

Perspectivas científicas del agro

Serie de documentos de trabajo

Escaneo científico sobre la relación entre los cítricos y los hongos micorrízicos arbusculares (AMF)

Leidy Johanna Cárdenas Solano
Carlos Alberto Contreras Pedraza





Escaneo científico sobre la relación entre los cítricos y los hongos micorrízicos arbusculares (AMF)

Autores

Leidy Johanna Cárdenas Solano
Carlos Alberto Contreras Pedraza

Mosquera, Marzo 2025

La elaboración de este documento se deriva de las acciones de monitoreo y seguimiento de información científica, desarrollados por el Departamento de Inteligencia Científica y Tecnológica de la Dirección de Investigación y Desarrollo de Agrosavia.

Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria (AGROSAVIA)

Sede Central. Kilómetro 14 vía Mosquera-Bogotá, Mosquera, Cundinamarca. Código postal 250047,
Colombia.

Citación sugerida: Cárdenas-Solano, L.J. & Contreras-Pedraza, C.A. (2025). *Escaneo científico sobre la relación entre los cítricos y los hongos micorrízicos arbusculares (AMF)*. Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria (AGROSAVIA).

DOI: 10.21930/agrosavia.escaneocientifico.2025.1

Línea de atención al cliente: 018000121515

atencionalcliente@agrosavia.co

<http://www.agrosavia.co>



https://co.creativecommons.org/?page_id=13

Cláusula de responsabilidad: AGROSAVIA no es responsable de las opiniones e información recogidas en el presente texto. Los autores asumen de manera exclusiva y plena toda responsabilidad sobre su contenido, ya sea este propio o de terceros, y declaran, en este último supuesto, que cuentan con la debida autorización de terceros para su publicación; igualmente, declaran que no existe conflicto de interés alguno en relación con los resultados de la investigación propiedad de tales terceros. En consecuencia, los autores serán responsables civil, administrativa o penalmente, frente a cualquier reclamo o demanda por parte de terceros relativa a los derechos de autor u otros derechos que se hubieran vulnerado como resultado de su contribución.

Tabla de Contenido

Introducción	7
Estrategia de búsqueda.....	10
Indicadores bibliométricos	10
Dinámica de publicaciones	11
Indicadores de producción científica.....	13
Principales representantes según producción bibliográfica	14
Referentes temáticos en investigación	27
Tendencias temáticas y evolución en tópicos de investigación	28
Red de coocurrencia de tópicos.....	31
Mapa temático principales tendencias de investigación	34
Bibliografía.....	37

Lista de Figuras

Figura 1. Producción de publicaciones científicas	11
Figura 2. Principales autores e instituciones según producción bibliográfica	15
Figura 3. Principales países según producción bibliográfica	17
Figura 4. Líneas temáticas en investigación.....	28
Figura 5. Tópicos tendenciales.....	29
Figura 6. Evolución temática	30
Figura 7. Red de coocurrencia temática de tendencias generales	32
Figura 8. Mapa temático principales tendencias de investigación	35

Lista de Tablas

Tabla 1. Indicadores bibliométricos de la producción científica	13
Tabla 2. Principales fuentes de difusión y consulta	19
Tabla 3. Publicaciones más citadas a nivel global.....	21
Tabla 4. Referencias más citadas dentro del corpus recuperado.....	25

Autores

Leidy Johanna Cardenas Solano, M.Sc.

Orcid: [0000-0001-5471-7160](https://orcid.org/0000-0001-5471-7160)

Ingeniera Industrial, MSc en Ingeniería Industrial enfocada en la gestión de la tecnología y la innovación, certificada como Ciudadana de Datos por Alianza Caoba y Científica de datos certificada por MinTIC y Correlation One, con conocimientos en ISO 27001:2013. Investigador Junior reconocido por el Ministerio de Ciencia, Tecnología e Innovación de Colombia y Analista del Departamento de Inteligencia y Divulgación Científica de la Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria AGROSAVIA. Formación en Platzi en Transformación Digital y más de 12 años de experiencia en valoración financiera de tecnologías, transferencia tecnológica y formulación de proyectos de I+D+i para el SGR, Minciencias, y CYTED. Docente universitaria, experiencia de investigación en Gestión de la Innovación Tecnológica y el Conocimiento y formulación de proyectos para la consecución de más de 13 mil millones que se ejecutan a través de proyectos financiados con beneficios tributarios. Las principales áreas de investigación comprenden la gestión del conocimiento, la gestión de la innovación, la gestión de la tecnología, la inteligencia competitiva, la vigilancia tecnológica, la cienciometría, el análisis de las cadenas de valor de la agricultura, la hoja de ruta tecnológica, el benchmarking, y la prospectiva tecnológica.

Carlos Alberto Contreras Pedraza, M.Sc.

Orcid: [0000-0001-7138-2147](https://orcid.org/0000-0001-7138-2147)

Profesional en Ingeniería Industrial, Magíster en Ingeniería Agrícola y estudios en Magister en Ingeniera Industrial de la Universidad Nacional de Colombia. Investigador Master Asociado de la Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria – AGROSAVIA y Coordinador de Inteligencia Científica de la misma. Experiencia en investigación y ejecución de proyectos en el área de gestión tecnológica, gestión de conocimiento y direccionamiento estratégico de sectores productivos. Ha desarrollado proyectos con la Universidad Nacional de Colombia, el Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural, AGROSAVIA, La Corporación de Ciencia y Tecnología para el Desarrollo de la Industria

Naval Marítima y Fluvial - COTECMAR, Cámara de Comercio de Cartagena, Universidad Tecnológica de Bolívar, entre otras. Conocimiento y habilidad en el desarrollo de ejercicios de vigilancia tecnológica y comercial, benchmarking, diagnóstico tecnológico, prospectiva, desarrollo de indicadores en CTI, entre otros. Experiencia en estudios estratégicos para cadenas productivas agroindustriales, manejo de bases de datos de información científica y comercial, elaboración y actualización de indicadores de CTI para el sector agropecuario, al igual herramientas informáticas básicas y especializadas en el campo de la vigilancia tecnológica y comercial.

Introducción

Los hongos micorrízicos arbusculares (AMF - *arbuscular mycorrhizal fungi* en inglés) desempeñan un papel crucial en la sanidad vegetal y en la sostenibilidad de los sistemas de producción agrícola, especialmente en cultivos perennes como los cítricos. Estos hongos forman asociaciones simbióticas con las raíces de las plantas, facilitando la absorción de nutrientes esenciales, mejorando la resistencia a estreses abióticos y bióticos, y optimizando la estructura del suelo (Hu et al., 2024; Xu et al., 2024a). En el contexto de la citricultura, los desafíos fitosanitarios, como la infestación por *Tylenchulus semipenetrans* (nematodo de los cítricos), la escasez de agua y la toxicidad por metales pesados, han impulsado el interés por estrategias de manejo integradas que reduzcan la dependencia de agroquímicos y mejoren la resiliencia del cultivo (Hussain et al., 2025; Zoubi et al., 2025).

Uno de los principales problemas en la producción cítrica es la proliferación de *T. semipenetrans*, un endoparásito sedentario que afecta las raíces de los cítricos, limitando su crecimiento y rendimiento. Su control mediante nematocidas sintéticos es costoso y ambientalmente riesgoso, lo que ha generado la necesidad de estrategias alternativas basadas en el uso de AMF (Zoubi et al., 2025). Estudios recientes han demostrado que especies como *Funneliformis mosseae* y *Rhizophagus irregularis* pueden reducir en más del 80 % la población de este nematodo en el suelo y en las raíces de cítricos como *Citrus aurantium* y *Carrizo citrange*, promoviendo simultáneamente un mayor crecimiento y desarrollo radicular (Zoubi et al., 2025).

Además del control biológico de plagas, los AMF también contribuyen a la tolerancia de los cítricos a estreses ambientales como la sequía, un factor cada vez más crítico debido al cambio climático (Hussain et al., 2025). En este sentido, se ha demostrado que la inoculación con AMF mejora la eficiencia fotosintética, la regulación estomática y la actividad antioxidante en patrones cítricos como *Rangpur lime* y *Carrizo citrange*, reduciendo los efectos negativos del déficit hídrico en la planta (Hussain et al., 2025). Estos hallazgos resaltan la importancia de los AMF en la mitigación de condiciones de estrés hídrico, lo que los convierte en aliados clave para la citricultura sostenible.

Otro aspecto relevante de la interacción AMF-cítricos es su capacidad para mejorar la fertilidad del suelo y la absorción de nutrientes. Investigaciones en *Citrus reticulata* cv.

Tejakula han demostrado que la alta colonización de raíces por AMF (90-100 %) favorece la disponibilidad de nutrientes esenciales y la estructura del suelo, incluso en suelos degradados por el uso intensivo de agroquímicos (Wijana et al., 2025). Esto refuerza la necesidad de adoptar estrategias de manejo de suelos que fomenten la biodiversidad microbiana beneficiosa en los huertos cítricos.

Adicionalmente, los AMF desempeñan un papel importante en la mitigación de la toxicidad por metales pesados en suelos agrícolas. Xu et al. (2024) encontraron que *Funneliformis mosseae* mejora la tolerancia del naranjo trifoliado (*Poncirus trifoliata*) a la toxicidad por manganeso (Mn), reduciendo la acumulación de este metal en raíces y hojas, mejorando la actividad fotosintética y regulando la expresión de genes clave asociados con la detoxificación celular. Este hallazgo sugiere que los AMF pueden ser utilizados como una estrategia para la biorremediación de suelos contaminados en plantaciones cítricas.

En términos de desarrollo radicular, los AMF también han demostrado ser determinantes en la morfogénesis de los pelos radicales en cítricos, modulando la expresión de genes relacionados con la síntesis de hormonas como auxinas, giberelinas y citoquininas, lo que amplía la superficie de absorción y mejora la capacidad de la planta para establecerse en suelos de baja fertilidad, promoviendo un mayor crecimiento de los pelos radicales y fortaleciendo la interacción simbiótica con los AMF (Hu et al., 2024).

En este contexto, el presente estudio tiene como objetivo un análisis exploratorio sobre el papel de los hongos micorrízicos arbusculares (AMF) en la producción de cítricos, evaluando su impacto en la mejora de la sanidad radicular, la tolerancia a estreses abióticos y bióticos, la optimización de la absorción de nutrientes y su potencial en la biorremediación de suelos. Esta revisión se basa en la revisión de estudios recientes que han explorado la relación entre los cítricos y los AMF en distintos escenarios agronómicos, empleando herramientas de vigilancia científica a partir de una consulta en la base de datos Scopus®, utilizando una ecuación de búsqueda basada en las palabras claves 'arbuscular', 'mycorrhizal', 'fungi' y 'citrus'. Esta iniciativa se enmarca en los objetivos de la DID, orientados a fomentar la estructuración y desarrollo de planes, programas y proyectos alineados con las agendas territoriales y los enfoques estratégicos. Posteriormente, se recopiló el corpus restringido al período 1979-2025, considerando todo tipo de publicaciones. Posteriormente, con los metadatos recuperados de 315 documentos, se

identificaron principales tendencias de investigación de acuerdo con la relevancia y el nivel de desarrollo mediante la elaboración de un mapa temático con indicadores cuantitativos elaborado con la herramienta Bibliometrix® v 4.3.0 (Aria & Cuccurullo, 2017). Con relación a la identificación de clústeres con tópicos de investigación afines se utilizó software libre VOSviewer® v 1.6.20 (van Eck & Waltman, 2010), herramienta que a través de cálculos algorítmicos permite analizar la coocurrencia de palabras claves visualizada en una red representada en un gráfico de nodos y líneas de relacionamiento.

Estrategia de búsqueda

Para el análisis de la relación entre los cítricos y los hongos micorrízicos arbusculares (AMF) se descargó un corpus con 315 registros de la base de datos de Scopus® utilizando la siguiente ecuación de búsqueda, la cual se compone de un conjunto de palabras o términos relevantes conectados mediante operadores booleanos y unas restricciones temporales, restricciones por tipo de documento, y restricciones por área temática:

```
(TITLE-ABS-KEY (arbuscular AND mycorrhiza* AND (fung? OR fung?s) AND citrus) OR TITLE-ABS-KEY (amf AND citrus))
```

La base de datos Scopus® fue consultada directamente para obtener detalles sobre los documentos seleccionados, incluyendo autores, campos de estudio y número de publicaciones. Esta plataforma recopila y organiza una amplia variedad de fuentes, como revistas científicas, artículos de investigación y revisión, libros, patentes y otros recursos. Esto se logra mediante la extracción de metadatos de títulos, autores, resúmenes y palabras clave. Este proceso es posible gracias al uso de algoritmos de búsqueda y análisis semántico, teniendo en cuenta factores como las palabras clave utilizadas, la relevancia de los documentos, la calidad de las revistas y las citas recibidas (Flórez-Martínez et al., 2023). Estos factores se describen a través de indicadores bibliométricos implementados por Scopus®.

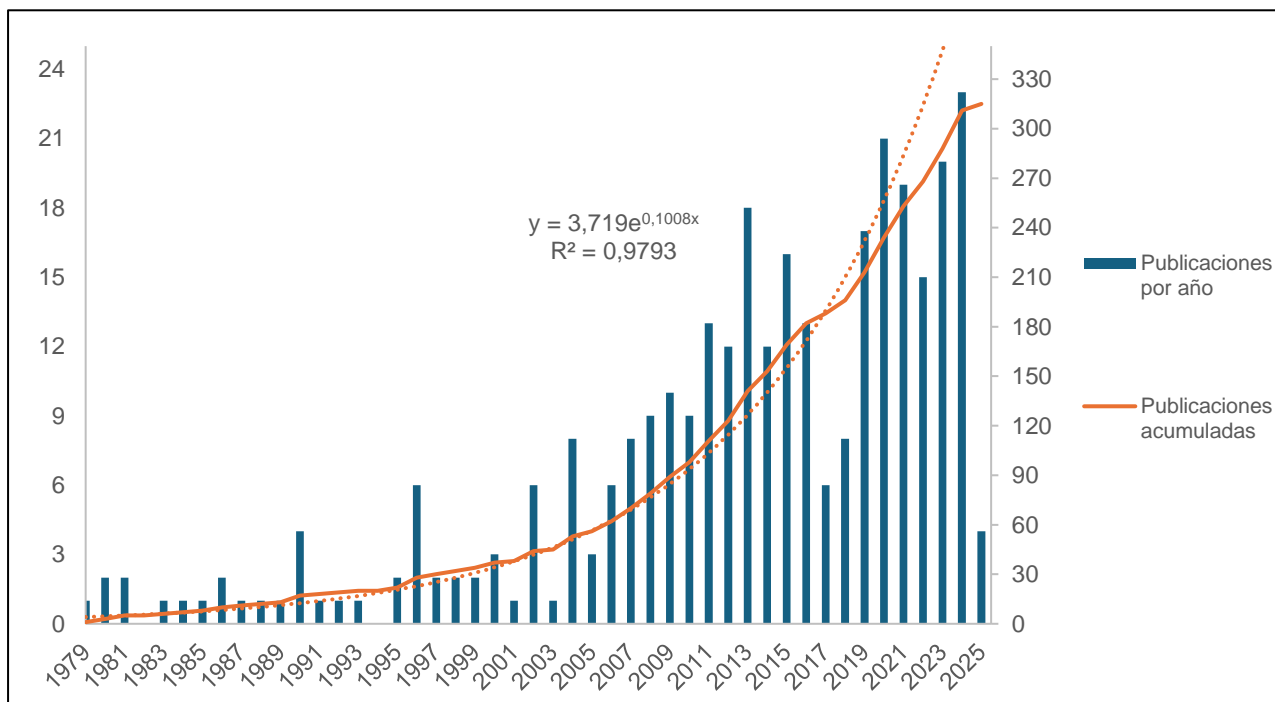
Indicadores bibliométricos

A continuación, se presenta un análisis exhaustivo de la producción científica sobre las tendencias emergentes en la interacción de los hongos micorrízicos arbusculares (AMF) y los cítricos. Este análisis abarca la dinámica de publicaciones, considerando el crecimiento promedio anual en términos de número de publicaciones, lo cual permite identificar cambios significativos en periodos específicos dentro de la ventana temporal analizada y reflejar posibles variaciones o tendencias emergentes en la generación de conocimiento en este ámbito. Asimismo, se analizan los referentes temáticos de investigación, los tópicos persistentes a lo largo del tiempo y la red de coocurrencia de temas, proporcionando una visión integral de las principales áreas de interés y las conexiones temáticas en este campo.

Dinámica de publicaciones

La dinámica de publicaciones representada en la Figura 1 sobre la interacción entre los cítricos y los hongos micorrízicos arbusculares (AMF), refleja un crecimiento exponencial en el interés científico por este tema, como lo indica la ecuación ajustada $y=3,719e^{0.1008x}$ con un coeficiente de determinación $R^2=0.9793$, que muestra un ajuste altamente preciso al modelo de crecimiento exponencial.

Figura 1. Producción de publicaciones científicas



Fuente. Elaborado a partir de datos de Scopus®, fecha de actualización de consulta marzo de 2025. Software de análisis Excel®

Hasta la década de 1990, la producción científica en esta área fue esporádica, con un promedio de una o dos publicaciones por año. Sin embargo, a partir de 2000 se observa un aumento progresivo en el número de investigaciones publicadas anualmente, con un punto de inflexión claro entre 2010 y 2015, cuando el número de publicaciones comenzó a superar las 10 por año.

Desde 2019, el crecimiento en la producción científica se intensificó considerablemente, alcanzando un máximo en 2024 con 23 publicaciones anuales. La tendencia acumulativa

de publicaciones confirma este comportamiento, mostrando una trayectoria sostenida de incremento en el número de estudios publicados sobre la temática. Esta aceleración reciente sugiere un interés creciente por el papel de los AMF en la mejora del crecimiento y resistencia de los cítricos a factores de estrés biótico y abiótico.

El aumento en la investigación sobre AMF y cítricos puede atribuirse a la creciente necesidad de estrategias agrícolas sostenibles y alternativas al uso de fertilizantes y agroquímicos. En particular, los estudios más citados en el periodo de tiempo 2019-2024 han explorado los mecanismos fisiológicos y bioquímicos implicados en esta simbiosis resaltando el papel de los AMF en la mejora de la resistencia de los cítricos a patógenos como *Tylenchulus semipenetrans*, el aumento de la tolerancia a la sequía y la optimización de la absorción de nutrientes. Por ejemplo, Zhang et al., (2020) demostraron que los AMF pueden modular el metabolismo de poliaminas en las raíces de *Poncirus trifoliata*, promoviendo la acumulación de antioxidantes y reduciendo los efectos del estrés hídrico. Un mecanismo similar fue identificado por Wu et al., (2019), quienes encontraron que los AMF alteran la composición y saturación de los ácidos grasos en las raíces de cítricos, lo que mejora la estabilidad de las membranas celulares bajo condiciones de sequía. En la misma línea, (He et al., 2020) reportaron que la colonización micorrízica en cítricos aumenta la expresión de genes antioxidantes y la actividad enzimática, reduciendo así el daño oxidativo durante la sequía.

Otro enfoque clave ha sido el papel de los AMF en la mejora de la calidad del suelo y la acumulación de carbono orgánico. He et al. (2020) encontraron que las proteínas relacionadas con la glomalina contribuyen significativamente al carbono orgánico del suelo en cítricos micorrizados, lo que sugiere un efecto positivo de los AMF en la fertilidad y estructura del suelo. De manera complementaria, (Yang et al., 2021) demostraron que los hongos endófitos pueden mejorar la absorción de nutrientes en *Poncirus trifoliata*, destacando la importancia de estas asociaciones simbióticas en la nutrición de los cítricos.

Además, se han identificado mecanismos hormonales y moleculares que explican la interacción entre los AMF y las raíces de cítricos. Zhang et al. (2019) mostraron que los AMF promueven el crecimiento de los pelos radicales en *Poncirus trifoliata* a través de la regulación de hormonas como el ácido abscísico y las brassinosteroides. Asimismo,

(Cheng et al., 2021) destacaron el papel de la actividad de H⁺-ATPasa y la expresión génica en la adaptación de cítricos a la sequía mediante la simbiosis con AMF.

En términos de la dinámica del suelo, Wu et al. (2020) evaluaron el impacto del cambio de uso del suelo en la respiración del suelo y la comunidad microbiana, demostrando que la conversión de arrozales a huertos de cítricos afecta significativamente la actividad microbiana del suelo, con implicaciones para la sostenibilidad agrícola. Finalmente, (Cheng et al., 2022) analizaron cómo los AMF modulan la microestructura de la rizosfera en cítricos, promoviendo la acumulación de exudados radiculares y proteínas del suelo que mejoran la estabilidad de los agregados del suelo y la resistencia a la sequía.

En términos de proyección, la tendencia observada indica que la investigación sobre AMF y cítricos continuará expandiéndose en los próximos años, consolidándose como un área clave en la agricultura sostenible y la biotecnología aplicada a la citricultura.

Indicadores de producción científica

De acuerdo con los indicadores bibliométricos de la Tabla 1, la comunidad científica que investiga la interacción entre los hongos micorrízicos arbusculares (AMF) y los cítricos en el ámbito de la horticultura está compuesta por 777 autores, con un total de 315 publicaciones en el período analizado (1979-2025). El promedio de 28.6 citas por artículo sugiere un impacto moderado en la literatura científica, lo que indica que los estudios publicados han sido reconocidos y referenciados en el campo, contribuyendo al avance del conocimiento en esta área.

Tabla 1. Indicadores bibliométricos de la producción científica

Indicadores Bibliométricos	Resultados
Período de análisis	1979 - 2025
Número de publicaciones	315
Citas promedio por artículo	28.6
Referencias totales	12,150
Antigüedad media de los documentos (años)	12.1
Palabras clave de los autores (DE)	764
Palabras clave adicionales (ID)	1,119
Número total de autores	777

Indicadores Bibliométricos	Resultados
Co-autores por documento	4.55
Colaboración internacional (%)	30.79
Número total de revistas y fuentes	139
Tipos de documentos publicados:	
- Artículos	291
- Capítulos de libros	5
- Artículos de conferencias	10
- Revisiones	9

Fuente. Elaboración propia a partir de datos de Scopus®, fecha de actualización de consulta marzo de 2025. Software de análisis Bibliometrix 4.4.2®

Principales representantes según producción bibliográfica

El análisis bibliométrico confirma que la investigación sobre la relación entre los hongos micorrízicos arbusculares (AMF) y los cítricos ha crecido exponencialmente en las últimas décadas, con el investigador Wu, Q.S., la institución Yangtze University y el país China como los principales actores en este campo (Ver Figura 2 y Figura 3).

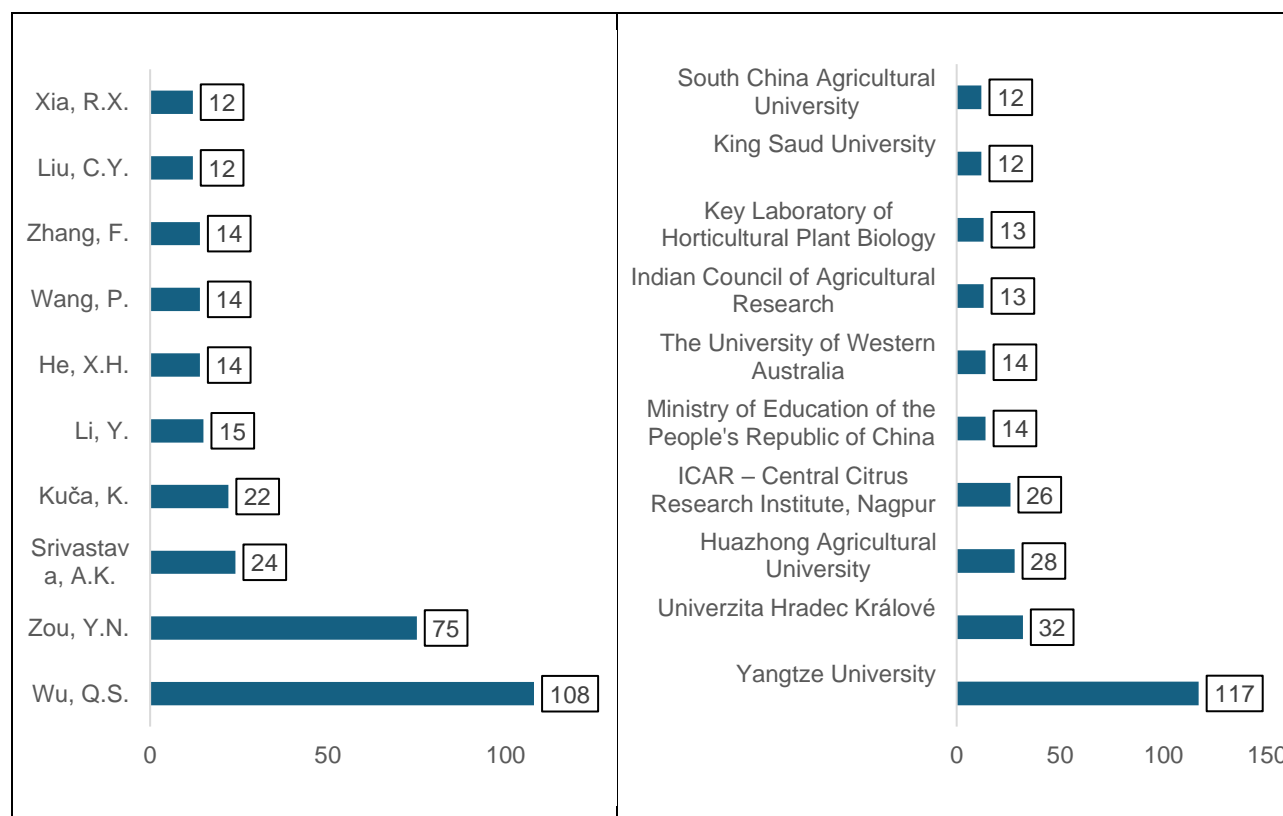
Respecto al análisis detallado de los investigadores, el investigador con mayor producción científica es Q.S. Wu, con un total de 108 publicaciones, consolidándose como el principal referente en la materia. Su contribución es significativamente mayor que la del siguiente autor más productivo, Y.N. Zou, con 75 publicaciones. Las líneas de investigación de Wu han abarcado diversos aspectos del impacto de los AMF en cítricos, destacándose en sus cinco publicaciones más recientes los siguientes temas clave:

1. **Mitigación de la toxicidad por manganeso en naranja trifoliada** mediante la inoculación con *Funneliformis mosseae*, promoviendo el crecimiento y la eficiencia fotosintética de las plantas bajo condiciones de toxicidad (Xu et al., 2024b).
2. **Regulación del crecimiento de los pelos radiculares en cítricos mediada por AMF**, con un papel fundamental del transportador de auxinas PtPIN6 en el desarrollo radicular (Guo et al., 2024a).
3. **Mecanismos de tolerancia a la sequía inducidos por AMF**, donde se regulan la síntesis de trehalosa y la hidrólisis de la sacarosa, facilitando la adaptación a condiciones de estrés hídrico (Zheng et al., 2024a).

4. **Expresión génica de catalasas en mandarina satsuma bajo estrés ambiental y micorrización**, resaltando la importancia de *CitCAT2* en la resistencia a bajas temperaturas y la contribución de *Diversispora versiformis* a la reducción del estrés oxidativo (Z. Liu et al., 2024).
5. **Interacción entre AMF y el metabolismo del fósforo y auxinas en cítricos**, mejorando la arquitectura radicular y la eficiencia de absorción de nutrientes en distintos genotipos cítricos (C.-Y. Liu et al., 2024).

Además, su publicación más citada, con 435 citas, explora cómo los AMF influyen en el crecimiento, ajuste osmótico y fotosíntesis de cítricos bajo condiciones de estrés hídrico (Q.-S. Wu & Xia, 2006). Este artículo ha sido crucial para la comprensión de los mecanismos fisiológicos mediante los cuales los AMF mejoran la tolerancia al estrés en cítricos, consolidando su impacto en la comunidad científica.

Figura 2. Principales autores e instituciones según producción bibliográfica



Fuente. Elaborado a partir de datos de Scopus®, fecha de actualización de consulta marzo de 2025. Software de análisis Excel®

En cuanto a las instituciones, Yangtze University se posiciona como la institución con mayor número de publicaciones en el campo de la relación entre hongos micorrízicos arbusculares (AMF) y cítricos, con un total de 117 publicaciones, superando ampliamente a otras instituciones de prestigio como la Universidad de Hradec Králové (32 publicaciones) y la Huazhong Agricultural University (28 publicaciones). Las cinco publicaciones más recientes de Yangtze University en 2024 reflejan un enfoque diversificado en el impacto de los AMF sobre la fisiología de los cítricos, con énfasis en la tolerancia al estrés abiótico y biótico, la absorción de nutrientes y la expresión génica en respuesta a la colonización micorrízica.

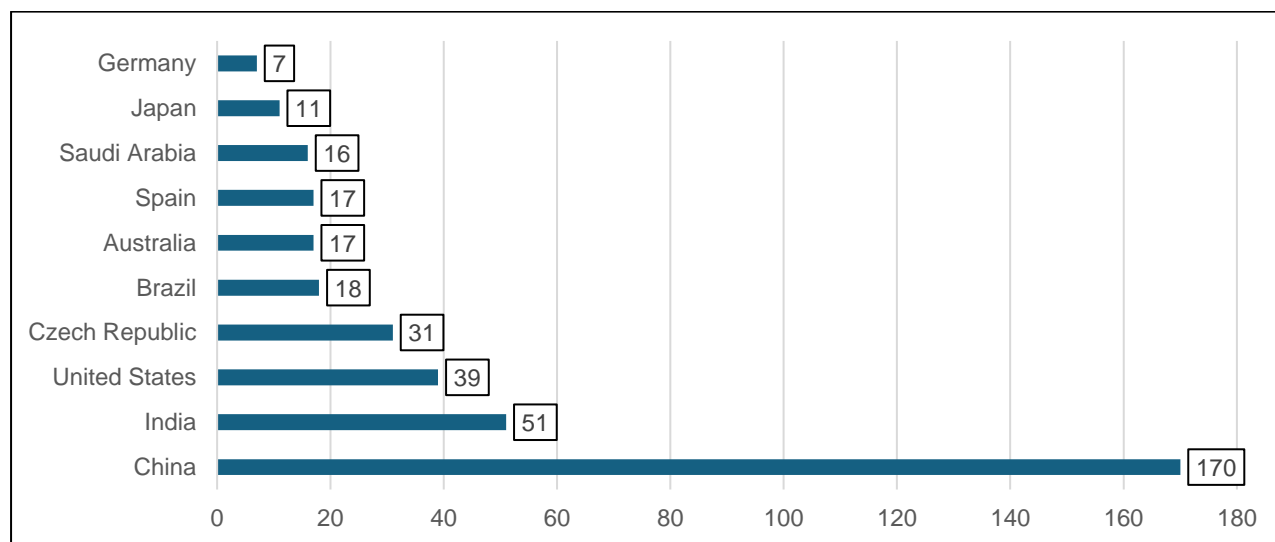
1. **Mitigación de la toxicidad por manganeso en cítricos:** (Xu et al., 2024a) estudiaron el papel de *Funneliformis mosseae* en la reducción de la toxicidad por manganeso (Mn) en *Poncirus trifoliata*. Se observó que los AMF mejoran la eficiencia fotosintética y reducen la acumulación de manganeso en raíces y hojas mediante la regulación de la expresión génica relacionada con la homeostasis de Mn (PtMTP11, PtHEMA2 y PtMnSOD).
2. **Regulación del crecimiento de pelos radicales en cítricos:** (Guo et al., 2024b) evaluaron la interacción entre *F. mosseae* y el transporte de auxinas en la formación de pelos radicales en cítricos. Se identificó el gen PtPIN6 como clave en la modulación del transporte de auxinas, promoviendo el crecimiento radicular en respuesta a la simbiosis micorrízica.
3. **Síntesis de trehalosa y tolerancia a sequía:** (Zheng et al., 2024b) demostraron que los AMF regulan la síntesis de trehalosa y la hidrólisis de sacarosa para mejorar la tolerancia a la sequía en *P. trifoliata*. Se observó una mayor acumulación de monosacáridos y disacáridos esenciales y una modulación de los genes PtAI, PtNI, PtSPS y PtTPS1, los cuales favorecen la estabilidad metabólica bajo estrés hídrico.
4. **Análisis transcriptómico y metabolómico en raíces:** (Hu et al., 2024) emplearon técnicas ómicas para analizar la influencia de los AMF en la regulación del crecimiento de pelos radicales en cítricos, destacando la activación de rutas hormonales como el ácido giberélico, auxinas, etileno y citocininas. Este estudio refuerza el papel de los AMF en la modificación morfológica del sistema radicular.
5. **Expresión de genes de catalasa en respuesta a estrés ambiental:** (Z. Liu et al., 2024) investigaron los genes CitCAT1 y CitCAT2 en *Citrus sinensis* y su regulación en

respuesta a temperaturas extremas y a la inoculación con *Diversispora versiformis*. Se observó una mayor resistencia al estrés oxidativo en plantas micorrizadas, confirmando el papel de los AMF en la reducción del daño celular causado por radicales libres y peróxido de hidrógeno (H₂O₂).

El artículo más citado de Yangtze University es “*AMF-induced tolerance to drought stress in citrus: A review*” (Q.-S. Wu et al., 2013), con 281 citas. Este trabajo es una referencia clave en la investigación sobre la función de los AMF en la mejora de la tolerancia a sequía en cítricos, destacando mecanismos como: (i) Aumento en la absorción de agua y fósforo mediante el crecimiento de hifas extrarradicales. (ii) Regulación de la osmorregulación a través de la acumulación de iones esenciales (K⁺, Ca²⁺, Mg²⁺). (iii) Escudo antioxidante con activación de enzimas como superóxido dismutasa (SOD), catalasa (CAT) y peroxidasas (POD). (iv) Fortalecimiento de la estructura del suelo por la producción de glomalina, mejorando la estabilidad de agregados del suelo.

En los próximos años, se espera que la producción científica de esta institución continúe en ascenso, con énfasis en aplicaciones biotecnológicas de los AMF en citricultura sostenible, lo que contribuirá al desarrollo de nuevas estrategias para enfrentar los desafíos del cambio climático y la seguridad alimentaria.

Figura 3. Principales países según producción bibliográfica



Fuente. Elaboración propia a partir de datos de Scopus®, fecha de actualización de consulta marzo de 2025. Software de análisis Bibliometrix 4.4.2®

Finalmente, en la Figura 2 se detallan los países con mayor número de publicaciones científicas dentro de la base de datos Scopus®. La distribución de publicaciones por países muestra que China lidera ampliamente la investigación en la relación entre hongos micorrízicos arbusculares (AMF) y cítricos, con 170 publicaciones, seguido por India (51), Estados Unidos (39) y la República Checa (31). Estos cuatro países concentran la mayor parte de la producción científica en el área, lo que sugiere una fuerte inversión en la investigación sobre biofertilización y manejo sostenible de cultivos cítricos.

El liderazgo de China en la investigación sobre hongos micorrízicos arbusculares (AMF) y cítricos se debe a una fuerte inversión en agricultura sostenible y tecnologías de manejo de suelos, junto con la presencia de instituciones destacadas como Yangtze University y Huazhong Agricultural University. El uso de AMF como alternativa a los fertilizantes químicos ha sido clave para mejorar la productividad en suelos degradados, impulsando numerosas investigaciones. Los estudios recientes han abordado aspectos críticos como la tolerancia a la sequía, la absorción de nutrientes y la mitigación de la toxicidad por metales pesados, consolidando a China como un referente en biotecnología aplicada a la citricultura. En el futuro, se prevé una mayor expansión de la investigación en este campo, con colaboraciones internacionales y la integración de enfoques ómicos para profundizar en los mecanismos de interacción entre AMF y cítricos.

Las investigaciones más recientes de China han abordado diversos aspectos de la relación AMF-cítricos, destacando:

- Aumento del carbono orgánico en suelos mediante cultivos de cobertura (J. Zhang et al., 2025). Se evaluó el efecto de *Vicia villosa* en la acumulación de carbono orgánico en huertos de cítricos, y se observó un incremento del 19.23 % en el carbono orgánico del suelo, favoreciendo la retención de carbono en la rizosfera.
- Mitigación de la toxicidad por manganeso en cítricos (Xu et al., 2024a). Se demostró que *Funneliformis mosseae* mejora la absorción de manganeso y reduce su toxicidad en trifoliolate Orange, y se identificaron genes clave como *PtMTP11* y *PtMnSOD* que regulan la homeostasis del manganeso.
- Regulación del crecimiento de pelos radicales mediante HMA (Guo et al., 2024b). Se estudió el papel del gen *PtPIN6* en la regulación del transporte de auxinas y su relación con el desarrollo radicular en cítricos micorrizados.

- Síntesis de trehalosa y resistencia a sequía inducida por HMA (Zheng et al., 2024a). Se encontró que los AMF regulan la síntesis de trehalosa y la hidrólisis de sacarosa, aumentando la tolerancia a sequía en cítricos.
- Efectos de la micorrización en el crecimiento de pelos radicales (Hu et al., 2024). Se usaron técnicas transcriptómicas y metabolómicas para evaluar cómo los AMF influyen en la expresión de hormonas como auxinas, giberelinas y citocininas.

El artículo con mayor impacto en la literatura científica publicado por Chinaes: "Arbuscular mycorrhizal fungi influence growth, osmotic adjustment and photosynthesis of citrus under well-watered and water stress conditions" (Q.-S. Wu & Xia, 2006), con 435 citas. Este estudio pionero demostró que la colonización micorrízica mejora la tolerancia a sequía en cítricos mediante ajuste osmótico y eficiencia fotosintética; e identificó que los AMF aumentan la absorción de potasio (K^+), calcio (Ca^{2+}) y magnesio (Mg^{2+}) en condiciones de sequía.

Además, utilizando el software de análisis Bibliometrix®, se identificaron las principales fuentes de difusión y consulta de las investigaciones analizadas, las cuales se detallan en la Tabla 2. Estas fuentes representan canales clave para la divulgación científica, facilitando la accesibilidad del conocimiento y potenciando su impacto en la comunidad académica y en sectores aplicados.

Tabla 2. Principales fuentes de difusión y consulta

Aquí tienes la tabla con las principales fuentes de difusión y consulta, organizadas según el número de publicaciones:

Publicación	Breve descripción
Scientia Horticulturae (26 artículos)	Revista que publica investigaciones en horticultura, abarcando aspectos como fisiología de cultivos, producción sustentable y biotecnología aplicada.
Acta Horticulturae (12 artículos)	Publicación especializada en horticultura, cubriendo temas sobre propagación de cultivos, manejo agronómico y avances tecnológicos en la producción agrícola.

Publicación	Breve descripción
Archives of Agronomy and Soil Science (8 artículos)	Revista enfocada en la ciencia del suelo y la agronomía, abordando manejo de suelos, fertilización y técnicas para la mejora de cultivos.
International Journal of Agriculture and Biology (8 artículos)	Publicación interdisciplinaria sobre agricultura y biología, incluyendo estudios en fisiología vegetal, interacciones suelo-planta y biotecnología.
Notulae Botanicae Horti Agrobotanici Cluj-Napoca (8 artículos)	Revista centrada en botánica y horticultura, con investigaciones sobre taxonomía, mejoramiento genético y biotecnología vegetal.
Plant and Soil (8 artículos)	Publicación que explora la relación entre plantas y suelos, con énfasis en nutrición vegetal, microbiología del suelo y manejo sostenible.
Applied Soil Ecology (7 artículos)	Revista especializada en la función de los organismos del suelo en la fertilidad, sostenibilidad y procesos ecosistémicos, incluyendo su impacto en la productividad agrícola.
Horticulturae (7 artículos)	Publicación internacional de acceso abierto que cubre todas las áreas de la horticultura, desde climas templados hasta tropicales, fomentando investigaciones multidisciplinarias.
Mycorrhiza (7 artículos)	Revista dedicada a la investigación de las micorrizas, explorando desde el nivel molecular hasta el ecosistémico, con aplicaciones en agricultura, ecología y biotecnología.
Journal of the Japanese Society for Horticultural Science (6 artículos)	Publicación de la Sociedad Japonesa de Ciencias Hortícolas, difundiendo investigaciones en genética, producción y fisiología de cultivos a nivel global.

Fuente. Elaboración propia a partir de datos de Scopus®, fecha de actualización de consulta marzo 2025. Software de análisis Bibliometrix 4.4.2®

Este listado refleja las fuentes más relevantes en la investigación sobre hongos micorrízicos arbusculares y cítricos, destacando la importancia de estudios en horticultura, manejo del suelo y biotecnología aplicada.

En la Tabla 3 se identifican las publicaciones más citadas y el número de citas de cada una, posteriormente, en la Tabla 4 se identifican las referencias más citadas dentro del corpus de la producción científica recuperada con la ecuación de búsqueda definida en el alcance de este escaneo científico.

Tabla 3. Publicaciones más citadas a nivel global

Publicación	Descripción	Citas
Arbuscular mycorrhizal fungi influence growth, osmotic adjustment and photosynthesis of citrus under well-watered and water stress conditions (Q.-S. Wu & Xia, 2006)	El estudio analiza cómo <i>Glomus versiforme</i> afecta el crecimiento, ajuste osmótico y fotosíntesis en <i>Citrus tangerine</i> bajo condiciones de riego y estrés hídrico. Se encontró que la colonización micorrízica mejora la biomasa vegetal, la retención de agua y el contenido de carbohidratos no estructurales, así como la absorción de K ⁺ , Ca ²⁺ y Mg ²⁺ , lo que contribuye a una mayor tolerancia a la sequía.	436
Boron removal from saline water: A comprehensive review (Hilal et al., 2011)	El artículo revisa la problemática del boro en el agua salina y su impacto en la agricultura, destacando la necesidad de eliminarlo en procesos de desalinización por ósmosis inversa (RO) para evitar toxicidad en cultivos. Se analiza la tecnología emergente de Filtración por Membrana con Adsorción (AMF, por sus siglas en inglés), la cual ha demostrado ser una alternativa eficiente y de bajo costo para la eliminación de boro en comparación con métodos tradicionales como la RO de múltiples etapas y el intercambio iónico con resinas selectivas de boro (BSRs). La revisión se	408

Publicación	Descripción	Citas
	enfoca en la aplicabilidad de AMF en regiones como Medio Oriente y el Norte de África (MENA), resaltando su potencial para mejorar la calidad del agua utilizada en sistemas agrícolas dependientes de la simbiosis con hongos micorrízicos arbusculares (AMF), los cuales pueden verse afectados por la presencia de boro en el suelo.	
AMF-induced tolerance to drought stress in citrus: A review (Q.-S. Wu et al., 2013)	Se examinan los mecanismos mediante los cuales los hongos micorrízicos arbusculares (AMF) mejoran la tolerancia a la sequía en cítricos. Se destacan estrategias como el aumento en la absorción de agua y nutrientes (especialmente fósforo), la configuración espacial eficiente del sistema radicular, el ajuste osmótico con carbohidratos no estructurales y la regulación del estrés oxidativo mediante enzimas antioxidantes.	281
Improved soil structure and citrus growth after inoculation with three arbuscular mycorrhizal fungi under drought stress (Q.-S. Wu et al., 2008)	Un experimento en macetas evaluó los efectos de <i>Glomus mosseae</i> , <i>G. versiforme</i> y <i>G. diaphanum</i> en plántulas de <i>Poncirus trifoliata</i> bajo condiciones de riego y sequía. Se observó que la inoculación con AMF incrementó la biomasa vegetal, mejoró la estabilidad de agregados del suelo y promovió la retención de humedad mediante el incremento de la proteína del suelo reactiva a Bradford.	247
Contributions of arbuscular mycorrhizal fungi to growth, photosynthesis, root morphology and ionic balance of citrus seedlings under salt stress (Q.-S. Wu et al., 2010)	Se investigó el impacto de <i>Glomus mosseae</i> y <i>Paraglomus occultum</i> en plántulas de <i>Citrus tangerine</i> expuestas a 100 mM de NaCl. Se encontró que la colonización con AMF redujo la acumulación de Na ⁺ en hojas y mejoró las concentraciones de K ⁺ y Mg ²⁺ , además de favorecer el crecimiento radicular y la tasa	224

Publicación	Descripción	Citas
	fotosintética, sugiriendo una mejora en la tolerancia a la salinidad.	
Reactive oxygen metabolism in mycorrhizal and non-mycorrhizal citrus (<i>Poncirus trifoliata</i>) seedlings subjected to water stress (Q.-S. Wu et al., 2006)	Se analizó el papel de <i>Glomus versiforme</i> en la reducción del daño oxidativo en <i>Poncirus trifoliata</i> bajo estrés hídrico. Las plántulas micorrizadas mostraron menor acumulación de malondialdehído, peróxido de hidrógeno y radicales superóxidos, junto con una mayor actividad enzimática antioxidante, lo que contribuyó a una mayor tolerancia al estrés hídrico.	185
Alleviation of salt stress in citrus seedlings inoculated with mycorrhiza: changes in leaf antioxidant defense systems (Q. S. Wu et al., 2010)	Se estudió el efecto de <i>Glomus mosseae</i> y <i>G. versiforme</i> en plántulas de <i>Poncirus trifoliata</i> bajo condiciones de salinidad. La inoculación con <i>G. mosseae</i> mejoró el crecimiento y redujo los niveles de peróxido de hidrógeno y malondialdehído en hojas. También se observó un aumento en la actividad de catalasa y los niveles de antioxidantes no enzimáticos, mejorando la resistencia al estrés salino.	139
Arbuscular mycorrhiza mediates glomalin-related soil protein production and soil enzyme activities in the rhizosphere of trifoliolate orange grown under different P levels (Q.-S. Wu et al., 2015)	Se evaluó el impacto de <i>Funneliformis mosseae</i> en la producción de proteína relacionada con la glomalina (GRSP) y la actividad enzimática del suelo en presencia de distintos niveles de fósforo. Se encontró que la inoculación micorrízica aumentó la producción de GRSP y mejoró la actividad de β -glucosidasa, catalasa y peroxidasa, lo que favorece la fertilidad del suelo independientemente de la disponibilidad de fósforo.	132
Arbuscular mycorrhizas modulate root polyamine	Se analizó cómo <i>Funneliformis mosseae</i> regula el metabolismo de poliaminas en <i>Poncirus trifoliata</i>	131

Publicación	Descripción	Citas
metabolism to enhance drought tolerance of trifoliolate orange (F. Zhang et al., 2020b)	bajo estrés hídrico. Se observó un aumento en los niveles de putrescina y cadaverina, junto con una reducción de espermidina y espermina, además de la regulación de genes antioxidantes, lo que redujo la acumulación de especies reactivas de oxígeno y mejoró la tolerancia a la sequía.	
The obligate endobacteria of arbuscular mycorrhizal fungi are ancient heritable components related to the Mollicutes (Naumann et al., 2010)	Se investigó la presencia de bacterias intracelulares en hongos micorrízicos arbusculares (AMF) mediante un análisis filogenético de ADN ribosomal 16S. Se encontró que estas bacterias pertenecen a un linaje monofilético relacionado con <i>Mollicutes</i> , lo que sugiere que su asociación con AMF se remonta a más de 400 millones de años, antes de la diversificación de las principales líneas evolutivas de AMF.	124

Fuente. Elaboración propia a partir de datos de Scopus®, fecha de actualización de consulta marzo 2025. Software de análisis Bibliometrix 4.4.2®

Las publicaciones más citadas a nivel global, según la Tabla 3, reflejan una fuerte influencia de estudios sobre la simbiosis micorrízica arbuscular (AMF) en el crecimiento y tolerancia al estrés abiótico en cítricos. Los artículos más relevantes abordan el impacto de AMF en la fotosíntesis, ajuste osmótico y absorción de nutrientes en condiciones de sequía y estrés salino, destacando su papel en la mejora de la estructura del suelo y la producción de glomalina. Asimismo, se identifican estudios clave sobre el metabolismo del oxígeno reactivo en plántulas micorrizadas y el efecto de AMF en el balance iónico bajo estrés salino. Otros artículos exploran la modulación del metabolismo de poliaminas y la relación entre AMF y endobacterias obligadas, lo que amplía el conocimiento sobre la evolución y funcionalidad de esta simbiosis en plantas. La alta tasa de citación de estos estudios resalta la importancia de AMF en la agricultura sostenible y en la mitigación del impacto del cambio climático en cultivos sensibles como los cítricos.

Tabla 4. Referencias más citadas dentro del corpus recuperado

Referencia	Número de citas	Descripción
<p>Facelli, E., Smith, S.E. & Smith, F.A. Mycorrhizal symbiosis — overview and new insights into roles of arbuscular mycorrhizas in agro- and natural ecosystems. <i>Australasian Plant Pathology</i> 38, 338–344 (2009). https://doi.org/10.1071/AP09033 (Facelli et al., 2009)</p>	<p>36</p>	<p>Estudio sobre la simbiosis micorrízica arbuscular en ecosistemas agrícolas y naturales. Se analizan los beneficios ocultos de estas asociaciones en la nutrición vegetal y su impacto en la competencia entre plantas micorrizadas y no micorrizadas. También se explora su papel en la interacción planta-patógeno.</p>
<p>Phillips, J. M., & Hayman, D. S. (1970). Improved procedures for clearing roots and staining parasitic and vesicular-arbuscular mycorrhizal fungi for rapid assessment of infection. <i>Transactions of the British mycological Society</i>, 55(1), 158-181.</p>	<p>22</p>	<p>Desarrollo de un método mejorado para la tinción de raíces infectadas con hongos micorrízicos arbusculares (AMF), permitiendo una evaluación más precisa de la infección en diferentes especies vegetales. Se describen técnicas para eliminar pigmentos radiculares y mejorar la visibilidad de estructuras fúngicas.</p>
<p>Wu, QS., Li, Y., Zou, YN. et al. Arbuscular mycorrhiza mediates glomalin-related soil protein production and soil enzyme activities in the rhizosphere of trifoliolate orange grown under different P levels. <i>Mycorrhiza</i> 25, 121–130 (2015).</p>	<p>20</p>	<p>Evaluación de la influencia de los AMF en la producción de proteínas relacionadas con la glomalina (GRSP) y la actividad enzimática del suelo en el rizosfera de naranjo trifoliado. Se encontró que la colonización micorrízica aumenta la biomasa vegetal y mejora la actividad de diversas enzimas del</p>

Referencia	Número de citas	Descripción
<p>https://doi.org/10.1007/s00572-014-0594-3 (Q.-S. Wu et al., 2015)</p>		suelo, independientemente de los niveles de fósforo.
<p>Augé, R. Water relations, drought and vesicular-arbuscular mycorrhizal symbiosis. <i>Mycorrhiza</i> 11, 3–42 (2001). https://doi.org/10.1007/s005720100097 (Augé, 2001)</p>	15	Revisión sobre el papel de los hongos micorrízicos arbusculares en la regulación del equilibrio hídrico de las plantas hospedadoras, tanto en condiciones de riego adecuado como de sequía. Se analizan los mecanismos que influyen en la resistencia a la sequía y la respuesta del hongo a la reducción de humedad en el suelo.
<p>Camprubí, A., & Calvet, C. (1996). Isolation and screening of mycorrhizal fungi from citrus nurseries and orchards and inoculation studies.</p>	14	Investigación sobre la selección y evaluación de hongos micorrízicos arbusculares en viveros y huertos de cítricos en España. Se identificaron <i>Glomus</i> spp., <i>G. mosseae</i> y <i>G. intraradices</i> como los más comunes y efectivos en la promoción del crecimiento de portainjertos de cítricos, destacando diferencias en la dependencia micorrízica entre variedades.

Fuente. Elaboración propia a partir de datos de Scopus®, fecha de actualización de consulta marzo 2025. Software de análisis Bibliometrix 4.4.2®

Respecto a la Tabla 4, las referencias más citadas dentro del corpus recuperado de la base de datos Scopus®, destacan la importancia de la simbiosis micorrízica arbuscular (AMF) en la agricultura y la fisiología vegetal. Entre los estudios más influyentes se encuentra el

trabajo de Facelli et al., que ofrece una visión general sobre la función de AMF en los ecosistemas agrícolas y naturales, resaltando su papel en la absorción de nutrientes y la interacción planta-patógeno. Asimismo, el artículo de Phillips y Hayman ha sido fundamental en el desarrollo de métodos de tinción para la evaluación de infecciones micorrízicas, facilitando su estudio en diversas especies vegetales. Otros estudios altamente citados incluyen la investigación de Wu et al. sobre la producción de glomalina y su impacto en la actividad enzimática del suelo, así como la revisión de Augé sobre la relación entre AMF y la tolerancia a la sequía en plantas hospedadoras. Además, la investigación de Camprubí y Calvet en cítricos destaca la selección de especies micorrízicas más eficientes para mejorar el crecimiento de patrones en viveros. El impacto de estas publicaciones radica en su contribución a la comprensión del papel de AMF en la agricultura sostenible, con aplicaciones en la mejora de la tolerancia al estrés abiótico, el manejo de la fertilidad del suelo y el desarrollo de estrategias para la producción hortícola.

Referentes temáticos en investigación

La identificación de referentes en investigación a través del análisis de publicaciones científicas permite conocer investigadores, organizaciones, países líderes y las principales fuentes de consulta, información relevante para mapear una temática. Este proceso es valioso para mapear la temática y detectar referentes, potenciales aliados estratégicos para el desarrollo de proyectos de investigación, transferencias de tecnología, intercambio de conocimientos y la organización de misiones técnicas.

La Figura 4 representa una visualización de tres variables mediante un diagrama de Sankey, permitiendo observar las conexiones entre instituciones líderes en investigación (AU_UN), países con mayor producción científica (AU_CO) y tópicos de investigación más relevantes (DE). Este tipo de representación facilita la identificación de la concentración de esfuerzos científicos y la interrelación entre actores clave en el ámbito de la micorrización arbuscular en cítricos.

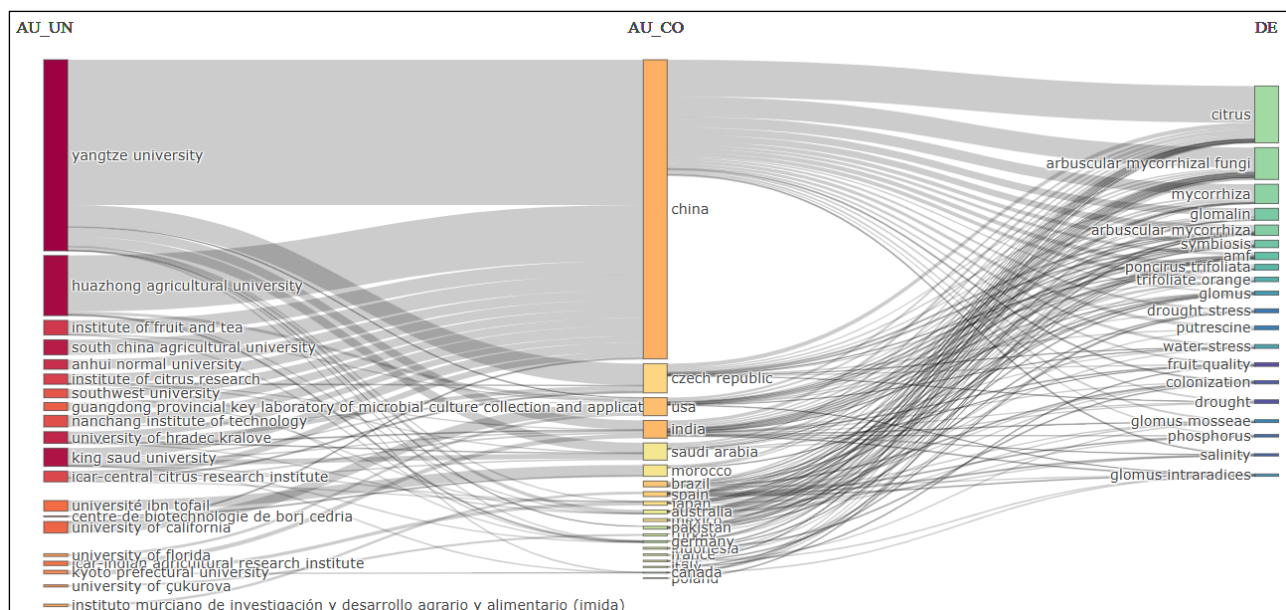
Los datos revelan que China es el principal país en producción científica en este campo, con universidades como Yangtze University y Huazhong Agricultural University destacándose como instituciones líderes. Otros países con contribuciones relevantes

incluyen Estados Unidos, República Checa, India y Arabia Saudita, aunque con menor volumen de publicaciones.

En cuanto a los tópicos de investigación predominantes, destacan términos como cítricos, hongos micorrízicos arbusculares, glomalina, simbiosis micorrízica, estrés por sequía, colonización y calidad de fruta, lo que sugiere un fuerte enfoque en la mejora del rendimiento agrícola y la resiliencia de los cultivos ante condiciones adversas mediante el uso de micorrizas.

Este análisis permite identificar actores estratégicos en la investigación de micorrizas en cítricos, lo que puede facilitar colaboraciones internacionales, el acceso a desarrollos tecnológicos y la consolidación de redes científicas especializadas en esta área.

Figura 4. Líneas temáticas en investigación



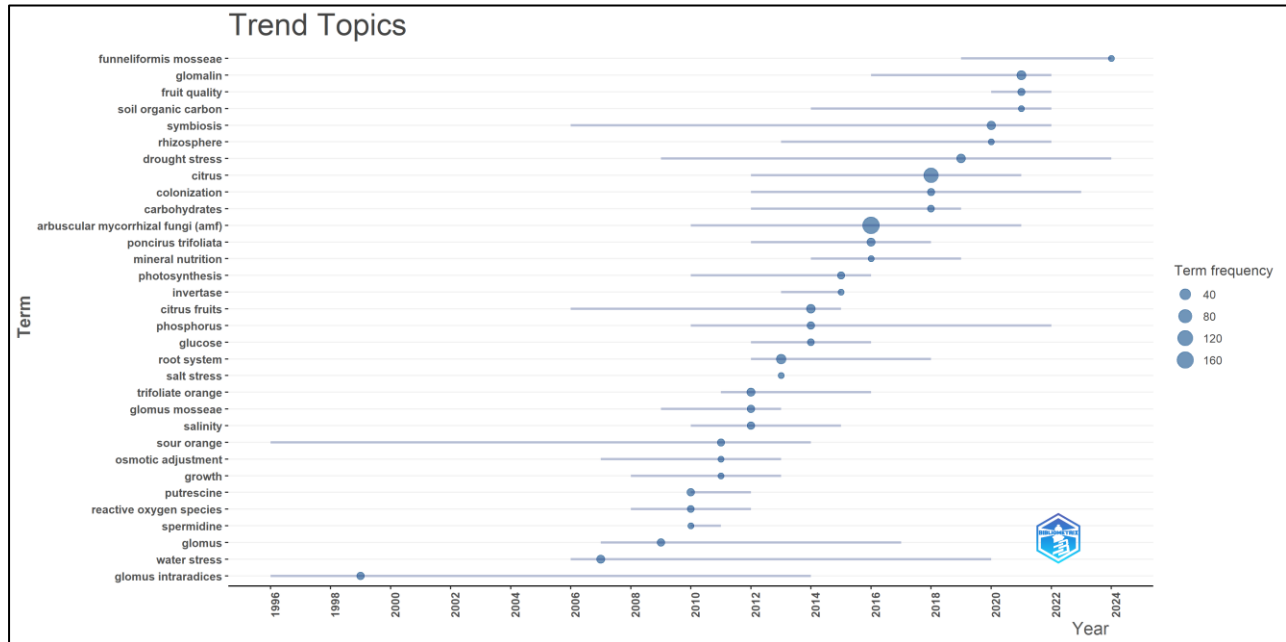
Fuente. Elaboración propia a partir de datos de Scopus®, fecha de actualización de consulta marzo de 2025. Software de análisis Bibliometrix 4.4.2®

Tendencias temáticas y evolución en tópicos de investigación

Los tópicos tendenciales son aquellos que han tenido una mayor continuidad en su ocurrencia a lo largo de la ventana de tiempo. En la Figura 5 se muestra la evolución

temporal de los términos más frecuentes en investigaciones científicas sobre la micorrización arbuscular en cítricos.

Figura 5. Tópicos tendencias



Fuente. Elaboración propia a partir de datos de Scopus®, fecha de actualización de consulta marzo de 2025. Software de análisis Bibliometrix 4.4.2®

A partir de esta figura se pueden extraer los siguientes puntos clave:

1. **Consolidación de términos históricos:** Términos como *Glomus intraradices* y *sour orange* tienen una presencia temprana en la literatura científica, con su primer cuartil antes del año 2000¹. Sin embargo, su frecuencia en los últimos años ha disminuido, lo que sugiere que su relevancia en la investigación ha sido reemplazada por otros enfoques.
2. **Expansión de términos clave en micorrizas:** *Arbuscular mycorrhizal fungi (AMF)* es el término con mayor frecuencia (169 ocurrencias), con un crecimiento sostenido desde 2010 hasta 2021. Este comportamiento refleja su importancia creciente en la literatura científica.

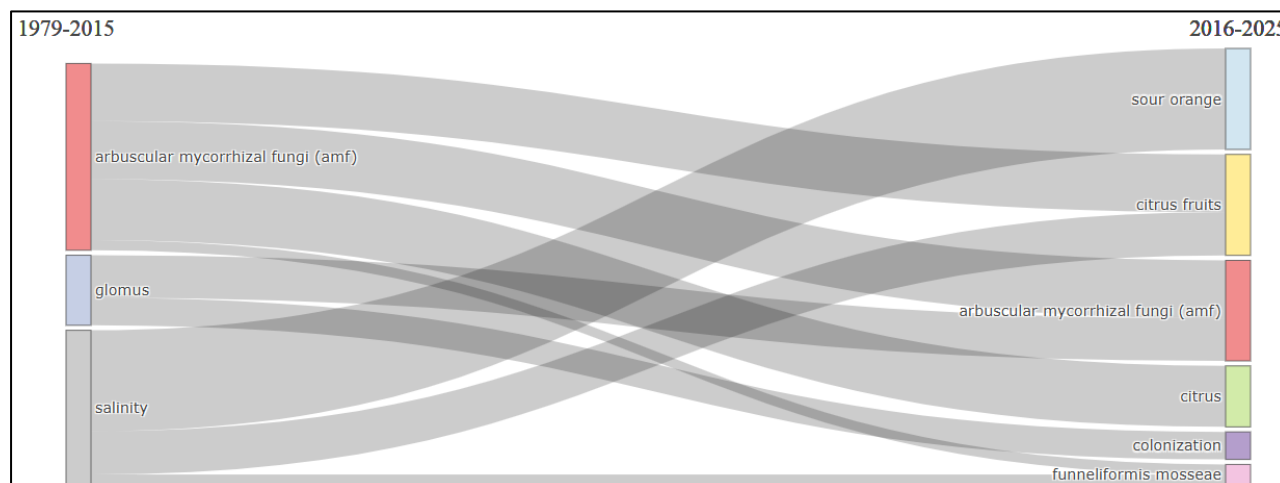
¹ Q1 representa el año en que un término aparece por primera vez en la base de datos analizada

3. **Interés creciente en la fisiología del estrés en plantas:** Términos como *drought stress*, *water stress*, *salt stress* y *osmotic adjustment* han mantenido una evolución continua, con incrementos notables en las publicaciones recientes. Esto sugiere un interés particular en la adaptación de los cítricos y su simbiosis con micorrizas en respuesta a condiciones adversas.
4. **Aparición de términos emergentes:** Conceptos como *glomalin*, *fruit quality* y *soil organic carbon* han surgido recientemente, con Q1 posterior a 2016 y un crecimiento acelerado en los últimos años. Esto podría indicar nuevas direcciones de investigación enfocadas en la calidad del suelo y la funcionalidad de las micorrizas en la mejora de la producción agrícola.
5. **Términos con mayor continuidad temporal:** *Citrus*, *colonization*, *symbiosis* y *phosphorus* han mostrado una persistencia en el tiempo, lo que sugiere que siguen siendo temas fundamentales dentro de la investigación en micorrizas y cítricos.

Estos patrones reflejan la evolución de la investigación en el área y permiten anticipar futuras tendencias en la aplicación de hongos micorrízicos en la agricultura.

La Figura 6 muestra la evolución temática en investigaciones sobre la micorrización arbuscular en cítricos.

Figura 6. Evolución temática



Fuente. Elaboración propia a partir de datos de Scopus®, fecha de actualización de consulta marzo de 2025. Software de análisis Bibliometrix 4.4.2®

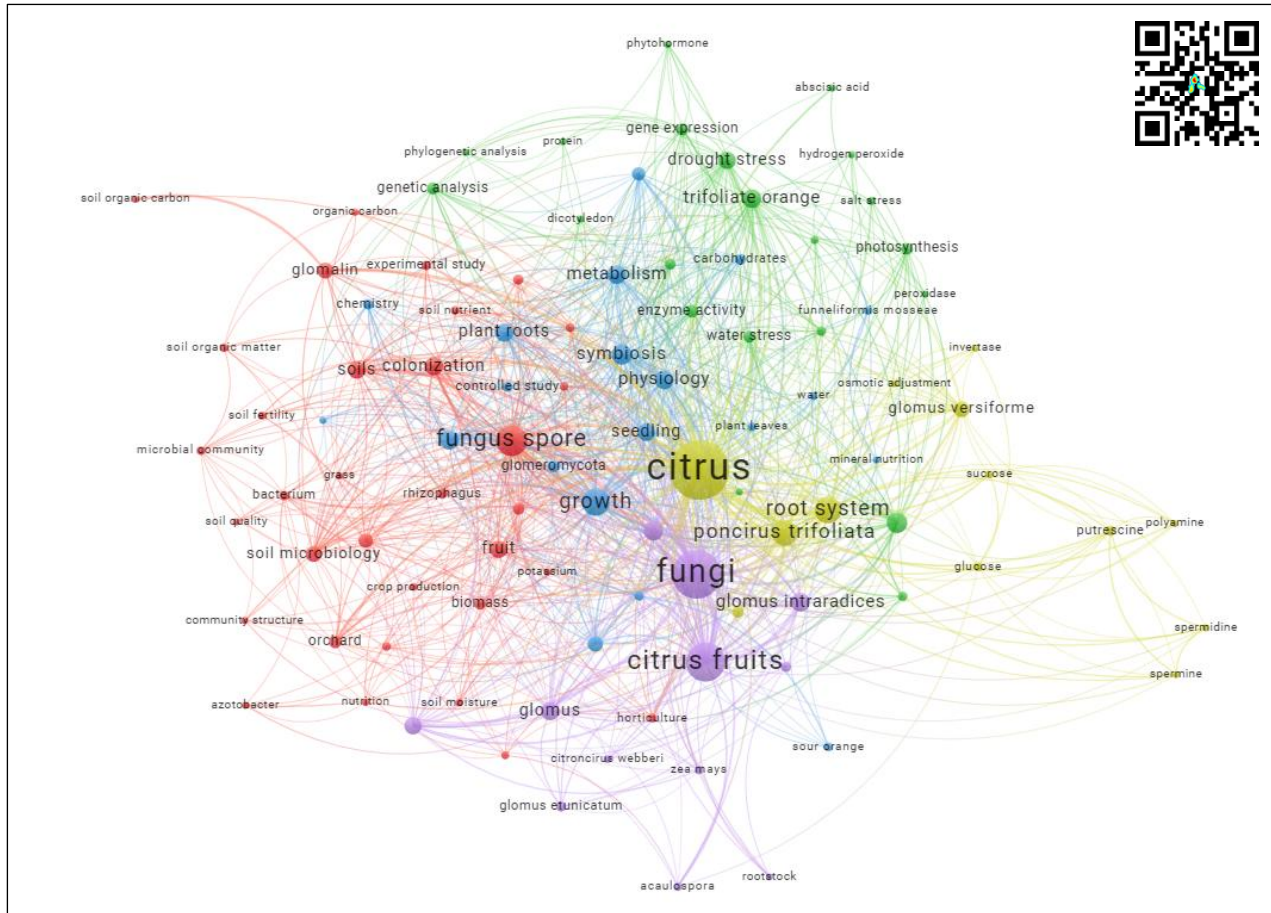
Red de coocurrencia de tópicos

El análisis de coocurrencia de palabras clave permite identificar de manera eficiente las principales áreas de investigación y desarrollo dentro de la temática estudiada. A través del uso de VOSviewer, se emplea una metodología de agrupación específica que facilita la organización de términos relacionados en clústeres bien definidos, utilizando el método de conteo fraccionado. Este enfoque, que toma como unidad de análisis las palabras clave proporcionadas por los autores y aquellas asignadas por los sistemas de indexación, genera una representación visual de las conexiones y relaciones temáticas presentes en las publicaciones. En este tipo de visualización, el tamaño de un clúster refleja la cantidad de publicaciones que pertenecen al clúster. Los grupos más grandes incluyen más publicaciones (Waltman et al., 2010). La distancia entre dos grupos indica aproximadamente la relación de los grupos en términos de citas. Los conglomerados que están ubicados cerca unos de otros tienden a estar estrechamente relacionados en términos de citas, mientras que los conglomerados que están ubicados más alejados entre sí tienden a estar menos relacionados. Las líneas entre los grupos también reflejan la relación de los grupos, con el grosor de una línea que representa el número de citas entre dos grupos. Los ejes horizontal y vertical no tienen un significado especial (van Eck & Waltman, 2017).

Para la construcción del mapa de coocurrencia mostrado en la Figura 7, se utilizó la técnica de agrupación por asociación (parámetros 3 atracción y 0 repulsión), y el análisis de coocurrencia se realizó con base en el método de conteo fraccionado usando VOSviewer®, donde la unidad de análisis es <keyword> (de autor y de indexación) de las 315 publicaciones recuperadas de Scopus® sobre la micorrización arbuscular en cítricos para la ventana de tiempo 1979-2025. A partir de este conjunto de datos, se identificaron 1655 palabras clave, que, tras un proceso de limpieza supervisada y normalización de términos (Perianes-Rodriguez et al., 2016), se redujeron a 1613 palabras clave. De estas, se procesaron aquellas con un número mínimo de ocurrencias de 5, eliminando 29 términos que no correspondían al alcance del estudio o generaban algún tipo de sesgo no deseado. Con esta depuración, se generaron 5 clústeres temáticos, basados en la relación entre 100 tópicos y 2271 interacciones entre ellos, calculados automáticamente a través de VOSviewer® con base en el umbral mínimo de 5 documentos por cada <keyword>.

En el mapa presentado en la Figura 7, cada clúster se distingue por un color único, lo que indica la existencia de subcampos temáticos interrelacionados. La visualización muestra una gran cantidad de tópicos interconectados. La interpretación de los resultados se realiza observando tanto el tamaño de los nodos, que refleja la relevancia de cada término, como las conexiones, que indica la frecuencia de coocurrencia entre palabras clave.

Figura 7. Red de coocurrencia temática de tendencias generales



Fuente. Elaboración propia a partir de datos de Scopus®. Información recuperada en marzo de 2025. Software de procesamiento VOSViewer® 1.6.20

Esta representación gráfica no solo permite visualizar las tendencias actuales de investigación, sino también identificar conexiones interdisciplinarias, facilitando la detección de nuevas oportunidades de estudio y colaboración científica en el ámbito de la sanidad animal. Además, este tipo de análisis ayuda a reconocer tanto líneas de investigación consolidadas como áreas emergentes con potencial para convertirse en futuras tendencias dentro del campo. Los clústeres identificados son los siguientes:

- **Clúster rojo – 94 ítems (Microbiología del Suelo y Simbiosis)**

Este clúster incluye términos clave como *soil microbiology*, *rhizosphere*, *microbial community*, *colonization*, *soil fertility* y *glomalin*, lo que sugiere un enfoque en la dinámica de la microbiota del suelo en interacción con los hongos micorrízicos arbusculares (AMF). También incorpora términos relacionados con la estructura y calidad del suelo, como *soil organic matter*, *soil organic carbon*, *soil moisture*, *species diversity* y *soil quality*, lo que refuerza su vinculación con la funcionalidad ecológica del suelo y la influencia de los AMF en la formación de agregados. Este grupo enfatiza el papel de los AMF en la mejora de la fertilidad y estructura del suelo, especialmente a través de la producción de glomalina y su impacto en la estabilidad de los agregados del suelo. La presencia de términos como *azotobacter*, *bacterium* y *plant growth* sugiere una relación estrecha con microorganismos beneficiosos que influyen en la microbiología del suelo y en la promoción del crecimiento vegetal.

- **Clúster verde – 21 ítems (Tolerancia al Estrés Hídrico y Salino)**

Este clúster agrupa términos como *drought stress*, *salt stress*, *water stress*, *reactive oxygen species*, *peroxidase*, *hydrogen peroxide*, *gene expression*, *phytohormone* y *glomus mosseae*, lo que indica un enfoque en la respuesta de los cítricos colonizados por micorrizas ante condiciones de sequía y salinidad. La presencia de términos como *photosynthesis* y *enzyme activity* sugiere estudios centrados en la regulación bioquímica y fisiológica de las plantas en condiciones de estrés abiótico. Este grupo de términos destaca el papel de las micorrizas en la mitigación del estrés hídrico y salino a través de mecanismos como la regulación de especies reactivas de oxígeno (ROS), la modulación de fitohormonas y la optimización del metabolismo fotosintético y enzimático.

- **Clúster azul – 20 ítems (Fisiología Vegetal y Relaciones Simbióticas)**

Este clúster agrupa términos como *physiology*, *metabolism*, *plant roots*, *symbiosis* y *mineral nutrition*, lo que indica un enfoque en la interacción entre los cítricos y las micorrizas en términos de fisiología y nutrición vegetal. También aparecen términos como *phosphorus* y *microbiology*, sugiriendo estudios sobre el papel de las micorrizas en la absorción de nutrientes y su impacto en la microbiota del suelo. Este grupo de términos destaca la

importancia de los AMF en la nutrición vegetal y la regulación fisiológica de los cítricos, con posibles aplicaciones en la mejora del crecimiento y la resistencia al estrés.

- **Clúster amarillo – 13 ítems (Metabolismo y Regulación Molecular)**

Este clúster conecta términos como putrescine, spermidine, polyamine, glucose, sucrose, osmotic adjustment, invertase, y nutrient uptake, lo que indica un enfoque en la regulación metabólica de los cítricos y su interacción con las micorrizas. La presencia de términos como *glomus versiforme*, *poncirus trifoliata* y *root system* sugiere estudios centrados en la relación entre la absorción de nutrientes y la simbiosis micorrízica en cítricos. Este grupo refleja un interés creciente en cómo las micorrizas afectan la asimilación de compuestos clave, la respuesta osmótica y el metabolismo del carbono en cítricos bajo diferentes condiciones ambientales.

- **Clúster morado – 12 ítems (Taxonomía y Biodiversidad de AMF)**

Este clúster agrupa términos como *glomus*, *glomus intraradices*, *glomus etunicatum*, *acaulospora*, *gigaspora margarita* y *citroncirus webberi*, lo que indica un enfoque en la diversidad taxonómica de los hongos micorrízicos arbusculares (AMF) y su asociación con distintas especies vegetales, en particular cítricos y cultivos como *zea mays*. Este grupo es clave para la identificación de especies con alto potencial en biofertilización y restauración de suelos, resaltando la importancia de la selección de cepas específicas para mejorar la simbiosis micorrízica y su impacto en la productividad agrícola.

Mapa temático principales tendencias de investigación

La Figura 8 presenta el mapa temático que clasifica los principales tópicos de investigación en función de dos dimensiones clave: **relevancia** (centralidad), que mide la importancia de un tema dentro del campo y su conexión con otros tópicos, y **desarrollo** (densidad), que indica el grado de avance y especialización del conocimiento generado en torno a ese tema. Estas dimensiones permiten categorizar los clústeres en cuatro grupos, según su nivel de relevancia y desarrollo (Aria et al., 2022; Giannakos et al., 2020):

Figura 8. Mapa temático principales tendencias de investigación



Fuente. Elaboración propia a partir de datos de Scopus®, fecha de actualización de consulta marzo de 2025. Software de análisis Bibliometrix 4.4.2®

Cuadrante Superior Derecho: Temas Motores (Alta Centralidad y Alta Densidad): Este cuadrante agrupa los tópicos con un alto nivel de desarrollo y relevancia en el área de investigación. Estos temas son considerados motores de la disciplina, ya que lideran tanto el avance científico como el desarrollo de nuevas tecnologías y aplicaciones. La alta densidad sugiere un conocimiento consolidado, mientras que su alta centralidad indica su fuerte conexión con múltiples áreas de estudio.

- **Drought stress, glomus, photosynthesis, reactive oxygen species, arbuscular mycorrhizas:** La micorrización arbuscular es un área central dentro del estudio de los cítricos y la tolerancia al estrés abiótico. Se destacan investigaciones sobre la resistencia a la sequía y la fotosíntesis como mecanismos clave en la adaptación de los cítricos a condiciones de estrés.

Cuadrante Inferior Derecho: Temas Base o Transversales (Alta Centralidad y Baja Densidad): Este cuadrante incluye temas de alta relevancia que aún no han alcanzado un desarrollo suficiente para ser considerados motores. Su alta centralidad refleja su conexión con diversas áreas del conocimiento, mientras que su baja densidad sugiere oportunidades para profundizar en su estudio.

- ***Arbuscular mycorrhizal fungi (AMF), citrus, glomalin, trifoliolate orange, glomus mosseae.*** Representan la base del conocimiento sobre la simbiosis micorrízica en cítricos, incluyendo especies específicas como *Glomus mosseae* y la acumulación de glomalina en el suelo. Son temas ampliamente estudiados, pero con espacio para nuevas aplicaciones y especialización.

Cuadrante Superior Izquierdo: Temas de Nicho o Altamente Especializados (Alta Densidad y Baja Centralidad): Este cuadrante incluye temas con un alto grado de especialización, aunque su relevancia general dentro del campo es limitada. Se enfocan en problemas específicos que requieren conocimientos profundos y pueden tener aplicaciones en áreas más especializadas.

- ***Colonization, acaulospora, endomycorrhizae, plant nutrition, rootstock:*** Se enfocan en la colonización de raíces por AMF y su impacto en la nutrición vegetal, siendo temas especializados con una audiencia científica más reducida. Su desarrollo sugiere un fuerte interés en la optimización del uso de portainjertos y prácticas agronómicas avanzadas.

Cuadrante Inferior Izquierdo: Temas Emergentes o en Declive (Baja Centralidad y Baja Densidad): En este cuadrante se agrupan temas cuya importancia y desarrollo aún son bajos, lo que puede deberse a que se trata de tópicos relativamente nuevos o de áreas que han perdido relevancia en la comunidad científica. Algunos de estos temas están comenzando a desarrollarse en respuesta a nuevas demandas globales, mientras que otros reflejan una disminución en el interés de investigación, posiblemente al ser integrados en enfoques más avanzados o específicos:

- ***Sour orange, sweet orange, indigenous mycorrhiza, phosphorus nutrition, soil sterilization:*** Representan estudios sobre variedades específicas de cítricos y su relación con micorrizas autóctonas, pero no están todavía bien integrados con otros campos de investigación. Es posible que sean nichos de estudio en crecimiento o en riesgo de estancamiento.

Bibliografía

- Aria, M., & Cuccurullo, C. (2017). bibliometrix: An R-tool for comprehensive science mapping analysis. *Journal of Informetrics*. <https://doi.org/10.1016/j.joi.2017.08.007>
- Aria, M., Cuccurullo, C., D'aniello, L., Misuraca, M., & Spano, M. (2022). Thematic Analysis as a New Culturomic Tool: The Social Media Coverage on COVID-19 Pandemic in Italy. *Sustainability (Switzerland)*, *14*(6). <https://doi.org/10.3390/su14063643>
- Augé, R. M. (2001). Water relations, drought and vesicular-arbuscular mycorrhizal symbiosis. *Mycorrhiza*, *11*(1), 3–42. <https://doi.org/10.1007/s005720100097>
- Cheng, H.-Q., Giri, B., Wu, Q.-S., Zou, Y.-N., & Kuča, K. (2022). Arbuscular mycorrhizal fungi mitigate drought stress in citrus by modulating root microenvironment. *Archives of Agronomy and Soil Science*, *68*(9), 1217–1228. <https://doi.org/10.1080/03650340.2021.1878497>
- Cheng, H.-Q., Zou, Y.-N., Wu, Q.-S., & Kuča, K. (2021). Arbuscular Mycorrhizal Fungi Alleviate Drought Stress in Trifoliolate Orange by Regulating H⁺-ATPase Activity and Gene Expression. *Frontiers in Plant Science*, *12*. <https://doi.org/10.3389/fpls.2021.659694>
- Facelli, E., Smith, S. E., & Smith, F. A. (2009). Mycorrhizal symbiosis – overview and new insights into roles of arbuscular mycorrhizas in agro- and natural ecosystems. *Australasian Plant Pathology*, *38*(4), 338. <https://doi.org/10.1071/AP09033>
- Flórez-Martínez, D. H., Contreras-Pedraza, C. A., Escobar-Parra, S., & Rodríguez-Cortina, J. (2023). Key Drivers for Non-Centrifugal Sugar Cane Research, Technological Development, and Market Linkage: A Technological Roadmap Approach for Colombia. *Sugar Tech*, *25*(2), 373–385. <https://doi.org/10.1007/s12355-022-01200-9>
- Giannakos, M., Papamitsiou, Z., Markopoulos, P., Read, J., & Hourcade, J. P. (2020). Mapping child–computer interaction research through co-word analysis. *International Journal of Child-Computer Interaction*, *23–24*. <https://doi.org/10.1016/j.ijcci.2020.100165>
- Guo, X.-N., Lu, W., Liu, C.-Y., & Wu, Q.-S. (2024a). Regulation of arbuscular mycorrhizal fungi in citrus root hairs mediated by auxin efflux carrier protein PtPINs. *Scientia Horticulturae*, *337*, 113574. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2024.113574>

- Guo, X.-N., Lu, W., Liu, C.-Y., & Wu, Q.-S. (2024b). Regulation of arbuscular mycorrhizal fungi in citrus root hairs mediated by auxin efflux carrier protein PtPINs. *Scientia Horticulturae*, 337, 113574. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2024.113574>
- He, J.-D., Zou, Y.-N., Wu, Q.-S., & Kuča, K. (2020). Mycorrhizas enhance drought tolerance of trifoliolate orange by enhancing activities and gene expression of antioxidant enzymes. *Scientia Horticulturae*, 262, 108745. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2019.108745>
- Hilal, N., Kim, G. J., & Somerfield, C. (2011). Boron removal from saline water: A comprehensive review. *Desalination*, 273(1), 23–35. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2010.05.012>
- Hu, C., Li, H., Tong, C., Zhang, D., & Lu, Y. (2024). Integrated transcriptomic and metabolomic analyses reveal the effect of mycorrhizal colonization on trifoliolate orange root hair. *Scientia Horticulturae*, 336, 113429. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2024.113429>
- Hussain, S., Jan, M., Khalid, M. F., Haider, S. T.-A., Ali, M. A., Ahmad, S., Sabir, S., Sétamou, M., & Morillon, R. (2025). Rooting for Resilience: Arbuscular Mycorrhizal Fungi (AMF) Boost Citrus Tolerance to Water Scarcity in Rangpur Lime and Carrizo Citrange Rootstocks. *Horticulturae*, 11(1), 24. <https://doi.org/10.3390/horticulturae11010024>
- Liu, C.-Y., Guo, X.-N., Dai, F.-J., & Wu, Q.-S. (2024). Mycorrhizal Symbiosis Enhances P Uptake and Indole-3-Acetic Acid Accumulation to Improve Root Morphology in Different Citrus Genotypes. *Horticulturae*, 10(4), 339. <https://doi.org/10.3390/horticulturae10040339>
- Liu, Z., Cao, M.-A., Kuča, K., Alqahtani, M. D., Muthuramalingam, P., & Wu, Q.-S. (2024). Cloning of CAT genes in Satsuma mandarin and their expression characteristics in response to environmental stress and arbuscular mycorrhizal fungi. *Plant Cell Reports*, 43(5), 123. <https://doi.org/10.1007/s00299-024-03218-7>
- Naumann, M., Schüßler, A., & Bonfante, P. (2010). The obligate endobacteria of arbuscular mycorrhizal fungi are ancient heritable components related to the Mollicutes. *The ISME Journal*, 4(7), 862–871. <https://doi.org/10.1038/ismej.2010.21>
- van Eck, N. J., & Waltman, L. (2010). Software survey: VOSviewer, a computer program for bibliometric mapping. *Scientometrics*. <https://doi.org/10.1007/s11192-009-0146-3>

- van Eck, N. J., & Waltman, L. (2017). Citation-based clustering of publications using CitNetExplorer and VOSviewer. *Scientometrics*, 111(2), 1053–1070. <https://doi.org/10.1007/S11192-017-2300-7>
- Waltman, L., van Eck, N. J., & Noyons, E. C. M. (2010). A unified approach to mapping and clustering of bibliometric networks. *Journal of Informetrics*, 4(4), 629–635. <https://doi.org/10.1016/J.JOI.2010.07.002>
- Wu, Q. S., Zou, Y. N., Liu, W., Ye, X. F., Zai, H. F., & Zhao, L. J. (2010). Alleviation of salt stress in citrus seedlings inoculated with mycorrhiza: changes in leaf antioxidant defense systems. *Plant, Soil and Environment*, 56(10), 470–475. <https://doi.org/10.17221/54/2010-PSE>
- Wu, Q.-S., He, J.-D., Srivastava, A. K., Zou, Y.-N., & Kuča, K. (2019). Mycorrhizas enhance drought tolerance of citrus by altering root fatty acid compositions and their saturation levels. *Tree Physiology*, 39(7), 1149–1158. <https://doi.org/10.1093/treephys/tpz039>
- Wu, Q.-S., Li, Y., Zou, Y.-N., & He, X.-H. (2015). Arbuscular mycorrhiza mediates glomalin-related soil protein production and soil enzyme activities in the rhizosphere of trifoliolate orange grown under different P levels. *Mycorrhiza*, 25(2), 121–130. <https://doi.org/10.1007/s00572-014-0594-3>
- Wu, Q.-S., Srivastava, A. K., & Zou, Y.-N. (2013). AMF-induced tolerance to drought stress in citrus: A review. *Scientia Horticulturae*, 164, 77–87. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2013.09.010>
- Wu, Q.-S., & Xia, R.-X. (2006). Arbuscular mycorrhizal fungi influence growth, osmotic adjustment and photosynthesis of citrus under well-watered and water stress conditions. *Journal of Plant Physiology*, 163(4), 417–425. <https://doi.org/10.1016/j.jplph.2005.04.024>
- Wu, Q.-S., Xia, R.-X., & Zou, Y.-N. (2006). Reactive oxygen metabolism in mycorrhizal and non-mycorrhizal citrus (*Poncirus trifoliata*) seedlings subjected to water stress. *Journal of Plant Physiology*, 163(11), 1101–1110. <https://doi.org/10.1016/j.jplph.2005.09.001>
- Wu, Q.-S., Xia, R.-X., & Zou, Y.-N. (2008). Improved soil structure and citrus growth after inoculation with three arbuscular mycorrhizal fungi under drought stress. *European Journal of Soil Biology*, 44(1), 122–128. <https://doi.org/10.1016/j.ejsobi.2007.10.001>
- Wu, Q.-S., Zou, Y.-N., & He, X.-H. (2010). Contributions of arbuscular mycorrhizal fungi to growth, photosynthesis, root morphology and ionic balance of citrus seedlings under

- salt stress. *Acta Physiologiae Plantarum*, 32(2), 297–304.
<https://doi.org/10.1007/s11738-009-0407-z>
- Xu, F.-Q., Meng, L.-L., Lei, A.-Q., Hashem, A., Abd_Allah, E. F., & Wu, Q.-S. (2024a). Arbuscular mycorrhizal fungi mitigate manganese toxicity on trifoliolate orange. *Scientia Horticulturae*, 338, 113722. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2024.113722>
- Xu, F.-Q., Meng, L.-L., Lei, A.-Q., Hashem, A., Abd_Allah, E. F., & Wu, Q.-S. (2024b). Arbuscular mycorrhizal fungi mitigate manganese toxicity on trifoliolate orange. *Scientia Horticulturae*, 338, 113722. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2024.113722>
- Yang, L., Zou, Y.-N., Tian, Z.-H., Wu, Q.-S., & Kuča, K. (2021). Effects of beneficial endophytic fungal inoculants on plant growth and nutrient absorption of trifoliolate orange seedlings. *Scientia Horticulturae*, 277, 109815. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2020.109815>
- Zhang, F., Zou, Y.-N., Wu, Q.-S., & Kuča, K. (2020a). Arbuscular mycorrhizas modulate root polyamine metabolism to enhance drought tolerance of trifoliolate orange. *Environmental and Experimental Botany*, 171, 103926. <https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2019.103926>
- Zhang, F., Zou, Y.-N., Wu, Q.-S., & Kuča, K. (2020b). Arbuscular mycorrhizas modulate root polyamine metabolism to enhance drought tolerance of trifoliolate orange. *Environmental and Experimental Botany*, 171, 103926. <https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2019.103926>
- Zhang, J., Lei, L., Xiao, W., Yang, X., Horwath, W. R., Liao, Y., Yang, H., Jian, Z., & Zeng, L. (2025). Vetch cover crops increase particulate organic carbon in citrus orchard by increasing lignin phenols. *Applied Soil Ecology*, 207, 105921. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2025.105921>
- Zheng, F.-L., Wang, Y.-J., Hashem, A., Abd_Allah, E. F., & Wu, Q.-S. (2024a). Mycorrhizae with *Funneliformis mosseae* regulate the trehalose synthesis and sucrose cleavage for enhancing drought tolerance in trifoliolate orange. *Scientia Horticulturae*, 337, 113486. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2024.113486>
- Zheng, F.-L., Wang, Y.-J., Hashem, A., Abd_Allah, E. F., & Wu, Q.-S. (2024b). Mycorrhizae with *Funneliformis mosseae* regulate the trehalose synthesis and sucrose cleavage for enhancing drought tolerance in trifoliolate orange. *Scientia Horticulturae*, 337, 113486. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2024.113486>

Zoubi, B., Mokrini, F., Houssayni, S., Benkebboura, A., Akachoud, O., Ghoulam, C., Housseini, A. I., & Qaddoury, A. (2025). Effectiveness of the arbuscular mycorrhizal fungi *Funneliformis mossae* and *Rhizophagus irregularis* as biological control agent of the citrus nematode *Tylenchulus semipenetrans*. *Journal of Natural Pesticide Research*, 11, 100104. <https://doi.org/10.1016/j.napere.2024.100104>



AGROSAVIA

Corporación colombiana de investigación agropecuaria