



UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS FORESTALES Y DE LA
CONSERVACIÓN DE LA NATURALEZA
ESCUELA DE CIENCIAS FORESTALES
DEPARTAMENTO DE SILVICULTURA Y CONSERVACIÓN DE LA
NATURALEZA

ESTADO DEL ARTE DEL EFECTO DE LAS MICORRIZAS ARBUSCULARES
SOBRE LA RESISTENCIA AL ESTRÉS HÍDRICO EN ESPECIES LEÑOSAS DE
AMBIENTES MEDITERRÁNEOS Y PROPUESTAS PARA SU USO EN
PLANTACIONES DE ESPECIES NATIVAS EN CHILE CENTRAL

Memoria para optar al Título
Profesional de Ingeniero Forestal

PEDRO PABLO ARAYA CAÑELLAS

Profesor Guía: Eduardo Martínez H. Ingeniero Forestal. Doctor en Ciencias
Silvoagropecuarias y Veterinarias.

Santiago, Chile
2021

**UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS FORESTALES Y
DE LA CONSERVACIÓN DE LA NATURALEZA
ESCUELA DE CIENCIAS FORESTALES
DEPARTAMENTO DE SILVICULTURA Y CONSERVACIÓN DE LA
NATURALEZA**

**ESTADO DEL ARTE DEL EFECTO DE LAS MICORRIZAS ARBUSCULARES
SOBRE LA RESISTENCIA AL ESTRÉS HÍDRICO EN ESPECIES LEÑOSAS DE
AMBIENTES MEDITERRÁNEOS Y PROPUESTAS PARA SU USO EN
PLANTACIONES DE ESPECIES NATIVAS EN CHILE CENTRAL**

Memoria para optar al Título
Profesional de Ingeniero Forestal

PEDRO PABLO ARAYA CAÑELLAS

| Calificaciones: | Nota | Firma |
|-------------------------------------|-----------|-------|
| Prof. Guía Sr. Eduardo Martínez H. | ...6,8... | |
| Prof. Consejero Sr. Carlos Magni D. | ...6,5... | |
| Prof. Consejero Sr. Oscar Seguel S. | ...6,5... | |

AGRADECIMIENTOS

Quiero agradecer a mis padres por todo el apoyo durante todos estos años, en especial a mi madre por dedicar gran parte de su vida a mi educación, a mi familia en general, a mi pareja, amigos, compañeros, a los profesores que aportaron a mi formación como persona tanto en valores como en lo académico, a todos ellos, desde el colegio hasta los que fueron parte de mi formación profesional durante la universidad, especialmente a aquellos que mostraron gran pasión por compartir sus conocimientos y aportar con mi aprendizaje. Agradezco también a mi profesor guía y profesores consejeros por ser partícipes a través de sus recomendaciones en la elaboración de esta memoria. Mencionar también al personal de salud, aseo, deportivo y administrativo por hacer que mi paso por la universidad haya sido grata.

Además, quisiera agradecer a la compañía Anglo American S.A. Operación Los Bronces, por auspiciar la investigación en materia de inoculación con micorrizas la cual forma parte del proyecto de Centro Productor de Semillas y Árboles Forestales (CESAF) de la Universidad de Chile “Gestión de Recursos Fitogenéticos”.

ÍNDICE

| | |
|--|----|
| 1. RESUMEN..... | 1 |
| 2. ABSTRACT | 2 |
| 3. INTRODUCCIÓN | 3 |
| 4. MATERIAL Y MÉTODOS | 5 |
| 4.1. Material..... | 5 |
| 4.2. Método..... | 5 |
| 5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN..... | 8 |
| 5.1. Análisis bibliométrico de las referencias existentes y utilizadas..... | 8 |
| 5.2. Micorrizas arbusculares y su influencia en especies leñosas de ambientes mediterráneos | 12 |
| 5.2.1. Establecimiento de especies leñosas de ambientes mediterráneos | 12 |
| 5.2.2. Cambio climático y sus repercusiones en la escasez hídrica | 13 |
| 5.2.3. Utilización de micorrizas arbusculares para potenciar el desarrollo y sobrevivencia de especies leñosas en situaciones de escasez hídrica | 14 |
| 5.3. Propuesta de uso de micorrizas arbusculares para el establecimiento de especies mediterráneas en Chile central | 16 |
| 5.3.1. Fundamentos para la proposición sobre el uso de las micorrizas arbusculares .. | 17 |
| 5.3.2. Viverización, elaboración de sustrato y aplicación de micorrizas arbusculares . | 18 |
| 5.3.3. Silvicultura en bosques nativos de Chile | 20 |
| 5.3.4. Trasplante desde el vivero al suelo del terreno..... | 24 |
| 5.3.5. Economía circular | 25 |
| 5.3.6. Micorrizas arbusculares como posible alternativa de uso frente a fertilizantes y pesticidas..... | 27 |
| 5.3.7. Leyes, regulaciones e importación de Chile | 28 |
| 5.3.8. Experiencias en la utilización de micorrizas arbusculares en el mundo..... | 29 |
| 5.3.9. Conocimiento y uso actual de micorrizas arbusculares en Chile..... | 33 |
| 5.3.10. Propuestas de uso para especies nativas de Chile con micorrizas arbusculares | 35 |
| 6. CONCLUSIONES | 38 |
| 7. BIBLIOGRAFÍA..... | 39 |

ÍNDICE DE CUADROS

| | |
|---|---|
| Cuadro 1. Palabras clave a utilizar en la búsqueda de material bibliográfico. | 6 |
| Cuadro 2. Palabras clave para la búsqueda de información. | 7 |

ÍNDICE DE FIGURAS

| | |
|---|----|
| Figura 1. Mapa de calor sobre palabras clave relacionadas al tema de estudio | 8 |
| Figura 2. Documentos científicos relacionados a micorrizas arbusculares a través del tiempo..... | 9 |
| Figura 3. Porcentaje de publicaciones encontradas y utilizadas en idioma inglés y español. | 10 |
| Figura 4. Países de origen de los documentos consultados y utilizados. | 11 |
| Figura 5. Cambios metabólicos y fisiológicos por simbiosis micorrícica (French, 2017).. | 15 |

1. RESUMEN

El cambio climático ha sido motivo de preocupación durante las últimas décadas, afectando negativamente los recursos. La escasez de agua repercute en formaciones naturales de vegetación, productores agrícolas y plantaciones forestales, dificultando la captación de agua suficiente que requieren las especies vegetales, provocando un estrés que afecta su rendimiento y desarrollo. Desde hace millones de años los hongos han existido en la tierra y han sido participes dentro de los procesos de evolución de las plantas; se destacan dentro de ellos los que forman micorrizas del tipo arbuscular, los cuales realizan un aporte significativo a las plantas en funciones de recolección de nutrientes y agua, por lo que, pueden jugar un papel importante a la hora de ayudar a las especies vegetales a obtener agua en situaciones de escasez hídrica. Existen muchos tipos de hongos, pero para el presente trabajo se analizaron en particular los que forman micorrizas arbusculares con especies leñosas, para así poder recopilar información y obtener conclusiones acerca de cómo replicar esta tecnología en el territorio central de Chile. Mediante la búsqueda y sistematización de información existente en la literatura científica se describió y analizó el estado del arte del uso de micorrizas arbusculares como medida para aumentar la resistencia al estrés hídrico en especies leñosas de ambientes mediterráneos, y luego finalizar con una propuesta para su aprovechamiento en Chile central. Se concluye que es viable la utilización de micorrizas arbusculares en Chile para aprovecharlas en plantaciones de bosque nativo en la zona central del país, ya que existen muchas variedades de especies de este tipo de hongos, siendo el 80% compatible con la mayoría de las familias de especies vegetales del mundo. Su aporte radica en que ayudan a las plantas a recolectar agua mediante la extensión del volumen de sus raíces, y además existen antecedentes que señalan rendimientos favorables para las especies endémicas que forman simbiosis con micorrizas arbusculares.

Palabras clave: Simbiosis micorrízica, escasez hídrica, micorriza arbuscular, consorcios micorrízicos, micorrizas mediterráneas.

2. ABSTRACT

Climate change has been a matter of concern in recent decades, negatively affecting resources. The scarcity of water affects natural vegetation formations, agricultural producers and forest plantations, making it difficult to capture enough water required by plant species, causing stress that affects their yield and development. For millions of years, fungi have existed on earth and have been participants in the evolutionary processes of plants; among them those that form arbuscular mycorrhizae stand out, which make a significant contribution to plants in functions of harvesting nutrients and water, so they can play an important role in helping plant species to obtain water in situations of water scarcity. There are many types of fungi, but for the present work those that form arbuscular mycorrhizae with woody species were analyzed in particular, in order to collect information and obtain conclusions about how to replicate this technology in the central territory of Chile. Through the search and systematization of existing information in the scientific literature, the state of the art of the use of arbuscular mycorrhizae as a measure to increase resistance to water stress in woody species of Mediterranean environments was described and analyzed, and then finalized with a proposal for its use in central Chile. It is concluded that the use of arbuscular mycorrhizae is viable in Chile to take advantage of them in native forest plantations in the central zone of the country, since there are many varieties of species of this type of fungi, 80% being compatible with most families of plant species in the world. Their contribution lies in the fact that they help plants to collect water by extent of the volume of their roots, and there is also history that indicates favorable yields for endemic species that form symbiosis with arbuscular mycorrhizae.

Key words: Mycorrhizal symbiosis, water scarcity, arbuscular mycorrhiza, mycorrhizal consortia, mediterranean mycorrhizae.

3. INTRODUCCIÓN

Los climas mediterráneos como los que se encuentran en Chile, California, Sudáfrica, suroeste de Australia, y la Cuenca Mediterránea, se caracterizan por tener veranos secos y calurosos, e inviernos lluviosos y fríos (Holdridge, 1967; Blumler, 2005; Marañón, 1997; Rundel y Cowling, 2013). La magnitud del periodo estival seco es variable, pero para el caso de Chile puede abarcar entre dos y ocho meses, dependiendo de la latitud, en los cuales no se registra ninguna precipitación efectiva (Casanova *et al.*, 2013). Dentro de este tipo de clima se encuentran especies leñosas que son autóctonas y desarrollan regeneración natural en condiciones particulares como presencia de hojarasca o alto nivel de materia orgánica del suelo, humedad o precipitaciones frecuentes, sombreado producto del dosel arbóreo o plantas nodrizas, y/o producto de la ausencia de herbivoría o mecanismos de resistencia a esta (Becerra *et al.*, 2008).

Estudios realizados por Giliberto y Estay (1978) en especies mediterráneas siempreverdes respecto al potencial xilemático demostraron que en verano las plantas tienen dificultades para absorber agua, a diferencia de invierno cuando hay más contenido de agua en el suelo. Sumado a las condiciones climáticas debido a la estacionalidad, la longitud y abundancia de las raíces también hace la diferencia en la absorción de agua, ya que mientras más exploración y a mayor profundidad se extienda el sistema radicular, mayor es el potencial xilemático (Marino, 2002).

Frente a la dificultad de las plantas de absorber agua y nutrientes en condiciones xéricas, existen hongos que se asocian a ellas y facilitan su desarrollo mediante la formación de micorrizas. Estas son la relación simbiótica entre las raíces de una planta y los micelios de un hongo, lo que mejora las condiciones de sobrevivencia tanto del huésped como del hospedante en condiciones de estrés osmótico (Blanco y Salas, 1997; Santander *et al.*, 2017). De esta forma las raíces pueden alcanzar un mayor volumen de exploración gracias a los micelios y absorber agua en donde originalmente no podían. Al mismo tiempo que mejora su absorción de agua, también ayuda a la obtención de nutrientes, los cuales a su vez son aprovechados por el hongo el cual no puede producirlos de manera independiente (Blanco y Salas, 1997).

Dentro de las clasificaciones de micorrizas se pueden encontrar a las denominadas endomicorrizas o micorrizas arbusculares, las cuales tienen la característica de modificar la morfología de las raíces de las plantas, colonizando intracelularmente la corteza de la raíz y extendiendo así el sistema radical por medio de un micelio extraradical, diferenciándose por este mecanismo del resto de asociaciones micorrízicas (Aguilera *et al.*, 2007; Finlay, 2008).

El establecimiento de las plantas requiere de diversos factores externos para que estas puedan germinar y sobrevivir a lo largo de su vida. Dentro de los elementos fundamentales para su desarrollo se encuentra el agua, la cual escasea producto del calentamiento global y debido a que se encuentra bajo un intenso uso por parte del ser humano, en proyectos asociados tanto a la producción agrícola como a la minería y al consumo humano (Bascopé, 2013; SONAMI, 2017). Bajo estos antecedentes, los megaproyectos deben someterse al Servicio de

Evaluación Ambiental (SEA), en particular cuando se afectan zonas con vegetación nativa, donde están obligados a cumplir con las compensaciones adecuadas exigidas por la institución fiscalizadora, la que en el caso de Chile es la Corporación Nacional Forestal (CONAF). En búsqueda de soluciones para que estas reparaciones ambientales se hagan efectivas, surge la posibilidad de utilizar micorrizas como un medio para ayudar a las plantas frente al estrés hídrico y lograr que se establezcan en lugares en donde el agua es limitada. Se desconoce el costo-beneficio de incluir la inoculación de plantas nativas en los programas de propagación y plantación de especies nativas en Chile, por lo que el presente análisis se centrará en este tipo de simbiosis, consultando la bibliografía correspondiente, para poder proponer tratamientos adecuados para el establecimiento de especies leñosas de ambientes mediterráneos en condiciones de escasez hídrica.

El objetivo global de este trabajo es realizar un análisis de la bibliografía existente respecto al uso de micorrizas arbusculares en el desarrollo de especies leñosas en ambientes mediterráneos, y a través de la recopilación del conocimiento vigente, proponer medidas de implementación en el territorio de Chile central. Específicamente se espera lograr:

- Actualizar el estado del arte sobre el efecto que tienen las micorrizas arbusculares sobre la resistencia al estrés hídrico en especies leñosas de ambientes mediterráneos.
- Proponer medidas de aprovechamiento de las micorrizas arbusculares para el establecimiento de especies leñosas de ambientes mediterráneos frente al estrés hídrico actual y proyectado para Chile central.

4. MATERIAL Y MÉTODOS

4.1. Material

El material empleado corresponde a bibliografía científica disponible en medios digitales, informes técnicos, libros, revistas, artículos, ensayos, entre muchos otros, de manera que constituyeran un aporte de información confiable y consistente para la elaboración del presente trabajo.

4.2. Método

El método empleado consiste en la búsqueda y sistematización de documentación científica existente, al igual que ensayos e informes técnicos sobre la implementación, desarrollo y/o cualquier otro contenido que sea de relevancia o se vincule con el objetivo del presente trabajo.

Se revisaron fuentes bibliográficas de revistas especializadas en las bases de datos de la Universidad de Chile como ScienceDirect, Scopus, ISI - Web of Science, EBSCO, Wiley Online Library, Nature, Springer Link, Oxford U. Press, IEEE Xplore, Westlaw Chile, ACS Publications, JSTOR, Sage Journals, Scielo, entre otras. El criterio para seleccionar la calidad de la fuente fue en base a información generada por personas del ámbito profesional o puramente científico, ya sea de universidades, laboratorios, empresas, revistas científicas, así como también conferencias (expresadas en documentos) y periodismo científico a modo de entrevistas personales a profesionales o innovaciones en la materia. La búsqueda y selección de los documentos no se hará de acuerdo a un rango de años en particular, es decir, se hará en base a todo lo que exista hasta la fecha de realización del documento (marzo 2021), ya que se pretende abarcar el mayor conocimiento posible, discriminando solo resultados o conocimiento redundante en la medida en que se avanza en la investigación.

Para realizar la búsqueda de información se utilizaron palabras clave tanto en español como en inglés, y éstas fueron en relación al tema de interés dentro del trabajo (Cuadro 1). La búsqueda se delimitó respecto al contexto de micorrizas arbusculares y su influencia en especies leñosas de ambientes mediterráneos, contexto de crisis hídrica y el costo-beneficio que implica la utilización de este tipo de asociación micorrícica. Además, se utilizó la plataforma *Scholar Google* para la búsqueda de información a través de las palabras clave y sus combinaciones. Con la información recopilada, se procedió a su lectura y selección para la redacción del presente documento.

Cuadro 1. Palabras clave a utilizar en la búsqueda de material bibliográfico.

| Español | Inglés |
|----------------------------|-----------------------|
| Simbiosis micorrícica | Mycorrhizal symbiosis |
| Micorriza | Mycorrhiza |
| Micorriza arbuscular | Arbuscular mycorrhiza |
| Estrés hídrico | Water stress |
| Calentamiento global | Global warming |
| Clima mediterráneo | Mediterranean climate |
| Especies leñosas | Woody species |
| Establecimiento de plantas | Plant establishment |

Debido a que existen distintos métodos de inoculación de micorrizas arbusculares en especies leñosas de ambientes mediterráneos, se procedió a la recopilación de información existente en la literatura, sobre las experiencias en esta materia. Posteriormente, se evaluaron los documentos recopilados en base a su validez y procedencia a través de una revisión bibliográfica, cerciorando que la fuente de información fuera confiable para establecer el marco teórico y empírico respecto a los mejores métodos para inocular, necesarios para la comprensión y la determinación de la conveniencia de uso.

Además, se realizó un análisis bibliométrico minucioso, que tomó resultados de proyectos precedentes, las técnicas empleadas y los componentes en el establecimiento de especies leñosas de ambientes mediterráneos con la ayuda de micorrizas arbusculares. Para lo anterior se consideró un mínimo de 30 publicaciones para corroborar que los resultados obtenidos de esos estudios fueran efectivos en las técnicas empleadas y para conocer las óptimas técnicas de aplicación en terreno.

El presente trabajo estuvo enfocado para Chile central, por lo que la revisión bibliográfica se concentró sobre la implementación de micorrizas arbusculares en el establecimiento de especies leñosas, en distintos tipos de ambientes, esperando que los resultados provenientes de esta búsqueda de información pudieran ser replicables en el medio climático del territorio nacional.

La revisión sistemática de alcance para la búsqueda de información respecto al objetivo específico 2, se realizó consultando las palabras clave que se muestran en el Cuadro 2. Luego de filtrar en los motores de búsqueda en base a los idiomas de interés que son español e inglés, se procedió a seleccionar los documentos de acuerdo con el objetivo de encontrar información sobre la influencia que tienen las micorrizas arbusculares en especies leñosas de ambientes mediterráneos. Para lo anterior, se analizaron los títulos, palabras clave, resúmenes o abstractos y los términos del índice de cada documento consultado; posteriormente se seleccionaron solo los documentos que se relacionaban o respondieran al objetivo planteado (Arksey y O'Malley, 2005; Peters *et al.*, 2015). La información recopilada fue organizada de manera que pudiera realizarse el análisis bibliométrico, que consistió en la realización de gráficos sobre los países de procedencia y las instituciones u organizaciones que generan este

tipo de conocimiento, el año en que fueron publicados y el idioma en que fueron publicados. El criterio de selección de documentos respecto a su calidad fue el mismo que para el primer objetivo, y no se limitó a un rango de años en particular. Los resultados de estos gráficos pretenden arrojar resultados sobre la cantidad de información que generan los países e instituciones respecto al tema, si ha ido aumentando o disminuyendo este tipo investigación, y en qué tipo de idioma se publica en mayor cantidad.

Cuadro 2. Palabras clave para la búsqueda de información.

| Español | Inglés |
|--------------------------|---------------------------|
| Simbiosis micorrícica | Mycorrhizal symbiosis |
| Micorriza | Mycorrhiza |
| Micorriza arbuscular | Arbuscular mycorrhiza |
| Consortios micorrícicos | Mycorrhizal consortia |
| Micorrizas mediterráneas | Mediterranean mycorrhizae |

La construcción de los gráficos se realizó a través del software VOSviewer, el cual necesitó del software Java para su funcionamiento, y mediante la plataforma Scopus, se utilizó la palabra clave “Arbuscular mycorrhiza”. Con esta palabra clave se limitó la búsqueda al idioma inglés y español, para publicaciones en estado final, y solo para las áreas de investigación de Ciencia medioambiental, Ciencias agrícolas y biológicas. Los documentos resultantes fueron un total de 9.356 a partir de los cuales, se seleccionaron y exportaron en su totalidad con la información de la citación, bibliografía, resumen y palabras clave, detalles de financiación, entre otras informaciones. Posteriormente, la exportación fue realizada en formato RIS y guardado en los archivos de la computadora. Finalmente, se ejecutó la aplicación de VOSviewer, y en la sección de “mapa”, se creó uno basado en los datos bibliográficos guardados previamente, procurando que leyera los datos de los archivos del administrador de referencias y el tipo de análisis fuera en base a las “keywords”. El mapa obtenido de las palabras claves relacionadas al tema se adjuntó al trabajo. Además, gracias a los datos provenientes de Scopus se realizó un gráfico de tendencia de actividad científica por año respecto al tema.

Con los datos recopilados exclusivamente de documentos que tenían relación con micorrizas arbusculares se realizó un gráfico de acuerdo al idioma de publicación (Inglés y Español) y un gráfico de procedencia del país de origen de las publicaciones o investigaciones.

Los documentos recopilados y que se analizaron en la bibliometría, se utilizaron para la redacción de la memoria, abordando distintos subcapítulos y finalizando con una propuesta de utilización de micorrizas arbusculares en especies leñosas para Chile central, que surgió a partir del conocimiento adquirido en las lecturas seleccionadas.

documentos científicos por año, relacionados al tema sobre micorrizas arbusculares (Figura 2).

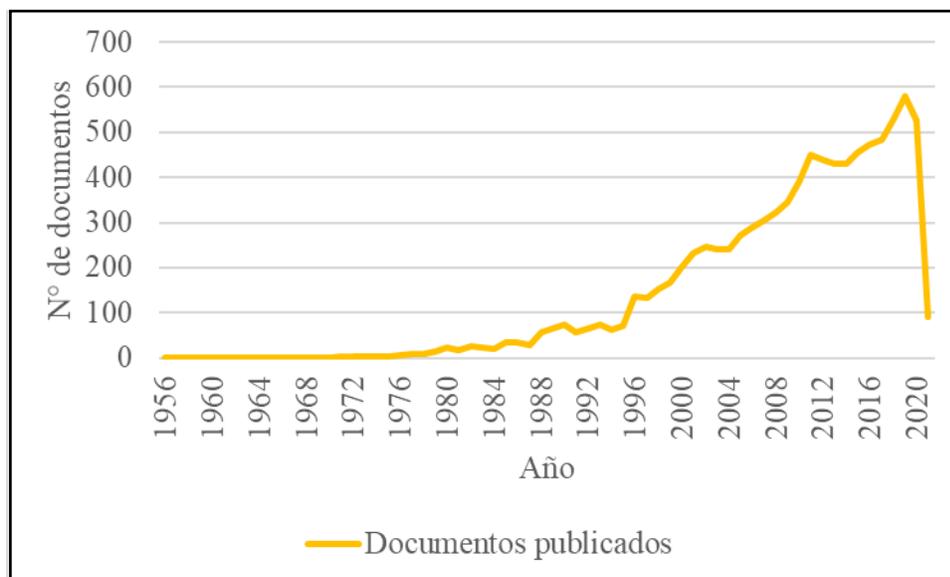


Figura 2. Documentos científicos relacionados a micorrizas arbusculares a través del tiempo.

Los datos de la Figura 2 muestran una tendencia creciente de las investigaciones relacionadas a micorrizas arbusculares, apreciándose una menor cantidad o casi nula entre los años 1956 hasta 1977, en donde comienzan a aumentar considerablemente hasta el año 2019, que es donde alcanza su punto máximo de documentos publicados, con una cantidad total de 579, y posteriormente una leve disminución a 525 en el año 2020 (estado de marzo de 2021). Esta tendencia al alza podría ser debido a los descubrimientos de los múltiples beneficios de estos organismos, que despertaron el interés científico, y la necesidad de utilizar tecnologías más sustentables con el medio ambiente. Una búsqueda realizada por Silva-Flores *et al.* (2019) en marzo de 2018 en ISI Web of Knowledge sobre hongos micorrícicos (MF) en los cinco ecosistemas mediterráneos (MTE), arrojó un total de 512 publicaciones en un lapso de 10 años, lo que señala la escasa investigación realizada sobre el tema en ese medio climático en particular. Respecto al análisis de la Figura 2, la leve disminución de publicaciones en el año 2020 podría deberse a la pandemia mundial del Covid-19, lo que pudo causar que la comunidad científica reenforcó sus esfuerzos en investigar sobre la enfermedad o bien se generaron contratiempos para realizar investigaciones y publicaciones.

La gran mayoría de búsquedas se hizo por medio del motor Scholar Google, y parte de ellas se extrajo de plataformas de divulgación científica como artículos de revistas científicas, trabajos para obtener algún tipo de grado académico, investigaciones universitarias, empresariales, entre otras.

Con un total de 124 documentos leídos y utilizados como referencias en este trabajo, 62 corresponden estrictamente a publicaciones referidas a micorrizas arbusculares, de las cuales 24 corresponden a textos en inglés y 38 a textos en idioma español (Figura 3). Se consideran únicamente estos dos idiomas, independientemente del país de origen, ya que existen publicaciones provenientes de China o la India, en donde no son su idioma nativo, pero aun así las investigaciones fueron publicadas en inglés. El criterio para seleccionar todos los documentos fue en relación a los temas a discutir dentro de la investigación, para enlazar adecuadamente el porqué es necesaria la investigación sobre micorrizas arbusculares, las circunstancias actuales del medio ambiente, el cómo y en qué circunstancias se desempeñan o utilizan las micorrizas, para así complementar la información reunida respecto a estudios realizados en especies leñosas con micorrizas arbusculares. La discusión generada a partir de la recopilación de información de los documentos seleccionados fue expuesta en los distintos capítulos de la presente investigación. La selección de publicaciones según el tipo de idioma fue en relación a lo que se encuentra actualmente disponible en los motores de búsqueda, sin un motivo en particular para discriminar ambos idiomas de la fuente de información.

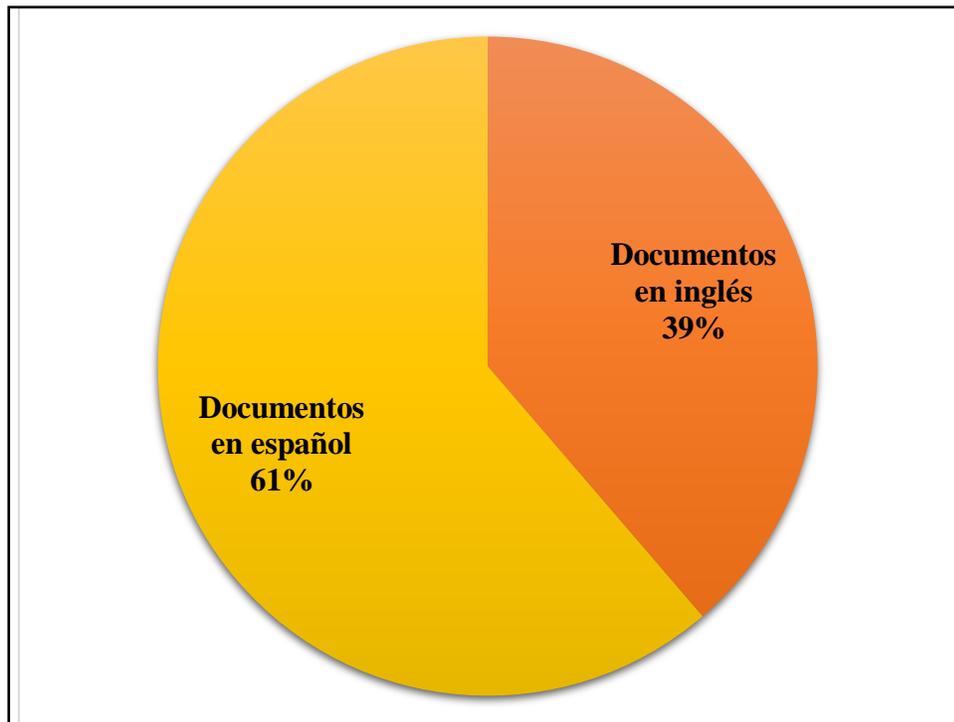


Figura 3. Porcentaje de publicaciones encontradas y utilizadas en idioma inglés y español.

Con la información proporcionada por el gráfico de porcentaje anterior, se puede evidenciar que la mayor cantidad de trabajos encontrados y utilizados para este trabajo fueron publicados en idioma español.

Los trabajos fueron realizados en distintas partes del mundo (Figura 4), en contexto de investigación respecto a los componentes de las micorrizas arbusculares, experimentación respecto a inoculación con distintas especies de plantas en lugares controlados como invernaderos y laboratorios, además de investigación en terreno analizando composición de especies en bosques de Chile.

Entre los textos leídos destacan los experimentos con distintas especies, situaciones ambientales, sustratos utilizados, tipos de estrés aplicados, aislamiento de factores para análisis de comportamiento. Destaca también la cooperación entre universidades, gobiernos, y entidades privadas.

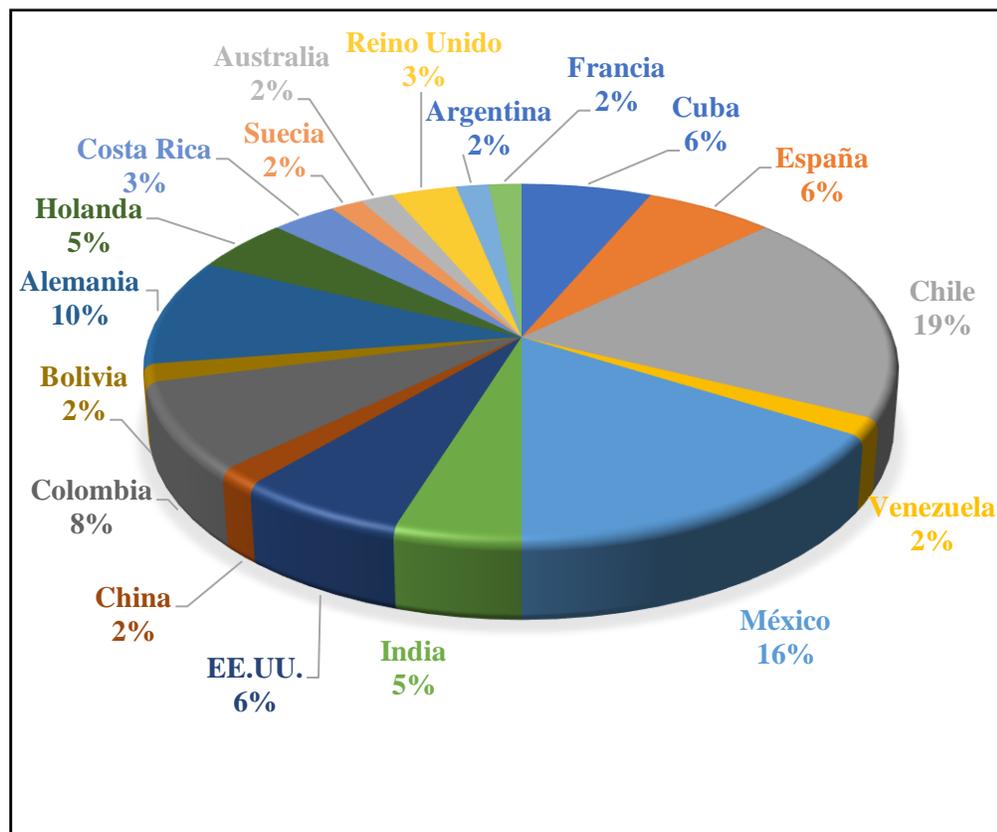


Figura 4. Países de origen de los documentos consultados y utilizados.

La Figura 4 muestra que la mayor cantidad de documentos consultados fueron realizados en Chile, con un 19%, y esto se debe a que el trabajo está enfocado para este país, por lo que se necesitaba la mayor información posible acerca de investigaciones realizadas allí. El segundo país con más cantidad de publicaciones consultadas fue México, con un 16% y en menor medida países como Bolivia, Venezuela, Suecia, China, Australia, Argentina y Francia, con 2%.

Las procedencias de cada país varían en cuanto a gobiernos, entidades privadas, editoriales y universidades, siendo estas últimas las que generan mayor cantidad de publicaciones científicas sobre micorrizas arbusculares. La mayoría de los autores citados corresponden a profesionales del área agrícola y forestal, el resto son de áreas relacionadas al ámbito medio ambiental, habiendo excepciones entre ellos.

5.2. Micorrizas arbusculares y su influencia en especies leñosas de ambientes mediterráneos

Las micorrizas son asociaciones simbióticas que ocurren entre los hongos y las raíces de las plantas, siendo parte importante para estas últimas dentro de su evolución y supervivencia. Esta relación beneficia a la planta aportando minerales y aumentando la superficie de absorción de agua, mientras que el hongo obtiene asimilados fotosintéticos. Están presentes en el 90% de las plantas y aportan significativamente a los ciclos de carbono, nitrógeno y fósforo. Dentro de la clasificación de las micorrizas, se encuentran las endomicorrizas y ectomicorrizas, las cuales se diferencian entre sí por la forma en que se sitúan las hifas del hongo que forma la simbiosis (Roldán, 1985; Salazar, 2016; Silva-Flores *et al.*, 2019).

Los hongos más primitivos del Reino Fungi, antiguamente denominados como “hongos inferiores”, son muy pequeños para apreciar sus setas a simple vista, y en este tipo se pueden hallar a cuatro clases que corresponden a las divisiones Chytridiomycota, Zygomycota, Blastocladiomycota y Glomeromycota. Esta última división se caracteriza por formar endomicorrizas, además de formar parte de las más antiguas, estando presente en la Tierra hace aproximadamente 460 millones de años, durante el periodo ordovícico, asociándose desde entonces con el 95% de las plantas vasculares (Salazar, 2016).

Dentro de las endomicorrizas se encuentran las Ericoides, Orquideoides y Arbusculares; estas últimas representan al 78% de las relaciones simbióticas en el planeta, debido a que son más generalistas, asociándose la gran mayoría a distintas especies vegetales (Silva, 2020). Pertenecen a la división Glomeromycota y se caracterizan por reproducirse exclusivamente por propagación vegetativa, por lo que no forman cuerpos fructíferos, logrando reconocerlas solo por microscopio. Forman arbuscúlos al interior de las raíces de las plantas y poseen esporas de gran tamaño con hifas no septadas (Salazar, 2016).

5.2.1. Establecimiento de especies leñosas de ambientes mediterráneos

La parte central de Chile se caracteriza por estar dentro de los cinco tipos de climas mediterráneos del mundo, albergando dentro de su extensión bosques de tipo esclerófilo siempreverde, similares en estructura y en ambiente a los que se pueden encontrar en la región de California de Estados Unidos (Rundel *et al.*, 2019). Bajo esta premisa, se entiende que cualquier especie leñosa que crezca en un ambiente climático de una región, se podrá desarrollar de igual o similar manera en el otro extremo del mundo bajo la condición de encontrarse en una zona climática semejante. Sin embargo, surgen ciertas excepciones donde

influyen la disponibilidad de nutrientes, las interacciones entre competidores, el factor antrópico y el microclima, entre otros (Padilla, 2008; Hauenstein *et al.*, 2014; Gómez *et al.*, 2015). Dentro de estos factores limitantes para el establecimiento de la vegetación, se encuentra el agua, que es uno de los elementos fundamentales para su sobrevivencia y desarrollo (MINAGRI-FAO, 2011; Aguilera *et al.*, 2015).

En situaciones de estrés hídrico y/o bajas temperaturas, los tallos de las plantas son más propensos a cavitación, entendida ésta como el corte de la continuidad de la columna de agua en los haces vasculares del continuo suelo-planta-atmósfera, debido a las tensiones negativas en su xilema (Marino, 2002). Frente a estas situaciones se produce embolismo en la planta, como un mecanismo de adaptación cuando la conductividad hidráulica en el xilema se ve afectada, de esta manera evita una pérdida excesiva de agua por vía estomática (Socorro, 2009). El embolismo producido por el estrés hídrico estaría relacionado con el tamaño de los poros de las paredes celulares de traqueidas y vasos, a diferencia del embolismo producido por bajas temperaturas que está relacionado con el diámetro de los vasos (Marino, 2002; Socorro, 2009).

Dependiendo de la estacionalidad, las condiciones de verano en climas mediterráneos provocan un estrés hídrico significativo en las plantas, mientras que en invierno esto no sucede debido a mayor contenido de agua en el suelo. En lugares más xéricos de disponibilidad de agua, dentro de regiones mediterráneas, especies deciduas a la sequía presentan un sistema radical superficial, reducen su área foliar y entran en períodos de dormancia para enfrentar de una mejor manera los períodos de sequías (Marino, 2002).

La temperatura, lluvia, humedad del suelo y fotoperiodo son variables importantes que permiten la floración en zonas tropicales, y se concentra debido a la actividad de polinizadores que se ve estimulada en algunos períodos del año. Esta característica es similar en zonas templadas, y además se infiere que los patrones de floración responden en gran proporción a factores bióticos (Arroyo *et al.*, 1981).

5.2.2. Cambio climático y sus repercusiones en la escasez hídrica

El cambio climático ha sido motivo de preocupación durante las últimas décadas debido a las diferentes repercusiones que ha dejado el calentamiento global y el efecto invernadero. Uno de estos cambios, es la escasez hídrica, siendo uno de los temas principales a considerar dentro de esta problemática. Se ha corroborado un aumento significativo en la temperatura a nivel global, por lo que Chile en particular, espera para los próximos años una alteración en su paisaje debido a veranos más cálidos e inviernos menos lluviosos (Bascopé, 2013; Boisier, *et al.*, 2018).

En otras partes del mundo, como en Ecuador, los efectos del cambio climático se evidencian por las inundaciones, sequías más frecuentes e intensas, y retirada de los glaciares de las sierras (Toulkeridis *et al.*, 2020). En México las precipitaciones disminuirán, provocando a su vez la falta de escurrimiento superficial y recarga de los acuíferos, sin mencionar además el estrés hídrico que se adjudicará al crecimiento poblacional y económico del siglo XXI (Martínez y Patiño, 2012). Debido a estos antecedentes se han realizado convenciones

internacionales para tratar estos asuntos, como por ejemplo el Acuerdo de París (Gauna, 2017). Sin embargo, no han sido suficientes las medidas tomadas para cumplir con las metas establecidas, ya que para los países sigue siendo más importante la producción y la economía, retrasando la implementación de tecnologías más sustentables (Di Pietro, 2019). Si bien se ha observado cooperación internacional para enfrentar el cambio climático, como la que existe entre la Unión Europea y América Latina, cada país debe hacerse cargo de sus propios problemas ambientales ya que estos varían localmente (Toulkeridis *et al.*, 2020).

Debido a la irregularidad de las precipitaciones y la escasez hídrica en ecosistemas mediterráneos, acrecentados por el cambio climático, las plantas tienden a mostrar mecanismos de adaptación en su ecofisiología, como por ejemplo el embolismo producto de la cavitación en los tallos. Sin embargo, algunas especies no lograrán por sí mismas sobrevivir al escenario futuro, dando lugar a extinciones locales (Valladares *et al.*, 2004). Bajo estos antecedentes, existen varias estrategias que permitirían mitigar los problemas de establecimiento de plantaciones de bosque nativo, como el uso de riego, el cambio de composición hacia especies más xéricas, prácticas de cosechas de aguas lluvias, mejoramiento genético, el uso de organismos simbioses como las micorrizas, entre otras. Esta revisión se focaliza en la utilización de micorrizas arbusculares para ayudar al establecimiento de especies leñosas de ambientes mediterráneos en situaciones de estrés hídrico para Chile central.

5.2.3. Utilización de micorrizas arbusculares para potenciar el desarrollo y sobrevivencia de especies leñosas en situaciones de escasez hídrica

Las micorrizas arbusculares se destacan por la invasión de los micelios del hongo a las zonas intercelulares de la raíz de una planta, llegando finalmente en el proceso de su infección hasta el interior de la célula, es decir, el micelio inicialmente pasa por la rizodermis y termina de extenderse hasta las células corticales de la raíz (Noda, 2009). Estos arbusculos se ubican en las zonas aledañas al cilindro vascular, desde ahí transfieren bidireccionalmente nutrientes desde el suelo y el huésped, mientras que la red de hifas que genera el hongo rodea a la raíz extendiéndose más allá de su rango convencional, ofreciendo una mayor área de absorción de nutrientes y agua a la planta infectada (Noda, 2009). Lo anterior resulta interesante para el área de conservación forestal, así como también para la agricultura en zonas áridas y semiáridas, donde los cultivos agrícolas y ecosistemas nativos se encuentran degradados debido a las sequías (Seguel, 2014).

Una investigación realizada por Augé (2001) sobre los efectos y mecanismos causales de los hongos micorrícicos vesículo arbusculares (VAM) en el equilibrio hídrico en situaciones de abundancia y escasez de agua, resume resultados de publicaciones científicas anteriores sobre el tema y sugiere mecanismos subyacentes, mediante información en tablas que exponen los efectos de VAM sobre los hospedadores respecto al tamaño, comparativas sin micorrizas (NM), cambios en las concentraciones de nutrientes en plantas expuestas a sequías, y documentos que tratan sobre la influencia de la sequía, aridez o gradientes propios de la humedad del suelo. Gracias a esta información se genera una discusión sobre los efectos, mecanismos, resistencia a la sequía e influencia del secado del suelo sobre los hongos y las

condiciones control, exponiendo los resultados y resumen de otros autores que experimentaron con VAM en especies leñosas (Augé, 2001).

Del mencionado trabajo se señalan dos tipos de resistencia a la sequía en las plantas, estando las que evitan sequía manteniendo un potencial hídrico interno alto, y las tolerantes que sobreviven con un bajo potencial hídrico (Augé, 2001). A su vez, las plantas que utilizan la tolerancia como mecanismo de resistencia, se subdividen en las que evitan y las que toleran la deshidratación, manteniendo un alto y bajo contenido interno del agua, respectivamente (Augé, 2001). Las plantas con VAM involucran un aumento en las estrategias de escape y tolerancia al estrés hídrico, y generalmente se asocian con la mejora del crecimiento, relacionado a una mejor adquisición de nutrientes, aunque una mayor capacidad de ajuste osmótico también es una característica de tolerancia a la sequía que las plantas con VAM demuestran en esas condiciones (Santander *et al.*, 2017). Desde perspectivas ecológicas y agrícolas, es mayor el interés que hay en caracterizar la sequía en términos de crecimiento, rendimiento y supervivencia. La influencia de VAM por sí misma que tiene sobre la absorción de agua es sustancial, sin embargo, aún se debe aprender a reproducir de forma fiable los efectos de VAM en cuanto a la hidratación, los que si se mantienen en el tiempo pueden tener efectos positivos sobre la aptitud de las plantas (Augé, 2001).

La Figura 5 muestra la simbiosis producida entre el hongo y su hospedante a nivel fisiológico y metabólico. Se forma una membrana periarbuscular (PAM) derivada de la planta hospedante, el espacio periarbuscular (PAS) que proviene del hongo y la planta, y la membrana plasmática del hongo. Estos cambios benefician la defensa contra el ataque de patógenos y herbívoros, además de aumentar la resistencia a la sequía y la tolerancia a metales pesados (French, 2017).

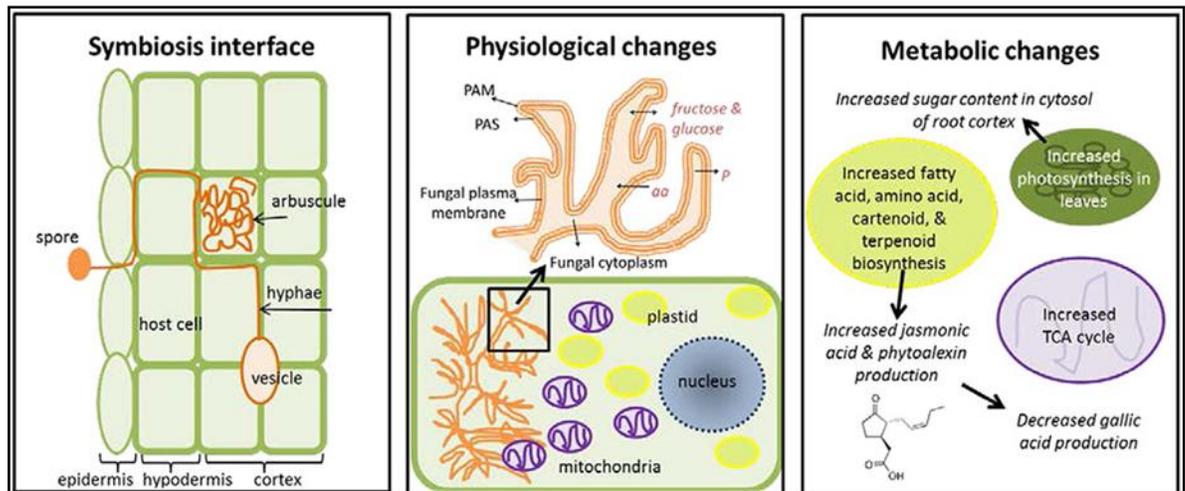


Figura 5. Cambios metabólicos y fisiológicos por simbiosis micorrízica (French, 2017).

Los hongos de la clase Glomeromicetes forman simbiosis endomicorriza con los olivos, contribuyendo a la absorción de nutrientes y el agua del suelo de manera más eficiente (Jornadas Nacionales de Olivicultura de la SECH, 2009). Los hongos forman micorrizas de

forma espontánea en situaciones naturales, pero bajo cultivo intenso, debido al uso de fertilizantes y agroquímicos se reducen las poblaciones de hongos nativos, llegando a dificultar el establecimiento de una simbiosis efectiva, y en el caso de llegar a formarse, la eficacia disminuye (Jornadas Nacionales de Olivicultura de la SECH, 2009). En países mediterráneos se ha demostrado la efectividad de la inoculación de hongos micorrízicos arbusculares en *Olea europaea* L. (olivo) en vivero y en campo, favoreciendo el crecimiento y supervivencia en suelos de baja fertilidad, elevada salinidad y bajo número de propágulos efectivos (Jornadas Nacionales de Olivicultura de la SECH, 2009).

Otras experiencias indican que las micorrizas arbusculares promueven el crecimiento de las plantas, mejoran la retención de agua del suelo, incrementan la absorción de nutrientes y agua y aumentan la resistencia de la planta al estrés abiótico como sequías, metales pesados, salinidad y suelos con bajos nutrientes (Trouvelot *et al.*, 2015). Por ejemplo, la especie *Vitis vinifera* (vid), que realiza simbiosis con hongos micorrízicos arbusculares, permite disminuir el uso de agua y aumenta la protección contra patógenos (Aguilar, 2013).

Las plantas programan estrategias de interacción, mediante defensa o interacción, dependiendo del agente externo que entra en contacto con ellas, permitiendo que se produzca la simbiosis discriminando al hongo como un organismo benéfico (Ramírez y Rodríguez, 2012). La disminución de la hormona ácido salicílico (SA) en las plantas permite que se tome lugar la simbiosis, interacción que a su vez incrementa ácido jasmónico (JA) y etileno (ET) en el hospedante, permitiendo que este obtenga mayor resistencia o tolerancia a las plagas; y estrategias de defensa como “priming” les permite actuar con mecanismos de memoria frente a estímulos, en donde los compuestos volátiles (VOCs) inducidos por herbívoros mejoran de manera directa e indirecta las respuestas de defensa, ya que las lesiones y ataques de estos aumentan los niveles de JA (Ramírez y Rodríguez, 2012).

5.3. Propuesta de uso de micorrizas arbusculares para el establecimiento de especies mediterráneas en Chile central

El clima de Chile central es de tipo mediterráneo el cual producto del cambio climático global ha sido alterado paulatinamente a condiciones más cálidas y secas, lo cual provoca cambios en diferentes especies respecto a su conductancia estomática, afectando la fotosíntesis (Marino, 2002; Rundel y Cowling, 2013). La alteración climática incrementa el fenómeno de la desertificación, afectando en gran medida a las especies vegetales autóctonas de nuestro país, las cuales se ven sometidas a un estrés ambiental que es poco habitual (Emanuelli *et al.*, 2016). Dentro de los factores negativos que se observan, se encuentra el estrés hídrico acrecentado por la acción del hombre, ya sea por necesidades de suministro de agua para riego o abastecimiento de agua para la población (Emanuelli *et al.*, 2016).

De acuerdo a Trivelli (2014), la vegetación de Chile Central corresponde a bosque esclerófilo, que en términos generales es un bosque heterogéneo en relación a su composición florística. También en esta zona del país se encuentra el bosque caducifolio caracterizado por las especies del género *Nothofagus*, en tanto en las regiones del Libertador General Bernardo O’Higgins (VI) y la Región del Maule (VII) se puede mencionar al Bosque Maulino,

comprendido por los bosques de hualo (*Nothofagus glauca*), lo cuales crecen asociados a diversas especies del bosque esclerófilo (Trivelli, 2014). Por último, este mismo autor destaca la importancia de las formaciones relictuales, que son un tipo de vegetación muy distinta a su entorno y que persisten gracias a condiciones microclimáticas de la cordillera de la costa, permitiendo conservar estas comunidades, las cuales incluyen especies como *Aextoxicon punctatum* y *Rhaphithamnus spinosus*.

Los hongos se utilizan ampliamente para producir medicamentos, pigmentos, bioetanol, biomateriales y antibióticos, recibiendo poca atención la investigación y utilización de las micorrizas arbusculares para su uso en el sector agrícola y forestal (French, 2017). En particular, las micorrizas pueden ser útiles para fines de conservación y restauración de comunidades vegetales degradadas debido a presiones antrópicas negativas (Silva-Flores *et al.*, 2019).

5.3.1. Fundamentos para la proposición sobre el uso de las micorrizas arbusculares

Las micorrizas, al presente, no son organismos alterados genéticamente, sino que son un producto que se obtiene mediante aislación de su medio natural y que luego se propaga a conveniencia. Su uso podría complementar y reducir el uso de fertilizantes, teniendo la ventaja de ser amigables con el medio ambiente (Noda, 2009; Pizarro, 2017). Expresan mejor sus cualidades cuando están en contacto con suelo o plantas bajo estrés, y la mayoría de ellas funciona en casi todas las especies con las que realiza simbiosis. Desde que se empezaron a conocer sus ventajas para la agricultura y forestación, muchas empresas y universidades comenzaron a investigarlas para aprovechar al máximo sus beneficios, sin embargo, aún no se domestica completamente al hongo, esperándose para los próximos años avances dentro de esta nueva tecnología para los cultivos (Pizarro, 2017).

Diversos microorganismos interactúan con las plantas y aquellos que las benefician generan distintos incrementos de rendimiento debido a diversos factores involucrados; es por esta razón que se está en la constante búsqueda de cuáles son las mejores combinaciones de estos recursos para obtener la máxima respuesta en las plantaciones, teniendo potencial de aplicación tanto en el área forestal y como la agrícola (Cassán *et al.*, 2017). Cada microorganismo lleva su propia huella de ADN que lo diferencia de los demás, por lo que cada especie de micorriza interactuará de diferente manera en términos de rendimiento con las distintas especies de plantas que se intenten inocular (Cassán *et al.*, 2017).

La propuesta de utilización de micorrizas arbusculares para el desarrollo de las plantas, se basa en que son una herramienta muy útil para la agricultura y las plantaciones forestales de manera sustentable para el medio ambiente (Cuenca *et al.*, 2007). Además de ofrecer mayor absorción de elementos poco móviles como el P, Cu y Zn, ofrecen protección frente a patógenos, mayor resistencia a las sequías y contribuyen a la formación de la estructura del suelo (Cuenca *et al.*, 2007).

5.3.2. Viverización, elaboración de sustrato y aplicación de micorrizas arbusculares

Dentro de las alternativas para inocular con micorrizas arbusculares, se encuentra la opción de inocular las plantas antes de llegar al campo. El cultivo en vivero resulta distinto al del suelo, ya que cada contenedor en el que crece una planta posee un tamaño determinado, en el cual se depositará una cantidad de sustrato predefinido por la capacidad de su volumen. El tamaño y la mezcla del sustrato son fundamentales, ya que de ellos dependerán la cantidad de oxígeno, agua y nutrientes que obtendrá la planta. Debido a las condiciones que están sometidas las plantas en vivero, como las temperaturas controladas y altos niveles de nutrimentos, los estomas alcanzan una apertura superior (Pastor, 1999). Esto conlleva a una pérdida mayor de agua y, por consiguiente, la planta exige más cantidad de riego para poder sobrevivir; sin embargo, mucha agua provoca problemas de aireación y para evitarlo se debe usar un sustrato con elevada porosidad (Pastor, 1999).

Dados estos antecedentes, el sustrato cumple un papel clave a la hora de dejar fluir el agua eficientemente y que las raíces capten la mayor cantidad posible, pero si se usa un mal sustrato, muy denso y con mal drenaje, el agua se acumulará y terminará por generar hipoxia a la planta (Quiroga, 1983; Delgado, 1985; Cabrera, 1999; Bracho *et al.*, 2009). Otro problema que se puede dar es que un sustrato mal elaborado deja fluir demasiado rápido el agua, perdiendo el recurso en vez de mantenerlo por mayor tiempo a disposición de las raíces de la planta; de esta manera, se debe utilizar una combinación de sustrato que permita que el agua sea aprovechada al máximo y de manera eficaz. Las propiedades físicas como aireación, retención de agua, densidad aparente y drenaje, son las más importantes, ya que una vez establecido el cultivo difícilmente se podrán mejorar si no son las adecuadas (Callejas *et al.*, 2009). Los rangos óptimos varían de la siguiente manera: capacidad de aireación, 10 a 20%; retención de agua, 55 a 70% (porcentaje con base en el volumen total del sustrato); densidad aparente $<0,4 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$; granulometría de 0,25 a 2,25mm; agua disponible entre 20 y 30% y espacio poroso total de 70 a 85% (Cabrera, 1999; Callejas *et al.*, 2009).

Estudios realizados con micorrizas arbusculares utilizando como sustrato cáscara de arroz (tamaño promedio 9,80mm) o arena (2,06mm), arrojaron resultados mayores respecto a niveles poblacionales (propágulos) para las variables de las micorrizas analizadas en el sustrato de arena debido al tamaño de la partícula (Gaur y Adholeya, 2000; Cuenca *et al.*, 2007). Lo anterior implica que la capacidad real y aparente aumentan a medida que el tamaño de la partícula (arena) disminuye (Vargas *et al.*, 2008). En comparativa con otra investigación similar, al utilizar materiales con partículas entre 0,50 y 0,78mm, se obtiene una óptima producción de inóculos de micorrizas arbusculares, debido a una mayor aireación, crecimiento radical, drenaje y suministro de O_2 (Cuenca *et al.*, 2007). Es decir, con sistemas de partículas de mayor tamaño no se forman tantos propágulos, debido a que brindan una menor retención de agua, siendo desventajoso para la producción de inoculantes (Gaur y Adholeya, 2000; Cuenca *et al.*, 2007).

Para favorecer la colonización micorrízica en las plantas, no solo el suministro de agua y oxígeno en el sustrato debe ser balanceado (Callejas *et al.*, 2009). El pH muy alto o bajo, la cantidad de agua y la temperatura pueden limitar o impedir la esporulación de los hongos, mientras que las bajas concentraciones de oxígeno debido a la baja capacidad de aireación del sustrato inhiben la germinación de las esporas de los hongos micorrícicos arbusculares

(Smith y Gianinazzi, 1988; Wang *et al.*, 1993; González *et al.*, 2000). Por estas razones las propiedades del sustrato son fundamentales para que pueda tener lugar la simbiosis y que el comportamiento de los HMA sea eficiente (González *et al.*, 2000).

Dependerá del tipo de cultivo, el sistema de plantación y el ciclo de crecimiento el mejor método de inoculación de las micorrizas. Los cultivos plantados en hileras destacan para temporadas cortas, obteniendo buenos resultados al colocar la semilla sobre el inóculo en un pequeño surco. En caso de complementar con fertilizantes, estos pueden depositarse en bandas laterales después de la germinación o durante la siembra. Para el caso de los árboles, se coloca el inóculo debajo de la estaca o plántula al momento de sembrar, y luego de una estación seca prolongada es bueno volver a inocular en bandas laterales. Si la cepa está bien establecida, no es necesario inocular nuevamente al segundo año (Howeler *et al.*, 1987). En resumen, la germinación y densidad de las esporas de micorrizas arbusculares dependen de la profundidad de muestreo del suelo, la cobertura vegetal, la fertilidad del suelo, el gradiente altitudinal (referido a gradiente climático que promueve la diversidad de especies mediante variables ambientales como precipitación y temperatura), la humedad del suelo, la concentración de metales pesados y el pH (Pérez, 2013; Cuyckens *et al.*, 2015; Ullah, 2019).

Productos químicos para controlar enfermedades, malezas e insectos afectan también a las micorrizas arbusculares, de manera positiva o negativa. Mediante experimentos se ha demostrado que la aplicación de herbicidas, por ejemplo, retrasa la acumulación poblacional de esporas. Sin embargo, el efecto es temporal, ya que luego de un tiempo la población vuelve a su equilibrio natural, no afectando el rendimiento final de las raíces formadas gracias a la simbiosis (Howeler *et al.*, 1987).

La incorporación de HMA a las plántulas en viveros puede realizarse a través de inóculo esporal o miceliar, pero la más sencilla es por medio de la aplicación esporal, la cual se aplica por medio de soluciones acuosas e incluso de manera directa por el sistema de irrigación del vivero, o bien se revuelve el producto en las semillas antes de la siembra. La inoculación a través del micelio se realiza aplicando diferentes cantidades de inóculo, dependiendo del tipo de contenedor, sustrato y planta hospedante (Quiroz *et al.*, 2001).

La aplicación de HMA se puede realizar en cualquier momento del desarrollo de un cultivo, sin embargo, se recomienda su aplicación durante las primeras etapas de crecimiento de las plantas, para que puedan crecer más robustas y con mejor adaptación a condiciones de estrés (Ramírez *et al.*, 2020). La inoculación puede realizarse seis a doce semanas después de la siembra directamente en tierra mediante el riego de una mezcla de agua destilada con el inóculo escogido (cuerpos fructíferos limpios), esto se describe como inóculo de esporas (Trujillo, 2009). Lo anterior puede efectuarse para inoculaciones en campo, siendo un método sencillo y económico; en el caso de utilizar micorriza comercial se aplica al momento del trasplante para que entre en contacto con la raíz, donde normalmente se utilizan 10g por planta, variando de acuerdo a las recomendaciones del productor del inóculo (Trujillo, 2009).

5.3.3. Silvicultura en bosques nativos de Chile

Los experimentos en laboratorios e invernaderos sirven para ponerlos a prueba en campo, donde las condiciones edáficas y climáticas son muy distintas, sin dejar de considerar, además, que la planta tendrá que sobrevivir por sí misma, sin intervención regular del ser humano para cuidados como fertilización, poda o riego, a diferencia de las plantaciones comerciales, las cuales sí los tienen frente a situaciones de estrés. En comparación al vivero, las raíces tienen más libertad de expansión en campo debido a que no están limitadas a sus maceteros o contenedores. Estudios en esta materia demostraron que, en períodos de sequía prolongada, las poblaciones de micorrizas arbusculares en las raíces de las plantas en campo disminuyen considerablemente, concentrándose en las capas más profundas del suelo (Howeler *et al.*, 1987). A diferencia de un invernadero, el ciclo de crecimiento de un cultivo en campo es mayor, por lo tanto, las micorrizas arbusculares tienen tiempo suficiente para desarrollar una asociación micorrízica exitosa en campo, aún con una población baja de hongos (Howeler *et al.*, 1987).

El sector forestal en Chile tiene programas de mejoramiento genético que han proporcionado importante información respecto a especies exóticas de uso comercial (pino y eucalipto), así como también para especies del bosque nativo (raulí) nacional (CONAF, 2015). Es importante esta área de investigación, debido a que su finalidad es poder disminuir la vulnerabilidad de estos tipos de bosques frente al cambio climático, trabajando sobre el material genético de cada tipo de especie (CONAF, 2015). En conjunto, las universidades, privados, alianzas público-privadas y el Instituto Nacional Forestal (INFOR) han contribuido con estos estudios, pero la información, aún no se ha podido diversificar entre todo el sector productivo, como viveros, pequeños y medianos propietarios. El desafío es disminuir las brechas de rendimientos, calidad y sobrevivencia de los rodales que existen entre las producciones de las grandes empresas y los productores pequeños (CONAF, 2015).

Como apoyo a los pequeños y medianos productores existen consultores forestales o extensionistas de CONAF, para poner en marcha los programas y actividades a nivel territorial, siendo un nexo entre el propietario y esta entidad; destacan al respecto operaciones como el manejo de plantaciones o bosque nativo y programas de forestación, para los cuales estos trabajos son apoyados con tecnología de software, siendo la modernización un factor clave dentro de este rubro (CONAF, 2015).

La producción nacional no puede estar sostenida por una o dos especies, por lo tanto, se hace necesario la incorporación de otras especies como materia prima, entrando en esta lista algunas especies del bosque nativo como por ejemplo los renovales de Robe, Raulí y Coihue debido a su gran abundancia para su aprovechamiento, además de Tapa, Lenga y Ulmo que participan entre las especies más comercializadas del país (Emanuelli y Milla, 2006; CONAF, 2014). De esta manera los recursos provenientes de las plantaciones responderían mejor a las exigencias de los mercados externos e internos, además de evitar eventuales enfermedades o plagas, enfrentar el dinamismo del cambio climático, junto con el problema de la escasez hídrica (CONAF, 2015).

Existe gran interés en estudiar los bosques de *Nothofagus* en Chile, pero también aparecen otras especies como el quillay y el canelo con gran potencial productivo (Donoso y Promis,

2013). También hay especies como el ruil y el hualo en la Región del Maule en estados delicados de conservación, para los cuales merece la pena evaluar sus potencialidades, además de encontrar en esta zona del país bosques de tipo forestal Siempreverde que pueden ser aprovechados en silvicultura multietánea (Donoso y Promis, 2013).

Debido a que la silvicultura de bosque nativo es un proceso que da resultados luego de un largo tiempo, es poco el interés que hay entre los profesionales de esta área e investigadores para avanzar dentro de esta temática, sumado a la poca confianza que se tenía de su potencial productivo en el pasado (Hans, 1993). Es por esta razón que a través del Fondo de Investigación en bosque nativo de la ley 20.283 sobre recuperación del bosque nativo y fomento forestal, se ha buscado despertar el interés por continuar las investigaciones en silvicultura de los bosques nativos (CONAF, 2012). Sin embargo, las investigaciones no han tenido los efectos esperados en cuanto a incentivar el buen manejo de los bosques nativos, a través de investigación en ecología forestal aplicada y silvicultura, lo cual se hace fundamental para la conservación (Donoso y Promis, 2013).

Para el caso de la especie *Quillaja saponaria*, que es un árbol nativo endémico siempreverde del bosque esclerófilo de la zona mediterránea de Chile, se incluye dentro de las recomendaciones de su manejo silvicultural aplicar un enriquecimiento con plantas nuevas de quillay y de otras especies esclerófilas, para aumentar la cobertura y biomasa del bosque (Cruz, 2013). Es en esta instancia del manejo cuando podría complementarse la plantación de nuevos individuos con micorrizas arbusculares para potenciar su desarrollo. Esto puede hacerse en la etapa de la viverización o en la etapa de trasplante, probando también con micorrizas comerciales. Antes de llevar esto a cabo debe realizarse investigación para determinar las especies nativas, aislarlas y probar sus efectos de forma aislada o en consorcio. Por ejemplo, según estudios realizados por Godoy *et al.* (1991) una de las mejores micorrizas para obtener el mejor índice de calidad de la especie *Quillaja saponaria* fue con la especie de hongo *Glomus intraradices*.

El concepto de enriquecimiento es toda plantación o siembra que se hace bajo dosel arbóreo o arbustivo de forma complementaria, con especies nativas comercialmente valiosas que son del mismo tipo forestal, con la finalidad de mejorar la composición o estructura de la formación (Contreras, 1997). Este tratamiento silvicultural, no necesariamente tiene que ser orientado solo a especies nativas, por lo cual puede ser aplicado de igual manera a especies exóticas. Cuando los bosques están degradados por prácticas de extracción con ausencia de planes de manejo adecuados, y se extraen ejemplares de mayor valor económico con calidades genéticas superiores, se deterioran los bosques intervenidos (Contreras, 1997). Para solucionar esto, las prácticas de enriquecimiento involucran la incorporación de individuos con alto valor, de manera de mejorar la capacidad productiva y calidad del bosque objetivo, aumentando la densidad de las especies anheladas (Di Marco, 2014).

Para el enriquecimiento en líneas, se necesita averiguar las necesidades lumínicas de las especies y su tolerancia a las heladas, para abrir adecuadamente el ancho de las fajas que van en forma paralela; posteriormente, se instalan las plantas en hileras entre 4 a 5 metros de distancia entre sí, y de acuerdo con la topografía del terreno se usan métodos manuales o mecánicos para la preparación de este (Di Marco, 2014). Según Vita (2019), en el bosque original se abren caminos o picadas donde se plantan varias hileras de la especie de interés; complementariamente, se deben anillar los árboles cuyas copas cubran la faja en altura,

teniendo presente eso sí que la distancia entre cada faja debe ser muy superior al ancho de fajas (>10m), debiendo contemplar limpiezas y raleos posteriores. Este método es más común en bosques densos heterogéneos, donde es de fácil aplicación, altera de forma mínima el ecosistema original y las plantas introducidas reciben protección lateral (Vita, 2019).

Existe también el procedimiento de enriquecimiento en bosquetes, que consiste en aprovechar los pequeños claros del bosque, los cuales pueden ser originados de forma natural o por medio de la acción del hombre, y en los que se plantan una o varias especies para así disminuir el riesgo (Di Marco, 2014). Este método es efectivo en superficies pequeñas y la selección de especies será fundamental a la hora de competir por los recursos, ya que los más vigorosos se impondrán por sobre los demás. De acuerdo con Vita (2019), el enriquecimiento en bosquetes bajo abrigo vertical es un método más complejo que el de fajas y corresponde a la plantación que crece resguardada bajo un dosel de alta densidad, la cual se realiza generalmente en cuadrados; la distancia entre bosquetes dependerá de la intensidad de la silvicultura, y los árboles sobre los bosquetes deben ser extraídos o anillados paulatinamente. Por último se encuentra el enriquecimiento en claros, el cual resulta adecuado para bosques fragmentados y se aplica en superficies de tamaños y formas irregulares, aprovechando los claros naturales, donde los individuos reciben protección lateral y se instalan según las condiciones de microhábitat (Vita, 2019).

En el caso de realizar una plantación desde cero, es muy importante la preparación del terreno, puesto que la eliminación de árboles, hierbas y arbustos evita la competencia por el espacio, nutrientes y el agua (Valenzuela, 1967). Además, la correcta plantación, estación del año, elección adecuada de las especies y protección inicial contra la herbivoría aumenta las probabilidades de un establecimiento efectivo de los individuos, por lo que la correcta operación de cada una de estas recomendaciones será clave a la hora de evitar replantes que muchas veces retrasan la formación del bosque a conseguir y que aumentan el costo económico respectivo (Valenzuela, 1967).

Posterior al plantado se deben realizar cuidados como inspecciones periódicas para verificar y asegurar el buen establecimiento y desarrollo de los individuos, realizar controles de malezas permanentes hasta que las plantas puedan superar la competencia por agua y nutrientes, y llevar a cabo detecciones tempranas de problemas sanitarios (Martínez, 2013).

Como se menciona anteriormente, uno de los factores clave para el efectivo establecimiento de las especies vegetales, es evitar el daño por pisoteo o mordedura de lagomorfos y el ganado, a través de construcción y mantención de cercos, por lo menos los primeros años, hasta que los árboles hayan alcanzado el diámetro y altura suficiente para valerse por sí mismos (Valenzuela, 1967).

La elección de especies para la plantación debe considerar las condiciones climáticas del sitio, el tipo de terreno, los objetivos planteados según el plan de manejo y las especies disponibles (Valenzuela, 1967). Para la zona central de Chile destacan algunas de las siguientes especies nativas arbóreas en donde al menos una de sus preferencias de crecimiento es en bosque: *Prosopis chilensis*, *Beilschmiedia miersii*, *Beilschmiedia berteriana*, *Peumus boldus*, *Drymis winteri*, *Austrocedrus chilensis*, *Nothofagus Leonii*, *Persea lingue*, *Podocarpus andina*, *Crinodendron patagua*, *Cryptocarya rubra*, *Gomortega keule*, *Quillaja saponaria*, *Nothofagus obliqua* var. *macrocarpa*, *Nothofagus glauca*, *Salix*

humboldtiana, *Prosopis tamarugo* (Valenzuela, 1967). En el caso de especies nativas arborescentes y arbustivas para la zona central, en que al menos una de sus preferencias sea crecimiento en bosque, se tiene como ejemplo a *Escallonia sp.* (Valenzuela, 1967).

Se sugiere efectuar la plantación de forma manual, evitando la utilización de maquinaria pesada para disminuir la compactación del terreno, sobre todo en sitios con pendientes superiores o iguales a 30% y en sitios con suelos de fragilidad muy alta (Martínez, 2013). Sin embargo, si se cuenta con los recursos y se decide realizar plantación mecanizada, el trabajo puede ser más eficiente, lo que implica la selección de maquinaria adecuada de acuerdo a las dimensiones y características del bosque, relacionado directamente con la topografía, especialmente con el tipo de pendiente (Carey *et al.*, 2007). Según Ruiz y Rodríguez del Rincón (1995) la mecanización del trasplante moderno exige que las plantas tengan cepellón. La época de plantación será fundamental, ya que las plantas deben disponer de una humedad adecuada para asegurar su establecimiento y desarrollo (Martínez, 2013). En zonas secas es recomendable verificar que el suelo del terreno tenga humedad hasta al menos 20 cm de profundidad (Martínez, 2013). La disposición de las plantas debe ir de manera que queden distribuidas de forma eficiente al ocupar el sitio (Martínez, 2013). Posteriormente se efectuarán los manejos forestales que se componen de tratamientos o intervenciones silvícolas correspondientes con finalidades ambientales o comerciales según sea el caso, por lo cual el propietario deberá presentar un plan de manejo ante CONAF (Martínez, 2013).

El clima de Chile central corresponde a un clima mediterráneo, el cual en condiciones de invernadero permite cultivar durante todo el año especies aptas para clima cálido por medio de instalaciones en donde se pueda regular el ambiente (FAO, 2002). Al usar sistema de invernadero para la producción de plantas, genera complicaciones en verano por el aumento excesivo de la temperatura dentro de los invernaderos, y la lluvia en invierno genera dificultades al uso de abrigo durante la estación fría del año (FAO, 2002). Para mejorar la productividad de las plantas es necesario aplicar la cantidad correcta de agua mediante el riego, y resulta fundamental en el caso de los cultivos protegidos ya que la pluviometría es nula (FAO, 2002). A su vez el riego proporciona un control climático extra, aportando regulación de temperatura y humedad del ambiente. El riego en invernadero y plantaciones puede realizarse por surcos, aspersion y de forma localizada, donde la frecuencia y duración del mismo tendrá efectos sobre el desarrollo del sistema de raíces, por consiguiente, si el riego es escaso, las raíces que son superficiales y poco extendidas se verán favorecidas en su crecimiento, pero serán muy sensibles a las sequías (FAO, 2002; Guerra *et al.*, 2010).

La preparación de suelos es fundamental para mejorar la retención e infiltración de agua y que las raíces de las plantas se establezcan adecuadamente (Martínez, 2013). Idealmente se deben realizar estas actividades en curvas de nivel (para aprovechar mejor el agua), ausencia de lluvias o cuando el suelo tenga bajo contenido de agua, de manera de prevenir la compactación (Martínez, 2013). Los tipos de preparación que existen son casilla manual o mecanizada, surcos con animales o con tractor, subsolado a 40cm, subsolado a 70cm con camellón (solo en suelos compactados), o drenes y preparación mecanizada (Martínez, 2013).

5.3.4. Trasplante desde el vivero al suelo del terreno

Antes de llevar a cabo una plantación, se debe tener acceso al abastecimiento de plantas y en el mejor de los casos deben obtenerse dentro del mismo sector o cercano a él, para asegurar que los individuos se adapten a las condiciones medioambientales del lugar. Generalmente se utilizan individuos provenientes de viveros, lo cual resulta complejo puesto que se deben realizar prácticas especializadas para la obtención de plantas de calidad. Además el vivero deberá contar con las exigencias del Servicio Agrícola y ganadero (SAG), como estar inscrito antes del 30 de septiembre de cada año, demostrar que el suelo/sustrato no supere los niveles de tolerancia de nemátodos fitopatógenos, contar con un Informe Fitosanitario Oficial de Análisis de suelos/sustratos realizado por algún laboratorio acreditado por el SAG, debe mantener un registro de las labores que se efectúan y disponer de instalaciones y el equipamiento necesario para realizar el control de plagas y garantizar la calidad en todas las etapas de producción y comercialización (Martínez, 2013).

Existen las plantas a raíz desnuda que necesitan embalaje para el traslado al terreno designado para la plantación, y también están las que son a raíz cubierta, que pueden estar en bolsas o en speedling (bandejas almacigueras expandidas en celdas). Cada individuo debe tener un aspecto sano, que asegure su buena calidad y antes del traslado debe tener la mínima manipulación posible para evitar la menor pérdida foliar, y la menor deformación del pan de la tierra, raíces y tallo. Se debe realizar un riego previo al momento del traslado para que no pierdan mucha agua durante el transporte o también se les puede aplicar un gel hidratante. El transporte debe ser realizado durante el mismo día que la cosecha para plantas a raíz desnuda. Las que vienen en contenedores o speedling pueden quedar almacenadas en el terreno designado para su plantación, bajo condiciones de sombra, buena circulación de aire y un riego de acuerdo a sus necesidades, y el tiempo de almacenaje debe ser lo más corto posible (Quiroz *et al.*, 2001; Martínez, 2013).

Cuando se realiza la plantación en suelos sin bosque (praderas), la preparación del suelo es uno de los factores determinantes para el éxito de la forestación. Las preparaciones se hacen de acuerdo al tipo de formato que vengán las plantas, la calidad del terreno, la estacionalidad, el tipo de especies que se plantarán y el comportamiento de cada especie, entre otros. Generalmente para plantaciones de especies nativas, se sugiere un rango entre 40 a 65 cm de altura, ya que poseen mejor capacidad para soportar y superar el estrés de la plantación (Quiroz *et al.*, 2001).

La micorrización aumenta la resistencia de las plántulas a la infección de los patógenos que causan el damping-off (Larios *et al.*, 2019). Este problema es causado generalmente en el proceso de germinación y se caracteriza por generar pudrición en la base del tallo a nivel del suelo, lo que provoca la marchitez del individuo afectado (Larios *et al.*, 2019). Para manejar este problema, los productores deben manejar la humedad relativa y la temperatura, o bien recurrir a fungicidas químicos, lo cual ocasiona resistencia en los fitopatógenos, además de ser muchas veces perjudicial para el ambiente y la salud humana. El reemplazo de estos productos por agentes biológicos, como las micorrizas, toma gran fuerza y generalmente su aplicación se realiza en la etapa del vivero (Larios *et al.*, 2019). Se recomienda aplicar micorrizas en suelos donde los hongos micorrícicos nativos se encuentren en niveles bajos o ausentes, aplicando una sola vez durante el ciclo de vida vegetal durante la siembra o

trasplante, además pueden tratarse con micorrizas las plantas establecidas y adultas (Biosim, 2009). También se sugiere la aplicación cerca de las raíces, ya que las esporas son tan diminutas que es difícil su migración en el suelo; por ejemplo, las esporas de la especie *Glomus intraradices* tienen un diámetro entre 40 y 140µm (Biosim, 2009). La cantidad de micorriza a utilizar dependerá del tipo de aplicación y micorriza, siendo para el tipo comercial MYCOSYM TRIN-TON (*Glomus intraradices* sobre soporte inerte granulado de arcilla expandida) una cantidad ideal para vivero y en semillero al 2-4% v/v (20-40 cm³ o 6-12 g/litro) mezclado con el sustrato, en tanto para trasplante en campo en cada hoyo de la plantación se recomienda una cantidad de 1,5-3g, 3-6g y 6-10g para los volúmenes de raíz de 0,25-1 litros, 1-2,5 litros y 2,5-5 litros, respectivamente (Biosim, 2009).

De acuerdo con Quiroz *et al.* (2001) cuando el material producido está destinado a plantarse dentro de un bosque, por ejemplo, mediante el método de enriquecimiento, no es necesaria la participación de micorrizas arbusculares desde el vivero, como se menciona en el párrafo anterior, ya que usualmente el sustrato superficial en este tipo de ambiente o situación contiene una gran cantidad de estos hongos.

El procedimiento de la plantación consiste en la excavación de hoyos de tamaños proporcionales a las plantas, teniendo en consideración que la tierra que va debajo de las raíces quede suelta para que se expandan posteriormente con mayor facilidad. Cada individuo debe ser colocado de manera centrada en cada agujero realizado de la forma más recta posible y luego debe ser tapado con tierra fértil. Se realiza una leve compactación de la tierra vertida, junto con un alcorque para facilitar la acumulación de agua. En situaciones de inclinación del terreno este va en forma de media luna para que pueda ayudar a la captación del agua de lluvia por parte de la planta. Por último, se coloca la protección contra el ramoneo y este variará según el presupuesto y tipo de herbívoro a controlar (INTA, 2018).

5.3.5. Economía circular

El modelo económico que ha predominado desde la revolución industrial ha sido la economía lineal, la cual consiste en la utilización de recursos naturales como materia prima que posteriormente se transforma a través de distintos procesos productivos en productos específicos que satisfacen necesidades de los consumidores. Dentro del proceso de transformación de esta materia prima para obtener el producto final surgen residuos no deseados, muchas veces tóxicos y que generalmente no se pueden volver a utilizar, convirtiéndose en basura o agentes nocivos para las personas y el medio ambiente (Miramontes, 2020). A raíz de estos problemas surge el concepto de economía circular, en una búsqueda constante de solución a los residuos generados por los procesos industriales. La idea de este concepto se basa en incentivar e incorporar al área económica de producción industrial un modelo amigable con el medio ambiente, para que los residuos que se generan de estas cadenas productivas sean menores, se aprovechen o reciclen de manera sustentable. La necesidad de este cambio de mentalidad nace debido a los problemas generados por el calentamiento global que genera problemas de abastecimiento de alimentos y agua potable, la creciente explosión demográfica que no permitirá en un futuro próximo a los recursos naturales actuales solventar las necesidades de las personas, sin dejar de mencionar también

los beneficios económicos que provee a las industrias y la oportunidad de más empleos por la generación de nuevos puestos de trabajo (Miramontes, 2020).

Respecto a este tema se ha implementado en Chile la Ley 20.920 REP (Responsabilidad Extendida del Productor y Fomento al Reciclaje) que determina el marco para la gestión de residuos, en donde su objetivo principal es disminuir la generación de residuos y fomentar su reutilización (MMA, s.f.). Para este propósito se tomó como referencia a los países con experiencia que van a la vanguardia en la temática de economía circular, para poder dejar atrás el paradigma de tomar-hacer-desechar. Actualmente, se tiene contemplado dentro de esta ley productos “prioritarios”, es decir, de uso masivo y que sus residuos resulten peligrosos, como por ejemplo aceites lubricantes, aparatos eléctricos y electrónicos, baterías, pilas, envases, embalajes y neumáticos. Sin embargo, en el futuro se pretende integrar aún más cambios para transitar hacia este nuevo paradigma económico. Respecto al manejo de residuos orgánicos, se busca evitar que sean depositados en vertederos o rellenos sanitarios para así reducir los gases de efecto invernadero; en vez de eso, se pueden aprovechar para producir compost y fertilizantes (MMA, s.f.).

En el ámbito de agricultura y forestación, se utilizan fertilizantes para el desempeño óptimo de los cultivos, y para erradicar o evitar plagas se utilizan pesticidas. Ambas herramientas muchas veces resultan en riesgos de toxicidad o generan residuos que se arrastran por infiltración en el suelo, producto del riego de las plantaciones agrícolas y forestales (Rojas *et al.*, 2000; Silva, 2010; Reyes y Cortés, 2017). El uso de fertilizantes en plantaciones forestales y viveros ha sido muy común para poder mejorar el rendimiento de las especies objetivo (Rose *et al.*, 2004). Sin embargo, los componentes como el nitrógeno provocan eutrofización de las aguas, destrucción de hábitats naturales con bajo contenido de nutrientes, crecimiento excesivo de algas y acidificación del suelo (Silva, 2010).

También para mantener un buen desarrollo de los cultivos, se utilizan agroquímicos con metales pesados en su composición, los cuales se lixivian con facilidad, contaminando medios más sensibles e indefensos como el acuático. Lo anterior despierta preocupación en el norte de Chile, debido al estrés producido por la escasez de acceso a recursos hídricos, haciendo imperativo el uso racionado de este preciado recurso (Silva, 2010).

Frente a la necesidad de cambiar las tecnologías y métodos hacia otros más sustentables para las plantaciones forestales y viveros, siguiendo la línea de una economía circular, resulta imperativo buscar alternativas al uso de fertilizantes y pesticidas. Es acá cuando surge la opción de utilizar a las micorrizas como un reemplazo a las técnicas actuales que contaminan por acumulación de residuos no deseados. Por ejemplo, se puede utilizar germinaza como sustrato para fomentar la propagación de micorrizas en la producción de plantas de vivero (González *et al.*, 2000). Lo anterior disminuye el impacto ecológico que genera la extracción de suelo, ya que se requiere menos cantidad de este para crear el sustrato, y además se utilizan los desechos del cultivo de coco, de lo contrario serían dispuestos en terrenos baldíos, quemados o arrojados a cauces de agua (González *et al.*, 2000). Además, la germinaza es uno de los sustratos que mejor logra expresar la eficiencia de las micorrizas debido a sus propiedades físicas y químicas (González *et al.*, 2000).

5.3.6. Micorrizas arbusculares como posible alternativa de uso frente a fertilizantes y pesticidas

Desde que surgió la necesidad de combatir las plagas que afectan los cultivos, se han usado diversas técnicas y sustancias, desde azufre para eliminar hongos descrito en documentos por Homero, flores de piretro como insecticida, usadas por el rey de Persia Jerjes, hasta arsenito descubierto por los chinos para el control de roedores (Del Puerto Rodríguez *et al.*, 2014). Posteriormente, a mediados del siglo XIX hasta principios del siglo XX, se perfeccionaron estas tecnologías de control de plagas utilizando derivados del petróleo. Luego comenzaron a fabricarse y utilizarse productos sintéticos, que contenían propiedades insecticidas, como por ejemplo el conocido DDT (Dicloro difenil tricloroetano), evolucionando finalmente a productos como los órganoclorados y órganofosforados, siendo estos últimos los más tóxicos y menos estables para el medio ambiente (Del Puerto Rodríguez *et al.*, 2014).

En los viveros, debido a las condiciones ideales que se generan para el cultivo o reproducción de plantas, también resultan beneficiosas para la aparición de especies u organismos no deseados. Es por esta razón que la utilización de agroquímicos se hace necesaria para evitar la aparición y propagación de plagas y enfermedades. Estos se agrupan en herbicidas, insecticidas, acaricidas, nematicidas, fungicidas, rodenticidas y lusquicidas, variando según la clasificación de la OMS (Organización Mundial de la Salud), en distintos niveles de toxicidad desde el I hasta el IV (Ortega *et al.*, 2014). Además de los riesgos para la salud, se suma también el incumplimiento hacia las normas y la carencia de conocimiento por parte de los jornaleros al utilizar estos productos. Otra característica negativa sobre el uso de estas tecnologías es la acumulación en los invernaderos, de los envases vacíos luego del uso de su contenido (Ortega *et al.*, 2014).

Como medida alternativa a la utilización de fertilizantes y plaguicidas, surgen las micorrizas como complemento para el desarrollo de las especies, ya que desempeñan un papel similar y resultan ser claves a la hora de reducir el deterioro del medio ambiente debido a que es un producto natural (Noda, 2009). Sus propiedades en suelos con alto contenido de P conceden el establecimiento y crecimiento temprano de los cultivos. Los individuos beneficiados por las relaciones micorrícicas mejoran su calidad biológica, obteniendo mayor vigor, altura y área foliar (Noda, 2009). Se pueden obtener rendimientos entre 15 y 50% en cultivos como el arroz, girasol tomate, trigo, algodón, maíz y soya, además de proporcionar protección frente a hongos patógenos, mediante la aplicación de micorrizas (Noda, 2009).

Estudios realizados por Rojas y Ortuño (2007) con micorrizas arbusculares (*Glomus fasciculatum*) en *Allium cepa* (cebolla) y *Solanum tuberosum* (papa) en distintos tratamientos (6 en total), demostraron un crecimiento y desarrollo de mayor rendimiento en comparación al uso de fertilizantes, y puede ser aún mayor si se combinan con métodos como el uso de humus de lombriz o gallinaza. Además de no ser tratamientos negativos, generan un impacto positivo sobre el suelo y el desarrollo de los cultivos (Cuenca *et al.*, 2007; Rojas y Ortuño, 2007).

5.3.7. Leyes, regulaciones e importación de Chile

Actualmente en Chile, algunos hongos se encuentran en el reglamento para la clasificación de especies silvestres según estado de conservación. El reglamento establece el procedimiento para la clasificación de los hongos según el artículo 37 de la ley N° 19.300, sobre Bases Generales del Medio Ambiente, la cual consiste en sus disposiciones generales, al derecho de vivir en un medio ambiente libre de contaminación, a la protección del medio ambiente, preservación de la naturaleza y conservación del patrimonio ambiental. Entre las disposiciones de este reglamento, se menciona que serán aplicables a ciertas especies de hongos que sean nativos de Chile.

El artículo 37 de la ley N° 19.300, establece que los hongos estarán clasificados según categoría de conservación los cuales corresponden a Extinta, Extinta en Estado Silvestre, En Peligro Crítico, En Peligro, Vulnerable, Casi Amenazada, Preocupación Menor y Datos insuficientes. Las categorías anteriores son recomendadas por la Unión Internacional para la Conservación de la Naturaleza (UICN), razón por la cual no está permitido trabajar o experimentar con hongos clasificados en estas categorías de conservación. Para lo anterior, el Gobierno de Chile tiene a disposición pública, un listado de las especies en categoría de conservación según el Reglamento para la clasificación de especies (RCE).

Según el artículo 38 de la ley N° 19.300, es El Ministerio del Medio Ambiente (MMA) quién se preocupará que los organismos competentes del Estado elaboren y mantengan actualizado un inventario sobre plantas, algas, hongos y animales silvestres, además de que deberán fiscalizar las normas que imponen restricciones respecto a su corte, captura, caza, comercio y transporte, con el objetivo de realizar acciones y medidas para conservar la diversidad biológica y preservar dichas especies. Actualmente, el MMA posee a disposición pública una página web con el catastro nacional de especies asilvestradas, tratándose de un portal dinámico y en plena construcción, que puede ser enriquecido con aportes de investigadores y de la ciudadanía (MMA, 2020). Lo anterior indicaría que para estos asuntos, el MMA no estaría cumpliendo en su totalidad y de forma exhaustiva con el rol asignado.

En el caso de tener que importar especies de hongos a Chile, la Resolución exenta N° 7424 de 2013 establece los requisitos fitosanitarios para el ingreso de hongos para propagación y consumo, procedentes de cualquier origen. En esta se resuelve que la importación al país de especies de hongos para consumo o propagación, solo serán las siguientes: *Agaricus bisporus* (Sin: *Agaricus brunnescens*), *Lentinus edodes*, *Morchella conica*, *Pholiota nameko*, *Pleurotus boudan*, *Pleurotus eryngii*, *Pleurotus ostreatus*, *Pleurotus vouis*, *Stropharia rugoso-annulata*, *Tricholoma magnivelare*, *Tricholoma matsutake*, *Tuber aestivum*, *Tuber magnatum*, *Tuber melanosporum*, *Tuber uncinatum*. Los envíos de hongos para su utilización en propagación podrán ingresar al país como micelio o esporas en aserrín, agar, agar-papa, agua esterilizada, mazorcas molidas de *Zea mays*, granos de *Triticum* spp., *Panicum mileaceum*, *Nothofagus* spp., *Triticum* spp. y *Secale cereale*. Además, debe contar con su respectivo Certificado Fitosanitario Oficial emitido por la autoridad fitosanitaria desde el país de origen del hongo. Así mismo, los hongos que vengan con sustrato de granos serán sometidos a un tratamiento de desvitalización por calor, mientras que los hongos en frasco destinados a propagación y consumo deben venir libres de suelo. Finalmente, los envíos que lleguen a Chile serán inspeccionados por el Servicio Agrícola y Ganadero (SAG) en los puertos de ingreso al país.

Si se quiere importar productos de forma personal y sin carácter comercial, se debe contar con la factura, poder notarial del dueño, certificaciones y conocimiento del embarque original. En caso de que la mercancía supere los US\$1.000 valor FOB (del inglés Free On Board o “libre a bordo”), el importador deberá contratar un agente de aduanas. Cuando las compras son ocasionales, sin fines comerciales y tienen un valor de hasta 30 dólares, los tributos que deben pagar por las importaciones corresponden al derecho *ad valorem*, que es un 6% sobre su valor CIF (del inglés Cost, Insurance and Freight o “Costo, Seguro y Flete”) y pago del IVA (Impuesto al Valor Agregado) sobre su valor CIF, más el derecho *ad valorem* (Aduanas de Chile, s.f.).

Es importante conocer las leyes, regulaciones y sistema de importaciones de Chile, si se quiere experimentar o trabajar con hongos, para no tener repercusiones legales en el proceso y problemas en las aduanas con respecto a la importación al país de algunas especies. Además, para evaluaciones de proyectos de gran escala, es posible que al conocer estos detalles influya en el costo total del mismo.

5.3.8. Experiencias en la utilización de micorrizas arbusculares en el mundo

Se inocularon esporas del hongo *Glomus intraradices* en la especie *Zea mays* para reproducir micorrizas. La finalidad era encontrar una alternativa económica y competente para que los cultivos tuvieran una influencia positiva en su desarrollo con una libre influencia de fertilizantes químicos. Los resultados de este ensayo muestran que el mejor método de propagación dependerá mucho del tipo de planta a infectar, en este caso se recomienda la utilización de pasto u otra especie de fácil reproducción vegetativa (Quintana, 2014).

Estudios realizados con ocho consorcios nativos de hongos micorrícicos arbusculares (AMF) en *Agave inaequidens*, mostraron una relación positiva en su crecimiento, a diferencia del tratamiento control en donde no se utilizaron. Se midieron variables como el porcentaje de colonización, Índice de dependencia relativa de micorrizas e Índice de Calidad de Dickson, y a través de sus resultados se descubre que la utilización de estos consorcios nativos resulta mejor que utilizar un hongo monoespecífico, debido a que cada uno por sí mismo estará adaptado a distintas condiciones medioambientales condicionadas a su área de extracción, por consiguiente, hay alta probabilidad que pueda generar una ventaja competitiva al momento de introducirlos en otro medio, junto a la planta huésped objetivo (Quiñones *et al.*, 2016). Además, se observa que las plantas inoculadas con AMF, ganan más biomasa total debido a la mayor absorción de agua y nutrientes, a su vez gracias al aumento del volumen en las raíces producto de la simbiosis.

Se ha descubierto en trabajos realizados por Saif (1981) con *Glomus macrocarpus* en la especie *Eupatorium odoratum*, que la concentración de oxígeno ideal para la micorrización y una expresión provechosa de la simbiosis debía ser entre 12 y 16% ; además, usualmente la concentración de O₂ en la atmosfera del suelo tiene que ver más con la actividad fisiológica de la micorriza que sobre el grado de infección sobre la planta.

Otros trabajos realizados con yuca en invernadero y campo mostraron resultados favorables de crecimiento en condiciones de suelo con bajo P, demostrando la eficacia de las micorrizas arbusculares para la absorción de este nutriente, que se tradujo en un aumento del rendimiento de la biomasa de la raíz en 20 a 25%. (Howeler *et al.*, 1987).

Se sabe que, en rodales viejos de especies forestales la concentración de P en el suelo es menor, por lo tanto, se observa una deficiencia de P en los árboles, lo cual explica el lento crecimiento de estos. Una asociación débil de micorrizas arbusculares con estos rodales también son un factor que condiciona el lento crecimiento (Ullah *et al.*, 2019).

La concentración de metales pesados como Zn, Fe y Cu afectan la etapa inicial de germinación de esporas de las micorrizas arbusculares, ya que las concentraciones de estos metales aumentan desde la etapa sucesional temprana hasta la etapa sucesional tardía (Ullah *et al.*, 2019). Factores como la cobertura vegetal y la fertilidad del suelo, están directamente relacionados con la densidad de esporas, ya que estas se ven afectadas negativamente por el aumento de la cobertura vegetal, y positivamente en suelos poco fértiles, debido a las tasas más lentas de descomposición y raíces de vida más larga, situación que no ocurre en bosques viejos. Por lo tanto, un entorno adecuado para el desarrollo y germinación de asociaciones de hongos micorrízicos arbusculares, dará buenos resultados para mejorar el crecimiento de bosques viejos (Ullah *et al.*, 2019).

Estudios demuestran que alrededor del límite de los bosques son lugares ideales para mejorar la distribución y densidad de HMA, debido a que son ricos en alimentos, que atraen a fauna que propaga las esporas de las micorrizas (Ullah *et al.*, 2019). Los nutrientes que están a disposición de las plantas en el suelo son extraídos con la ayuda de las micorrizas, especialmente elementos como P, mientras que las influencias que tienen sobre la adquisición de agua son sutiles, transitorias y específicas de acuerdo a cada tipo de simbiote. La ventaja que ofrecen las micorrizas del tipo vesículo arbuscular a las plantas es que funcionan como un todo, desde el transporte de los nutrientes, agua, protección contra patógenos, entre otros (Hooker *et al.*, 1994).

Respecto a la tolerancia de las plantas contra el estrés hídrico por déficit de humedad del suelo, experimentos en naranja trifoliada con micorrizas arbusculares de *Funneliformis mosseae*, demostraron que mejora la regulación de homeostasis de poliaminas en las raíces (Zou *et al.*, 2021). Estas tienen un papel importante en la tolerancia al estrés abiótico de las plantas, participan en procesos de apertura de estomas y como osmoreguladores. Gracias a esta investigación se descubre que las HMA inducen a nivel molecular los mecanismos relacionados a la red reguladora de poliaminas (Zou *et al.*, 2021).

Como bien se sabe, el problema del calentamiento global es un tema actual y controversial, y dentro de esta problemática se habla de la necesidad del secuestro de carbono, papel que desempeñan muy bien las especies vegetales. La presencia de asociaciones de micorrizas aumenta la asimilación de carbono en las plantas mediante la fotosíntesis, a la vez que incrementan la inducción del carbono al suelo (Ullah *et al.*, 2019). En este proceso las hifas producen una glucoproteína llamada glomalina, la cual desempeña un rol muy importante en la agregación del suelo, aportando estabilidad debido a que no es soluble en agua y es resistente a la degradación por calor (Ullah *et al.*, 2019). Sus propiedades le permiten actuar

como pegamento y contribuir a la agregación del suelo, evitando la erosión de este. Aumenta la percolación y retención del agua cerca de las raíces de la planta, además de mejorar el almacenamiento de carbono y nitrógeno, participando en el reciclaje de nutrientes (Wright y Upadhyaya, 1996; Singh, 2012; Bitterlich *et al.*, 2018; Prasad *et al.*, 2018). Cuando se realiza una conversión de bosques maduros a plantaciones exóticas, no cambia la tasa de producción de glomalina relacionada a las proteínas del suelo (GRSP), pero sí la de esporulación y la riqueza de hongos arbusculares (Rivas *et al.*, 2016). La ocurrencia del fuego en zonas boscosas del Centro-Sur de Chile, afecta el contenido de GRSP producido por los hongos micorrícicos arbusculares en los primeros horizontes del suelo; lo que podría responder a una evolución ecológico-evolutiva de la simbiosis en bosques templados frente a eventos catastróficos y condiciones edafo-climáticas restrictivas (Rivas *et al.*, 2016).

Experimentos realizados con *Rhizoglyphus irregularis* inoculado en tomate para evaluar la conductividad hidráulica insaturada con exclusión del crecimiento interno de las raíces, demostraron que aumenta en un 50% los sustratos colonizados con HMA, y se obtuvo un rango de potencial hídrico fisiológicamente importante, que fue entre 6 y 10 kPa; este rango es relevante ya que funciona para la mayoría de los escenarios de absorción de agua en las plantas, porque el agua se retiene contra la gravitación y se puede extraer fácilmente en grandes cantidades (Bitterlich *et al.*, 2018). Gracias a esta investigación se corroboró la importancia de las micorrizas para aliviar la resistencia al movimiento del agua en zonas alejadas de la raíz de la planta, que es por donde se expanden y actúan estos hongos simbioses, ergo actúan como bioestimulantes y representan una herramienta biológica potencial para expandir efectivamente la rizosfera de sus hospedantes a fin de adquirir agua y solutos de zonas periféricas (Bitterlich *et al.*, 2018).

Las HMA poseen esta característica de reducción a la resistencia al movimiento del agua gracias a que pueden producir hidrofobinas, que son proteínas de hongos filamentosos capaces de reducir la tensión superficial del agua, permitiendo que las hifas sean capaces de romper una película de agua (Rillig, 2005). Para la realización del experimento anterior, se utilizó como sustrato una mezcla esterilizada de arena fina, vermiculita y suelo arenoso local tamizado en macetas, donde se inocularon 0,5L del inóculo de *R. irregularis* (Bitterlich *et al.*, 2018). En resumen, esta investigación señala que poner en práctica la utilización de HMA en campo puede ser una muy buena alternativa para que las plantaciones puedan obtener agua y solutos en zonas de difícil acceso para las raíces de los árboles, ya que la eficiencia de estos hongos queda demostrada al aislar su funcionamiento de las propias raíces.

Volviendo al tema de las hidrofobinas, resulta interesante destacar la investigación sobre estas, ya que son proteínas de superficie activa producidas por hongos filamentosos, donde su característica más importante es su comportamiento anfifílico, es decir, que poseen moléculas con un extremo hidrofílico (soluble en agua) y otro que es hidrófobo (rechaza el agua), lo que les permite interactuar como interfases al disminuir la tensión superficial y cambiar el comportamiento de las superficies, pasando de hidrófilas a hidrófobas o viceversa (Santa-Cecilia, 2014). Estas proteínas muestran propiedades interesantes que pueden tener muchas aplicaciones, en el caso de la especie *Fusarium poae*, demuestra su buena capacidad para interactuar con superficies sólidas y autoensamblarse en la interfaz agua-aire (Santa-Cecilia, 2014). Actúan también como un obstáculo al ataque microbiano, contribuyendo a la persistencia del suelo, gracias a su naturaleza hidrofóbica y su disposición a formar

nanoestructuras ensambladas (Rillig, 2005). En condiciones *in vitro*, la hidrofobina SC3 producida por la especie *Schizophyllum commune*, reduce la tensión superficial del agua de 72 a 24 mJ m⁻² (Wösten *et al.*, 1999). En la aplicación práctica, las hidrofobinas con propiedades adecuadas pueden llegar a ser candidatos potenciales para tratar la repelencia o viceversa, actuando de forma natural como biosurfactantes al participar en la creación o disminución de la hidrofobicidad, lo que puede abrir oportunidades para el manejo en campo al utilizar hongos micorrícicos arbusculares como inoculantes (Rillig, 2005).

Otro tipo de ensayo realizado con *Glomus intraradices* y *Trichoderma harzianum* en plántulas de melón, determinaron que la combinación de ambos HMA como promotores de crecimiento de las plantas, no resultaron efectivos, ya que *T. harzianum* tuvo una acción antagónica sobre *G. intraradices*, teniendo un efecto detrimental sobre la colonización micorrícica; sin embargo, al inocular de forma individual a *G. intraradices*, logra un efecto positivo sobre el crecimiento radicular, debido a la alta capacidad de colonización demostrada en el experimento. Esta investigación fue realizada en un invernadero semiclimatizado en donde se inocularon 40 esporas en latencia por planta⁻¹ de GI comercial y 1,5 * 10⁸ UFC (unidades formadoras de colonias) 3 L de sustrato⁻¹ de TH comercial, en donde para ambos el sustrato fue una mezcla de 70:30% de Turba + Perlita (Santander y Olave, 2014). Con esto se demuestra que no siempre se dará una cooperación entre hongos al momento de inocularlos conjuntamente en una planta, ya que la acción antagónica para este caso en particular de *T. harzianum*, se expresa parasitando el micelio y esporas de los HMA, disminuyendo la actividad micorrícica; además produce y libera a la rizosfera metabolitos tóxicos volátiles y no volátiles produciendo una acción fungistática (Santander y Olave, 2014).

En el departamento de Genética y Mejoramiento de las plantas del Instituto Nacional de Ciencias Agrícolas (INCA) de Cuba, se realizaron experimentos por Morales *et al.* (2011) para evaluar la respuesta de *Begonia* sp (var. Rex) con la aplicación de hongos micorrícicos arbusculares, en sustrato de mezcla de suelo Ferralítico Rojo lixiviado, cachaza y paja de arroz (a fin de evitar la compactación del sustrato). Para la inoculación utilizaron EcoMic®, que consiste en un inoculante sólido con propágulos de HMA con alto grado de pureza y estabilidad biológica, específicamente la cepa *Glomus hoi-like*. Evaluaron variables como la cantidad de hojas, el largo de hojas, vigor de las plantas, masa seca de las raíces y la parte aérea, y número de esporas. Descubrieron que los sustratos con mayor materia orgánica e inoculados con micorrizas, se diferenciaron significativamente del resto de los tratamientos respecto al largo, cantidad de las hojas. Además de observarse mayor vigor y color más intenso en los individuos inoculados, apreciaron mayor productividad de masa seca en la parte aérea y raíces. Sin embargo, descubrieron que esta última cualidad parecía beneficiarse más de la materia orgánica del sustrato, que de la propia inoculación. En contraparte, el otro tratamiento realizado con menor contenido de materia orgánica, las micorrizas sí favorecieron la producción de masa seca, siendo determinantes en esta función. Esta investigación pone de manifiesto la viabilidad de utilizar tecnologías limpias y económicas, junto con el aprovechamiento de los recursos locales para favorecer la captación de agua y nutrientes del suelo, entre otras ventajas que proveen los HMA (Morales *et al.*, 2011).

En un estudio de la inoculación con HMA de *Glomus hoi-like*, Mena *et al.* (2011), compararon este tipo de micorriza frente a un conglomerado de especies (Consorcio selva),

para evaluar el efecto sobre el crecimiento y desarrollo de plantas de *Sorghum vulgare* sometidas a estrés hídrico. El experimento muestra que las plantas control sometidas al estrés obtuvieron un menor crecimiento y rendimiento, sin embargo, las plantas con micorrizas obtuvieron un buen desempeño, independientemente del déficit hídrico aplicado. Los valores superiores de las variables morfoagronómicas se observaron más acentuadamente en donde emplearon el Consorcio selva, pero las respuestas fisiológicas fueron similares respecto a *Glomus hoi*-like. Se asocia una mejor respuesta del conglomerado de especies en las plantas, que fueron las que mejor soportaron y se recuperaron del déficit hídrico, ya que en este caso las especies que las conformaban podrían tener efectos sinérgicos entre sí, potenciando la micorrización de la planta y no existiendo efectos antagónicos o fungistáticos. El sustrato correspondía a una mezcla de suelo franco y arena en una relación de 3:1 esterilizado con formol previamente, y los conglomerados contenían especies como *Glomus constrictum* (Trappe), *Glomus tortuosum* Schenck & Smith, *Glomus geosporum* (Nicol. & Gerd.) Walker, *Acaulospora scrobiculata* Trappe, y *Glomus fasciculatum* (Thaxter) Gerd. & Trappe emend. Walker & Koske. La utilización de inóculo fue alrededor de 10 g (11 esporas g⁻¹) por planta, en donde la eficiencia de la simbiosis depende tanto de cepas eficientes y los conglomerados que se potencien entre ellos, considerando también, el tipo de sustrato utilizado o características del suelo (Mena *et al.*, 2011).

Un estudio en donde el uso combinado de EcoMic[®] y Fitomas-E[®] (bioestimulante natural de crecimiento) en la búsqueda de disminuir el uso de fertilizantes minerales en la producción de Triticale (*x. Triticosecale* Wittmack) como forraje, demuestra que es posible esta disminución, pues no hay diferencias significativas con los demás tratamientos donde se aplicaron otras normas de fertilización. Además, el costo de fertilizar resulta menor al utilizar HMA y el Fitomas-E[®], lo que resulta en un cultivo más rentable para la producción final. La calidad del forraje fue semejante a las del uso convencional de fertilizantes y se aprecia mayor actividad biológica en la rizosfera del cultivo gracias a las micorrizas, con posibles efectos positivos sobre el mejoramiento del suelo (Plana *et al.*, 2016).

La relación entre un hongo micorrícico arbuscular y una planta no es considerada específica, ya que estos hongos son generalistas y se pueden asociar a cualquier especie de planta, debido a que se pueden encontrar en muchos tipos de suelos (Barrera, 2009). Sin embargo, como se ha mencionado anteriormente, algunos hongos se pueden asociar mejor a ciertas especies, por lo que se puede hablar de especificidad entre HMA y hospederos, debido a que el tipo de suelo influye en la respuesta de los hongos, y cada especie posee una estrategia ecológica diferente, así como también influye la arquitectura y metabolismo de las plantas con las que realiza la simbiosis. A pesar de que el uso de esta tecnología va en aumento, el monocultivo de HMA podría estar influyendo en la disminución de la diversidad de estos, lo que podría limitar a su vez las posibilidades de mejora en el rendimiento de los cultivos (Barrera, 2009).

5.3.9. Conocimiento y uso actual de micorrizas arbusculares en Chile

Se analizaron 23 especies de hongos micorrícicos arbusculares (HMA) en muestras de suelos de *Peumus boldus*, encontrando en su mayoría hongos de la familia *Glomeraceae*, en donde

la especie tenía como preferencia para realizar simbiosis específicamente hongos del género *Funneliformis* (Benedetti *et al.*, 2018).

Otros estudios realizados en *Quillaja saponaria* con 6 cepas comerciales de hongos micorrícicos vesículo-arbusculares (HMVA), se destacaron los *Glomus versiforme*, *monosporum*, *aggregatum* y *fasciculatum*, pero los que mostraron el mayor índice de calidad de plántulas en quillay, fueron las asociaciones con *Glomus intraradices* (Godoy *et al.*, 1991).

Las micorrizas arbusculares han tenido buenos resultados en proyectos de restauración de ecosistemas degradados, en su mayoría dentro del hemisferio norte (Silva, 2018). En Chile central nos encontramos con el matorral chileno, el cual se encuentra dentro de un clima mediterráneo y compuesto por una alta proporción de especie nativas endémicas, que muchas veces están sometidas a presiones antropogénicas, provocando su degradación paulatina. Bajo este escenario, las HMA surgen como una buena alternativa para utilizarlas en programas de restauración ecológica; sin embargo, aún existe falta de información respecto a una utilización adecuada de este tipo de organismos, ya que hay patrones de preferencia de asociación de algunos de estos tipos de estructuras de hongos (micorrizas arbusculares, ectomicorrizas, micorrizas Ericoides o micorrizas Orquideoides), con las distintas especies de plantas (Silva, 2018). Para el caso del matorral chileno, se descubre que las estructuras de HMA son las más abundantes y que para el bosque esclerófilo con especies como *Peumus boldus*, *Cryptocarya alba*, *Escallonia pulverulenta*, *Kageneckia oblonga* y *Quillaja saponaria*, son especies que suelen asociarse preferentemente a este tipo de estructura de hongos, a excepción de *Lithrea caustica* que no necesariamente tiene como preferencia asociarse a este tipo de organismos. Junto a la obtención de este patrón de asociamiento de estos hongos, se ha dilucidado también que la abundancia de esporas varía considerablemente según la estación del año; además, la diversidad de los HMA cambia de acuerdo al tipo de hábitat en que se encuentre su hospedero (Silva, 2018).

A pesar que existe especificidad de HMA con algunas plantas, este tipo de asociación selectiva es mínima, ya que la gran mayoría de estos organismos se asocian con distintas especies, y dentro del matorral chileno se destaca una gran cantidad de hongos del género *Claroideoglomus*, *Paraglomus* y *Glomus* (Silva, 2018).

En el país se realizó una investigación en el Valle Central del sur, específicamente en bosques de *Nothofagus obliqua*, *Peumus boldus*, *Nothofagus antartica* y *Myrceugenia exsucca*, en donde se ha documentado que en 91 especies de un total de 114 existen micorrizas, y cuatro de los bosques analizados la dominancia fue del tipo vesículo arbuscular con una presencia del 72,8%. La finalidad era encontrar alternativas de uso para estos organismos en función de restaurar aquellos ecosistemas endémicos degradados (Carrillo *et al.*, 1992).

La recopilación de estudios expuestos anteriormente, señalan factores interesantes para tener en cuenta al momento de experimentar con micorrizas arbusculares en especies leñosas de ambientes mediterráneos, sobre todo si las especies de hongos mencionadas han mostrado resultados favorables para el rendimiento de las plantas nativas de Chile, ya que lo más probable es que si se pudieran replicar en el territorio nacional tengan una simbiosis exitosa y resultados favorables para los individuos inoculados.

5.3.10. Propuestas de uso para especies nativas de Chile con micorrizas arbusculares

Las micorrizas arbusculares son un aporte significativo para el establecimiento y desarrollo de las plantas, gracias a la simbiosis de tipo mutualista que aporta a sus hospedantes propiedades mejoradas para la captación de nutrientes y agua. Al ser generalistas, se asocian con la mayoría de las especies del planeta, ampliando las posibilidades de su aprovechamiento, tanto en el ámbito forestal como agrícola (Facelli *et al.*, 2009).

Gracias a la información recopilada se puede decir que la aplicación de micorrizas arbusculares dependerá de la finalidad de la plantación, ya que puede ser un tipo de enriquecimiento (en línea o en bosque) destinado a un programa de restauración de bosque nativo degradado por factores antrópicos, o bien su uso puede ser destinado a una plantación nativa desde cero.

Para Chile central, el uso de micorrizas arbusculares es recomendable, ya que son un tipo de hongo que se desempeña bien en climas cálido-húmedo, templado-frío y cálido-seco, los cuales son muy similares a la zona centro del país (Camargo *et al.*, 2012). Además el rango de distribución que abarca presenta un clima mediterráneo con diversos tipos de estrés que restringen el desarrollo y sobrevivencia de las especies vegetales, además de poseer una escasa disponibilidad hídrica (Cabrera, 2002).

En caso de utilizar HMA para el enriquecimiento de un bosque se sugiere investigar la composición de especies existentes y las especies que se quieren introducir para su participación en la restauración. En este sentido, no se recomienda el uso de micorrizas comerciales, porque usualmente en los bosques nativos ya se encuentran disponibles estos tipos de hongos en el suelo, por consiguiente, interactuarán de forma natural con las especies de plantas que se van a incluir. Sin embargo, es recomendable realizar un estudio del suelo del bosque para verificar este hecho, de lo contrario tendrán que ser otras las medidas para poder aprovechar los beneficios de estos organismos.

En el contexto de una plantación nativa desde cero o un caso puntual en que no se registren HMA en el suelo del bosque a restaurar mediante enriquecimiento, la aplicación de este tipo de simbiosis debe realizarse en el vivero, en las raíces de cada plántula, antes de su llegada al campo objetivo o terreno de plantación, ya que esto hará que la planta crezca más robusta y esté preparada frente a situaciones de estrés (Trujillo, 2009). El tipo de hongo arbuscular utilizado, dependerá de la especie nativa en particular, donde el sustrato y el tipo de tratamiento, también formará parte importante de una infección exitosa. Se sugiere la utilización de especies de hongos que ya han sido testados previamente en especies nativas de plantas. Por ejemplo, si se quiere lograr ciertas hectáreas de bosque nativo de *Quillaja saponaria*, la aplicación del hongo micorrícico arbuscular en vivero debiera ser de la especie *Glomus intraradices*, ya que en experimentos anteriores resulta ser la que más destaca para mejorar las condiciones de calidad de las plántulas en vivero (Godoy *et al.*, 1991). De esta manera tendremos altas probabilidades de que los proyectos tengan éxito en su aplicación práctica.

El tipo de suelo adquiere un rol importante al momento de hacer efectiva la micorrización entre el hongo y el hospedante, debido a que la simbiosis requiere de un pH tendiente a valores neutros (González *et al.*, 2000; Álvarez *et al.*, 2013). El tipo de suelo de la zona

central y el centro sur de Chile corresponde a Andosoles con material parental de cenizas andesíticas-basálticas, en donde los suelos derivados de cenizas volcánicas tienen un pH ácido a lo largo del perfil; en caso de presentarse suelos de estas características se sugiere evaluar el encalado de suelo para elevar el pH de este, lo cual aumentará el porcentaje de micorrización (Tosso, 1985; Álvarez *et al.*, 2013).

También se podrían utilizar consorcios micorrícicos arbusculares provenientes de bosques nativos de composición similar a las especies de la plantación que se quiere lograr, por ejemplo, si un bosque de *Peumus boldus* posee estos hongos, se pueden extraer y luego utilizar en la plantación objetivo, que será de la misma especie arbórea. Se sugiere de esta manera porque a pesar de que estos hongos no son específicos, hay algunos que sí aportan mayores beneficios para ciertas especies de plantas, entonces un entorno familiar en el contexto ambiental, edáfico, físico, químico, el hongo podrá responder con una infección exitosa (Monzon y Azcón, 1996). Para la recopilación de los inóculos se recomienda usar el método de “plantas trampa”, ya que se reduce el riesgo de introducir enfermedades o plagas, además de que resulta sencillo de aplicar y muestra gran eficiencia; lo anterior también permite escoger las cepas que favorezcan la nutrición vegetal y el crecimiento (De la Rosa-Mera *et al.*, 2012; Nazareno *et al.*, 2020). El inóculo obtenido por el método mencionado puede ser aplicado mezclándolo en el sustrato de los contenedores en vivero o depositándolo 3 a 5 cm bajo la superficie del sustrato en bandas (De la Rosa-Mera *et al.*, 2012). Las plantas que serán infectadas deben ser susceptibles a la inoculación, el sustrato utilizado debe ser esterilizado y no debe ser restrictivo a la especie del hongo micorrícico arbuscular, así se asegura que luego de 3 a 6 meses bajo condiciones favorables las raíces estarán colonizadas (Salas y Blanco, 2000).

Durante la recopilación de documentos de distintas partes del mundo y de Chile, es destacable que el género más mencionado y que usualmente se obtienen mejores resultados dentro de las investigaciones realizadas con micorrizas arbusculares en plantas fue *Glomus*, siendo que existen muchos más. Se sugiere utilizar especies de este género de hongos para la inoculación en especies nativas de Chile, solo en caso de que no existan antecedentes de una interacción entre hongo-planta en que se establezca que ambos han sido compatibles o eficientes entre sí, por lo que la recomendación es para fines experimentales hacia especies nativas dentro del territorio nacional. Las razones del éxito de este género de hongos se debe a que resiste los disturbios en el suelo, haciéndolo resistente a cambios en el ecosistema, además posee una amplia distribución en distintos tipos de hábitats, especialmente cuando es el primero en la sucesión de un sitio (Oehl *et al.*, 2004; Sýkorová *et al.*, 2007; Benedetti *et al.*, 2018).

Si se va a experimentar con especies del género *Glomus*, en una primera etapa deben hacerse ensayos controlados en viveros o laboratorios a pequeña escala exclusivamente para investigación, ya que se debe evaluar el costo-beneficio de la aplicación de HMA en una especie en particular. En cuanto a la cantidad de inóculo a utilizar, dependerá de la preferencia que tenga cada hongo-planta entre sí en cuanto a compatibilidad, ya que un mayor número de esporas no necesariamente asegura el éxito de la micorrización (Cartes, 2008). La colonización es un proceso dinámico que no solo depende de la tasa de formación de unidades de infección y su crecimiento, sino que también de la tasa de crecimiento del sistema radicular infectado, por lo que la disponibilidad de nutrientes, compactación del suelo, temperatura, entre otros, producen efectos indirectos que afectarán el porcentaje final de colonización micorrícica (Smith y Read, 2008).

La obtención del inóculo y la utilización de una especie en particular de hongo quedará entonces a criterio del productor o investigador, de acuerdo a sus necesidades y presupuesto. Este puede obtenerse reproduciendo un hongo recolectado en campo, o bien puede ser un hongo de tipo comercial, en donde las cantidades y las condiciones permitidas para su uso e importación a Chile quedan sujetas a lo que dictan las normas y leyes del país. En cuanto a la recolección en bosques nativos dependerá del estado de conservación en que se encuentre el hongo en cuestión, y que se pueda extraer, si hay que pedir permisos o realizar manejos especiales o no, variará de acuerdo al tiempo, ya que una especie puede aumentar o disminuir su cantidad muestral en los registros del estado.

También hay que considerar que las aplicaciones de fungicidas y otros agroquímicos reducen la actividad de la micorrización, lo que resulta en una mala colonización de la planta y aumenta las probabilidades de aparición de hongos patógenos en las raíces (Facelli *et al.*, 2009). Debido a lo anterior, se aconseja verificar los efectos de los fungicidas sobre los inóculos aplicados, para asegurar una micorrización exitosa. Al utilizar fertilizantes, no se recomienda los de tipo mineral, sobre todo los fosfatados, debido a que pueden perjudicar la cantidad de propágulos de los hongos micorrícicos arbusculares (Borie *et al.*, 2000).

6. CONCLUSIONES

Lo expuesto en esta investigación representa un acercamiento general de los efectos que tienen los hongos micorrícicos arbusculares (HMV) en especies leñosas sobre la resistencia al estrés hídrico en términos de desarrollo de los individuos inoculados, y la búsqueda se limitó a los idiomas inglés y español, mayoritariamente en ambientes mediterráneos. Debido a la información recaudada, se sabe que los hongos y plantas tienen mayor eficiencia en su rendimiento si la simbiosis se realiza entre las especies adecuadas.

Los hongos micorrícicos arbusculares son organismos que pueden considerarse generalistas y cosmopolitas, lo que hace que puedan ser utilizados con alta probabilidad de éxito en muchas especies de plantas. Entre los limitantes para el establecimiento de los HMV en las raíces de un hospedante se encuentran los factores físicos del suelo y la composición química de este. También puede haber interacciones negativas entre diferentes especies de estos hongos, así como factores que inhiben su desarrollo como pesticidas y fertilizantes. Se requiere de investigaciones específicas acerca de cuáles especies de simbioses y hospederos son más compatibles entre sí para conocer de mejor forma los beneficios que aportan los HMV a sus hospedantes.

El cambio climático ha contribuido a que las investigaciones se centren en descubrir mejoras técnicas o métodos más sustentables con el medio ambiente. En los últimos años ha aumentado considerablemente la cantidad de documentos científicos dedicados a la investigación con micorrizas arbusculares, debido a que son un producto natural que puede ser aprovechado en el ámbito forestal y la agricultura. El problema de la escasez hídrica y la alta dependencia de fertilizantes químicos puede ser solucionado en parte gracias a los beneficios que aportan estos organismos a las plantas. Las propiedades que conforman a estos hongos brindan protección contra patógenos, además de ayudar a las especies vegetales a obtener agua y nutrientes. Los HMV se destacan también por las propiedades físico-químicas que brindan al suelo aportando agregados lo que los hace menos propensos a la erosión.

Las propuestas dadas en este trabajo para inoculación con especies de hongos arbusculares en especies leñosas de Chile central también representan un acercamiento a nivel general de las medidas a considerar al momento de realizar plantaciones, ya que no se centraron esfuerzos en investigar una especie en particular de esta parte del territorio nacional. Estudios específicos, resultan esenciales respecto a los mejores métodos de plantación y uso de HMV, además de considerar las condiciones microclimáticas de un lugar en particular que puede estar inserto dentro de una extensión territorial con clima mediterráneo.

7. BIBLIOGRAFÍA

- Aduanas de Chile, [s.f.]. Preguntas frecuentes [en línea] <https://www.aduana.cl/preguntas-frecuentes-importaciones/aduana/2007-02-28/161116.html#vtxt_cuerpo_T0> [consulta: 11 enero 2021]
- Aguilar, A. 2013, oct. Producción de inóculos comerciales de hongos micorrícicos arbusculares nativos para vid y frutales. (Informe Final), Incuba, Universidad de Concepción. Concepción, Chile: Comisión Nacional de Investigación científica y Tecnológica (CONICYT). 14p.
- Aguilera, L.; Olalde, V.; Arriaga, R. y Contreras, A. 2007, nov.-feb. Micorrizas arbusculares. CIENCIA ergo-sum, *Revista Científica Multidisciplinaria de Prospectiva*, 14(3): 300-306.
- Aguilera, N.; Algara, M. y Olvera, L. 2015, may. Gestión del agua como factor limitante de productividad cañera en México. *Revista de Geografía Norte Grande*, (60): 135-152.
- Álvarez, M.; Hernández, E.; Maldonado, R. y Rivera, M. 2013, ene. Encalado y micorriza para corregir deficiencia de fósforo en un Andisol cultivado con *Pinus halepensis*. *Madera y bosques*, 19(1): 7-16.
- Arksey, H. and O'Malley, L. 2005, feb. Scoping studies: towards a methodological framework. *International Journal of Social Research Methodology*, 8(1): 19-32.
- Arroyo, M.; Armesto, J and Villagrán, C. 1981, mar. Plant phenological patterns in the high Andean cordillera of central Chile. *Journal of Ecology*, 69: 205-223.
- Augé, R. 2001, dec. Water relations, drought and vesicular-arbuscular mycorrhizal symbiosis. *Mycorrhiza*, 11: 3-42.
- Barrera, S. 2009, may. El uso de hongos micorrízicos arbusculares como una alternativa para la agricultura. *Bioteología en el Sector Agropecuario y Agroindustrial*, 7(1): 123-132.
- Bascopé A. 2013, oct. Cambio Climático Impacto en la Agricultura Heladas y Sequía. (Informe final), Oficina de Estudios y Políticas Agrarias (Odepa). Santiago, Chile. 36 p.
- Becerra, P.; Smith-Ramírez, C. y Arellano, E. 2008. Evaluación de técnicas pasivas y activas para la recuperación del bosque esclerófilo de Chile central. Santiago, Chile. 90 p.
- Benedetti, S.; Balocchi, F. y Hormazábal, M. 2018, jun. Hongos micorrícicos arbusculares (HMA) asociados naturales de *Peumus boldus* en Chile Central. *Gayana Botánica*, 75(1): 431-437.
- Biosim, 2009. MYCOSYM Guía del Productor. (Documento Técnico), MYCOSYM International AG. Málaga, España: Biosim. 2p.
- Bitterlich, M.; Franken, P. and Graefe, J. 2018, mar. Arbuscular mycorrhiza improves substrate hydraulic conductivity in the plant available moisture range under root growth exclusion. *Frontiers in Plant Science*, 9(301): 1-11.

Blanco, F. y Salas, E. 1997. Micorrizas en la agricultura: Contexto mundial e investigación realizada en Costa Rica. *Revista Agronomía Costarricense*, 21(1): 55-67.

Blumler, M. 2005, jan. Three conflated definitions of Mediterranean climates. *Middle States Geographer*, 38: 52-60.

Boisier, J.; Alvarez-Garretón, C.; Cordero, R.; Damiani, A.; Gallardo, L.; Garreaud, R.; Lambert, F. et al. 2018, dec. Anthropogenic drying in central-southern Chile evidenced by long-term observations and climate model simulations. *Elementa: Science of Anthropocene*, 6: 74.

Borie, F.; Rubio, R.; Morales, A. y Castillo, C. 2000, dic. Relación entre densidad de hifas de hongos micorrizógenos arbusculares y producción de glomalina con las características físicas y químicas de suelos bajo cero labranza. *Revista Chilena de Historia Natural*, 73(4), 749-756.

Bracho, J.; Pierre F.; y Quiroz, A. 2009, ago. Caracterización de componentes de sustratos locales para la producción de plántulas de hortalizas en el estado Lara, Venezuela. *Bioagro*, 21(2): 117-124.

Cabrera, H. 2002, mar. Respuestas ecofisiológicas de plantas en ecosistemas de zonas con clima mediterráneo y ambientes de altamontaña. *Revista Chilena de Historia Natural*, 75(3): 625-637.

Cabrera, R. 1999, jun. Propiedades, uso y manejo de sustratos de cultivo para la producción de plantas en maceta. *Revista Chapingo Serie Horticultura*, 5: 5-11.

Callejas, B.; Castillo, A.; Colinas, M.; González, M.; Pineda, J. y Valdez, L. 2009, nov. Sustratos y hongos micorrízicos arbusculares en la producción de nochebuena. *Revista Chapingo Serie horticultura*, 15(1): 57-66.

Camargo, S.; Montaña, N.; De la Rosa-Mera, C. y Montaña, S. 2012, jul. Micorrizas: una gran unión debajo del suelo. *Revista Digital Universitaria*, 13(7): 3-19.

Carrillo, R.; Godoy, R. y Peredo, H. 1992, dic. Simbiosis micorrícica en comunidades boscosas del valle Central del sur de Chile. *BOSQUE*, 13(2): 57-67.

Carey, J.; Sandoval, V. y Saldivia, R. 2007, may. Proyección de los sistemas de cosecha forestal en las plantaciones establecidas en el contorno de la reserva Río Cruces para los próximos diez años. *Bosque (Valdivia)*, 28(2), 173-177.

Cartes, M. 2008. Evaluación del grado de micorrización de *Araucaria araucana* (Mol.) K. Koch. en comunidades boscosas de las cordilleras de la Costa y los Andes en la IX Región de Chile. Tesis para optar al grado de Licenciado en Ingeniería Forestal. Temuco, Chile: Facultad de Recursos Naturales, Universidad Católica de Temuco. 106h.

Casanova, M.; Salazar, O.; Seguel, O. and Luzio, W. 2013. The Soils of Chile. World Soils Book Series. Madison, Wisconsin: Springer. 190p.

Cassán, F.; Penna, C.; Bravo, J.; Narea J.; Sanjuán, J. y Epstein, S. 2017, feb.-mar. La ciencia se acerca a la empresa: El inmenso potencial de uso de las bacterias en el sector hortofrutícola. *Revista Redagráfica*, 84(1): 12-15.

CONAF, 2012. Ley sobre recuperación del bosque nativo y fomento forestal y reglamentos. Corporación Nacional Forestal. Santiago, Chile: CONAF. 90p.

CONAF, 2014, mar. Manual Técnico Manejo del Bosque Nativo. (Manual Técnico N° 51), Centro de Investigación y desarrollo en Agronegocios, Universidad del Bío-Bío. Concepción, Chile: UBB. 39p.

CONAF, 2015, dic. Propuesta de acciones para minimizar las brechas en el manejo de plantaciones forestales de pequeños y medianos propietarios (Informe Final). Instituto Forestal (INFOR). Sede Bio Bio, Concepción, Chile: INFOR. 183p.

Contreras, R. 1997, dic. En la actividad forestal: Normas legales y conceptos técnicos. (Doc. Tec.), Instituto de Capacitación y Estudios laborales y Sociales ESICO Ltda., CONAF. [s.l.]: CONAF. 198p.

Cruz, G. 2013. Propuesta silvicultural para el manejo sustentable con fines industriales en bosques naturales con quillay (Quillaja saponaria) en Chile central. En: DONOSO, H. P. Y PROMIS, B. A. Silvicultura en bosques nativos: avances en la investigación en Chile, Argentina y Nueva Zelanda. Chile, Marisa Cuneo Ediciones. pp. 19-37.

Cuenca, G.; Cáceres, A.; Oirdobro, G.; Hasmy, Z. y Urdaneta, C. 2007, ene. Las micorrizas arbusculares como alternativa para una agricultura sustentable en áreas tropicales. *Interciencia*, 32(1): 23-29.

Cuyckens, G.; Malizia, L. y Blundo, C. 2015, mar.-jun. Composición, diversidad y estructura de comunidades de árboles en un gradiente altitudinal de selvas subtropicales de montaña (Serranías de Zapla, Jujuy, Argentina). *Madera y bosques*, 21(3): 137-148.

De la Rosa-Mera, C.; Ferrera, R.; Alarcón, A.; Sánchez, M. y Franco, A. 2012, jun. Aislamiento de consorcios de hongos micorrícicos arbusculares de plantas medicinales y su efecto en el crecimiento de vinca (*Catharanthus roseus*). *Revista chilena de historia natural*, 85(2): 187-198.

Delgado, L. 1985, mar. Drenaje predial. Aspectos generales: El desplazamiento del oxígeno del suelo por el agua ejerce una acción directa sobre la producción agrícola. *IPA Quilamapu*, 26: 35-38.

Del Puerto Rodríguez, A.; Suárez, S. y Palacio, D. 2014, sep.-dic. Efectos de los plaguicidas sobre el ambiente y la salud. *Revista Cubana de Higiene y Epidemiología*, 52(3): 372-387.

Di Marco, E. 2014. Práctica Silvícola: Enriquecimiento del Bosque Nativo. (Ficha técnica), Dirección de Producción Forestal, DPF - MAGyP. MAGyP. pp 35-37.

Di Pietro, S. 2019, abr. Acuerdo de París: ¿Nuevos compromisos con el medio ambiente o nuevas oportunidades de negocio? *Estudios internacionales (Santiago)*, 51(192): 57-70.

- Donoso, H. P. y Promis, B. A. 2013. Silvicultura en bosques nativos: avances en la investigación en Chile, Argentina y Nueva Zelandia. Valdivia, Marisa Cuneo Ediciones. 226p.
- Emanuelli, P. y Milla, F. 2006. Comercialización, Pieza Clave para el Manejo Sustentable del Bosque Nativo. Santiago de Chile: CONAF y Sociedad Alemana de Cooperación Técnica (GTZ). 161p.
- Emanuelli, P.; F. Milla; E. Duarte; J. Torrealba; C. Garrido; O. Orellana et al. 2016. Diagnóstico de la desertificación en Chile y sus efectos en el desarrollo sustentable. (Documento Técnico), Sud-Austral Consultan SpA. Santiago, Chile: CONAF. 30p.
- Facelli, E.; Smith, S. and Smith, F. 2009, feb. Mycorrhizal symbiosis – overview and new insights into roles of arbuscular Mycorrhizas in agro- and natural ecosystems. *Australasian Plant Pathology*, 38(4): 338-344.
- FAO. 2002. Medios y Técnicas de producción. (cap. 5, pp. 159-165). En: El cultivo protegido en clima mediterráneo. Roma: FAO. 320p.
- Finlay, R. 2008, feb. Ecological aspects of mycorrhizal symbiosis with special emphasis on the functional diversity of interactions involving the extraradical mycelium. *Journal of Experimental Botany*, 59: 1115-1126.
- French, K. 2017, jul. Engineering mycorrhizal symbioses to alter plant metabolism and improve crop health. *Frontier in Microbiology*, 8: 1403.
- Gauna, L. 2017, jul. Cooperación Internacional para el cambio climático. Estudio de casos: América latina y la Unión Europea. *Revista Electrónica de Medioambiente*, 18(1): 27-48.
- Gaur, A. and Adholeya, A. 2000, may. Response of three vegetable crops to VAM fungal inoculation in nutrient deficient soils amended with organic matter. *Symbiosis*, 29: 19-31.
- Giliberto, J. and Estay, H. 1978, jun. Seasonal water stress in some Chilean matorral shrubs. *Botanical Gazzete*, 139(2): 236-260.
- Godoy, R.; Riquelme, C.; Peredo, H. y Carrillo, R. 1991. Compatibilidad y eficiencia de hongos micorrízicos vesículo – arbusculares en *Eucalyptus camaldulensis* Dehnh. y *Quillaja saponaria* Mol. *CIFOR*, 5(2): 237-250.
- Gómez, J.; Alcántara, J.; Olmedo, J. y Martínez, E. 2015, sep. La sistematización del clima mediterráneo: identificación, clasificación y caracterización climática de Andalucía (España). *Revista de Geografía Norte Grande*, (61): 161-180.
- González, M.; Ferrera, R.; Villegas, A. y Oropeza, J. 2000, oct.-nov. Selección de sustratos de crecimiento en microplántulas de cítricos inoculadas con *Glomus* sp. Zac-19. *Terra Latinoamericana*, 18(4): 369-378.
- Guerra, E.; Herrera, M. y Drake, F. 2010, feb. Efecto de los sistemas de riego en la rentabilidad de plantaciones de eucalipto (*Eucalyptus globulus*). *Agrociencia*, 44(1): 99-107.

Hans, W. 1993, sep. Transformación de bosques nativos degradados en Chile. *Instituto Forestal*, 7(1): 136-159.

Hauenstein, E.; Peña, F.; Bertrán, C.; Tapia, J.; Vargas, L. y Urrutia, O. 2014, jun. Composición florística y evaluación de la degradación del bosque pantanoso costero de temupitra en la Región de La Araucanía, Chile. *Gayana Botanica*, 71(1): 43-57.

Holdridge, L. R. 1967. Life Zona Ecology. San José, Tropical Science Center. 149p.

Hooker, J. E.; Jaizme-Vega, M., and Atkinson, D. 1994. Biocontrol of plant pathogens using arbuscular mycorrhizal fungi. En: GIANIAZZI, S y HANNES, S (Eds.). Impact of Arbuscular Mycorrhizas on Sustainable Agriculture and Natural Ecosystems. Aberdeen, Soil Biology Unit, Department of Land Resources. pp. 191-200.

Howeler, R.; Sieverding, E. and Saif, S. 1987, feb. Practical aspects of mycorrhizal technology in some tropical crops and pastures. *Plant and soil*, 100: 249-283.

INTA, 2018. Manual de vivero. Buenos Aires, Argentina: Ministerio de Agroindustria. 174p.

Jornadas Nacionales de Olivicultura de la SECH (2^{da}, 2 y 3 de Marzo de 2009, Tarragona, España). Efectividad de la inoculación con micorrizas del olivo: estudios en distintas condiciones de suelos mediterráneos. V. Estaún; C. Calvet; A. Camprubí.; Y. Kapulnik; A. Dag; I. Ortas y M. Orfanoudakis (Eds.). Tarragona, España: Sociedad Española de Ciencias Hortícolas. 81p.

Larios, E.; Valdovinos, J.; Chan, W.; García, F.; Manzo, G. y Buenrostro, M. 2019, may. Biocontrol de Damping off y promoción del crecimiento vegetativo en plantas de *Capsicum chinense* (Jacq) con *Trichoderma* spp. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 10(3): 471-483.

Marañón, T. 1997. El bosque mediterráneo. En: Naturaleza de Andalucía 7. Editorial Giralda. España. pp 16-50.

Marino, H. 2002, sep. Respuestas ecofisiológicas de plantas en ecosistemas de zonas con clima mediterráneo y ambientes de altamontaña. *Revista Chilena de Historia Natural*, 75(3): 625-637.

Martínez, P. y Patiño, C. 2012. Efectos del cambio climático en la disponibilidad de agua en México. *Tecnología y Ciencias del Agua*, 3(1): 50-20.

Martínez, B. A. 2013. Guía básica de buenas practicas para plantaciones forestales de pequeños y medianos propietarios. Chile, Corporación Nacional Forestal (CONAF). 91p.

Mena, A.; Fernández, K.; Jerez, E.; Olalde, V., y Serrato, R. 2011, ene.-mar. Influencia de la inoculación con *Glomus hoi-like* y un conglomerado de especies de HMA en el crecimiento de plantas de sorgo sometidas o no a estrés hídrico. *Cultivos Tropicales*, 32(1): 16-27.

MINAGRI-FAO. 2011, abr. Prácticas de Conservación de Suelos y Agua para la Adaptación Productiva a la Variación Climática. Secano de la Región de O'Higgins. Organización de las

Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO); Ministerio de Agricultura, Subsecretaría de Agricultura, Unidad Nacional de Emergencias Agrícolas y Gestión del Riesgo Agroclimático (UNEA). Santiago, Chile. 33 p.

Ministerio del Medio Ambiente (MMA), [s.f.]. Economía circular [en línea] <<https://mma.gob.cl/economia-circular/>> [consulta: 13 enero 2020]

Miramontes, A. 2020, jul.-dic. La industria forestal de España en la Economía circular, ¿su integración es posible? *Anales de Geografía de la Universidad Complutense*, 40(2): 439-465.

MMA (Ministerio del Medio Ambiente), 2020. Inventario nacional de especies de Chile. [en línea]. Santiago, Chile: Ministerio del Medio Ambiente. Recuperado en: <<http://especies.mma.gob.cl/CNMWeb/Web/WebCiudadana/Default.aspx>> Consultado el: 13 de julio de 2021.

Monzon, A. and Azcón, R. 1996, may. Relevance of mycorrhizal fungal origin and host plant genotype to inducing growth and nutrient uptake in *Medicago* species. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 60: 9-15

Morales, C.; Calaña, J.; Corbera, J. y Rivera, R. 2011, ene.-mar. Evaluación de sustratos y aplicación de hongos micorrízicos arbusculares en *Begonia* sp. *Cultivos Tropicales*, 32(1): 50-62.

Nazareno, C.; Ruscitti, M y Arango, M. 2020. Micorrizas arbusculares: Biología y aplicaciones en el sector agro-forestal. Buenos Aires, Editorial de la Universidad de la Plata. 134p.

Noda, Y. 2009, abr.-jun. Las Micorrizas: Una alternativa de fertilización ecológica en los pastos. *Pastos y Forrajes*, 32(1): 1.

Oehl, F.; Sieverding, E.; Mäder, P.; Dubois, D.; Ineichen, K.; Boller, T. and Wiemken, A. 2004, jan. Impact of long-term conventional and organic farming on the diversity of arbuscular mycorrhizal fungi. *Oecologia*, 138(4): 574-583.

Ortega, L.; Martínez, C.; Huerta de la Peña, A.; Ocampo, J.; Sandoval, E. y Jaramillo, J. 2014, may.-jun. Uso y manejo de plaguicidas en invernaderos de la región norte del estado de Puebla, México. *Acta Universitaria*, 24(3): 3-12.

Padilla, F. 2008, ene. Factores limitantes y estrategias de establecimiento de plantas leñosas en ambientes semiáridos. Implicaciones para la restauración. *Ecosistemas*, 17(1): 155-159.

Pérez, P. 2013. Diversidad de Hongos Micorrízicos Arbusculares en un gradiente altitudinal en el Parque Nacional Izta-Popo. Tesis para obtener el título de Bióloga. D. F., México: Facultad de Estudios Superiores Zaragoza, UNAM. 54h.

Pastor, J. 1999, jul.-sep. Utilización de sustratos en viveros. *Terra Latinoamericana*, 17(3): 231-235.

Peters, M.; Godfrey, C.; Khalil, H.; McInerney, P.; Parker, D. and Soares, C. 2015, sep. Guidance for conducting systematic Scoping reviews. *International Journal of Evidence-Based Healthcare*, 13(3): 141-146.

Pizarro, Y. 2017. Chile y Perú como principales mercados de exportación: Desarrollo de las micorrizas en España y el mundo [en línea] Revista Redagícola <https://www.redagricola.com/cl/__trashed-6/>. [consulta: 28 enero 2021]

Plana, R.; González, P. y Soto, F. 2016, oct.-dic. Uso combinado de Ecomic[®], Fitomas-e[®] y fertilizantes minerales en la producción de forraje para la alimentación animal a base de triticale (*x. Triticosecale Wittmack*), cv INCA TT-7. *Cultivos Tropicales*, 37(4): 76-83.

Prasad, M.; Chaudhary, M.; Ramakrishnan, S. and Kumar, S. 2018, sep. Glomalin: a miracle protein for soil sustainability. *Indian Farmer*, 5(09): 1092-1100.

Quintana, J. 2014. Aislamiento y reproducción de hongo micorriza arbuscular (*Glomus intraradices*) en plantas de maíz (*Zea mays*). Tesis para la obtención del Título de Ingeniería en Agronomía. Instituto Tecnológico de la Zona Maya (ITZM), México. 34h.

Quiñones, E.; Montoya, A.; Rincón, G.; Lobit, P. and López, L. 2016, dec. Effectiveness of native arbuscular mycorrhizal consortia on the growth of *Agave inaequidens*. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 16(4): 1052-1064.

Quiroga, G. 1983, jun. El mal drenaje de los suelos: una limitante de la productividad agrícola. *INIA*, 2(2): 18-22.

Quiroz, M.; Flores, L.; Pincheira, M. y Villaroel, A. 2001. Manual de viverización y plantación de especies nativas. Valdivia, Instituto Forestal (INFOR). 160p.

Ramírez, M.; Peñaranda R.; Serralde, D. y Pérez, U. 2020. Aplicación de HFMA en vivero (cap. 7, pp. 41-43). En: Producción y aplicación de hongos formadores de micorrizas en vivero de caña para panela. Colombia: AGROSAVIA. 50p.

Ramírez, M. y Rodríguez, A. 2012, jun. Mecanismo de defensa y respuestas de las plantas en la interacción micorrícica: una revisión. *Revista Colombiana de Biotecnología*, 14(1): 271-284.

Reyes, G. y Cortés, J. 2017, ene. Intensidad en el uso de fertilizantes en América Latina y el Caribe (2006-2012). *Bioagro*, 29(1): 45-52.

Rillig, M. 2005, sep. A connection between fungal hydrophobins and soil water repellency? *Pedobiologia*, 49(5): 395-399.

Rivas, Y.; Inés, M.; Knicker, H.; Etcheverría, P.; Godoy, R.; Matus, F.; Valenzuela, E. y Gallardo, R. 2016. Variación en el contenido de glomalina relacionada a las proteínas del suelo, después de un incendio forestal en un Andisol en bosques de Araucaria araucana del centro-sur de Chile. *Bosque*, 37(2): 409-417.

- Rojas, A.; Ojeda, M. y Barraza, X. 2000, abr. Malformaciones congénitas y exposición a pesticidas. *Revista Médica de Chile*, 128(4): 399-404.
- Rojas, K., y 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(4): 697-719.
- Roldán, F. 1985. Micorrizas VA en Cultivos Arbóreos: Almendro, Naranja y Olivo. Tesis Doctoral. Facultad de Ciencias, Universidad de Granada. España. 258h.
- Rose, R.; Haase, D. y Arellano, E. 2004, ago. Fertilizantes de entrega controlada: potencial para mejorar la productividad de la reforestación. *Bosque (Valdivia)*, 25(2): 89-100.
- Ruiz, M. y Rodríguez del Rincón, A. 1995. Mecanización del cultivo extensivo. (cap. 9, pp. 312-349). En: El cultivo del tomate. Madrid: Muni-Prensa. 793p.
- Rundel, P. W. and Cowling, R. M. 2013, dec. Mediterranean Climate Ecosystems. En: Levin, S. (Ed.) *Encyclopedia of Biodiversity: Second Edition*, Waltham, MA: Academic, pp. 212-222.
- Rundel, P.; Rasoul, M.; Vu, M.; Montenegro, G. and Mooney, H. 2019, nov. Seasonal patterns of growth phenology and nutrient dynamics in four matorral shrubs in Central Chile. *Gayana Botanica*, 25(2): 208-219.
- Saif, S. 1981, aug. The influence of soil aeration on the efficiency of vesicular-arbuscular mycorrhizae. I. Effect of soil oxygen on the growth and mineral uptake of *Eupatorium odoratum* L. inoculated with *Glomus macrocarpus*. *New Phytologist*, 88: 649-659.
- Salas, E. y Blanco, F. 2000, ene.-jun. Selección de plantas hospederas y efectos del fósforo para la producción de inóculo de hongos formadores de micorrizas arbusculares por el método de cultivo en macetas. *Agronomía Costarricense*, 24: 19-28.
- Salazar, V. 2016. Manual de micología básica. Universidad de Concepción. Chile. 78 p.
- Santa-Cecilia, B. 2014. Estudios sobre las hidrofobinas de clase II. Trabajo Fin de Grado. Zaragoza, Facultad de Veterinaria, Universidad Zaragoza. 40h.
- Santander, C.; Aroca, R.; Ruiz-Lozano, J. M.; Olave, J.; Cartes, P.; Borie, F. and Cornejo, P. 2017, jun. Arbuscular mycorrhiza effects on plant performance under osmotic stress. *Mycorrhiza*, 27(7), 639-657.
- Santander, C. y Olave, J. 2014, may. Efecto de la interacción del hongo micorrícico arbuscular (AMF) *Glomus intraradices* y *Trichoderma harzianum* sobre la producción de plantines de melón en zonas áridas. *Idesia (Arica)*, 32(2), 21-28.
- Seguel, A. 2014, ene.-feb. El potencial de las micorrizas arbusculares en la agricultura desarrollada en zonas áridas y semiáridas. *Idesia (Arica)*, 32(1): 3-8.

Silva, C. 2010, abr. Agricultura limpia y la necesidad del uso racional de los fertilizantes. *Idesia (Arica)*, 28(1): 5-7.

Silva, P. 2018. Factores que determinan la comunidad de hongos micorrícicos arbusculares del bosque esclerófilo en Chile central mediterráneo. Tesis para optar al grado de Doctor en Ciencias Biológicas, Área Botánica. Concepción, Chile: Facultad de Ciencias Naturales y Oceanográficas. 165h.

Silva-Flores, P.; Aguilar, A.; Dilbán, J. and Mujica, M. 2019. Mycorrhizas in the South American Mediterranean-Type Ecosystem: Chilean Matorral. En: PAGANO, M. y LUGO, M. (Eds.) Mycorrhizal Fungi in South America. Springer. pp 277-294.

Silva, P. 2020. Las Micorrizas y el Bosque. En: CHARLA DE las micorrizas y el bosque. Universidad Católica del Maule y CONECIFM. Santiago, Chile. s.p.

Singh, P. 2012, mar. Role of glomalin related soil protein produced by arbuscular mycorrhizal fungi: A Review. *Agricultural Science Research Journal*, 2(3): 119-125.

Smith, S. and Gianinazzi, V. 1988, june. Physiological interaction between symbionts in vesicular-arbuscular mycorrhizal plants. *Annual Review of Plant Physiology and Plant Molecular Biology*, 39(1): 221-244.

Smith, S. E. and Read, D. J. 2008. Mycorrhizal symbiosis. 3^a ed. Ámsterdam, Elsevier. 815p.

Socorro, A. 2009, feb. Simulación del efecto del embolismo xilemático sobre la conductividad hidráulica en las plantas. *Revista Cubana de Física*, 26(2): 120-126.

SONAMI. 2017. Informe Consumo de Agua en Minería. (Informe), Sociedad Nacional de Minería (SONAMI). Chile. 29 p.

Sýkorová, Z.; Ineichen, K.; Wiemken, A. and Redecker, D. 2007, sep. The cultivation bias: different communities of arbuscular mycorrhizal fungi detected in roots from the field, from bait plants transplanted to the field, and from a greenhouse trap experiment. *Mycorrhiza*, 18(1): 1-14.

Tosso, J. 1985. Suelos volcánicos de Chile. Primera Edición. Santiago: INIA. 723p.

Toulkeridis, T.; Tamayo, E.; Simón, D.; Merizalde, M.; Reyes, D.; Viera, M. y Heredia, M. 2020, mar. Cambio Climático según los académicos ecuatorianos – Percepciones versus hechos. LA GRANJA. *Revista de Ciencias de la Vida*, 31(1): 21-46.

Trivelli, M. 2014. Reseña de la vegetación de Chile. (Material de difusión), División de Protección de los Recursos Naturales Renovables. Santiago, Chile: SAG. 32p.

Trouvelot, S.; Bonneau, L.; Redecker, D.; van Tuinen, D.; Adrian, M. and Wipf, D. 2015, jul. Arbuscular mycorrhiza symbiosis in viticulture: a review. *Agronomy for Sustainable Development*, 35(4): 19p.

Trujillo, E. 2009. Guía de Reforestación. Segunda edición. Bogotá, Colombia: Trujillo Navarrete. 256p.

Ullah, S.; Muhammad, B.; Amin, R.; Abbas, H. and Muneer, M. 2019, jul. Sensitivity of arbuscular mycorrhizal fungi old-growth forests: direct Effect on growth and soil carbon storage. *Applied Ecology and Environmental Research*, 7(6):13749-13758.

Valenzuela, H. 1967. Prácticas silvícolas elementales: plantación. En: Manual 3: Nociones de silvicultura. Chile, INFOR. pp 95-184.

Valladares, F.; Vilagrosa, A.; Peñuelas, J.; Ogaya, R.; Camarero, J.; Corcuera, L.; Sisó, S. y Gil-Peigrín, E. 2004. Estrés hídrico: ecofisiología y escalas de la sequía. En: Valladares, F. Ecología del bosque mediterráneo en un mundo cambiante. Ministerio de Medio Ambiente, EGRAF, S. A., Madrid. pp 163-190.

Vargas, P.; Castellanos, J.; Muñoz, J.; Sánchez, P.; Tijerina, L.; López, R.; Martínez, C. y Ojodeagua, J. 2008, sep. Efecto del tamaño de partícula sobre algunas propiedades físicas del tezontle de Guanajuato, México. *Agricultura técnica en México*, 34(3): 323-331.

Vita, A. 2019. Enriquecimiento [Diapositivas]. [Chile]: Universidad de Chile. 15 diapositivas (PDF), (45min.), color, formato pdf.

Wang, H.; Parent, S.; Gosselin, A. and Desjardins, Y. 1993, oct. Vesicular–arbuscular mycorrhizal peat-based substrates enhance symbiosis establishment and growth of Three micropropagated species. *Journal of the American Society for Horticultural Science*, 118(6): 896-901.

Wösten, H.; van Wetter, M.; Lugones, L.; van der Mei, H.; Busscher, H. and Wessels, J., 1999, jan. How a fungus escapes the water to grow into the air. *Current Biology*, 9(2): 85-88.

Wright, S. and Upadhyaya, A. 1996, sep. Extraction of an abundant and unusual protein from soil and comparison with hyphal protein of arbuscular mycorrhizal fungi. *Soil Science*, 161(9): 575-586.

Zou, Y.; Zhang, F.; Srivastava, A.; Wu, Q. and Kuča, K. 2021, jan. Arbuscular Mycorrhizal Fungi Regulate Polyamine Homeostasis in Roots of Trifoliolate Orange for Improved Adaptation to Soil Moisture Deficit Stress. *Frontier Plant Science*, 11: 600-792.