



Hongos micorrícicos arbusculares para el mejoramiento de pastos *Brachiaria decumbens* y *Brachiaria brizantha*: alternativa sostenible en la ganadería del trópico bajo colombiano

Luisa Fernanda Mazo Lopera

Monografía presentada para optar al título de Ingeniera Agropecuaria

Asesoras

María Isabel Arroyo Arroyo, Magíster (MSc) en Ciencias Básicas Biomédicas

Mayra Patricia Mercado Pérez, Ingeniera Agrónoma

Universidad de Antioquia
Facultad de Ciencias Agrarias

Ingeniería Agropecuaria
Caucasia, Antioquia, Colombia

2023

Cita	(Mazo Lopera, 2023)
Referencia	Mazo Lopera, L. F. (2023). Hongos micorrícicos arbusculares para el mejoramiento de pastos <i>Brachiaria decumbens</i> y <i>Brachiaria brizantha</i> : alternativa sostenible en la ganadería del trópico bajo colombiano [Trabajo de grado profesional]. Universidad de Antioquia, Cauca, Colombia.
Estilo APA 7 (2020)	



Biblioteca Seccional Bajo Cauca (Caucasia)

Repositorio Institucional: <http://bibliotecadigital.udea.edu.co>

Universidad de Antioquia - www.udea.edu.co

Rector: John Jairo Arboleda Céspedes.

Decano/Director: Liliana Mahecha Ledesma.

Jefe departamento: Wilson Ernesto Castrillón Hoyos.

El contenido de esta obra corresponde al derecho de expresión de los autores y no compromete el pensamiento institucional de la Universidad de Antioquia ni desata su responsabilidad frente a terceros. Los autores asumen la responsabilidad por los derechos de autor y conexos.

Tabla de contenido

Resumen.....	6
Abstract.....	7
Introducción	8
Planteamiento del problema.....	9
Pregunta de investigación	13
Justificación	13
Objetivos	15
Objetivo general	15
Objetivos específicos.....	16
Metodología	16
Sistemas pecuarios en el desarrollo agrícola sostenible y la seguridad alimentaria: El caso de la producción bovina en Colombia	17
Especies de pasturas asociadas al trópico bajo colombiano.....	19
Características estructurales de los hongos micorrícicos arbusculares (HMA)	23
Interacción micorriza arbuscular – Plantas	26
Beneficios de las micorrizas arbusculares (MA).....	28
Interacción de los HMA como fertilizante en los pastos <i>Brachiaria decumbens</i> y <i>Brachiaria brizantha</i>	31
Resultados y discusión	35
Conclusión	50
Referencia	52

Lista de tablas

Tabla 1. Características del pasto <i>Brachiaria decumbens</i>	21
Tabla 2. Características del pasto <i>Brachiaria brizantha</i>	22
Tabla 3. Incremento en el rendimiento por la aplicación de EcoMic®.	32
Tabla 4. Características reportadas de la asociación de HMA y algunas especies de pastos del trópico alto y bajo.	49

Tabla de ilustraciones

Ilustración 1. Micelio de Micorrizas Arbusculares (Primario).....	25
Ilustración 2. Estructura intracelular (diferentes tipos de vesículas, micelio y arbusculos)	26
Ilustración 3. Dinámica de colonización de hongos con capacidad micorrícica.	30
Ilustración 4. Dinámica de colonización de hongos con capacidad micorrícica.	30

Resumen

La ganadería en el trópico bajo colombiano se enfrenta a desafíos como la baja calidad de los pastos y la disponibilidad limitada de nutrientes en el suelo. Las micorrizas arbusculares en adelante MA, se presentan como una alternativa prometedora para mejorar el crecimiento y la productividad de los pastos de manera sostenible. Esta investigación de literatura analiza estudios relevantes sobre el uso de las micorrizas arbusculares donde los resultados indican que las micorrizas arbusculares tienen un efecto significativo en la absorción de nutrientes por parte de los pastos, especialmente en suelos con poca fertilidad. Estas simbiosis mejoran la captación de nutrientes, como fósforo y nitrógeno, a través de las hifas fúngicas. Además, se observa un incremento en el crecimiento y la producción de forraje en comparación con los pastos no colonizados por micorrizas; al igual que en presencia de MA también mejora la salud del suelo al aumentar la disponibilidad de nutrientes para otras plantas y fortalecer la resistencia a enfermedades y estrés abiótico en sistemas de pastoreo. En síntesis, los hongos micorrícicos arbusculares, en adelante HMA, representan una alternativa sostenible y eficiente para mejorar los pastos en la ganadería del trópico bajo colombiano. La implementación de prácticas agrícolas que fomenten la colonización de las raíces por MA puede contribuir a una ganadería más productiva y sostenible en la región. Sin embargo, se requiere más investigación para optimizar las prácticas de manejo y evaluar los efectos a largo plazo de los HMA en la producción ganadera y en los ecosistemas locales.

Abstract

Livestock farming in the Colombian low tropics faces challenges such as low-quality pastures and limited availability of nutrients in the soil. Arbuscular mycorrhizas (AM) emerge as a promising alternative to improve the growth and productivity of pastures in a sustainable manner. This literature review analyzes relevant studies on the use of arbuscular mycorrhizas, and the results indicate that AM have a significant effect on nutrient uptake by pastures, especially in soils with low fertility. These symbiotic relationships enhance the absorption of nutrients, such as phosphorus and nitrogen, through fungal hyphae. Additionally, an increase in growth and forage production is observed compared to pastures not colonized by mycorrhizas. The presence of AM also improves soil health by increasing nutrient availability for other plants and strengthening resistance to diseases and abiotic stress in grazing systems. In summary, arbuscular mycorrhizal fungi (AMF) represent a sustainable and efficient alternative for improving pastures in Colombian low tropics livestock farming. The implementation of agricultural practices that promote root colonization by AM can contribute to a more productive and sustainable livestock industry in the region. However, further research is required to optimize management practices and assess the long-term effects of AMF on livestock production and local ecosystems.

Introducción

Los hongos micorrícicos arbusculares (HMA) se presentan como una alternativa sostenible y prometedora para mejorar la calidad y productividad de los pastos *Brachiaria decumbens* y *Brachiaria brizantha* en la ganadería del trópico bajo colombiano. Estos hongos establecen una simbiosis mutualista con las raíces de las plantas, formando estructuras llamadas micorrizas arbusculares. A través de esta asociación, los HMA facilitan la absorción de nutrientes esenciales, como fósforo y nitrógeno, que son vitales para el crecimiento y desarrollo saludable de los pastos.

Los suelos del trópico bajo colombiano presentan desafíos significativos, como la baja calidad de los pastos y la disponibilidad limitada de nutrientes en el suelo. Sin embargo, las investigaciones han demostrado que la introducción de HMA en estos sistemas puede mejorar la absorción de nutrientes por parte de los pastos, especialmente en suelos con baja fertilidad. Las hifas fúngicas de los HMA se extienden en el suelo, ampliando el área de exploración de las raíces y permitiendo una mayor captación de nutrientes. Este aumento en la disponibilidad de nutrientes no solo beneficia el crecimiento y la productividad de los pastos, sino que también mejora las condiciones biológicas del suelo en general.

En síntesis, los HMA ofrecen una solución sostenible y eficiente para abordar los desafíos de la ganadería en el trópico bajo colombiano. Su capacidad para mejorar la absorción de nutrientes, fortalecer la resistencia a enfermedades y estrés abiótico, y mejorar la salud del suelo los convierte en una herramienta valiosa para promover el crecimiento y la productividad de los pastos *Brachiaria decumbens* y *Brachiaria brizantha*. Sin embargo, se requiere más investigación y la implementación de prácticas agrícolas adecuadas para optimizar el uso de los HMA y evaluar sus efectos a largo plazo en la ganadería y los ecosistemas locales.

Planteamiento del problema

La agricultura y las explotaciones ganaderas son los pilares principales de la alimentación a nivel mundial. En un informe de la FAO (2020), a nivel mundial la superficie de la tierra destinada a la agricultura es de aproximadamente 5.000 megahectáreas (Mha), es decir, el 38% donde un tercio se utiliza como tierra de cultivo, mientras que los dos tercios restantes son praderas y pastizales para el pastoreo.

Para el año 2020 la FAO expresa que las tierras dedicadas a praderas y pastizales permanentes a nivel mundial estuvo por encima de los 3 mil millones de hectáreas, donde Asia aportaba el 33.9% del total y de segundo lugar el continente americano con el 23,7%, los países con mayores áreas cultivadas en praderas o pastizales permanentes son en su orden: china (392 millones de hectáreas), Australia (324 millones de hectáreas), Estados Unidos de América (245 millones de hectáreas), Kazajistan (184 millones de hectáreas) y Brasil (173 millones de hectáreas) (FAO, 2020).

Para garantizar una producción ganadera se debe garantizar forrajes y pastos de consumo animal de excelente calidad. No obstante, hay un llamado mundial de diferentes organizaciones internacionales para que pare la devastación agroecológica y climática que se vive en la actualidad en diferentes partes del mundo (FAO, 2023) y (ONU, 2023). De manera adicional, se convoca a la implementación de estrategias de producción limpias y seguras para los ecosistemas terrestres, que contrarresten a su vez las consecuencias del cambio climático (ONU, 2015).

En Colombia, según la Encuesta Nacional Agropecuaria (ENA) de 2019, el total de uso del suelo fue de 50.102.269 hectáreas. El uso pecuario fue el más común, con 39.017.179 hectáreas (77,9%), seguido de los bosques con 5.175.846 hectáreas (10,3%), el uso agrícola con 4.617.116 hectáreas (9,2%) y otros usos con 1.292.128 hectáreas (2,6%). La ENA también destacó áreas

específicas, como los cultivos permanentes con 3.038.552 hectáreas en el uso agrícola, los pastos y forrajes con 22.946.697 hectáreas en el uso pecuario y los bosques naturales con 4.605.850 hectáreas en el uso en bosques (DANE, 2019). Cabe resaltar, en el 2017 en el país, se tienen 38 millones de hectáreas cultivadas de pasto generando conflicto sobre el suelo, ya que, por vocación de suelos, solo 8 millones de hectáreas son aptas para este cultivo (UPRA, 2017).

Los pastos en Colombia, constituyen la base principal de la producción pecuaria, los cuales proporcionan una fuente de forraje a bajos costos principalmente para rumiantes y los medios de subsistencia en varias regiones de Colombia (Motta-Delgado et al., 2019). No obstante, tal como lo plantea Argüello-Rangel et al., (2019): “las ganaderías del trópico bajo se enfrentan al desafío de adaptar su producción a los cambios climáticos”. Debido principalmente a que la carencia de alimentación disponible para rumiantes es baja en la relación de energía: proteínas de las pasturas, y baja disponibilidad en época seca (Argüello-Rangel et al., (2019); Sossa & Barahona, (2015) y Sotelo et al., (2017)).

El género *Brachiaria* abarca múltiples variedades de gran valor agronómico, lo cual la hace candidata para ser implementada como forraje. Es un género con alrededor de 100 especies, su distribución es extensa en los trópicos (Jarma Orozco et al., 2012); el desempeño agronómico destaca a *Brachiaria humidicola*, quien ha superado a otras gramíneas de pastos tropicales (Jarma Orozco et al., 2012). Además, la especie *Brachiaria brizantha* y *Brachiaria decumbens* presente en sabanas tropicales, tienen alta tolerancia a la acidez de los suelos y aluminio (Fedegán, 2015).

Aunado a lo anterior, el Sistema de Información para la Planificación Rural Agropecuaria, da a conocer la aptitud de los suelos a nivel nacional de la producción de pastos *Brachiaria* común y basillisk (*Brachiaria decumbens*), en la que expresa que 9.116.290 hectáreas de suelo poseen una

aptitud alta para la siembra; 14.161.260 ha, una aptitud media y 265.230 ha, con aptitud baja para este tipo de pasto (SIPRA, 2023).

Por otra parte, se ha podido evidenciar que los rumiantes al permanecer en las pasturas provocan degradación por mal uso del suelo, es decir, por sobre o subpastoreo (Motta-Delgado et al., 2019). En adición, se alteran las características físicas y químicas propias del suelo, lo que contribuye a los diferentes procesos de degradación del microbioma del suelo y procesos de erosión. Según la Organización de las Naciones Unidas (FAO, 2016), los suelos constituyen uno de los mayores reservorios de biodiversidad, y los organismos del suelo juegan un papel importante en la prestación de muchos servicios ecosistémicos y la degradación de estos, es un problema global que afecta negativamente a la biodiversidad, la producción de alimentos y el bienestar humano. La implementación de estrategias sostenibles para mitigar la pérdida de las características físicas y químicas del suelo es esencial para proteger los ecosistemas terrestres (ONU, 2015). Así mismo, se debe establecer condiciones de producción solidarias, limpias y amigables con el ambiente en especial en los ecosistemas productivos extensivos como la ganadería basada en pastos que permitan disminuir la degradación del suelo.

Por ello, el uso de microorganismos con efecto benéfico en la interacción suelo - planta es una estrategia de uso creciente para mitigar el impacto negativo en producción agropecuaria. En particular, en los pastos se han descrito algunas asociaciones simbióticas del 80% al 90% con los hongos micorrícicos arbusculares (HMA) (Cuenca et al., 2007). Algunos hongos micorrícicos forman arbuscúlos, vesículas (en algunas especies) e hifas dentro de las células corticales de las plantas que colonizan. Su distribución además es amplia, si bien es cierto, está presente en diferentes gradientes latitudinales, por ejemplo, pueden estar presentes en varios tipos de suelos como los oxisoles, vertisoles, molisoles, entre otros. Los HMA pueden ser muy heterogénea en un

mismo sitio en cuanto a variedad y cantidad, aspecto importante para que la planta obtenga el máximo beneficio de la asociación (Barrera B, 2009).

Según [Messa & Savioli, \(2021\)](#), los HMA promueven el aumento de la actividad fotosintética, mejora la relación planta-agua porque se ha evidenciado e induce cambios bioquímicos y fisiológicos a través de diversos compuestos y moléculas, como lo son las auxinas, citoquininas, giberelinas y compuestos orgánicos bioactivos que se acumulan en gran cantidad en las plantas (Messa & Savioli, 2021). En la interacción hongo-planta [Genre et al., \(2020\)](#) infiere que los hongos obtienen carbono de la fotosíntesis, y a su vez, proporciona a la planta huésped minerales como fósforo y nitrógeno. La inoculación de HMA promueve tolerancia a las plantas huésped frente problemáticas asociadas al estrés, la sequía, la salinidad, los metales pesados y temperaturas extremas ([Pérez C & Peroza C, 2013](#)).

Además, los HMA pueden ser un agente de biorremediación de gran potencial porque estimula el sistema de defensa primario de la planta hospedera frente al ataque de patógenos, aumentando así la tolerancia de la planta al estrés biótico causados por enfermedades, ayuda en la caracterización ambiental física y química, a través de la producción de glomalina, proteína que se encarga de darle estabilidad de la estructura del suelo, aportando a los procesos fisiológicos normales de las plantas ([Begum et al., 2019](#)). Estos hongos constituyen insumos microbiológicos de gran importancia para el desarrollo de agroecosistemas sostenibles, considerando su potencial como biofertilizante. Dado esto, es de gran valor conocer a fondo los beneficios que trae consigo el uso de los HMA para el mejoramiento de las pasturas, satisfaciendo las necesidades alimenticias a corto y largo plazo para las diferentes explotaciones ganaderas, como alternativa de sostenibilidad de agroecosistemas del trópico bajo colombiano.

Por todo lo anterior, mediante esta revisión se plantea mostrar cuáles son los beneficios del uso de HMA en los pastos, específicamente las especies *Brachiaria decumbens* y *Brachiaria brizantha* cultivadas en el trópico bajo colombiano y son fuente alimenticia para la población bovina.

Pregunta de investigación

¿Cuáles son los beneficios del uso de HMA en los pastos *Brachiaria decumbens* y *Brachiaria brizantha* para la ganadería sostenible del trópico bajo colombiano?

Justificación

En la producción de hatos ganaderos el balance nutritivo juega un papel importante, donde la calidad de los pastos influye a gran escala en la alimentación. En el trópico bajo en la disponibilidad forrajera es común hallar una baja tecnificación, es decir, con manejos impertinentes las cuales se han llevado a cabo a lo largo de la historia, como por ejemplo el sobre o subpastoreo del mismo, sin omitir la pérdida de las características tanto físicas como químicas, las cuales contribuyen a la erosión y destrucción de la biota del suelo, disminuyendo su calidad (Argüello-Rangel et al., 2019).

Las actividades de explotaciones ganaderas han tenido grandes efectos, tanto positivos como negativos, sobre la diversidad taxonómica de los microorganismos; el pisoteo promueve la compactación del suelo, la pérdida de la cobertura vegetal y su erosión, lo que conlleva a la disminución de la capacidad de retención de agua y a la infertilidad que puede agotar o disminuir los nutrientes disponibles para la obtención de óptimas producciones agrícolas, en este caso, las pasturas (Noda, 2009).

En sistemas de producción extensivo, las pasturas constituyen el principal uso del suelo, sembrado como monocultivo, donde más del 50% del área presenta degradación del suelo, que afectan la sostenibilidad del sistema y con tendencia del incremento del número de productores ganaderos (Motta-Delgado et al., (2019) y Sepúlveda et al., (2011)).

En el censo pecuario realizado por ICA, (2022) se observa que la población bovina para este año estuvo distribuida en 633.841 predios y totaliza 29.301.392 cabezas de ganado bovino, lo cual representa un incremento del 4,7% respecto al año anterior. De esta totalidad el 68,6% del total de ganado se centra en 10 departamentos, siendo Antioquia el de mayor participación con 11,2%, seguido de Córdoba (7,8%), Meta (7,8%), Caquetá (7,5%), Casanare (7,5%), Santander (5,7%), Magdalena (5,5%), Cesar (5,5%), Bolívar (4,9%) y Cundinamarca (5%) (ICA, 2022).

Por otro lado, siendo las pasturas un monocultivo, hace los predios más vulnerables a la aparición de plagas y enfermedades; lo que conduce a que, en sistemas intensivos, con alta fertilización química, el uso de plaguicidas se haya convertido en una práctica obligatoria, común, habitual y de alto impacto económico (Cadavid & Tapasco, 2020); lo cual es contradictorio y violaría lo pactado en los Objetivos de Desarrollo Sostenibles de la agenda 2030 propuestos por las Naciones Unidas (ONU, 2015), (ONU, 2015) donde se invita a generar acciones concretas y eficaces para luchar contra la desertificación, detener e invertir la degradación de las tierras, detener la pérdida de diversidad (ODS15), (ONU, 2015).

Otro agravante es el uso de los fertilizantes químicos han sido a lo largo del tiempo una de las fuentes principales de la contaminación del suelo y del agua, cuando esta no es utilizada de forma equilibrada; por ello, investigaciones se ha dedicado al trabajo en conjunto con la intención de buscar alternativas más ecológicas para la fertilización de cultivos, con el objetivo de garantizar agroecosistemas sostenibles haciendo uso de microorganismos que se destacan por su función

ecológica y poder garantizar la disponibilidad de agua y su gestión sostenible y el saneamiento para todos (ODS 6); adoptar medidas urgentes para combatir el cambio climático y sus efectos (ODS13) como lo contempla la Agenda 2030 de la ONU (ONU, 2015), y además el trabajo orientado por misiones del gobierno actual de Colombia (Gobierno de Colombia, 2019).

De acuerdo con Noda, (2009), el uso de los HMA es una de las alternativas técnicas biológicas que se emplean en muchas alternativas de fertilización, sin embargo, en los pastos aún no se ha logrado extender ampliamente y los estudios realizados han sido dirigidos a algunas leguminosas y muy pocas gramíneas. No obstante, el uso de HMA ha permitido la aplicación con gran éxito mediante recubrimiento de semillas. Por otro lado, las relaciones micorrícicas pueden ser ficha clave para la disminución de fertilizantes, en especial los fosfatos.

Los HMA son primordiales en la gestión del estrés ambiental provocado en las pasturas y el rendimiento agrícola (Messa & Savioli, 2021). En otras palabras, el microbioma tiene un gran potencial para aumentar el rendimiento de los cultivos y disminuir de forma significativa tanto las enfermedades como los factores de estrés abiótico a través de las rizobacterias y las micorrizas (Messa & Savioli, 2021). Por lo anterior, este trabajo pretende dar a conocer los beneficios del uso de los HMA para el mejoramiento de pasturas, enfocado como alternativa sostenible para la ganadería en el trópico bajo colombiano.

Objetivos

Objetivo general

Conocer la importancia de las micorrizas arbusculares para el mejoramiento de pastos de interés ganadero del trópico bajo colombiano como alternativa sostenible.

Objetivos específicos

- Describir los beneficios de las micorrizas arbusculares en pastos de interés ganadero del trópico bajo colombiano.
- Identificar el uso de las micorrizas arbusculares como alternativa de biofertilizante para pastos de interés ganadero del trópico bajo colombiano.

Metodología

Para el desarrollo de esta investigación, se hizo recopilación de documentos investigación disponibles como: revistas, artículos, libros, tesis; que brindaron más información. La búsqueda de literatura científica se realizó en las bases de datos Scielo, Redalyc, Geotech, Bione, Google scholar y Sciencedirect, entre el mes de agosto de 2022 y abril de 2023 con la combinación de las palabras clave “arbuscular mycorrhizae”, “fungi - plant interaction” y “sustainability”. Posteriormente, se amplió una combinación usando operadores booleanos AND, OR y NOT según conviniera, de los términos “arbuscular mycorrhizal fungi”, “sustainability of agroecosystems”, “as well low tropical pastures”, “self-sustainable pastures and arbuscular mycorrhiza- plant interaction”.

Se tuvieron en cuenta los siguientes criterios de inclusión, al analizar las diferentes fuentes de información:

- Tratarse de investigaciones originales o de revisión.
- El contenido esté enfocado en las MA y los pastos *Brachiaria brizantha* y *Brachiaria decumbens*.
- Las investigaciones tengan experimentos que evidencien sobre los beneficios de biorremediación de los hongos micorrícicos arbusculares HMA para los pastos *Brachiaria brizantha* y *Brachiaria decumbens*.

Marco teórico

Sistemas pecuarios en el desarrollo agrícola sostenible y la seguridad alimentaria: El caso de la producción bovina en Colombia

El crecimiento y la transformación continuo de los sistemas pecuarios ofrecen oportunidades sustanciales para el desarrollo agrícola, la reducción de la pobreza, los avances en materia de seguridad alimentaria y la mejora de la nutrición humana. La producción bovina contribuye a casi el 40% de la producción agrícola total de los países desarrollados y el 20% en los países en desarrollo, apoyando los medios de vida de al menos 1.300 millones de personas en todo el mundo. El ganado consume anualmente alrededor de 6.000 millones de toneladas de materia seca en su alimentación, de las cuales aproximadamente la mitad son pastos (FAO, 2022).

En Colombia, la producción de carne o doble propósito se localiza principalmente en las regiones de trópico bajo (0 a 1000 msnm), donde es común encontrar carencias en la alimentación de rumiantes, por la baja relación de energía: proteína de las pasturas y la baja disponibilidad de alimento en época seca (Sossa & Barahona, (2015) y Sotelo et al., (2017)). Este efecto se relaciona con la baja capacidad de resiliencia de los sistemas, debido al bajo nivel de tecnificación, al limitado acceso a modelos productivos sostenibles, bajo asesoramiento técnico y pobre o escasa oferta nutricional (Barahona Rosales et al., 2014).

En Colombia se encuentran dos tipos de producción de leche: especializada y doble propósito. Estas se establecen en diferentes regiones del país. La producción lechera especializada se localiza en zonas de trópico alto, como el altiplano norte y nordeste de Antioquia, donde el clima es fresco a frío y cerca de los centros urbanos. Este sistema se caracteriza por utilizar diferentes razas de ganado, utilizar intensivamente la tierra, el capital y la mano de obra, emplear fertilizantes, riego, rotación de praderas y suplementos alimenticios. Por otro lado, el sistema de

doble propósito se encuentra en las zonas de trópico bajo, como la Costa Atlántica, los valles de los ríos Magdalena, Cauca, Piedemonte Llanero y Caqueteño, que tienen temperaturas más altas y están más alejadas de los mercados. Este sistema se caracteriza por ser una ganadería extensiva debido a la amplia disponibilidad de tierras en estas áreas del país. La ganadería bovina en Colombia es reconocida no solo por su contribución directa a la alimentación y a las actividades derivadas de la transformación de sus productos, sino también por ser uno de los sectores que generan importantes impactos ambientales, como la deforestación, la quema de bosques, la pérdida de biodiversidad y la desecación de humedales (Restrepo Giraldo et al., 2019).

Según (Sepúlveda et al., 2011), la producción pecuaria tiene un gran impacto sobre los recursos naturales como al agua, biodiversidad, suelo, etc.; y donde en América Latina, los pastos son el principal uso del suelo para llevar a cabo los sistemas de producción extensivos de monocultivos, donde más del 50% de la superficie se encuentra en avanzado estado de degradación lo que afectan la disponibilidad del sistema, y la tendencia del incremento del número de productores ganaderos.

Chaudhry, (2008) afirma que las pasturas son reconocidas como un importante contribuyente a la eficiencia ambiental, la recreación y la eficiencia en la producción de leche y carne, donde la sostenibilidad es sustancial para mantener sistemas que sean rentables y respetuosos con el medio ambiente al tiempo que proporciona alimentos económicos y de alto valor destinados a la alimentación humana.

Además, varios autores definen que las pasturas sostenibles son aquellas que, a largo plazo, mejoran las condiciones de calidad ambiental y la base de los recursos de los ecosistemas al tiempo que proporcionan alimentos de una manera económicamente viable para satisfacer las necesidades

humanas y mejorar la vida tanto de los productores como la de los consumidores (Motta-Delgado et al., (2019); Sollenberger, (2008) y Stewart et al., (1991)).

La adopción de producciones sostenibles en sistemas ganaderos es esencial para la vida humana, ya que con base a esta se puede obtener condiciones de vida favorables y duraderas para satisfacer las necesidades tanto de generaciones presentes como futuras.

Especies de pasturas asociadas al trópico bajo colombiano

La familia *Poaceae*, conocida comúnmente como gramíneas, es un grupo de plantas de gran importancia para la producción pecuaria debido a su valor como especies forrajeras. En efecto, estas plantas constituyen la principal fuente de alimento para animales de granja como bovinos, ovinos y equinos, lo que a su vez influye significativamente en los sistemas de producción. Por consiguiente, el cultivo de especies de *Poaceae* es crucial para garantizar la disponibilidad de alimento para el ganado y, en última instancia, para la seguridad alimentaria de la población. Con el fin de mitigar la escases de alimento para bovinos en especial, se han incorporado al ecosistema la especie del género *Brachiaria* que son resistentes a la sequía y que tienen un mayor potencial productivo y una mejor calidad nutricional, es decir, mayor productividad de materia seca, mayor porcentaje de proteína y buena fibra (Villegas-Aparicio, 2018).

Narro, (2009) en un escrito describe los pastos del género *Brachiaria* como una variedad de plantas de pastoreo utilizadas en la agricultura y la ganadería; los cuales son comúnmente conocidos como pastos tropicales, ya que se adaptan bien a climas cálidos y húmedos. También describe que las *Brachiaria* son gramíneas perennes y pueden crecer hasta una altura de

aproximadamente un metro, estas tienen un sistema de radicular profundo y denso, lo que los hace altamente tolerantes a la sequía y a los suelos pobres en nutrientes.

Son resistentes a enfermedades y plagas comunes en las regiones tropicales. Estos pastos son muy nutritivos y proporcionan una fuente importante de alimento para los rumiantes. Son ricos en proteínas, minerales y vitaminas, y tienen una digestibilidad alta; además este género de pastos tiene la capacidad de fijar nitrógeno en el suelo, lo que puede mejorar la fertilidad del mismo (Narro, 2009).

Los pastos de este género han abierto nuevas expectativas en la ganadería tropical gracias a su amplio rango de adaptación, mayor producción de forraje y superior calidad nutricional; esto ha permitido a los ganaderos seleccionar la especie de pasto que mejor se adapte a las condiciones de su terreno y al tipo de explotación que manejan, logrando una mayor eficiencia y rentabilidad en su actividad (Narro, 2009).

De este género, los pastos *Brachiaria brizantha* y *Brachiaria decumbens*, son las dos especies ampliamente difundidas en altitudes hasta de 2000 msnm (Tabla2), que han demostrado una buena adaptación agronómica en diversos ecosistemas (Narro, 2009). En concordancia, (Villegas Aparicio, (2018) y Beltrán Brito, (2016)) describen a estas dos especies del género *Brachiaria* como las dos especies altamente valoradas debido a sus buenas cualidades de adaptación y persistencia en suelos ácidos, bajos en fertilidad y de mediana a baja calidad (Tabla1) y (Tabla 2). Su crecimiento eficiente y duradero, así como su alta producción de biomasa de buena calidad y grado de aceptación por los animales, la convierten en una excelente opción para la alimentación animal. Además, es altamente resistente a periodos prolongados de sequía y es capaz de rebrotar y ofrecer forraje verde durante épocas críticas del año. Otra ventaja de las especies *Brachiaria brizantha* y *Brachiaria decumbens* es su alta agresividad de invasión de predios durante

la etapa de establecimiento y explotación del pastizal. Esta característica la hace ideal para la producción ganadera, ya que garantiza una competencia efectiva con otras especies y un mayor rendimiento del pastizal.

Tabla 1.

Características del pasto Brachiaria decumbens.

<i>Brachiaria decumbens</i>	
Ficha técnica	
Referencia	Pasto tropical
Nombre científico o latín	<i>Brachiaria decumbens cv basilisk</i>
Nombre común	Decumbens, pasto amargo o dalis
Ciclo vegetativo	Perenne
Origen	Gran Lago de Uganda África, (CIAT 606)
Forma de crecimiento	Decumbente
Establecimiento	90 – 120 días
Información técnica	
Altitud MSNM	0 a 2.000 m
Clima	Cálido a frío moderado
Suelo	Fertilidad baja a media
Precipitaciones (rango en mm)	Superior a 800 mm
Calidad de forraje	
Proteína bruta en materia seca	8 – 11%
Digestibilidad	Buena

Palatabilidad	Buena
Tolerancia a sequía	Media
Tolerancia a encharcamiento	Baja
Tolerancia al salivazo	Baja

Producción de forraje

Materia verde (ton/ha/año)	8 – 11
Materia seca (ton/ha/año)	Buena

Generalidades

Mezclas	Excelente asocio con <i>Brizantha</i>
Usos	Pastoreo, henificación y cobertura vegetal.

Nota. Datos modificados de (AGROACTIVO, 2023)

Tabla 2.

Características del pasto Brachiaria brizantha.

Brachiaria brizantha

Ficha técnica

Referencia	Pasto tropical
Nombre científico o latín	<i>Brachiaria brizantha cv marandú</i>
Nombre común	Marandú, pasto dulce
Ciclo vegetativo	Perenne
Origen	África tropical, (CIAT 6294)
Forma de crecimiento	Macolla
Establecimiento	90 – 120 días

Información técnica

Altitud MSNM	0 a 1.800 m
Clima	Cálido a templado
Suelo	Media fertilidad a alta
Precipitaciones (rango en mm)	Superior a 800 mm

Calidad de forraje

Proteína bruta en materia seca	10 – 12%
Digestibilidad	Buena
Palatabilidad	Buena
Tolerancia a sequía	Buena
Tolerancia a encharcamiento	Baja
Tolerancia al salivazo	Excelente

Producción de forraje

Materia verde (ton/ha/año)	50
Materia seca (ton/ha/año)	10 a 14

Generalidades

Mezclas	Excelente asocio con <i>Decumbens</i>
Usos	Pastoreo.

Nota. Datos modificados de (AGROACTIVO, 2023)

Características estructurales de los hongos micorrícicos arbusculares (HMA)

Los HMA, son microorganismos del suelo que son simbióticos con aproximadamente el 80% al 90% de las plantas terrestres formando arbusculos, vesículas e hifas en las células corticales

de las plantas que habitan (Barrera B, 2009). La mayoría de las plantas terrestres establecen en sus raíces al menos uno de los tres tipos de asociaciones micorrícicas; de ellas, la del tipo arbuscular es la simbiosis más extendida sobre el planeta, no solo por el número de plantas hospederas que son capaces de colonizar, sino también por su amplia distribución geográfica (Noda, 2009).

El término micorriza proviene del griego *mykos* (hongo) y *rhiza* (raíz) y fue utilizado por primera vez por Albert Bernanrd Frank en 1885 para hacer descripción de un fenómeno que observó en las raíces de árboles de los bosques templados de Norteamérica (Saparrat et al., 2020). Su distribución además de ser amplia dado que se presenta en todos los ecosistemas y suelos, puede ser muy heterogéneos en tipo y cantidad en el mismo lugar, lo cual es un requisito importante para que las plantas obtengan un mayor beneficio de la asociación (Barrera B, 2009).

Por su parte, los arbusculos está asociado con estructuras especializadas, que se forman en las células corticales de la raíz como resultado de la interacción planta-hongo. Estas estructuras constituyen el punto de intercambio de metabolitos entre los dos participantes de la simbiosis (Noda, 2009).

Los dos tipos más comunes y más conocidos son las ectomicorrizas y las endomicorrizas. Cada tipo se distingue en función de la relación de las hifas del hongo con las células radiculares de la planta hospedera. En las ectomicorrizas el micelio invade la raíz sin entrar en el interior de las células; en el caso de las endomicorrizas, el micelio invade la raíz, inicialmente es intercelular, pero luego penetra en el interior de las células radiculares, desde la rizodermis hasta las células corticales. Además, se distribuyen en la mayoría de los árboles de las zonas tropicales y algunos árboles de bosques templados (Noda, 2009).

Estos hongos que forman endomicorrizas versículo arbusculares pertenecen a un solo grupo, las Glomales (*Zygomycetes*), con seis géneros y muchas especies distribuidas en todos los

continentes; son estrictamente simbióticos y no pueden ser cultivados en cultivo puro, o sea en ausencia de su hospedero, contrariamente a los hongos ectomicorrícicos (Noda, 2009).

Los arbusculos de las endomicorizas son estructuras altamente ramificadas, intracelulares, que se localizan en las células cercanas al cilindro vascular, y su función es la transferencia de nutrimentos desde el suelo hasta la planta hospedadora; las vesículas son protuberancias que quedan revestidas por la membrana plásmatica (Ilustración 2). Las hifas, por otra parte, se extienden varios centímetros por fuera de la raíz, incrementando la cantidad de nutrientes absorbidos. En este sentido, las hifas no están septadas, es decir, ausentes de tabiques que separan las células y las asociaciones hongo/planta hospedera no son muy específicas. También se ha descrito que las endomicorizas son particularmente importantes en los trópicos, donde los suelos tienden a retener los fosfatos (Noda, 2009).

Saparrat et al., (2020) plantea que, los HMA se caracterizan por la formación de hifas intercelulares e intracelulares, su estructura de intercambio denominadas arbusculo en las células de la corteza radicular; así como la formación de esporas intra y extraradiculares; esto para su buen desarrollo y sostenibilidad en el medio.

Ilustración 1.

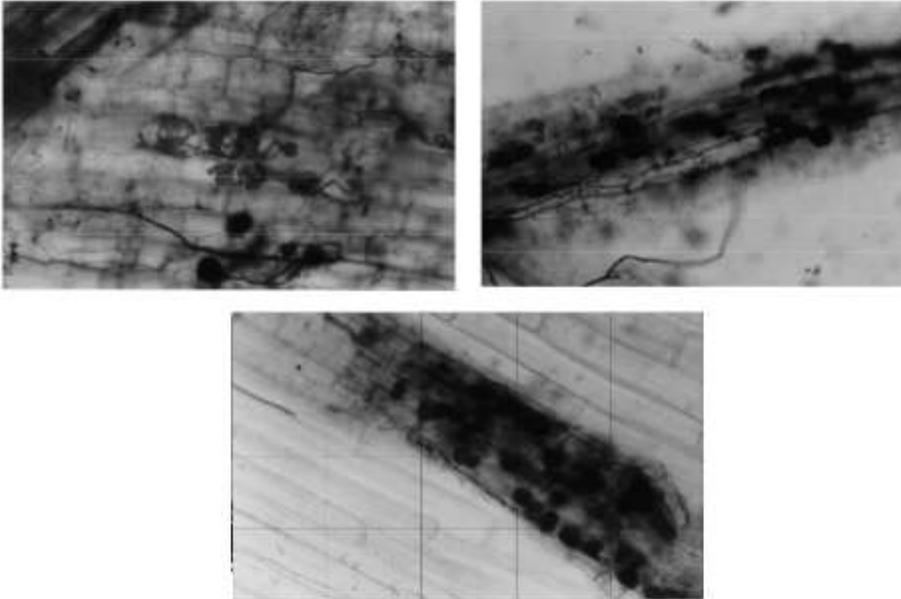
Micelio de Micorizas Arbusculares



Nota. Ilustración tomada de (Bolaños-B et al., 2000)

Ilustración 2.

Estructura intracelular (diferentes tipos de vesículas, micelio y arbusculos)



Nota. Ilustración tomada de (Bolaños-B et al., 2000).

Interacción micorriza arbuscular – Plantas

(Saparrat et al., 2020) utiliza el termino de simbiosis solo para denotar una relación mutuamente beneficiosa entre diferentes especies. Además, esta relación puede ser temporal o transitoria si no es necesaria, y las dos especies involucradas pueden sobrevivir juntas, separadas, o, por el contrario, obligadas o permanentes si una depende de la otra y no puede sobrevivir sin ese simbionte. Por otro lado, se resalta que los hongos son seres vivos heterótrofos y, por lo tanto, se benefician de los hidratos de carbono sintetizados por las plantas. Además de esto, la simbiosis micorrícica limita la absorción de metales pesados como lo es el zinc y el cadmio que persisten en las hifas fúngicas y aumenta el área de exploración de la raíz, aumentando así el flujo de agua del suelo a la planta.

Fernández Martín, (2003) en su publicación habla acerca de la simbiosis micorrícica arbuscular, en la cual describe que el proceso simbiótico comienza con la entrada de una hifa que se deriva de esporas germinadas, raíces infectadas o segmentos de micelio en el suelo y desencadena el crecimiento de estas en las condiciones adecuadas de humedad, temperatura o condiciones fisicoquímicas favorables. Esto coincide con el incremento del volumen de la raíz y, por tanto, permiten una mayor exploración de la rizosfera. Son considerados los componentes más activos de los órganos de absorción de los nutrientes de la planta, la que a su vez provee al hongo simbionte de nutrientes orgánicos y de un nicho protector (Noda, 2009). Al hacer contacto con la plántula, se forma un micelio especializado llamado apresorio en los pelos linfáticos o células epidérmicas detrás de la región del meristemo, que desempeña un papel de apoyo en la primera etapa de la invasión de las raíces de la planta (Ilustración 1). La colonización de los hongos ocurre continuamente en dos direcciones, hacia el interior y el exterior de las raíces. Al entrar en la raíz se forma una hifa infecciosa denominada haustorio que penetra en el interior radical, ramificándose intensamente de forma dicotómica, formando un arbúsculo, una estructura micorrícica que garantiza el intercambio de sustancias esenciales durante la simbiosis, sin invadir el endodermo ni penetrar el meristemo. Cuando alcanza la madurez fisiológica del proceso el cual dura alrededor de 7 a 15 días, estos son destruidos en el interior de las propias células por fagocitosis. De esta forma se garantiza la supervivencia del hongo en el medio en el que habitan.

Cuando las plantas se infectan con microorganismos del suelo, se desencadenan una serie de cambios fisiológicos y bioquímicos que no ocurren cuando los HMA colonizan la plantas, lo que respalda la hipótesis de que el hongo emite señales que la planta reconoce para que no desencadene una respuesta defensiva. Además, la planta también libera compuestos de exudados que estimulan el crecimiento de las hifas en varios puntos de control mientras se produce la

colonización fúngica (Barrera B, 2009). En estudios realizados en condiciones controladas por Barea et al. (1991) se ha demostrado que, por cada metro de raíz colonizada, el hongo produce entre 7 y 250 metros de hifa externas, dependiendo de las especies involucradas en la simbiosis y sus condiciones de crecimiento (Fernández Martín, 2003). El intercambio entre el hongo y el hospedante tiene lugar en los arbusculos, que se llenan de gránulos de fosfatos (Noda, 2009).

Este tipo de asociaciones está reportado en gramíneas: *Andropogon*, *Bromus*, *Festuca*, *Panicum*, *Poa*, *Saccharum*, *Sorghum*, *Sporobolus*, *Stipa* y *Zea mays*.

Beneficios de las micorrizas arbusculares (MA)

La micorriza desempeña una función crítica en la agricultura sostenible. En su prefacio al libro "Mycorrhizae in Sustainable Agriculture", Bethlenfalvai y Linderman (1992) concluyen que, "si el objetivo es reducir los insumos químicos por motivos ambientales y de salud, es necesario restaurar los HMA y otros microbios beneficiosos a un alto nivel de efectividad para compensar la disminución de los insumos". Esta estrategia se alinea con la opinión de que el grado de empobrecimiento o desaparición de la microflora y MA, es un indicador del deterioro de la estabilidad del sistema planta-suelo, de la misma manera que el nivel de estrés causado por las prácticas culturales es una medida de la sostenibilidad de la agricultura (Blanco & Salas, 1997). Según esta perspectiva, cuando se hace un aprovechamiento óptimo y responsable de los microorganismos, es posible tener una agricultura verdaderamente sostenible.

Varios estudios muestran que los H, benefician a las plantas en términos de aptitud física, crecimiento relativo y abundancia, y equilibrio competitivo. Por lo tanto, los HMA son uno de los factores que determinan la diversidad de plantas y la estructura de la comunidad (González et al., 2008), (Camargo-Ricalde, (2017) y Restrepo Giraldo et al., (2019)).

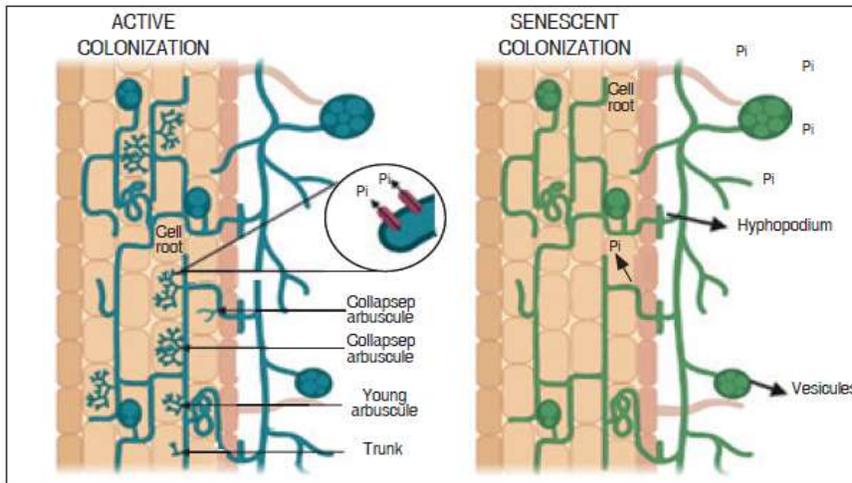
Algunos autores reportan los siguientes beneficios simbióticos entre HMA y plantas:

Mineralización: el papel de la actividad microbiana influye en la cinética de los procesos del suelo, como lo es la mineralización, la inmovilización de nutrientes y la participación en el ciclo de estos (Guerra, 2007). Además de esto, los HMA favorecen las condiciones fisicoquímicas del suelo mediante el enriquecimiento de materia orgánica; a su vez, absorben nutrientes del suelo y los transfieren a las raíces; en especial el fósforo y nitrógeno, y así, rindan protección contra patógenos y condiciones hídricas desfavorables.

Fertilización de los suelos: los HMA tienen un papel crucial en la fertilización, ya que estos pastos suelen crecer en suelos ácidos y pobres en nutrientes, especialmente en fósforo. Las micorrizas forman una red de hifas que se extiende por el suelo y aumenta la superficie de absorción de las raíces de las plantas, lo que permite una mayor captación de nutrientes. Además, los HMA pueden liberar enzimas que descomponen la materia orgánica del suelo y liberan nutrientes adicionales (Barrera B, 2009). En el caso específico de los pastos *Brachiaria*, se ha observado en estudios realizados que las micorrizas aumentan la absorción de fósforo y otros nutrientes esenciales, lo que mejora significativamente el crecimiento de la planta y la producción de biomasa (González et al., 2007) y se acelera la maduración de las cosechas (Noda, 2009). Los HMA expresan proteínas para transferir fosfato inorgánico (Pi) del suelo a las raíces colonizadas a través de interfaces simbióticas. Los mecanismos involucrados en la transferencia de Pi de hongos a células vegetales aún se desconocen en gran medida (Ilustración 3.) (Plassard et al., 2019).

Ilustración 3.

Dinámica de colonización de hongos con capacidad micorrícica.



Nota. Ilustración tomada de (García-Parra et al., 2022)

Por lo tanto, el aumento de la presencia de estructuras arbusculares en las raíces de las plantas promueve la activación de genes que facilitan la absorción de fosfatos desde la estructura fúngica hacia el tejido vegetal, gracias a proteínas que se encuentran en la membrana periarbuscular (según Harrison et al., 2002). Sin embargo, la forma en que se intercambia el fósforo entre la planta y el hongo varía debido a la dinámica que se desarrolla. Cuando hay escasez de fósforo, la colonización activa promueve un movimiento acelerado de este elemento. Por otro lado, la colonización senescente se da cuando la red hifal deja de crecer y se desconoce si el fósforo sigue siendo móvil entre el tejido vegetal y la rama arbuscular (García-Parra et al., 2022).

Biorremediación del suelo: Riopedre-Galán et al., (2021) habla de la relación entre los metales pesados y los HMA, donde explica que en el agroecosistema, la presencia de metales pesados puede representar un peligro para la cadena alimentaria. Por esto, las plantas y los hongos han desarrollado diferentes mecanismos para obtener nutrientes de suelos con distintas

composiciones y prevenir la toxicidad de los metales. Los eucariontes codifican varias familias de transportadores metálicos para transportar los metales en el interior de las plantas y hongos. Los microorganismos son capaces de concentrar metales pesados en niveles más altos que los del entorno que los rodea, y existen dos procesos conocidos como bioacumulación y biosorción para inmovilizar los metales. Las plantas excretan compuestos orgánicos para modificar su entorno y disminuir la movilidad de los metales pesados. Los HMA tienen un efecto protector que inmoviliza el metal en sus estructuras, lo que reduce la incorporación de metales a los tejidos vegetales. La inoculación de HMA y ácido salicílico en plantas de pimiento aumentó su tolerancia al estrés provocado por metales pesados (Riopedre-Galán et al., 2021). Es decir, los HMA pueden constituir una alternativa para contrarrestar los efectos negativos que provocan los excesos de metales pesados a las plantas.

Interacción de los HMA como fertilizante en los pastos *Brachiaria decumbens* y *Brachiaria brizantha*.

En Colombia, la producción sostenible y eficiente de cultivos se ve limitada por la aclimatación, adaptación y multiplicación en diversas condiciones agroecológicas. Los microorganismos tienen un gran potencial para solucionar múltiples problemas de la agricultura. En particular, los biofertilizantes basados en MA son una alternativa para reducir las pérdidas en la multiplicación de especies de plantas y mejorar la aclimatación y nutrición de los cultivos más importantes. Estas tecnologías pueden ser aplicadas a un gran número de especies y se han incorporado a la producción de semillas de alta calidad, tanto en viveros como en la biotecnología vegetal. En los Estados Unidos, se han estudiado varias especies de leguminosas (Lupinus, Astragalus, Trifolium) que presentan HMA con hifas aseptadas o micorrizas formadas por hifas septadas que a menudo forman esclerocios intracelulares. En Cuba, el Instituto Nacional de

Ciencias Agrícolas (INCA) ha llevado a cabo varias investigaciones en diferentes cultivos de importancia económica, como la soja, el frijol, los guisantes, el maíz, el arroz, el sorgo, el girasol, el trigo, el algodón, el plátano, las raíces y los tubérculos, las hortalizas, las posturas de cafeto, los frutales y los pastos, dentro de estas investigaciones se dio a conocer que el producto a base de HMA comercialmente conocido como EcoMic® ha demostrado incrementos en los rendimientos de los pastos entre un 33 y 70% (Tabla 3), mejor resistencia a la sequía, mayor aprovechamiento de nutrientes y reducción del uso de fertilizantes tanto en la agricultura familiar, con pequeñas extensiones y siembra manual, como en la agricultura intensiva, con grandes extensiones y siembra mecanizada. El recubrimiento de las semillas con dosis de 6 a 10% de su peso permite una aplicación exitosa del producto, lo que se traduce en una necesidad de pequeñas cantidades por hectárea (1-6 kg. ha⁻¹), lo que amplía significativamente el espectro de acción práctica de la simbiosis. (Noda, 2009).

Tabla 3.

Incremento en el rendimiento por la aplicación de EcoMic®.

Cultivo	Incremento (%)
Soya	20 – 50
Maíz	20 – 50
Arroz	15 – 50
Algodón	18 – 50
Girasol	15 – 50
Tomate	15 – 50
Trigo	15 – 50
Frijol	36 – 50
Pastos	33 – 70

Nota. Datos adaptados de (Noda, 2009)

Villegas-Aparicio, (2018) propone en su investigación de los efectos de biofertilizantes microbianos en el crecimiento de *Brachiaria brizantha* que la aplicación de fertilizantes biológicos basados en micorrizas y bacterias promotoras de crecimiento puede mejorar significativamente la persistencia, adaptación y productividad de los pastos debido a la simbiosis. Estos biofertilizantes ofrecen una amplia gama de beneficios, como la estimulación de la germinación de semillas y el enraizamiento mediante la producción de reguladores del crecimiento (auxinas, citoquininas y sustancias similares a giberelinas) que participan en el desarrollo vegetal. Además, estos biofertilizantes promueven una mayor y más eficiente captación de nutrientes, especialmente de fósforo, gracias a su capacidad para ejercer una acción positiva sobre los ciclos biogeoquímicos, como la fijación de N₂, la solubilización de elementos minerales y la mineralización de compuestos orgánicos. Por otro lado, también ayudan a controlar enfermedades y protegen contra patógenos, lo que mejora la tolerancia al estrés por sequía, salinidad, metales tóxicos y exceso de pesticidas. Esto contribuye a un equilibrio en el sistema suelo-planta-animal y a producciones más ecológicas, lo que a su vez permite obtener mayores beneficios económicos y sociales (Villegas-Aparicio, 2018).

En Colombia, se realizaron investigaciones tanto en campo como en invernadero con el fin de examinar los efectos de las MA en el crecimiento de varios tipos de pastos tropicales. Para llevar a cabo este, se produjo una variedad de especies de HMA y se midió su capacidad para aumentar los niveles de estudio de fósforos en suelos ácidos con bajos contenidos de este nutriente. La eficacia de las diferentes especies de HMA varió con la gravedad y dependió de factores tales como el pH y las aplicaciones de fertilizantes, así como de la temperatura y humedad del suelo.

Entre las especies de HMA examinadas, se encontró que *Glomus manihotis* y *Entrophospora* colombiana fueron las más efectivas para los pastos en suelos con bajo pH y altos contenidos de nitrógeno, fósforo y potasio. En suelos con bajos niveles de fósforo, las especies de pastos estudiadas dependieron en gran medida de las HMA. En suelos con altos contenidos de fósforo, la inoculación de HMA en varias pasturas y pastos leguminosos, en combinación con la aplicación de fosforita, aumentará tanto el crecimiento como el establecimiento temprano de los cultivos (Noda, 2009).

En otro estudio realizado en el que evaluaron el comportamiento forrajero de la *Brachiaria decumbens* (pasto dalis) con la aplicación de diferentes niveles de micorrizas y una base estándar de abono orgánico, pudieron constatar que una alta aplicación de micorrizas en asocio con abono ovino como base estándar, puede presentar diferencias estadísticas significativas en la producción de forraje verde y determinaron que la biofertilización contribuye al proceso de absorción del potasio y el fósforo, los cuales son elementos mayores y suelen presentarse en cantidades insuficientes. Al utilizar biofertilizantes, se logra un mejor aprovechamiento de estos minerales, que son esenciales para la producción de biomasa (Coloma Panata, 2015).

Por otro lado, se evaluó la producción de materia seca y se concluye que la interacción de micorrizas con material humificado aumenta significativamente la capacidad de las plantas para retener nutrientes y agua, lo que puede actuar como una hormona de crecimiento para mejorar la producción de forraje (Beltrán Brito, 2016).

En una investigación realizada por González et al., (2008), afirma que posiblemente las condiciones climáticas hayan afectado la productividad de los pastos y, de alguna manera, hayan influido en el comportamiento de las estructuras micorrícicas. En este estudio pudieron observar que durante la época de lluvia hubo un incremento en los valores absolutos de los porcentajes de

colonización y densidad visual, así como en el rendimiento de materia seca, en comparación con la época seca. Además, Según lo señalado por García y Mendoza (2008), durante el período en que los niveles de precipitaciones, temperatura y luminosidad son más altos y los pastos crecen rápidamente, se genera una mayor demanda de nutrientes, síntesis de sustancias carbonadas y otros fotosintatos que favorecen la intensidad de la simbiosis, y como resultado se produce un incremento de las estructuras fúngicas dentro de las raíces. Además, aumentar la frecuencia de corte o pastoreo en esta etapa puede estimular el crecimiento de las raíces, lo que a su vez favorece el proceso de recolonización a partir de los propágulos micorrícicos presentes en la rizosfera (González et al., 2008).

En cuanto a su efectividad en la promoción del crecimiento vegetal y el control biológico de patógenos, se ha observado que los HMA son altamente beneficiosos para las plantas (Cano Intriago, 2013).

Resultados y discusión

En la búsqueda exhaustiva de literatura en las bases de datos bibliográficas se encontraron en total 853 documentos relacionados con las palabras claves y que cumplen los criterios de inclusión. Al enfocar la búsqueda en el tema específico de las MA y los pastos *Brachiaria spp.*, se obtuvieron 725 resultados.

Posteriormente, se aplicó el criterio de selección que buscó investigaciones que evidenciaran los beneficios de la biorremediación de los HMA en los pastos *Brachiaria decumbens* y *Brachiaria brizantha*. Como resultado, se obtuvieron 225 documentos que cumplieron con este criterio.

Para afinar aún más la selección, se eligieron documentos académicos publicados específicamente sobre las especies "*Brachiaria brizantha*" y "*Brachiaria decumbens*". Esto dio como resultado un total de 77 documentos seleccionados.

Después de este proceso, se seleccionaron finalmente 30 documentos académicos indexados que cumplieron con los requisitos establecidos, donde 18 son revisiones bibliográficas, 5 son libros relacionados con las definiciones, estructura y función de los HMA y 7 son investigaciones experimentales realizadas en diferentes países incluyendo Colombia.

Con la finalidad de comprender mejor las características y el funcionamiento de los HMA en los agroecosistemas y su interacción con las plantas, se han considerado diversos documentos que abordan esta temática. Estos documentos proporcionan una definición general de los HMA y exploran sus beneficios como fertilizantes biológicos.

En primer lugar, una de las investigaciones caracterizó los HMA presentes en suelos de sistemas ganaderos del trópico alto y trópico bajo en Antioquia y exploró la relación entre la cantidad de esporas, el porcentaje de colonización, la diversidad de los géneros de HMA y algunas condiciones físico-químicas del suelo. Los autores recolectaron muestras de suelo de diferentes espacios en la región de estudio, tanto en el trópico alto como en el trópico bajo, para obtener una representación de la diversidad de HMA en diferentes áreas. Se recopilaron datos sobre aspectos generales del sistema, como la distribución y la utilización de la tierra, el tipo de sistema de producción, la carga animal, la composición de las especies animales presentes en la finca y detalles relacionados con el uso de fertilizantes en el suelo. Seguido a esto, se realizó un recorrido en zigzag para la extracción de suelo a una profundidad de 20 cm hasta conseguir una muestra compuesta de 1 kg la cual fue transferida a una bolsa plástica limpia, cerrada y marcada con el código de la finca muestreada, fecha y municipio. Para evaluar el porcentaje de colonización de

HMA en las raíces, se llevó a cabo un proceso de decoloración previa mediante el uso de una solución fuerte de hidróxido de potasio (KOH al 10%). Posteriormente, se neutralizó esta solución utilizando ácido clorhídrico (HCl al 10%) y las raíces fueron teñidas con una solución de azul de tripano al 0.05% durante un periodo de tres días. Luego, se examinaron las raíces utilizando un microscopio (modelo NIKON Eclipse E200). Se identificaron la presencia de arbusculos, vesículas y endosporas. Para determinar el porcentaje de colonización en las raíces, se utilizó el método descrito previamente en la literatura (Phillips y Hayman, 1970), y se clasificó el grado de colonización total en las siguientes categorías: baja colonización (0-20%), colonización media (20.1-50%), y alta colonización (> 50%) (Nicholson y Schenck, 1979) (Restrepo Giraldo et al., 2019).

Los autores en relación al manejo de los suelos en las fincas de la subregión del Magdalena Medio, ubicado en trópico bajo de Colombia, encontraron el pasto dominante en todas las fincas era del género *Brachiaria*, con especies como *Brachiaria decumbens*, *Brachiaria humidicola* y *Brachiaria brizantha*. Los sistemas de producción principales fueron la cría y el doble propósito. No se disminuyó el uso de fertilizantes como práctica de manejo del suelo reportada por los productores de esta zona. Además, las fincas se caracterizaban por ser explotaciones de gran tamaño. Al evaluar el porcentaje promedio de colonización de HMA en las raíces de los suelos de las fincas estudiadas con las técnicas anteriormente descritas, se encontró que todas presentaron valores dentro del rango de colonización media de HMA (20-50%). Sin embargo, al analizar los valores individuales de cada finca en los municipios y subregiones, se obtuvo una amplia variación. En el trópico alto, los valores de colonización oscilaron entre el 11% y el 91%, mientras que en el trópico bajo fueron entre el 4,0% y el 86% (Restrepo Giraldo et al., 2019).

En las fincas del trópico alto, se encontró una colonización de HMA de categoría baja y alta (entre 0% y 20%, y por encima del 50%, respectivamente). Estos valores de colonización baja fueron significativamente diferentes ($p=0.05$) de las demás fincas. Por otro lado, en las fincas del trópico bajo, la colonización de HMA se encontró en la categoría media y alta (entre el 20.1% y el 50%, y por encima del 50%, respectivamente), con porcentajes de colonización del 86% y el 83% ($p=0.03$) (Restrepo Giraldo et al., 2019).

En relación a los valores de colonización de HMA en las raíces, se encontró que los sistemas de trópico alto, donde predominaba el pasto kikuyo (*Penisetum clandestinum*), aparecieron mayores porcentajes de colonización en comparación con los pastos del trópico bajo. Esto podría atribuirse al uso de fertilizantes, que favorecieron una mayor asociación entre los hongos y las plantas en la zona de trópico alto (Restrepo Giraldo et al., 2019), lo cual contrasta con lo informado por Noda, (2009), quien sugirió que la fertilización y el tipo de inóculo micorrízico tienen influencia positiva en el porcentaje de asociación.

En cuanto a las características de la simbiosis descrita, los autores examinaron aspectos como la diversidad de especies de HMA presentes en los suelos ganaderos y encontraron que los HMA detectado en los suelos estudiados son *Glomus*, *Acualospora* y *Gigaspora*, donde el HMA de mayor abundancia y amplia distribución geográfica, fue del género *Glomus*. En este sentido, se menciona que el género *Glomus* tiene la capacidad de adaptarse a diversas condiciones del suelo y una mayor habilidad para establecer relaciones simbióticas con numerosas especies de plantas en Colombia (Restrepo Giraldo et al., 2019). Por último, en este estudio, se encontró una fuerte correlación negativa significativa entre los valores de concentración de elementos como Ca, Mg, K y P, así como el pH, y el recuento de esporas en la subregión del Magdalena Medio.

Las altas concentraciones de Ca y Mg en el suelo pueden resultar tóxicas para la vida del suelo, lo que se refleja en una disminución en el número de esporas. En el estudio realizado en las fincas de la subregión del Magdalena Medio del trópico bajo, se encontraron concentraciones más altas de P y Mg (67 mg kg⁻¹ y 30 mg kg⁻¹, respectivamente) en comparación con la subregión Norte (trópico alto), (29 mg kg⁻¹ y 12, respectivamente). Las concentraciones altas de P y Mg en el suelo podrían explicar la reducción en el número de esporas. Además, se demostró que un alto contenido de K en el suelo también estaba asociado con una menor cantidad de esporas en la rizosfera. En cuanto al porcentaje de colonización y la concentración de K, se observó una correlación positiva leve.

Otro resultado de la revisión revela que los HMA desempeñan un papel fundamental en el mejoramiento de los pastos tropicales como una alternativa sostenible (Loo et al., 2022). Estas asociaciones simbióticas entre los HMA y las raíces de las plantas proporcionan una serie de beneficios para los pastos *Brachiaria decumbens* y *Brachiaria brizantha*. Por ejemplo, las MA aumentan la absorción de nutrientes, especialmente fósforo, que es esencial para el crecimiento vegetal (Cañizares et al., 2015). Al establecerse en las raíces de las plantas, las MA amplían la superficie de absorción y facilitan la captación de nutrientes, incluso en suelos pobres en nutrientes. Esta mayor captación de nutrientes resulta en un crecimiento más vigoroso y una mayor producción de biomasa en los pastos. Además del fósforo, las MA también mejoran la absorción de otros nutrientes, como el nitrógeno y los micronutrientes, lo que contribuye a una mejor calidad nutricional de los pastos. Estos nutrientes esenciales son necesarios para el desarrollo óptimo de las plantas y, al ser absorbidos más eficientemente gracias a la simbiosis con los HMA, promueven un crecimiento saludable y una mayor productividad de los pastos en el trópico bajo colombiano (Begum et al., 2019).

En otro estudio realizado, analizaron el efecto de la combinación de biofertilizantes de humus, micorrizas y la combinación de humus más micorrizas en la producción forrajera de *Brachiaria decumbens* en condiciones controladas. La investigación estuvo constituida por 20 parcelas de *Brachiaria decumbens* (Pasto dalis), cuyas dimensiones fueron de 25m² (5 x 5 metros en parcela neta útil), cada unidad experimental, con cuatro repeticiones cada una, dando una superficie de 100 m² por cada tratamiento con un total de 500 m². En este se evaluó el comportamiento forrajero de la *Brachiaria decumbens* bajo la aplicación de 4 tratamientos de abono orgánico (2, 4, 6 y 8 Tn/ha de humus), más un testigo con cuatro repeticiones, las cuales se homogenizaron con una adición estándar de micorrizas (4 kg/ha). La distribución de los tratamientos se realizó mediante un Diseño de Bloques Completamente al Azar (DBCA) y las mediciones experimentales fueron; altura de la planta (cm.), cobertura basal (%), cobertura aérea (%), producción de forraje verde (Tn/ha/corte), producción de materia seca (Tn/ha/corte), análisis bromatológico, análisis de suelo inicial y final y análisis beneficio-costo. Los resultados se sometieron a los siguientes análisis: Análisis de la Varianza (ADEVA), para las diferencias de las medias, con ($P < 0,05$ y $P < 0,01$), separación de medias según Tukey y correlación y regresión (Beltrán Brito, 2016).

Para la aplicación de los biofertilizantes de las micorrizas, se empleó una cepa específica que había sido previamente identificada como beneficiosa para el crecimiento de *Brachiaria decumbens*. Se realizaron análisis periódicos del suelo y se tomaron muestras de biomasa vegetal para evaluar la producción forrajera.

La simbiosis entre el humus y las micorrizas presentó características beneficiosas para el cultivo de *Brachiaria decumbens* fortaleció una asociación mutualista con las raíces de las plantas,

esto proporcionó un mayor acceso a nutrientes y agua, mejorando su capacidad de absorción y su resistencia al estrés, como la sequía y la salinidad (Tabla 4), así como lo destaca Coloma, 2015.

La aplicación de diferentes niveles de humus junto con micorrizas tuvo un efecto significativo en la cobertura basal del *Brachiaria decumbens*. En las parcelas fertilizadas con 8 Tn/ha de humus + 4 kg/ha de micorrizas (T4), se observaron diferencias significativas en comparación con el grupo control (T0). La media de la cobertura basal en el T4 fue de 53,38%, mientras que las parcelas del grupo control tuvieron una media más baja de 46,19%. Estos resultados podrían estar relacionados con lo mencionado por Esparza (2010), donde se indica que el humus ayuda al desarrollo de las raíces en suelos pobres en materia orgánica, poco profundos y de textura gruesa. Dentro de los resultados del porcentaje de la cobertura aérea, se registró diferencias estadísticas significativas ($P \leq 0.05$), evidenciándose el mayor porcentaje de cobertura de aérea con el tratamiento T4 (8 Tn/ha de humus + 4 kg/ha de micorrizas) con 91,44%, seguidos de los tratamientos T2 y T3 con 82,44% y 82,10%; a continuación se ubica el tratamiento T1 con 80,60%; para finalmente ubicarse el tratamiento T0 con 71,13% de cobertura aérea Beltrán Brito, (2016). Se observa que los resultados cuando se aplican dosis altas de humus, específicamente el tratamiento de 8 Tn/ha de humus + 4 kg/ha de micorrizas (T4), muestra el mayor porcentaje de cobertura aérea. Estos hallazgos son consistentes con investigaciones anteriores que informan porcentajes promedio de cobertura aérea de 59,25% y 81,25%, respectivamente (Beltrán Brito, 2016).

Según los estudios mencionados hasta ahora la combinación de biofertilizantes de humus y micorrizas puede tener un impacto positivo en la producción forrajera de *Brachiaria decumbens* (Beltrán Brito, 2016) y la combinación de 1.25kg/ha de micorrizas con abono ovino mejora los rendimientos de la *Brachiaria decumbens* (Coloma Panata, 2015). Los resultados obtenidos

respaldan la utilización de esta simbiosis como una estrategia prometedora para mejorar el rendimiento y la calidad de los cultivos de pasto *Brachiaria decumbens* (Beltrán Brito, (2016) y Coloma Panata, (2015)).

Algunos autores afirman que, los HMA ayudan a las plantas a sobrevivir y adaptarse a ambientes adversos, aumentando su resistencia al estrés hídrico y salino. Las asociaciones simbióticas entre HMA y pastos, mejoran la eficiencia en el uso del agua y la acumulación de compuestos protectores, lo que permite a los pastos mantener su crecimiento y rendimiento incluso en condiciones desfavorables (Begum et al., 2019). Esta capacidad de adaptación de los pastos a los ambientes del trópico bajo colombiano es esencial para garantizar su sostenibilidad a largo plazo (Villegas-Aparicio, 2018).

Otra investigación se enfocó en analizar el efecto de la aplicación de biofertilizantes microbianos (bacterias y hongos) en el crecimiento de *Brachiaria brizantha*, en este se estableció en un diseño completamente al azar con arreglo factorial (2x6x2), donde el factor “A” correspondió a dos especies forrajeras (*Insurgente* y *Mulato II*), el factor “B” a biofertilizante con cuatro niveles, fertilizante químico y testigo sin tratamiento alguno, y el factor “C” humedad (con estrés hídrico y sin estrés hídrico) teniendo en total 24 tratamientos con seis repeticiones cada uno. Se utilizaron semillas certificadas de *Brachiaria brizantha* cv *Insurgente*, y cv *Mulato II*, así como biofertilizantes 20 g de micorriza (*Glomus fasciculatum* y *Glomus cubense*) y 1 g de *Azospirillum*. Para la fertilización química, se empleó la dosis recomendada por Lozano-Contreras et al. (2013), que consiste en 120N-80P-00K (Villegas-Aparicio, 2018).

En cuanto al riego, fue determinada por la capacidad de campo. Se aplicó un litro de agua a la maceta y se prolongaron que 800 ml fueron retenidos. Luego, se demostró que la maceta se secará hasta alcanzar su punto crítico, el cual se demostró a los siete días; este período se estableció

como el momento en que la planta entró en estrés hídrico. Para las plantas sin estrés hídrico, se realizó el riego cada tercer día, mientras que, para aquellas con estrés hídrico, se estableció un riego cada siete días (Villegas-Aparicio, 2018).

Los autores encontraron valores elevados de índice de vigor (IV) y porcentaje de germinación (% G) en las semillas inoculadas con una combinación de cepas de micorriza y *Azospirillum*. Estas semillas presentaron un índice de velocidad de germinación de 4.07 plantas y una tasa de germinación del 50.83%. Esto podría atribuirse a la presencia de bacterias promotoras de fitohormonas en los biofertilizantes utilizados (Villegas-Aparicio, 2018).

Al analizar los datos, se observa que las plantas fertilizadas con fertilizante químico tuvieron un rendimiento destacado en comparación con otros tipos de fertilización. Sin embargo, si nos centramos en la producción de hojas para la alimentación del ganado, se encontró que las plantas tratadas con micorrizas y la combinación de micorrizas 1 en asociación con *Azospirillum* presentó la mayor producción, alcanzando 2 toneladas por hectárea ($t\ ha^{-1}$) de hoja verde y un rendimiento total de $6\ t\ MS\ ha^{-1}$ (Villegas-Aparicio, 2018).

En cuanto a la relación entre raíz y parte aérea, se demostró que las plantas no respondieron significativamente a los tratamientos aplicados, lo que indica que no mostró una fuerte relación entre las raíces y la parte aérea. Esta falta de respuesta puede atribuirse a diversas restricciones en el crecimiento de las raíces, como el tipo de suelo, ya que *Brachiaria brizantha* se caracteriza por tener raíces profundas, y la edad de las plantas, ya que los hongos suelen germinar primero y luego colonizar las raíces. En cuanto al suministro de agua, se encontró que la producción de hojas y el rendimiento total fueron superiores en las plantas que no experimentaron estrés hídrico (Villegas-Aparicio, 2018).

La investigación demostró que la aplicación de biofertilizantes microbianos, particularmente aquellos que promueven la simbiosis con HMA, puede mejorar significativamente el aumento en el rendimiento de los forrajes. Esto permite establecer praderas utilizando el cultivar *Mulato II*, que ofrece rendimientos superiores en comparación con el cultivar Insurgente, incluso en condiciones de bajo suministro de agua. Estos resultados son especialmente beneficiosos en épocas de sequía, ya que tienen forraje disponible y contribuyen a mejorar la productividad del suelo mediante la fijación biológica de minerales (Villegas-Aparicio, 2018). En síntesis, los resultados obtenidos en esta investigación demuestran que la utilización de biofertilizantes puede ser una estrategia efectiva para mejorar la producción de forraje y enfrentar los desafíos de la sequía. Además, el beneficio adicional de la fijación biológica de minerales contribuye a la mejora de la productividad del suelo y, potencialmente, a la sostenibilidad del sistema de producción (Villegas-Aparicio, 2018).

Otra investigación realizada en el departamento del Guaviare, ubicada exactamente en la intersección de la Orinoquia y Amazonia colombiana a 240 m.s.n.m, donde el clima es bosque húmedo tropical, suelos de origen sedimentario y se caracterizan por ser poco evolucionados, por presentar acidez, baja fertilidad, bajos contenidos de materia orgánica, deficiente en P, altos contenidos de aluminio y susceptibilidad a la degradación física, química y microbiológica; analizó las micorrizas como estrategia de mejoramiento nutricional de pasturas de las especies *Brachiaria decumbens*, *Brachiaria dictyoneura* y especies frutales de las especies arazá, borjón y chontaduro, se llevaron a cabo ensayos en parcelas. Los tratamientos aplicados consistieron en la aplicación de una población de micorrizas nativas del Guaviare, una población de micorrizas introducidas (*Aculospora longula*, *Acaulospora spinosa* y *Glomus clarum*) y tres niveles de fertilización (0-

50%-100%) y un testigo con suelo natural desinfectado y otro sin desinfectar (Salamanca Solis, 1999).

La multiplicación de esporas de HMA nativos del Guaviare e introducidas, se realizó en un invernadero, en materas con suelo de terraza alta, desinfectado, donde se usó *Penicetum glaucum* como cultivos hospedero y después se recolectó el suelo más las raíces que contenía la población de HMA asociados a *Brachiaria decumbens* y de las especies frutales arazá, borjón y chontaduro con una densidad de 30 esporas/g suelo, que fue aplicado como dosis por planta.

La evaluación de forraje verde (g/m^2) y producción de materia seca de la pastura se realizó en la 15 semana de establecidas las pasturas y posteriormente, se efectuó un corte de uniformidad del pasto a 10 cm de la superficie del suelo. Por otro lado, para evaluar el desarrollo de las especies frutales, se sembraron semillas previamente desinfectadas y lavadas (Salamanca Solis, 1999)

En la investigación, se describió la simbiosis entre las micorrizas y las raíces de las plantas de pasturas y especies frutales donde encontraron que el mayor porcentaje de infección de las raíces se presentó en el pasto *Brachiaria decumbens* (Aprox. 73%), lo cual confirmó que las gramíneas son micotróficas dependientes, propiedad que permite un mejor establecimiento de las pasturas en suelos ácidos y de baja fertilidad (Salamanca Solis, 1999) . Seguido de esto, para la contribución con el manejo sostenible de pasturas en el área de colonización del Guaviare, en esta investigación se realizó un estudio de las micorrizas como alternativa para el mejoramiento de la producción de forraje y calidad nutricional de las pasturas donde predomina el *Brachiaria decumbens* con una participación de siembra del 73%. Los resultados indicaron una mayor cobertura del suelo con *Brachiaria decumbens* con respecto a *Brachiaria dictyoneura* en las diferentes edades de las pasturas (10, 15 y 21 semanas). También se observó la acumulación de

materia seca, donde el pasto *Brachiaria decumbens* presentó mayor acumulación con 2.330 kg/ha con respecto a *Brachiaria dictyoneura* con 1.365 kg/ha.

Al analizar el contenido de nutrientes en el tejido vegetal de las pasturas, los resultados indicaron mayor eficiencia en la absorción de nutrientes del pasto *Brachiaria decumbens* con respecto a *Brachiaria dictyoneura*, con un incremento relativo de N= 68.7%, P₂O₅=63.9%, K₂O = 67.4%, Ca= 86.5%, S=34.9%, Mg= 18.2%, Zn= 65.6%, Cu=75.5%, B=37.26%. La mayor eficiencia de inóculo de las micorrizas nativas con respecto a las introducidas tuvo diferencias significativas de las micorrizas en el contenido de P en el tratamiento con suelo natural (15.9 kg/ha/ P₂O₅) y micorrizas nativas (14,6 kg/ha/ P₂O₅) con respecto a las micorrizas introducidas (12,1 kg/ha/ P₂O₅). Dado esto, en el estudio se concluyó que el alto porcentaje de colonización de las raíces de HMA por gramo de suelo rizosférico de las especies frutales y *Brachiaria decumbens* indican una efectiva actividad simbiótica. Además *Brachiaria decumbens* se encuentra una mayor diversidad de HMA específicamente del género *Glomus* en concordancia con lo reportado por Villegas-Aparicio, (2018). Hay evidencia que el uso de biofertilizantes microbianos, especialmente aquellos que fomentan la simbiosis con HMA en este caso del género *Glomus*, tiene un impacto positivo y significativo en el incremento del rendimiento de los forrajes (Salamanca Solis, 1999).

Cañizares et al., (2015) evaluó cómo la inoculación micorrícica arbuscular puede contribuir a la reducción de la fertilización fosfórica en *Brachiaria decumbens* cv. *Basilisk*. Consideraron cuatro dosis de fertilización fosfórica: 0, 30, 60 y 90 kg de P₂O₅ ha/año. Estas dosis se aplicaron de forma individual y también combinadas con la inoculación de la cepa de HMA *Glomus cubense*, previamente seleccionada por su alta eficiencia. El diseño experimental utilizado fue un arreglo factorial 4x2 en un diseño de bloques al azar, con cuatro repeticiones.

Se aplicó fertilizante fosfórico en diferentes dosis durante la siembra y a los 12 meses posteriores. Todos los tratamientos recibieron una cantidad fija de 210 kg de N por hectárea por año, divididos en dosis de 35 kg ha⁻¹ en la siembra y después de cada corte, y 100 kg de K₂O por hectárea por año, aplicados en una sola dosis en la siembra ya los 12 meses. Se utilizó superfosfato triple, urea y cloruro de potasio como portadores de nutrientes. La selección de las dosis y frecuencias de aplicación del fertilizante fosfórico, así como de los fondos fijos de N y K₂O, se basó en los requisitos del cultivo, los niveles de nutrientes en el suelo, el número de cortes anuales y el rendimiento esperado. Para la inoculación micorrícica, se extrajo la cepa de hongo micorrícico arbuscular INCAM-4 de la especie *Glomus cubense*, también conocida como *Glomus hoi-like*, debido a su alta eficiencia en ensayos similares. Se aplicó un inoculante sólido certificado que contenía 25 esporas por gramo de sustrato. La inoculación se realizó en el momento de la siembra utilizando el método de recuperación de semillas (Cañizares et al., 2015).

Dentro de los resultados se encontró que la aplicación de fertilizante fosfórico no tuvo efecto en las variables mencionadas, excepto en el tratamiento en el que se combinó *G. cubense* con la dosis más alta de P₂O₅. En este caso, se observaron niveles más bajos de colonización y densidad visual, así como una menor cantidad de esporas en comparación con los otros tratamientos inoculados. Además, en el estudio se confirmó la eficacia de *G. cubense* para promover una simbiosis micorrícica adecuada y, como resultado, una respuesta agronómica favorable en el pasto. Estos aspectos ya se habían comprobado previamente en gramíneas forrajeras del género *Brachiaria* y en otras plantas cultivadas en agroecosistemas con suelos similares a los utilizados en este experimento (Cañizares et al., 2015).

Con base a estos resultados, se pudo concluir que la inoculación de una cepa eficiente de HMA aumenta las estructuras micorrícicas y reduce la necesidad de aplicar fertilizante fosfórico

en el pasto *Brachiaria decumbens*, cv. *Basilisco* (Tabla 4), al menos durante el primer año de establecimiento. Por lo tanto, el manejo de los HMA se presenta como una opción económica y ecológicamente viable para reducir los costos de fertilización de los pastos y los riesgos de contaminación ambiental asociados con la aplicación extensiva y sistemática de fertilizantes en estos cultivos (Villegas-Aparicio, (2018) y Noda, (2009)).

En síntesis, los resultados de esta investigación respaldan la importancia de los HMA como una herramienta clave para el mejoramiento de los pastos en el trópico bajo colombiano. Estas asociaciones simbióticas brindan beneficios significativos en términos de captación de nutrientes, resistencia al estrés y eficiencia en el uso del agua (Villegas-Aparicio, 2018). Además, se ha identificado el uso de los HMA como una alternativa de biofertilizantes para los pastos ganaderos, lo que contribuye a una producción más sostenible y rentable. Estos hallazgos subrayan la relevancia de promover el uso de las micorrizas arbusculares en la práctica ganadera del trópico bajo colombiano para mejorar la productividad y la sostenibilidad en este contexto. Implementar estrategias que fomenten la incorporación de las micorrizas arbusculares en la producción de pastos ganaderos podría tener un impacto significativo en la mejora de la calidad de los pastos y la sostenibilidad de la industria ganadera en el trópico bajo colombiano (Noda, 2009).

La inoculación de las MA en los pastos *Brachiaria decumbens* y *Brachiaria brizantha* ha demostrado aumentar la productividad y la calidad de la biomasa forrajera, lo que se traduce en un mayor rendimiento ganadero (Avelar Lizama M. & Vásquez G., (2001) y Coloma Panata, (2015)). Al mejorar la absorción de nutrientes y promover un crecimiento más vigoroso (Beltrán Brito, 2016) (Tabla 4), los HMA contribuyen a la producción de pastos más nutritivos y de mejor calidad para el ganado. Además, el uso de los HMA reduce la dependencia de fertilizantes químicos, lo

que resulta en beneficios tanto ambientales como económicos para los productores ganaderos (Noda, (2009) y Salamanca Solis, (1999)).

Tabla 4.

Características reportadas de la asociación de HMA y algunas especies de pastos del trópico alto y bajo.

Tipo de pasto	Característica de la simbiosis	Beneficio reportado	País	Autor
<i>Brachiaria decumbens</i> <i>cv. Señal</i>	Mayor presencia de HMA a través de una red de hifas interconectadas.	Incrementa las estructuras micorrícicas y reduce la necesidad de aplicar fertilizante fosfórico al pasto	La Habana, Cuba	(González et al., 2007)
		<i>Brachiaria decumbens.</i>		
<i>Brachiaria decumbens</i>	Asociación mutualista a través de estructuras llamadas hifas.	Mejores rendimientos de la altura y MS de planta, mejores resultados en relación beneficio/Costo.	Ecuador Honduras	
<i>Brachiaria decumbens</i>	Inoculación con HMA para la reducción de la fertilización fosfórica en <i>Brachiaria decumbens</i>	Reducción de la necesidad de aplicar fertilizante fosfórico al pasto	Cuba	Cañizares et al., (2015)
		<i>Brachiaria decumbens, cv. Basilisk.</i>		
<i>Brachiaria decumbens</i>	Formación de una red de hifas (red de absorción) que se extiende en el suelo y	Mayores rendimientos de biomasa, mayor postración de la planta y aumento en la	Ecuador	Beltrán Brito, (2016)

	establecen una simbiosis mutualista con las raíces del pasto.	resistencia de las plantas a condiciones de estrés, como la sequía y la salinidad del suelo.		
	Asociación mutualista entre los hongos micorrícicos y las raíces de la planta. Estos hongos forman una red de filamentos llamados hifas que se extienden en el suelo y se conectan con las raíces de la planta, facilitando la absorción de nutrientes y agua.	Producción de biomasa en MS intensa provocando mayor crecimiento aéreo de las plantas, mayores rendimientos de forraje en épocas de sequía y mejor productividad del suelo mediante la fijación biológica de minerales.	México	Villegas-Aparicio, (2018)
<i>Brachiaria brizantha</i>	Asociación mutualista entre las raíces del pasto y los HMA, por medio de estructuras llamadas hifas	Mayor rendimiento de follaje del pastos y una mayor productividad del cultivo.	Honduras	Avelar Lizama M. & Vásquez G., (2001)

Fuente: Elaboración propia

Conclusión

El uso de micorrizas arbusculares en combinación con abonos orgánicos o biofertilizantes representa una alternativa sostenible para el mejoramiento de pastos en el trópico bajo y alto colombiano.

Los HMA mejoran la capacidad de las plantas para absorber nutrientes como el fósforo, lo cual es indispensable para un buen crecimiento y producción de biomasa en los pastos *Brachiaria decumbens* y *Brachiaria brizantha*.

Las micorrizas arbusculares reduce la dependencia de fertilizantes químicos, contribuyendo con beneficios ambientales al disminuir la contaminación del suelo y el agua, lo cual resulta indispensable tener en cuenta para implementar en ecosistemas degradados por minería en Colombia.

Los HMA tienen la capacidad de mejorar la composición del suelo y de retención de agua, lo que resulta especialmente importante en regiones tropicales con periodos prolongados de sequía. Esto permite que los pastos *Brachiaria decumbens* y *Brachiaria brizantha* con mayor predominio en el trópico bajo colombiano sean más resistentes a condiciones de estrés hídrico y puedan mantener un buen crecimiento y producción durante épocas secas.

En síntesis, el uso de HMA en el mejoramiento de pastos en el trópico bajo colombiano podría ser una alternativa sostenible que mejora la nutrición de las plantas, reduce la dependencia de fertilizantes químicos, controla patógenos, mejora la estructura del suelo y aumenta la resistencia a condiciones de sequía. Dado esto se podrían obtener beneficios tanto económicos como ambientales, promoviendo una producción ganadera más eficiente y sostenible. Sin embargo, futuras investigaciones se hacen necesarias para conocer con claridad los efectos del mejoramiento de pastos de las especies *Brachiaria decumbens* y *Brachiaria brizantha* con el uso de micorrizas arbusculares en el trópico colombiano como los predios del Bajo Cauca antioqueño.

Referencia

- AGROACTIVO. (2023a). Ficha tecnica *Brachiaria brizantha marandú*. *Agroactivo*.
<https://agroactivocol.com/producto/material-vegetal/semillas/pastos/brachiaria-brizantha-marandu/>
- AGROACTIVO. (2023b). *Ficha tecnica Brachiaria decumbens.pdf*. AGROACTIVO.
<https://agroactivocol.com/wp-content/uploads/2018/04/FT-BRACHIARIA-DECUMBENS.pdf>
- Argüello-Rangel, J., Mahecha-Ledesma, L., & Angulo-Arizala, J. (2019). Arbustivas forrajeras: Importancia en las ganaderías de trópico bajo Colombiano. *Agronomía Mesoamericana*, 899-915. <https://doi.org/10.15517/am.v30i3.35136>
- Avelar Lizama M., P. A., & Vásquez G., J. (2001). *Evaluación biológica y económica del uso de micorrizas (Mycoral®) en cuatro pastos*. [Escuela Agrícola Panamericana, Zamorano.].
<https://bdigital.zamorano.edu/handle/11036/1497>
- Barrera B, S. E. (2009). El uso de hongos micorrizícos arbusculares como alternativa para la agricultura. *Biotecnología en el Sector Agropecuario y Agroindustrial*, 7(1), 123-132.
- Begum, N., Qin, C., Ahanger, M. A., Raza, S., Khan, M. I., Ashraf, M., Ahmed, N., & Zhang, L. (2019). Role of Arbuscular Mycorrhizal Fungi in Plant Growth Regulation: Implications in Abiotic Stress Tolerance. *Frontiers in Plant Science*, 10.
<https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fpls.2019.01068>
- Beltrán Brito, J. D. (2016). *Efecto de biofertilizantes humus más micorrizas en la producción forrajera de Brachiaria decumbens (Pasto dallis)* [BachelorThesis, Escuela Superior Politécnica de Chimborazo]. <http://dspace.esPOCH.edu.ec/handle/123456789/5376>
- Blanco, F., & Salas, E. (1997). Micorrizas en la agricultura: Contexto mundial e investigación realizada en Costa Rica. *Agronomía costarricense*, 21(1), 55-67.
- Bolaños-B, M. M., Rivillas-Osorio, C. A., & Suárez-Vásquez, S. (2000). *IDENTIFICACIÓN DE MICORRIZAS ARBUSCULARES EN SUELOS DE LA ZONA CAFETERA COLOMBIANA*.
- Cano Intriago, A. R. (2013). *A REVIEW OF INTERACTION OF BENEFICIAL MICROORGANISMS IN PLANTS: Mycorrhizae, Trichoderma spp. And Pseudomonas spp.* <https://repositorio.uteq.edu.ec/handle/43000/546>
- Cañizares, P. J. G., Pedroso, J. F. R., Rosemond, O. M., & Espinosa, R. R. (2015). *CONTRIBUCIÓN DE LA INOCULACIÓN MICORRÍZICA ARBUSCULAR A LA REDUCCIÓN DE LA FERTILIZACIÓN FOSFÓRICA EN Brachiaria decumbens*. 36(1).
- Coloma Panata, R. E. (2015). *Evaluación del comportamiento forrajero de la Brachiaria decumbens (Pasto dalis), con la aplicación de diferentes niveles de micorrizas y una base*

- estándar de abono orgánico* [BachelorThesis, Escuela Superior Politécnica de Chimborazo]. <http://dspace.esPOCH.edu.ec/handle/123456789/5195>
- Cuenca, G., Cáceres, A., Oirdobro, G., Hasmy, Z., & Urdaneta, C. (2007). Las micorrizas arbusculares como alternativa para una agricultura sustentable en áreas tropicales. *Interciencia*, 32(1), 23-29.
- DANE. (2019). *Boletín técnico Encuesta nacional agropecuaria (ENA) 2019*.
- FAO. (2020, mayo 7). *Uso de la tierra en la agricultura según las cifras*. Food and Agriculture Organization of the United Nations. <http://www.fao.org/sustainability/news/detail/es/c/1279267/>
- FAO. (2023). *¡Que fluyan los beneficios!* LivestockEnv. <http://www.fao.org/livestock-environment/es>
- Fedegán. (2015, mayo 13). *Los 5 mejores pastos para el ganado en el trópico bajo | Fedegán*. <https://www.fedegan.org.co/noticias/los-5-mejores-pastos-para-el-ganado-en-el-tropico-bajo>
- García-Parra, M., Cuellar-Rodríguez, L. Á., & Balaguera-López, H. E. (2022). Arbuscular mycorrhiza symbiosis in quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.): A systematic review. *Revista Facultad Nacional de Agronomía - Medellín*, 75(1), 9853-9865.
- Genre, A., Lanfranco, L., Perotto, S., & Bonfante, P. (2020). Unique and common traits in mycorrhizal symbioses. *Nature Reviews Microbiology*, 18(11), Article 11. <https://doi.org/10.1038/s41579-020-0402-3>
- Gobierno de Colombia. (2019). *Misión de sabios.pdf*. https://minciencias.gov.co/sites/default/files/libro_mision_de_sabios_digital_1_2_0.pdf
- González, P. J., Fernández, D., & Plana, R. (2007). *Efectos del antecedente cultural en las micorrizas nativas y la productividad del pasto brachiaria (Brachiaria decumbens cv. Señal)*. 30(1), 10.
- González, P. J., Plana, R., Rivera, R., Fernández, F., & Arbola, J. (2008). Efectos de la inoculación de hongos micorrícicos arbusculares en pastos del género *Brachiaria*, cultivados en suelo Pardo Mullido. *Revista Cubana de Ciencia Agrícola*, 42(1), 101-106.
- ICA. (2022). *Instituto Colombiano Agropecuario—ICA*. <https://www.ica.gov.co/areas/pecuaria/servicios/epidemiologia-veterinaria/censos-2016/censo-2018>
- Jarma Orozco, A., Maza Angulo, L., Pineda Pérez, A., & Hernández Ciodaro, J. (2012). Aspectos fisiológicos y bromatológicos de *Brachiaria humidicola*. *CES Medicina Veterinaria y Zootecnia*, 7(1), 88-99.
- Loo, W. T., Chua, K.-O., Mazumdar, P., Cheng, A., Osman, N., & Harikrishna, J. A. (2022). Arbuscular Mycorrhizal Symbiosis: A Strategy for Mitigating the Impacts of Climate

- Change on Tropical Legume Crops. *Plants*, 11(21), Article 21.
<https://doi.org/10.3390/plants11212875>
- Messa, V. R., & Savioli, M. R. (2021). Improving sustainable agriculture with arbuscular mycorrhizae. *Rhizosphere*, 19, 100412. <https://doi.org/10.1016/j.rhisph.2021.100412>
- Motta-Delgado, P. A., Martínez, H. E. O., & Rojas-Vargas, E. P. (2019). *Indicadores asociados a la sostenibilidad de pasturas: Una revisión*. 22.
- Narro, A. (2009). *CARACTERISTICAS GENERALES, ESTABLECIMIENTO, RENDIMIENTO PRODUCCION DE SEMILLA, PLAGAS Y ENFERMEDADES DEL GENERO BRACHIARIA*. 69. Pdf.
- Noda, Y. (2009). Las Micorrizas: Una alternativa de fertilización ecológica en los pastos. *Pastos y Forrajes*, 32(2), 1-10.
- ONU. (2015). Objetivos y metas de desarrollo sostenible. *Desarrollo Sostenible*.
<https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/objetivos-de-desarrollo-sostenible/>
- ONU. (2023). *Apoyar el desarrollo sostenible y la acción climática | Naciones Unidas*. United Nations; United Nations. <https://www.un.org/es/our-work/support-sustainable-development-and-climate-action>
- Pérez C, A., & Peroza C, V. (2013). Micorrizas arbusculares asociadas al pasto angleton (*Dichathium aristatum* Benth) en fincas ganaderas del municipio de Tolú, Sucre-Colombia. *Revista MVZ Córdoba*, 18(1), 3362-3369.
- Plassard, C., Becquer, A., & Garcia, K. (2019). Phosphorus Transport in Mycorrhiza: How Far Are We? *Trends in Plant Science*, 24(9), 794-801.
<https://doi.org/10.1016/j.tplants.2019.06.004>
- Restrepo Giraldo, K. J., Montoya Correa, M. I., Henao Jaramillo, P., Gutiérrez, L. A., Molina Guzmán, L. P., Restrepo Giraldo, K. J., Montoya Correa, M. I., Henao Jaramillo, P., Gutiérrez, L. A., & Molina Guzmán, L. P. (2019). Caracterización de hongos micorrícicos arbusculares de suelos ganaderos del trópico alto y trópico bajo en Antioquia, Colombia. *Idesia (Arica)*, 37(1), 35-44. <https://doi.org/10.4067/S0718-34292019005000301>
- Riopedre-Galán, T., Delgado-Álvarez, A., Cabrera-Rodríguez, J. A., & Cartaya-Rubio, O. E. (2021). *Relación entre los metales pesados y los hongos formadores de micorrizas arbusculares*. 42, 14.
- Salamanca Solis, C. R. (1999). *Las micorrizas como estrategia de mejoramiento nutricional de pasturas y especies frutales en el Guaviare*.
<https://repository.agrosavia.co/handle/20.500.12324/21177>
- SIPRA. (2023). *Aptitud de producción pastos Braquiaria común y basiisk (Brachiaria decumbens) y otros*. <https://sipra.upra.gov.co/nacional>

UPRA. (2017). *Planificación del ordenamiento productivo y social de la propiedad*. Unidad de Planificación Rural Agropecuaria.
https://drive.google.com/a/upra.gov.co/file/d/0B41eMRb76ohEZURRR11VTHAzY1E/view?usp=drive_web&usp=embed_facebook

Villegas-Aparicio, Y. (2018). EFECTO DE BIOFERTILIZANTES MICROBIANOS EN EL CRECIMIENTO DE *Brachiaria brizantha* (Trin) Griseb. *Agro Productividad*, 11(5), 76-81.