). Mitigation of Drought Stress by *Piriformospora indica* in *Solanum melongena* L. cultivars. *Proceedings of the National Academy of Sciences, India Section B: Biological Sciences*, 1-9.
- Tallapragada, P., Dikshit, R. y Seshagiri, S (2016). Influence of *Rhizophagus* spp. And *Burkholderia seminalis* on the Growth of tomato (*Lycopersicon esculatum*) and Bell Pepper (*Capsicum annum*) under Grought Stress. *Communications in Soil Science and Plant Analysis* 47(17): 1975-1984.
- Tian, L., Shi, S., Ma, L., Zhou, X., Luo, S., Zhang, J., Lu, B y Tian, C (2019).c The effect og *Glomus intraradices* on the physiological properties of *Panax ginseng* and on rhizospheric microbial diversity. *Journal of Ginseng Research*. Vol 43, pags. 77-85
- Trappe, J. M. (1987). “*Phylogenetic and Ecologic Aspects of Mycotrophy in the Angiosperms from an Evolutionary Standpoint*”, en Safir, G. R. (Ed.). *Ecophysiology of V-A Mycorrhizal Plants*. CRC. Press Inc., Boca Raton, Florida, USA.
- Vannette, R. L., Hunter, M. D. and Rasmann, S. (2013). *Arbuscular mycorrhizal fungi alter above – and below – ground chemical defense expressdion differentially among Asclepias species*. Biology Departt, Stanford University, CA, USA.
- Wilcox, W.F. (1989) Influence of environment and inoculum density on the incidence of brown rot blossom blight of sour cherry. *Phytopathology* 79, 530-534.
- Wilkinson, D.M. (2001). Mycorrhizal evolution. *Trends Ecol. Evolut.* 16: 64-65.
- Yamamoto, K., Endo, N., Degawa, Y., Fukuda, M., Yamada, A. (2017) First detection of Endogone ectomycorrizas in natural oak forest. *Mycorrhiza* 27, 295301.
- Zuccarini, P. y Okurowska, P. (2008). Effects of mycorrhizal colonization and fertilization on growth and photosynthesis of sweet basil under salt stress. *Journal of Plant Nutrition* 31: 497-513.