

TESINA DE GRADO DE LICENCIATURA EN CIENCIAS BIOLÓGICAS

Micorrizas arbusculares, hongos septados oscuros y otros indicadores de salud del suelo en suelos pertenecientes a diferentes grupos CONEAT.



ESTUDIANTE: MALENA ETCHANDY

ORIENTADORAS: FABIANA PEZZANI y SILVINA GARCÍA



Grupo Ecología de Pastizales (GEP)

Facultad de Ciencias – Facultad de Agronomía, UDELAR.

Índice

Contenido

RESUMEN	4
1. INTRODUCCIÓN	6
1.1 Calidad y salud del suelo	6
1.2 Indicadores de salud de suelo	7
1.3 Bioindicadores	8
1.4 Bioindicadores enzimáticos	10
1.5 Interacciones planta – microorganismos y su relación con los bioindicadores del suelo	12
1.6 Micorrizas como indicadores de salud del suelo	13
1.7 Hongos endófitos septados oscuros	16
1.8 El índice CONEAT como sistema de clasificación de suelos en Uruguay y su relación con indicadores del suelo	17
1.9 Campo natural en Uruguay y <i>Paspalum notatum</i> como modelo de estudio para el estudio de las interacciones planta - microorganismos	19
2. OBJETIVOS	21
3. MATERIALES Y MÉTODOS	22
3.1 Área de estudio	22
3.2 Trabajo de campo	26
3.3 Trabajo de laboratorio	26
3.4 Análisis estadístico	28
4. RESULTADOS	28
4.1 Micorrizas arbusculares	29
4.2 Hongos septados oscuros	33
4.3 Relación entre la presencia de micorrizas arbusculares y septados oscuros con otros bioindicadores	35
5. DISCUSIÓN	37
6. CONCLUSIONES	44
7. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	46

AGRADECIMIENTOS

A mis tutoras Fabiana Pezzani y Silvana García por el apoyo constante, guía y disposición a lo largo del trabajo. A los dueños de los predios por su disponibilidad y buen recibimiento. Al Instituto Plan Agropecuario y Laboratorio Sosei por su contribución. A mi familia y amigas por el apoyo.

RESUMEN

El pastizal o campo natural cubre aproximadamente el 60% del territorio de Uruguay, constituye la base forrajera de la actividad ganadera pastoril y proporciona otros importantes servicios ecosistémicos. El índice CONEAT se utiliza en Uruguay para clasificar los suelos según su productividad ganadera. Por otro lado, indicadores biológicos de salud del suelo permiten evaluar la capacidad del suelo para ejercer funciones claves que permitan el funcionamiento de los ecosistemas.

El objetivo del presente trabajo fue estudiar la presencia de micorrizas arbusculares (HMA) y hongos septados oscuros DSE) en una gramínea nativa de los pastizales de Uruguay, así como la relación con indicadores de salud del suelo, en sistemas pastoriles con distintos tipos de suelos de acuerdo con la clasificación CONEAT. En el otoño de 2022 se muestrearon raíces de la gramínea *Paspalum notatum* en tres establecimientos, que incluyeron dos potreros cada uno. Dentro de cada potrero se estudiaron a su vez situaciones con dos tipos de suelo de acuerdo a sus índices CONEAT. Los grupos de suelo relevados fueron 2.11a, 2.12, 5.02b, 5.4, 10.3 y 10.16. Se utilizaron datos provenientes de estudios previos, realizados en los mismos potreros, para analizar el vínculo con otros bioindicadores: biomasa de hongos, relación hongos:bacterias y actividad fosfatasa.

Se evidenció que la colonización micorrícica varió según los grupos de suelos definidos por el índice CONEAT. Por otro lado, los hongos septados oscuros, en general, no mostraron variaciones significativas con respecto al índice CONEAT. No se encontró relación entre la colonización por HMA y DSE con la biomasa de hongos del suelo. Sin embargo, se identificó una relación negativa entre la colonización micorrícica y la relación H:B, evidenciándose un menor porcentaje de colonización micorrícica en suelos con relaciones H:B más altas. En cuanto a los DSE, no se observó relación con esta variable. Además, el estudio indicó que tanto la colonización por HMA como por DSE se relacionó de forma inversa con la actividad fosfatasa, siendo menor la colonización en presencia de mayor actividad fosfatasa.

Este estudio explora la relación entre la presencia de micorrizas y hongos septados oscuros con otros bioindicadores de salud del suelo tomando como referencia suelos pertenecientes a diferentes grupos CONEAT. La integración del índice

CONEAT con bioindicadores puede proporcionar una visión más holística de la salud del suelo en sistemas productivos.

Palabras clave: micorrizas arbusculares; hongos septados oscuros; índice CONEAT; bioindicadores, pastizales.

1. INTRODUCCIÓN

1.1 Calidad y salud del suelo

Los suelos se consideran uno de los mayores reservorios de biodiversidad, debido a la gran cantidad de organismos y nutrientes que albergan. Estos organismos tienen una función fundamental en la prestación de muchos servicios ecosistémicos (FAO, 2023), los cuales hacen posible la vida en la tierra (Pereira, 2008).

A pesar de la importancia del suelo, en general y para la humanidad, el interés por el tema de la calidad o salud del suelo es relativamente reciente, surgiendo a fines de los años ochenta. Fue innovador resaltar la importancia del suelo más allá de la producción de alimentos, para el funcionamiento global de los ecosistemas (Mendes, 2018).

Particularmente con respecto al concepto de salud del suelo, puede entenderse al suelo como un sistema vivo y dinámico, cuyas funciones están mediadas por la diversidad de organismos que lo habitan y que requieren un adecuado manejo y conservación para su funcionalidad (Bünemann, 2018).

El funcionamiento del suelo, a su vez, está ligado a sus aspectos químicos, físicos y biológicos, siendo la estructura biológica el componente clave que mueve estos engranajes (Mendes, 2018). La salud del suelo, según varios autores y estudios, depende de estas propiedades esenciales para una productividad sostenible y un mínimo impacto ambiental. Implica que el suelo funcione dentro de los límites del ecosistema, mejorando la sostenibilidad ambiental y la salud humana, además de mantener la productividad agrícola (Acosta & Ari, 2022).

Un suelo saludable se caracteriza por una buena estructura, profundidad adecuada para la absorción de nutrientes y agua, almacenamiento y drenaje eficientes del agua, suministro equilibrado de nutrientes, baja presencia de patógenos y plagas, abundancia de organismos benéficos (claves para el funcionamiento del suelo; descomposición orgánica, ciclado de nutrientes, estructura del suelo y supresión biológica de plagas en las plantas), resistencia a la degradación y capacidad de recuperación rápida luego de eventos adversos (Acosta & Ari, 2022).

Los conceptos de salud y calidad del suelo han sido ampliamente discutidos, la diferencia en los conceptos radica en el objetivo del uso del suelo (Ortiz et al., 2015). La calidad debe interpretarse como la utilidad del suelo para un propósito

específico en una escala amplia de tiempo (Bautista et al. 2004) mientras que el concepto de salud de suelo puede independizarse del fin productivo (Ortiz et al., 2015). El estado de las propiedades dinámicas del suelo como contenido de materia orgánica, diversidad de organismos, o productos microbianos en un tiempo particular constituyen la salud del suelo (Bautista et al., 2004).

Por tanto, la salud del suelo va más allá de su capacidad para producir. Es posible tener suelos de baja calidad, pero cuya alta productividad esté relacionada con insumos en dosis muy superiores a las recomendadas para suelos bien manejados, condición no sostenible a largo plazo (Mendes, 2018).

Para aproximarse al conocimiento sobre la salud del suelo, pueden evaluarse diversos indicadores que reflejan tanto la capacidad productiva del suelo como su capacidad de regenerarse debido a los contaminantes que recibe (Acosta & Ari, 2022).

1.2 Indicadores de salud de suelo

Los indicadores son herramientas que permiten evaluar la capacidad del suelo de funcionar y ejercer funciones claves para la conservación del ecosistema. Estos informan a partir de parámetros mensurables acerca de la naturaleza de los cambios perjudiciales y, por tanto, de la calidad del suelo (Giri & Varma 2020). En los sistemas de producción, por ejemplo, para la evaluación de la sustentabilidad es necesario disponer de indicadores que permitan determinar la calidad del suelo, a largo plazo, que permitan evaluar los cambios provocados por el manejo. Estudios previos han determinado que no puede medirse de manera directa la salud del suelo, sin embargo, se puede caracterizar midiendo propiedades específicas del suelo ya sean físicas, químicas y biológicas, considerando indicadores tales como: la textura, la dureza de la superficie, la capacidad de retención de agua, los agregados estables al agua, la materia orgánica, pH, la respiración del suelo, el carbón activo y el análisis estándar de nutrientes. También se consideran indicadores a poblaciones de hongos, bacterias, nematodos y otros organismos (Acosta & Ari, 2022). Los atributos físicos, químicos y biológicos tienen una estrecha relación entre sí y participan de manera activa en la producción y la estabilidad de los agroecosistemas (García et al., 2012).

Hay algunas características que deben cumplir los indicadores de calidad del suelo, entre ellas: ser fáciles de medir y comprender, ser integradores, reflejar el atributo

de sostenibilidad que se quiere evaluar, ser adecuados al nivel de análisis y al sistema estudiado, ser preferentemente aplicables a un rango de ecosistemas y condiciones y permitir evaluar diferencias y cambios entre los sistemas (García et al., 2012).

Los indicadores deben ser sensibles a los cambios que sufre el suelo (tanto en procesos de degradación como de recuperación), es deseable que integren procesos químicos, físicos y biológicos y debe haber una alta correlación con los procesos del ecosistema (García et al., 2012). A continuación, se definen estos tres tipos de indicadores (Tabla 1).

Tabla 1. Características y ejemplos de los tres tipos de indicadores de salud del suelo (Navas, 2010; García et al 2012).

<p>Indicadores físicos</p>	<p>Propiedades físicas que reflejan la manera en que el suelo acepta, retiene y transmite agua a las plantas, así como las limitaciones que se pueden encontrar en el crecimiento de las raíces, la emergencia de las plántulas, la infiltración o el movimiento del agua dentro del perfil y que además estén relacionadas con el arreglo de las partículas y los poros.</p>	<ul style="list-style-type: none"> -Estructura -Densidad aparente -Estabilidad de agregados -Infiltración -Profundidad del suelo superficial -Capacidad almacenamiento del agua
<p>Indicadores químicos</p>	<p>Condiciones que afectan las relaciones suelo - planta, la calidad del agua, la capacidad amortiguadora del suelo, la disponibilidad de agua y nutrientes para las plantas y microorganismos.</p>	<ul style="list-style-type: none"> -Disponibilidad de nutrientes -Carbono orgánico -pH -Conductividad eléctrica -Capacidad de adsorción de fosfatos -Capacidad de intercambio de cationes -Cambios en la materia orgánica -Nitrógeno total y mineralizable -Fósforo - fosfatos
<p>Indicadores biológicos</p>	<p>Variables vinculadas a la estructura y el funcionamiento de los organismos</p> <p>Son los más sensibles</p> <p>No existen valores umbrales</p>	<ul style="list-style-type: none"> -Presencia de micro y macroorganismos -Funciones biológicas; tasa de respiración, actividad enzimática, descomposición de la materia orgánica, etc.

1.3 Bioindicadores

Los indicadores biológicos o bioindicadores del suelo son variables directamente vinculadas a la estructura y el funcionamiento de los organismos vivos que allí habitan; son descriptores de la salud y por lo tanto están estrechamente ligados a su

ambiente (Ortiz et al., 2015). En la actualidad, existen diversas técnicas para estimar los bioindicadores: fisiológicas, metabólicas, funcionales y moleculares. La elección de los bioindicadores clave depende de las preguntas planteadas (Bhaduri et al., 2022).

La principal ventaja que presentan los bioindicadores es que son más sensibles que los indicadores químicos y físicos, por tanto, detectan antes los cambios que ocurren en el suelo (Mendes, 2018). Los componentes bióticos del suelo reflejan rápidamente las alteraciones edáficas (Ortiz et al., 2015). En la Tabla 2 se presentan algunos de los bioindicadores más comunes.

El bioanálisis del suelo consiste en determinar algunos de esos indicadores vinculados a su funcionamiento biológico. Uno de los principales desafíos que ha habido que superar para el uso de bioindicadores en las evaluaciones de la calidad del suelo es la dificultad para interpretar los valores individuales de estos parámetros (Mendes, 2018).

Hasta hace poco tiempo resultaba difícil medir e interpretar de forma sencilla los bioindicadores, independientemente de un control o una referencia de comparación. A diferencia, por ejemplo, de los indicadores químicos de fertilidad, cuyos niveles (bajo, medio, adecuado, alto) ya están bien definidos para cada elemento y tipo de suelo (Mendes, 2018). Para los bioindicadores, no existe una tabla con valores umbrales por debajo o por encima del cual el sistema está en riesgo, como sucede, por ejemplo, con los contenidos de nutrientes (Ortiz et al., 2015). Aunque se ha avanzado en la investigación de varios bioindicadores, incluso en múltiples ambientes, en la mayoría aun no existen valores de referencia para el productor (Ortiz et al., 2015). Es decir, no se han definido valores que puedan separar claramente suelos con diferentes condiciones de calidad y sostenibilidad (Mendes, 2018). En este sentido, con el objetivo de ayudar en la interpretación de datos de bioindicadores, se pueden delimitar clases de suficiencia generando tablas específicas de interpretación, y establecer valores de referencia para los diferentes bioindicadores. Esto será útil, por ejemplo, para la toma de decisiones respecto a sistemas de manejo y/o prácticas de uso de suelo y sus impactos en la calidad del suelo. Para cada bioindicador estos límites críticos también pueden entenderse como los valores deseables que deben mantenerse para el normal funcionamiento del suelo (Mendes, 2018).

El bioanálisis puede entenderse como promovedor de prácticas conservacionistas. Por un lado, al alertar cuando sistemas de manejo degradan el suelo, demostrando que el mal manejo de la microbiota edáfica, tarde o temprano, resulta en pérdidas significativas de productividad. Por otro lado, como incentivo al revelar, por ejemplo, aumentos en la materia orgánica (Mendes, 2018).

Tabla 2. Bioindicadores de salud del suelo (Navas, 2010; Bautista et al., 2004; Bracamontes et al., 2018).

Indicador	A qué función se asocia	A qué tipo de organismos se asocia
Biomasa	Ciclo de nutrientes. Retención de Carbono. Hábitat para organismos. Energía de la materia orgánica	Hongos Bacterias
Relación Hongo: Bacteria	Hábitat para organismos Estado general de la cadena trófica del suelo	Hongos Bacterias
Actividades enzimáticas	Actividad biológica del suelo Ej fosfatasa: Liberación de fósforo - mineralización de Po	Hongos Bacterias
Respiración	Ciclo de Carbono Actividad microbiológica de suelo Actividad metabólica	Bacterias, hongos, algas (macro: insectos, lombrices, raíces, etc.)
Diversidad	Hábitat para organismos Regulador general de las funciones del suelo	Bacterias, hongos, nematodos, algas, otros.
Micorrizas arbusculares - Colonización de raíces - Micelio externo - Esporas (abundancia, diversidad, etc.)	Relaciones simbióticas Ciclo de nutrientes	Hongos, (raíces)

1.4 Bioindicadores enzimáticos

La determinación de la actividad enzimática del suelo es una de las formas de evaluar la actividad de los microorganismos. La actividad enzimática del suelo es el resultado de la suma de la actividad enzimática de los organismos vivos (plantas, microorganismos, animales) y de las enzimas asociadas a la fracción no viva en el suelo (Tecnal, s.f.).

Los microorganismos del suelo son responsables de la mineralización de compuestos orgánicos y de diversos ciclos biogeoquímicos. Influyen en la biodiversidad de los ecosistemas, incluida la diversidad vegetal. Son responsables de la productividad del suelo y de su estructura, y también afectan la circulación de los elementos en la naturaleza (Mencel et al., 2022).

La actividad de las enzimas depende de su abundancia, eficiencia catalítica y la presencia de otros compuestos. La eficiencia catalítica se ve afectada por las especies de microorganismos del suelo, la temperatura, el pH, la abundancia de agua y aire en el suelo y el contenido de compuestos minerales y orgánicos (Mencel et al., 2022).

En particular, las bacterias y los hongos del suelo participan de manera fundamental en procesos que aumentan la disponibilidad de fósforo (P) para las plantas. Una de las transformaciones que producen es la mineralización de fósforo orgánico (Po) a fósforo inorgánico (Pi) soluble (Fernández et al., 2008). La mineralización de Po es llevada a cabo por un grupo de enzimas conocidas como fosfatasas o fosfohidrolasas, que catalizan la hidrólisis de ésteres y de anhídridos de ácido fosfórico (Fernández et al., 2008). Las fosfatasas son responsables de estimular la transformación de compuestos orgánicos de fósforo en fosfatos inorgánicos, que son una forma disponible de este elemento para las plantas y los organismos del suelo (Mencel et al., 2022).

Las fosfatasas extracelulares son liberadas no sólo por algunos microorganismos del suelo, sino también por las raíces de las plantas. A su vez, existen enzimas libres que conservan sus propiedades una vez muerto el organismo del cual proceden. Invertebrados como las lombrices de tierra también liberan P. Sin embargo, se asume que las enzimas en el suelo provienen principalmente de la microbiota, debido a la importante cantidad de biomasa y en la elevada actividad metabólica que desarrollan en corto tiempo (Fernández et al., 2008).

Las fosfatasas ácidas (pH 4-6) se encuentran principalmente en suelos ácidos, mientras que las alcalinas predominan en suelos con pH básico (pH 8-10) (Fernández et al., 2008). La presencia de estas enzimas en el suelo es una medida de la mineralización del fósforo orgánico y de la actividad biológica del suelo. La fosfatasa ácida es secretada principalmente por las raíces de las plantas y los hongos. Muchas bacterias endofíticas, al secretar fosfatasas y ácidos orgánicos de

bajo peso molecular, facilitan la solubilización del fosfato y, por lo tanto, proveen P a las plantas (Mencel et al., 2022).

La actividad de la fosfatasa puede estudiarse mediante el recuento de las colonias bacterianas y fúngicas con esa actividad y de la evaluación de la actividad de la fosfatasa en el suelo. De esta manera se obtiene información acerca del potencial de los mismos para movilizar P orgánico (Fernández et al., 2008).

1.5 Interacciones planta – microorganismos y su relación con los bioindicadores del suelo

El componente biológico del suelo incluye microorganismos, órganos vegetales y fauna, y tiene una estrecha interrelación con componentes físicos y químicos, que influyen conjuntamente no sólo en la productividad y sostenibilidad de los sistemas agrícolas, sino también en otros servicios ecosistémicos (Mendes, 2018).

Las plantas no son receptores pasivos de nutrientes, sino que integran la información del ambiente para determinar inversiones subterráneas de carbono, como la producción y proliferación de raíces, la alteración en las tasas de exudación, la producción de compuestos secundarios, las formaciones de relaciones simbióticas con microorganismos (como hongos micorrízicos y bacterias) (Bonkowski, 2004).

Las plantas secretan al suelo exudados ricos en carbono, que estimulan la actividad microbiana, incluyendo bacterias y hongos. Estas interacciones microbianas en la rizosfera deben ser de fundamental importancia para que la planta justifique la asignación de carbono, que de otro modo podría destinar a sus propios tejidos, o competencia mejorar la habilidad competitiva de sus raíces por nutrientes disponibles (Bonkowski, 2004).

La composición y abundancia de microorganismos edáficos depende de las propiedades fisicoquímicas del suelo, de la disponibilidad de nutrientes, del tipo de suelo y de la comunidad vegetal (Mencel et al., 2022).

La simbiosis es una estrategia clave para el éxito de muchos grupos de organismos. Evolutivamente, las plantas requieren de la asociación con organismos especializados que favorecen su adaptación a ciertos ambientes, a la vez que les permite mantener un crecimiento y desarrollo adecuados (Alarcon et al., 2004). Las plantas deben distinguir entre simbioses mutualistas y patógenos y los simbioses

microbianos deben “comunicar su presencia” a las plantas hospedantes. Por lo cual, el intercambio recíproco de señales químicas entre la microbiota y las raíces es importante (Bonkowski, 2004).

Un bioindicador que aporta mucha información sobre la microbiota es la relación hongos-bacteria (H:B) que representa una medida comparativa de la proporción de la comunidad microbiana correspondiente a hongos y bacterias. El número de hongos generalmente es una variable más sensible que el número de bacterias, por lo tanto, la relación H:B es un buen indicador de los cambios que pueda tener el suelo. Velázquez (2023) reportó que el almacenamiento de carbono en el suelo depende de la relación H:B, si el suelo es dominado por hongos el almacenamiento de carbono será mayor, si la relación H:B disminuye el suelo comienza a perder carbono e indicaría un proceso de degradación del suelo.

1.6 Micorrizas como indicadores de salud del suelo

El término micorriza deriva de los vocablos griegos *mykos* y *rhiza*, que significan “hongo” y “raíz” respectivamente (FAO, 2023). Las micorrizas arbusculares son asociaciones simbióticas entre la mayoría de las plantas terrestres y hongos del Phylum Glomeromycota, y tienen un impacto importante en la estructura y procesos del ecosistema (Smith & Read 2008). Pueden considerarse bioindicadores ya que brindan información sobre las propiedades, características y procesos del suelo en el corto plazo, es decir, los cambios se ven reflejados rápidamente en la presencia de micorrizas en general y en particular en la abundancia de algunas estructuras fúngicas (Gupta, 2020).

Existen varios tipos de micorrizas, destacándose dos tipos principales: endomicorrizas y ectomicorrizas. Un tipo de endomicorriza son las micorrizas arbusculares. La denominación “arbuscular” deriva de una estructura fúngica característica que son los arbusculos, los cuales junto con las vesículas pueden utilizarse para identificar esta simbiosis (Smith & Read, 2008), aunque no necesariamente deben estar presentes vesículas para ser catalogadas así. Los arbusculos son órganos de intercambio de nutrientes entre la célula vegetal y el huésped fúngico, mientras que las vesículas (formadas por algunos géneros de estos hongos) constituyen reservorios de nutrientes, principalmente lípidos, presentes intercelularmente en la corteza de la raíz (Smith & Read 2008).

Los hongos micorrizógenos se benefician con los fotoasimilados sintetizados por la planta y a su vez permiten incrementar la adquisición de nutrientes beneficiosos para las plantas. Una de las principales funciones de estos hongos es la de extender la superficie de absorción en el suelo a través de sus hifas, lo cual hace que las plantas micorrizadas puedan incrementar la captación de nutrientes minerales, particularmente P y algunos otros elementos poco móviles en el suelo (Smith & Read 2008). Contribuyen a la absorción de micronutrientes como Mg, Cu y Zn en suelos donde se encuentran en formas menos solubles (Prieto et al., 2024). Esta asociación simbiótica generalmente considerada mutualista provee importantes beneficios: mejora la estructura del suelo, protege al sistema radicular frente a posibles patógenos, aumenta la productividad de las plantas y estimula el crecimiento y producción de biomasa aérea y radical (FAO, 2023). Los hongos micorrizógenos promueven el crecimiento del huésped por la producción de metabolitos (aminoácidos, vitaminas, fitohormonas) e incluso producen/acumulan metabolitos secundarios. Otra forma en la que intervienen en el crecimiento del huésped es a través de un mejor estado hídrico al alterar el comportamiento de los estomas. Esta simbiosis además puede influir en el entorno microbiano y químico de la rizósfera debido a que induce cambios en la fisiología en el huésped que pueden intervenir en los patrones de exudación de la raíz y, en consecuencia, producir alteraciones en las poblaciones microbianas de la rizósfera (Prieto et al., 2024). De manera general, podría entonces considerarse a las plantas micorrizadas más resistentes a condiciones ambientales adversas como la falta de agua o nutrientes, la salinidad, los cambios de temperatura, la acidificación del suelo, el ataque de patógenos, entre otros. Todas estas características hacen que estas interacciones sean consideradas en la implementación de prácticas agrícolas sostenibles (FAO, 2023). A través de su extensa red micelial son capaces de interconectarse con especies de plantas individuales no relacionadas, fomentando la biodiversidad de un ecosistema (Prieto et al., 2024).

Para propagarse, las micorrizas arbusculares pueden hacerlo de distintas formas. Por un lado, mediante esporas, es decir, a través de las estructuras reproductivas y de resistencia de dichos hongos, y, por otro lado, a través de fragmentos de raíces micorrizadas. También pueden lograrlo a través de redes de hifas que sobreviven en el suelo (FAO, 2023). Distintos factores ambientales afectan la presencia de micorrizas. Estos pueden catalogarse en factores bióticos, como la edad de la planta

o la presencia de otros microorganismos, y factores abióticos, como el microclima, la topografía, la temperatura, la humedad, el pH, la concentración de nutrientes, entre otros (FAO, 2023).

Estas relaciones simbióticas tienen efecto en la formación de la estructura del suelo, gracias a su papel en la creación de agregados estables, donde el micelio externo desempeña un papel destacado. También, influye en esta función la producción de glomalina secretada por las hifas, la cual promueve la agregación de las partículas del suelo confiriéndole mayor estabilidad, y aumenta la capacidad de retención de agua (Prieto et al., 2024).

Esta simbiosis no siempre es mutualista, ya que no todas las plantas se benefician por la presencia de micorrizas arbusculares en sus raíces, incluso una alta infección por micorrizas puede resultar dañina para las plantas (parasítica, Pezzani et al 2006). Esto se debe a que podría existir un conflicto en las estrategias de la planta para la asignación de su carbono y las estrategias de la comunidad microbiana para aumentar la salida neta del carbono desde las raíces (Bonkowski, 2004).

Las micorrizas tienen una gran importancia en el normal funcionamiento de la mayoría de las plantas y de los ecosistemas terrestres en general (Smith & Read, 2008). La importancia ecológica es particularmente relevante en ecosistemas donde las plantas son altamente tolerantes al estrés ambiental (Prieto et al., 2024). En Uruguay, las micorrizas son relevantes en los sistemas agrarios en general y en los pastizales en particular (del Pino et al 2021; Gracia et al 2016; Parodi & Pezzani, 2011). Si bien los antecedentes sobre micorrizas en Uruguay son escasos, en los últimos años se ha incrementado su estudio (García et al. 2017, García et al. 2019, García et al. 2023, Battistoni et al. 2023) particularmente en pastizales y gramíneas nativas.

El análisis histológico de las raíces permite evaluar la frecuencia de las estructuras intrarradiculares de los hongos micorrizógenos. Dicha colonización puede utilizarse como una estimación de los beneficios de las micorrizas arbusculares para sus hospederos (Silva et al., 2023). Para la detección de la presencia de hongos micorrícicos arbusculares en las raíces se emplean técnicas de tinción que facilitan la visualización de las distintas estructuras fúngicas en las raíces.

Además de la colonización radicular, otros indicadores de salud del suelo referidos a las micorrizas arbusculares son la cantidad de micelio externo y la diversidad de esporas de hongos micorrizógenos en el suelo. La diversidad de esporas se estudia

a través de la identificación de dichas esporas a partir de rasgos morfológicos y/o genéticos (Mishell & Recalde, 2023).

El micelio externo coloniza el suelo y puede extenderse considerablemente, a diferencia del micelio interno que se sitúa dentro de la corteza de las raíces (Mishell & Recalde, 2023). Se ha encontrado que existe relación entre la longitud del micelio externo y algunas propiedades físicas del suelo, ya que este micelio favorece la agregación, al generar redes que favorecen la formación de macro agregados (Sanchez & Paz, 2007).

1.7 Hongos endófitos septados oscuros

Las plantas también interactúan con otro grupo de hongos, los llamados endófitos septados oscuros, los cuales son muy abundantes en las raíces, y algunos se encuentra también dentro de tallos y hojas (Morales, 2022). Los endófitos septados oscuros (DSE, del inglés dark septate endophytes) son un grupo heterogéneo de hongos que suelen caracterizarse por tener hifas septadas y pared celular melanizada (Cisneros et al., s.f.). Son hongos con hifas estériles, oscuras, septadas, que están presentes en una gran diversidad de especies vegetales y ecosistemas terrestres, incluyendo suelos agrícolas (Morales, 2022). Se asocian con las plantas durante al menos una fracción de su historia de vida. Pertenecen a un grupo diverso de los Ascomicetes anamórficos dematiáceos que colonizan intra e intercelularmente los tejidos (Alarcon et al., 2004).

Su gran abundancia en diversas comunidades y amplio rango de hospedantes sugiere que, como los hongos micorrízicos arbusculares, cumplen un importante papel (Cisneros et al., s.f.).

Muchas especies fúngicas forman relaciones simbióticas con las raíces de las plantas y ocupan diferentes posiciones en el “continuo mutualismo-parasitismo” en función de las condiciones ambientales y edáficas (Alarcon et al., 2004). Al parecer los DSE no ejercen efectos adversos en la salud de las plantas, por el contrario, algunos incrementan las concentraciones de fósforo y nitrógeno en hojas. Sin embargo, los efectos positivos, neutrales o negativos hacia la planta, al parecer dependen del genotipo vegetal y fúngico que se asocien y de la fertilidad del suelo. Por otra parte, las interacciones de los DSE con otros microorganismos, como los hongos micorrízicos, han sido poco estudiadas. (Alarcon et al., 2004)

Con base en las características morfo-anatómicas, se ha sugerido que los DSE pueden mejorar la absorción de nutrientes y mantener una relación adecuada de agua para la supervivencia de las plantas hospedadas. Si bien se conoce mucho menos acerca de los efectos de estos hongos comparados con las micorrizas, se ha reportado que aumentan la disponibilidad de nutrientes y de metales no esenciales, favorecen el flujo de carbono y la productividad vegetal, modifican el funcionamiento biogeoquímico a nivel del sistema raíz-suelo-planta y propician el aumento de la actividad metabólica para combatir el estrés (Rivera, 2016).

A nivel ecosistémico, el papel que juegan los hongos DSE podría ser clave en algunos ciclos biogeoquímicos. Además, transforman el entorno local e inciden en el potencial redox, la concentración de oxígeno, el pH, la producción de enzimas extracelulares y la liberación de metabolitos (Solís, 2016).

1.8 El índice CONEAT como sistema de clasificación de suelos en Uruguay y su relación con indicadores del suelo

En Uruguay el programa CONEAT (Comisión Nacional de Estudio Agronómico de la Tierra) establecido en la década del 60, tuvo como objetivo determinar o categorizar mediante un índice la capacidad productiva media de los suelos del país y la de cada padrón rural (Lanfranco & Sapriza, 2011).

Esta clasificación consta de 188 grupos, agrupados en 13 zonas de uso y manejo de suelos que guardan relación con las unidades de la Carta de reconocimiento de suelos del Uruguay (Lanfranco & Sapriza, 2011).

Los Grupos de Suelo CONEAT no son estrictamente unidades cartográficas básicas de suelo, sino que constituyen áreas homogéneas, definidas por su capacidad productiva en términos de carne bovina, ovina y lana en pie (Artículo 65 de la Ley 13.695). Esta capacidad se expresa por un índice relativo a la capacidad productiva media del país. Los Grupos de Suelo CONEAT fueron determinados mediante fotografías aéreas a escala 1:400000, estudios de campo en todo el territorio nacional y análisis químicos y físicos de los suelos. El índice está normalizado con un valor medio de 100, un valor mínimo de 0 (tierra sin aptitud ganadera) y un máximo de 250 (Aguirre et al., 2023). Para cada grupo se indica el relieve, el material generador, los tipos de suelos que lo componen y el uso, entre otras características.

Si bien posee una serie de aspectos a mejorar, el índice CONEAT es ampliamente utilizado en Uruguay y, en la práctica, se ha observado que tiene una fuerte relación con la aptitud agrícola de los suelos (Morón, 2011). Se utiliza con fines tributarios para definir valor de los impuestos de acuerdo al potencial de producción de los suelos y es un valor de referencia en la compra- venta de tierras (Aguirre et al., 2023).

El índice CONEAT distingue entre suelos que tienen diferente productividad según su naturaleza u origen, pero no es dinámico, es decir no refleja los cambios producidos por el uso y manejo del suelo. No existe una actualización periódica del mismo (Morón, 2011).

En relación a sus limitaciones, la tierra es un factor de producción heterogéneo con una serie de características que determinan su productividad. Estas características están compuestas por un lado por características edáficas, topográficas, de localización, pero también por cambios introducidos por el propietario como infraestructura, fertilizaciones, etc (Ambrosini, 2021).

Componentes como la textura del suelo, el drenaje, la capacidad de retención del agua y la profundidad efectiva determinan la aptitud de la tierra. Debido a esto, el índice CONEAT desempeña un papel fundamental en la toma de decisiones agrícolas en Uruguay, permitiendo seleccionar cultivos que se adapten mejor a las condiciones edáficas, lo que permite maximizar la productividad y rentabilidad (Arrospide, 2023). También tiene un impacto significativo en la planificación y gestión del uso de la tierra a nivel nacional contribuyendo a políticas para desarrollar estrategias de uso sostenible de la tierra y evitar la sobreexplotación de los recursos naturales. Al comprender la aptitud de la tierra en diferentes regiones del país, se pueden establecer políticas que fomenten la conservación del suelo, la protección de los ecosistemas frágiles y la promoción de prácticas agrícolas sostenibles (Arrospide, 2023). El uso de este sistema ayuda a prevenir la degradación del suelo al evitar la sobreutilización de tierras con baja aptitud agrícola, por ejemplo, establecer límites en la cantidad de animales que puede mantener una determinada área (Arrospide, 2023)

Dado que el índice CONEAT considera una serie de parámetros para determinar la aptitud productiva del suelo, su integración con bioindicadores puede proporcionar una visión más holística de la salud del suelo en sistemas productivos.

1.9 Campo natural en Uruguay y *Paspalum notatum* como modelo de estudio para el estudio de las interacciones planta - microorganismos

El campo natural o pastizal es el bioma de Uruguay, cubre aproximadamente 55% del territorio y forma la base de la ganadería (MaPBiomias 2023; Perez, 2020).

Además, provee importantes servicios ecosistémicos, como el control de la erosión, la conservación de la biodiversidad y de la calidad del agua, la mitigación del cambio climático (Fedrigo et al., 2022), contribuye al secuestro de carbono, la regulación del intercambio de energía entre la superficie terrestre y la atmósfera, entre otros (Formoso, 2011). Uruguay ha experimentado importantes cambios en la cobertura y uso del suelo, particularmente reduciendo el área de pastizales como consecuencia de la expansión e intensificación de los cultivos agrícolas y forestales (Baeza & Paruelo 2018; Baeza et al. 2022).

La vegetación de los pastizales de Uruguay es predominantemente herbácea como consecuencia de la interacción del clima, el suelo y su utilización (De Cortés et al., 2020). Uruguay cuenta con aproximadamente 340 especies de gramíneas nativas que son los principales componentes del campo natural y presentan una alta presencia de micorrizas arbusculares (Parodi & Pezzani, 2011; del Pino et al 2021). La asociación de estas gramíneas con los HMA puede desempeñar un rol crucial en la estructuración del ecosistema pastizal. Son varios los estudios que relatan la influencia significativa que tiene la simbiosis micorrícica sobre el desempeño de las plantas y el rol que esta asociación juega en la estructuración de comunidades de pastizales. En Uruguay, como se ha mencionado en el punto 1.6, las micorrizas son relevantes en los sistemas agrarios en general y en los pastizales en particular (Parodi & Pezzani, 2011; del Pino et al 2021; Gracia et al 2016, 2017, 2019; Battistoni et al. 2023).

Los hongos micorrizógenos arbusculares colonizan, entre otras especies del campo natural, las raíces de *Paspalum notatum*. Esta es una gramínea perenne estival, de tipo C₄, rizomatosa y es una de las principales especies presente en las comunidades de pastizales de Uruguay (Rosengurtt 1979). Es una especie nativa, con gran adaptación a distintos ambientes, con una temperatura óptima para el crecimiento que se ubica entre 25 y 30°C. Se propaga generando estolones, rizomas, macollos y semillas del mes de enero al mes de abril (García & Pina, 2022). En veranos relativamente secos se mantiene mejor que otras especies estivales por su sistema radicular profundo y denso, convirtiéndose en una de las

especies más importante de los pastizales. Tiene una apetecibilidad prolongada y una productividad baja (Rosengurtt, 1979). La producción de forraje se concentra en primavera, verano y otoño, siendo enero el mes de mayor producción; en invierno tiene escaso crecimiento. Florece relativamente tarde en el verano y sus cañas se desintegran rápidamente. Su valor nutritivo está en función de la época del año y el manejo del pastoreo (García & Pina, 2022). Presenta un alto potencial para ser cultivada como pastura pura permanente con alto potencial productivo, como componente estival de pasturas cultivadas, o como especie recuperadora de campos naturales degradados, debido a sus rizomas estoloniformes y a la alta producción de semilla viable en el caso de cultivares que han sido seleccionados y mejorados (Reyno, 2019).

La cubierta vegetal y los microorganismos determinan la naturaleza y dirección de los procesos biogeoquímicos, así como los cambios fisicoquímicos que ocurren en los suelos. Además, tienen una influencia considerable en la fertilidad del suelo y su potencial de rendimiento. La bioactividad y las interacciones que ocurren en el ambiente edáfico son la base de diversas funciones del ecosistema, incluida la circulación de nutrientes, el control de patógenos, la infiltración de agua y la formación de cadenas tróficas (Mencel et al., 2022). El estudio de *P. notatum* como modelo permitirá evaluar la influencia de las interacciones planta-microorganismos en la salud del suelo.

Este estudio se realizó en algunos de los sitios seleccionados en el marco del proyecto Gestión de Pasto de Uruguay, el cual busca comprender las estrategias de asignación de forraje por parte de productores ganaderos. La empresa Sosei (<https://soseibioag.com/>) fue uno de los participantes de dicho proyecto, con el objetivo de apoyar el desarrollo de la agricultura biológica a través de información medible, por ejemplo, bioindicadores (Pereira, 2020; Sosei, 2021).

En este contexto, se planteó el presente trabajo para indagar la relación entre dos de las principales interacciones (micorrizas arbusculares y hongos septados oscuros) que presenta *P. notatum*, una de las especies herbáceas más frecuentes de los pastizales de Uruguay, con la capacidad productiva de los suelos estimada por CONEAT, así como el vínculo con otros indicadores de salud del suelo. Conocer la relación entre las interacciones bióticas planta - microorganismos en suelos de diferente grupo CONEAT y la relación con otros indicadores de la salud del suelo en

sistemas pastoriles de Uruguay podría resultar relevante en la búsqueda de prácticas ganaderas más sostenibles.

2. OBJETIVOS

Objetivo general

Estudiar la presencia de micorrizas arbusculares y hongos septados oscuros en suelos con distinto valor de Índice CONEAT, así como su relación con otros indicadores de salud del suelo, en sistemas pastoriles de Uruguay.

Objetivos específicos

- 1 Analizar la presencia de micorrizas arbusculares en raíces de *Paspalum notatum* provenientes de sistemas pastoriles de campo natural sobre suelos pertenecientes a seis grupos CONEAT diferentes.
- 2 Analizar la presencia de hongos septados oscuros en raíces de *Paspalum notatum* provenientes de sistemas pastoriles de campo natural sobre suelos pertenecientes a seis grupos CONEAT diferentes.
- 3 Evaluar la relación entre la presencia de micorrizas arbusculares, hongos septados oscuros y otros indicadores de salud del suelo (biomasa de hongos, relación Hongo:Bacteria y actividad fosfatasa) de los sistemas pastoriles de campo natural provenientes de suelos pertenecientes a seis grupos CONEAT diferentes.

Este trabajo busca responder preguntas tales como;

¿Existen diferencias en la presencia de micorrizas arbusculares y hongos septados oscuros en raíces de *P. notatum* de suelos con diferente Índice CONEAT?

¿Los suelos con mayor índice de productividad presentan mayor colonización micorrícica y por hongos septados?

¿Qué relación existe entre la presencia de hongos endófitos radiculares y bioindicadores de salud de suelos con distintos grupos CONEAT?

3. MATERIALES Y MÉTODOS

3.1 Área de estudio

Los sitios de estudio seleccionados para este trabajo se encuentran en la unidad geomorfológica Región Centro Sur (Panario, 1988), específicamente en los departamentos de Florida y Colonia (Figura 1). Se seleccionaron tres establecimientos y en cada uno se estudiaron dos potreros con distinto índice CONEAT. En todos los casos se trató de potreros de campo natural con pastoreo continuo (Tabla 3). Estos potreros forman parte de los sitios seleccionados en el marco del proyecto Gestión del Pasto del Instituto Plan Agropecuario (Pereira, 2020; Sosei, 2021). En dicho proyecto se determinaron valores de bioindicadores de salud del suelo como biomasa de hongos, relación biomasa hongos:bacteria (H:B) y actividad fosfatasa. La biomasa de hongos y de bacterias se determinó mediante microscopía óptica directa. La actividad fosfatasa ácida se evaluó mediante espectrofotometría, cuantificando el producto de la reacción, p-Nitrofenol, a través de su absorbancia a 405nm. Los valores de H:B en los potreros seleccionados para este estudio oscilaron entre 0,0085 y 0,0899 y los valores de biomasa de hongos entre 4,75 y 95,52 ug/g. Los datos de actividad fosfatasa se presentan como valores relativos entre las distintas situaciones relevadas, donde la menor actividad fosfatasa fue de 14,85 y la mayor fue de 124,45. Este último valor se asignó como referencia de valor máximo, es decir como 100 (Tabla 3).

Todos los potreros presentaban una alta cobertura de la gramínea *Paspalum notatum*, especie seleccionada para este estudio.

Previo a los muestreos se identificaron y localizaron en cada potrero las áreas correspondientes a los distintos grupos CONEAT, superponiendo la capa del tipo de suelo según CONEAT al mapa de los establecimientos en el programa Google Earth.

Tabla 3. Características de los potreros seleccionados.

Establecimientos	1				2				3			
	33°55'18, 55°56'39				33°54'32, 57°22'37				33°49'17, 55°34'43			
	a		b		a		b		a		b	
Grupo CONEAT	10.3	5.02b	10.16	5.02b	5.4	5.02b	5.4	5.02b	10.3	2.12	2.11a	5.02b
Características visuales de los suelos	Pardo oscuro, textura muy arcillosa (similar a 10.16)	Pardo oscuro, textura arcillosa	Pardo oscuro, textura arcillosa	Pardo claro, textura franco arcillosa, más superficial que 10.16 y 10.3	Pardo oscuro, alta materia orgánica, textura arcillosa	Pardo, textura arcillosa	Aspecto similar a potrero a	Similitud con 5.4, una zona de transición. Suelo moteado con hierro.	Pardo oscuro. Profundo, buena agregación.	2.12	Más superficial (afloramientos). Menor estado de agregación	5.02b
Vegetación	Campo natural P. cuadrifarium y B. Laguroides (estrato alto) P notatum (estrato bajo)	Campo natural 1 estrato dominado por P. notatum	Campo natural P. cuadrifarium (estrato alto). P. notatum / oxalis (estrato bajo)	Campo natural	Campo natural En estrato bajo domina P. notatum	Campo natural En estrato bajo domina P. notatum	Campo natural dominante P. notatum. existiendo becharis	Campo natural	Campo natural Alta diversidad y cobertura vegetal	Campo natural	Campo natural	Campo natural
Manejo pastoreo	Continuo con descanso (descanso desde hace 20 días). Sistema recría	Continuo con descanso	Continuo con descanso. Sistema recría (165 terneras 200kg)	Continuo en descanso	Continuo en descanso	Continuo en descanso	Continuo en descanso (hubo ovejas de cría)	Continuo en descanso	Continuo con descanso	Continuo con descanso	Continuo con descanso	Continuo con descanso
Biomasa de Hongos (ug/g)	90,230	58,216	95,525	60,048	s/d	4,750	91,252	41,727	92,972	69,006	s/d	12,077
Hongo::Bacteria	0,059	0,017	0,031	0,021	s/d	0,0810	0,022	0,045	0,073	0,054	s/d	0,009
Actividad fosfatasa (ug p-nitrophenol.g⁻¹ h⁻¹)	56,796	43,348	124,450	101,568	14,85	15,96	26,09	29,06	54,798	58,614	46,918	34,041

Nota: Las descripciones se basan en observaciones de campo. Los valores de biomasa de hongos, relación hongo:bacteria y actividad fosfatasa provienen de muestras de suelo en cada potrero durante el muestreo de raíces.



Figura 1. Localización de los establecimientos: 1, 2 y 3, en la Región Centro Sur, Uruguay. Se muestran las 4 regiones geomorfológicas con mayor cobertura de pastizales en Uruguay.



Figura 2. Delimitación de los establecimientos (rojo) 1) Establecimiento 1, 2) Establecimiento 2, 3) Establecimiento 3. Potreros “a” y “b” (amarillo) y la distribución de sus respectivos grupos CONEAT. Cinco réplicas por grupo CONEAT (azul), ilustradas solo en uno de los potreros.

A continuación, se presentan algunas generalidades de los suelos de los diferentes grupos CONEAT analizados en este estudio (Tabla 4).

Tabla 4. Grupos CONEAT de los suelos presentes en los potreros seleccionados (CONEAT, 1979).

Suelos Grupo CONEAT	Características	Índice de productividad
5.02b	<p>Relieve ondulado y ondulado fuerte</p> <p>Brunosoles Subéutricos Háplicos moderadamente profundos y superficiales, se asocian Inceptisoles a veces muy superficiales.</p> <p>Horizonte superior es de color pardo y pardo rojizo, a veces pardo amarillento, de textura franca, franco gravilosa o arenoso franca con gravillas abundantes, la fertilidad es media, a veces baja. Rocosidad moderada.</p> <p>Pueden existir bajos angostos, asociados a vías de drenaje de poca importancia, hidromórficas, que contienen muy buenas pasturas estivales.</p>	88
5.4	<p>Se desarrollan en posiciones de interfluvio.</p> <p>Se desarrollaron de materiales cristalinos, y en parte, de sedimentos limo arcillosos poco potentes y discontinuos que los recubren.</p> <p>Moderadamente profundos y superficiales, de texturas francas, fertilidad media, a veces baja, moderadamente bien a bien drenados. También suelos de color negro o pardo muy oscuro textura franca a franco arcillosa, fertilidad alta y moderadamente bien drenados.</p> <p>Se asocian suelos de diferenciación mínima, colores oscuros, fertilidad alta.</p>	114
10.3	<p>Interfluvios discontinuos. Ojos de agua. Esporádicamente pequeños afloramientos rocosos</p> <p>Predominante Brunosoles Éutricos Lúvicos, de color negro o pardo muy oscuro, textura franca a franco arcillosa, fertilidad alta y moderadamente bien drenados</p>	140
10.16	<p>Corresponde a un gran interfluvio. Relieve suavemente ondulado.</p> <p>Vertisoles Rupticos Luvicos y Brunosoles Eutricos Tipicos, de color pardo muy oscuro a negro, textura franco arcillosa a franco arcillo arenosa, fertilidad alta y drenaje moderadamente bueno a algo pobre.</p>	206
2.11 ^a	<p>Sierras rocosas, paisaje ondulado fuerte y pendientes.</p> <p>Suelos dominantes Brunosoles Subeutricos Haplicos, arenoso franco gravillosos y franco gravillosos, superficiales, pedregosos. Asociados a estos: Brunosoles Subeutricos Tipicos, francos, moderadamente profundos, a veces profundos (Praderas Pardas moderadamente profundas), en algunos casos a contacto lítico; y Litosoles Subeutricos Melanicos, areno gravillosos, a veces pedregosos y muy superficiales; con afloramientos rocosos. (Región sur).</p> <p>Brunosoles; más del 70% del área, (entre los afloramientos de rocas fundamentalmente migmatitas y granitos intrusivos. Litosoles ocurren próximos a los afloramientos, o en las áreas más rocosas de la unidad.</p>	53
2.12	<p>Sierras no rocosas de relieve ondulado y ondulado fuerte.</p> <p>Brunosoles Subeutricos Haplicos y Tipicos, arenoso francos y francos, algunas veces arenosos franco gravillosos, superficiales y moderadamente profundos.</p>	83

3.2 Trabajo de campo

El muestreo se realizó durante el otoño, entre los meses abril y junio de 2022.

En cada uno de los potreros y en cada área identificada correspondiente a un grupo CONEAT, se realizó una transecta de 25m y se colectaron raíces de 5 individuos de la especie *Paspalum notatum*, distanciados 5m entre sí, constituyendo las réplicas de este estudio.

Para el muestreo de raíces se utilizó una pala y una tijera para obtener las raíces finas de cada planta seleccionada que se encontraban a unos 10 - 20 cm de profundidad aproximadamente. Una vez colectadas, las raíces fueron conservadas en bioset con vinagre de alcohol y fueron llevadas en auto al laboratorio de Sistemas Ambientales para su posterior procesamiento en el laboratorio (Figura 3).



Figura 3. Proceso de muestreo de raíces de *Paspalum notatum*. a) Identificación de *P. notatum* en el campo. b-c) Obtención de pan de suelo de 20 cm de profundidad aproximadamente con raíces de *P. notatum*. d-e) Obtención de las raíces de *P. notatum*. f) Conservación de raíces en bioset.

3.3 Trabajo de laboratorio

El procesamiento y montaje de las raíces se realizó en el Laboratorio de Sistemas Ambientales de Facultad de Agronomía.

Para el procesamiento de las raíces de *P. notatum* se utilizó el método de Philips y Hayman, modificado por Koske y Gemma (1989). Las raíces se lavaron con agua y luego fueron decoloradas utilizando una solución de KOH al 10%, permaneciendo en la solución un tiempo aproximado a las 24 horas. Posteriormente fueron teñidas con una solución de azul de tripano al 0,05% por 48 horas aproximadamente, para que luego se puedan observar las estructuras fúngicas. Las raíces teñidas se conservaron en una solución de lactoglicerol hasta su montaje (Figura 4 a, b y c).

Para el montaje de las raíces se utilizaron 3 portaobjetos por planta o réplica. Se utilizó un bisturí para cortar las raíces en un largo de 1 cm aproximadamente. Este montaje constó en colocar, por cada muestra (planta), 30 segmentos de raíz en 3 portaobjetos, es decir, 10 segmentos en cada uno (Figura 4 d).

Para la observación de las estructuras fúngicas se utilizó un microscopio óptico para poder estimar la presencia (1) o ausencia (0) de micorrizas arbusculares. Se evaluó la presencia de hifas, vesículas, arbuscúlos y ovillos. Se evaluó además la presencia de hongos endófitos septados oscuros (Figura 4 e y f).



Figura 4. Procesamiento de las raíces de *Paspalum notatum* para observación microscópica de estructuras fúngicas (micorrizas y septados oscuros). a) Decoloración con solución de KOH. b) Tinción con solución de azul de tripano. c) Tinción y descarte de azul de tripano. d) Montaje de raíces. e-f) Observación de estructuras fúngicas (h: hifa, v: vesícula)

3.4 Análisis estadístico

A partir de los datos de presencia/ausencia de las diferentes estructuras fúngicas se calculó el porcentaje de colonización micorrícica total y el porcentaje de colonización de vesículas, arbusculos y ovidos. También se estimó el porcentaje de colonización por hongos septados oscuros. Para esto se utilizó el número de campos con presencia de alguna estructura fúngica sobre el número total de campos observados (n=90 en caso que todos los campos permitieran ser observados).

Se utilizó un Modelo Lineal Generalizado Mixto (MLGM), familia binomial para el análisis de la variación de la colonización micorrícica, con el Grupo CONEAT como efecto fijo dentro de cada potrero. El software estadístico empleado fue InfoStat (Balzarini, 2008).

Por otro lado, se relacionaron los valores de los otros indicadores de salud de suelo; la biomasa de hongos, la actividad fosfatasa y la relación hongo-bacteria, con los resultados obtenidos en este estudio mediante una regresión lineal. Se analizó la relación entre la variable colonización micorrícica, hongos septados oscuros y los indicadores biológicos medidos. Para analizar los datos de la actividad fosfatasa se utilizaron valores relativos en lugar de los valores absolutos medidos, se identificó el valor más alto y se estableció como 100, los demás valores relativos calculados se expresaron como un porcentaje de valor máximo.

4. RESULTADOS

En todos los sitios, se comprobó la presencia de micorrizas arbusculares y de endófitos septados oscuros, en raíces de *P. notatum*, observándose diferencias de acuerdo al índice CONEAT del suelo donde crecieron las plantas. Se observaron distintas estructuras de los hongos micorrícicos: mayoritariamente hifas y vesículas, y en menor abundancia arbusculos y ovidos. Las hifas fueron las estructuras micorrícicas más abundantes observadas (Figura 5a). Se observó colonización también por hongos septados oscuros (Figura 5b). La presencia de hongos septados oscuros en raíces de *P. notatum* fue más abundante que la presencia de micorrizas arbusculares. El rango general de micorrizas arbusculares fue de 5,9 a 100%, y de hongos septados oscuros fue de 41,2 a 100%.

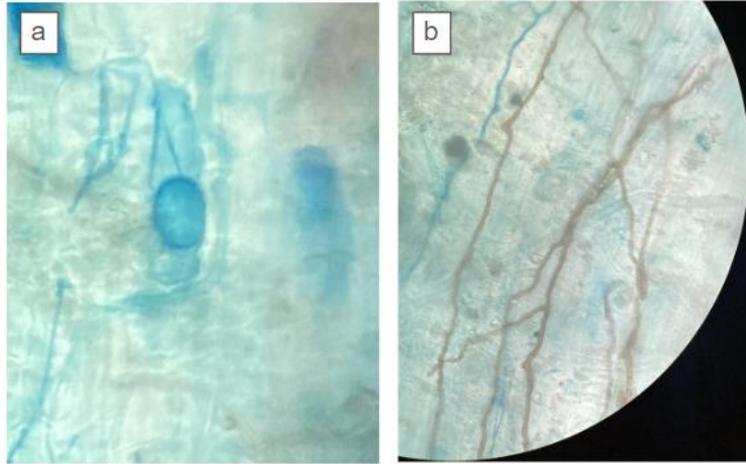


Figura 5. a) Vesícula con su correspondiente hifa perteneciente a hongo micorrícico arbuscular; b) Hifas septadas pertenecientes a hongo septado oscuro.

4.1 Micorrizas arbusculares

Respecto a la colonización micorrícica total, se observaron diferencias estadísticamente significativas entre los grupos CONEAT en la mayoría de los potreros. Es decir, la presencia de micorrizas arbusculares varió según los grupos CONEAT (Figura 6).

La mayor presencia de micorrizas arbusculares fue registrada en suelos del grupo CONEAT 5.02b en el establecimiento 3 (prom $87,8\% \pm 9,2$). También se observó gran abundancia en suelos de los grupos CONEAT 10.3 (prom $85\% \pm 6,6$) y 2.12 (prom $84,2 \pm 11,8$) del mismo establecimiento. Por otro lado, la menor abundancia de micorrizas fue observada en el grupo CONEAT 10.16 del establecimiento 1 (prom $17,18\% \pm 8,7$).

En el establecimiento 1, el grupo CONEAT 5.02b mostró mayor colonización micorrícica que suelos del grupo 10.16 (potrero 1b), pero no mostró diferencias significativas con el grupo 10.3 (potrero 1a).

En el establecimiento 2, las plantas provenientes de los suelos con grupo CONEAT 5.02b presentaron mayor valor de colonización que las provenientes del grupo 5.4 en el potrero 2a, pero menores valores en el potrero 2b.

En el establecimiento 3, el grupo CONEAT 5.02b mostró mayor colonización micorrícica que suelos del grupo 2.11a (potrero 3b), mientras que entre los grupos

10.3 y 2.12 no se observaron diferencias estadísticamente significativas (potrero 3a; $p > 0,05$).

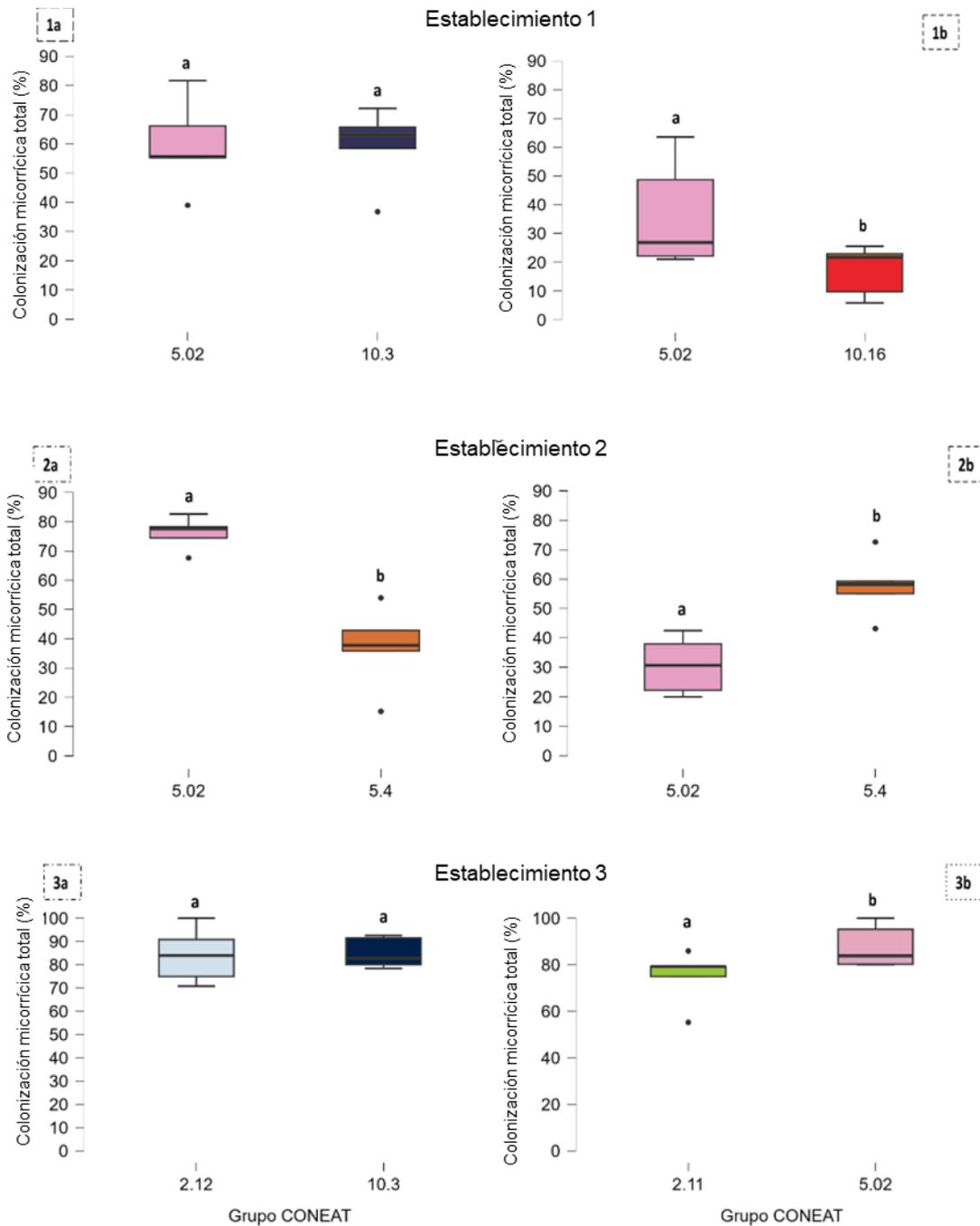


Figura 6. Colonización micorrícica total (%) en raíces de *Paspalum notatum* en suelos de dos grupos CONEAT distintos dentro de cada potrero estudiado. 1a y 1b potreros del establecimiento 1. 2a y 2b potreros del establecimiento 2. 3a y 3b potreros del establecimiento 3. Letras diferentes representan diferencias estadísticamente significativas dentro de cada potrero ($p < 0,05$)

En relación a la presencia de vesículas de los HMA (% vesículas) en raíces de *P. notatum*, el mayor promedio de vesículas fue observado en el grupo CONEAT 5.02b del establecimiento 2 (prom 37% \pm 9,7). La menor abundancia de vesículas fue observada en el grupo CONEAT 10.16 del establecimiento 1 (prom 6,47% \pm 2,5). Para esta variable se observaron diferencias estadísticamente significativas entre algunos grupos CONEAT (Figura 7). En el establecimiento 1, no se encontraron diferencias estadísticamente significativas entre los grupos CONEAT 10.3 y 5.02b, ni entre los grupos 10.16 y 5.02b.

En el establecimiento 2, sus grupos CONEAT 5.4 y 5.02b presentaron diferencias significativas ($p < 0,05$) y con resultados contrapuestos en los dos potreros evaluados. Mientras que en el establecimiento 3, solo uno de los potreros mostró diferencias en la presencia de vesículas; con valores más altos en suelos del grupo 5.02b que en suelos del grupo 2.11a ($p < 0,05$).

Por otro lado, la presencia de las estructuras micorrícicas de intercambio, arbusculos y ovillos, fue observada en menor abundancia que las hifas y vesículas.

En el establecimiento 1 solo se observaron arbusculos y ovillos en el grupo de suelo 5.02b.

En el establecimiento 2 se observaron arbusculos y ovillos en el grupo CONEAT 5.02b y en el grupo CONEAT 5.4. Y en el establecimiento 3, no se detectó presencia de arbusculos ni ovillos en ninguno de los suelos evaluados.

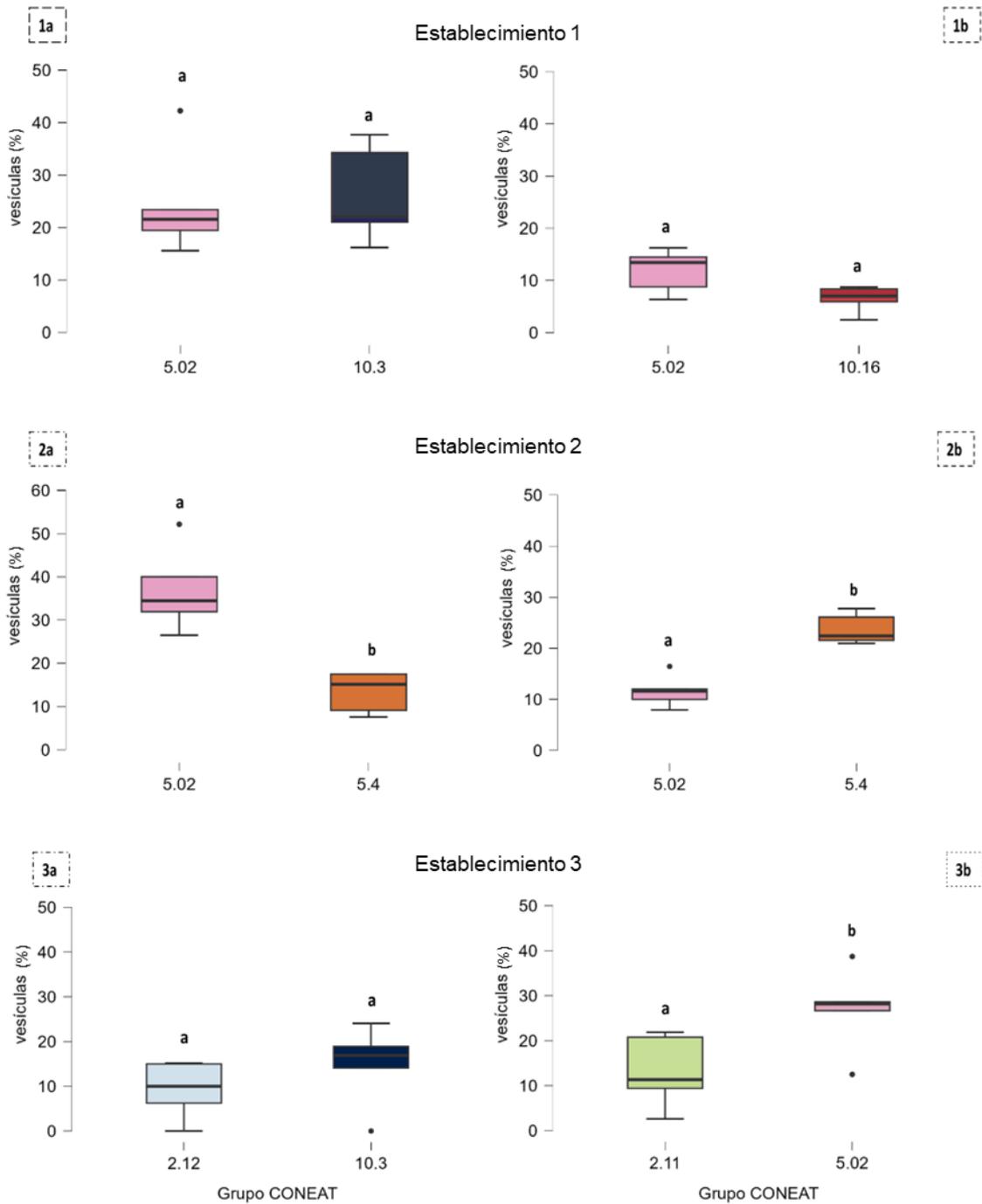


Figura 7. Presencia de vesículas de hongos micorrizógenos arbusculares (% vesículas) en raíces de *Paspalum notatum* provenientes de suelos de diferente grupo CONEAT. 1a y 1b potreros del establecimiento 1. 2a y 2b potreros del establecimiento 2. 3a y 3b potreros del establecimiento 3. Letras diferentes representan diferencias estadísticamente significativas entre los grupos CONEAT en cada potrero ($p < 0,05$)

4.2 Hongos septados oscuros

En relación a la presencia de hongos septados oscuros en las raíces de *Paspalum notatum*, los mayores valores observados fueron de $82\% \pm 8,8$ (grupos CONEAT 5.02b del establecimiento 3), y los menores presentaron un promedio de $59,1\% \pm 17,6$ (grupos CONEAT 10.16 del establecimiento 1)

La colonización por DSE solo mostró diferencias entre los grupos 5.02b y 5.4, en el potrero **a** del establecimiento 2 ($p < 0,05$; Figura 8).

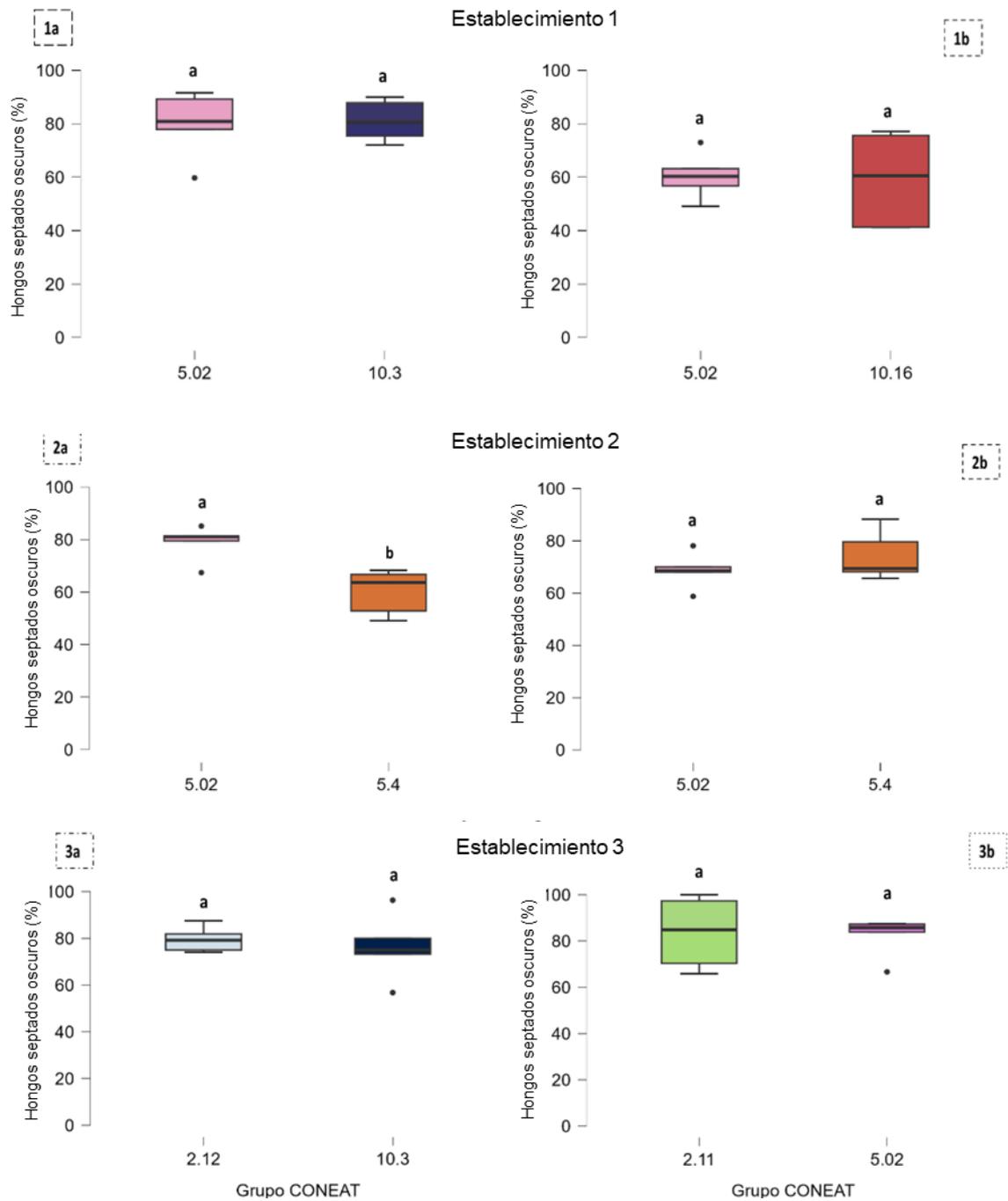


Figura 8. Colonización por hongos septados oscuros (% DSE) en raíces de *Paspalum notatum* proveniente de suelos de distintos grupos CONEAT. 1a y 1b potreros del establecimiento 1. 2a y 2b potreros del establecimiento 2. 3a y 3b potreros del establecimiento 3. Letras diferentes representan diferencias estadísticamente significativas entre los grupos CONEAT en cada potrero ($p < 0,05$).

4.3 Relación entre la presencia de micorrizas arbusculares y septados oscuros con otros bioindicadores

La relación entre la colonización micorrícica y el índice de productividad fue negativa y estadísticamente significativa ($p= 0,00085$), es decir que suelos pertenecientes a grupos CONEAT con índices de productividad más altos presentaron menor abundancia de micorrizas (Figura 9a).

Respecto a la relación entre la presencia de DSE y el índice CONEAT, el análisis estadístico no mostró una relación significativa ($p = 0,06688$), por lo que no hay evidencia suficiente para afirmar que el índice de productividad influye sobre la presencia de hongos septados oscuros en *P. notatum* (Figura 9b).

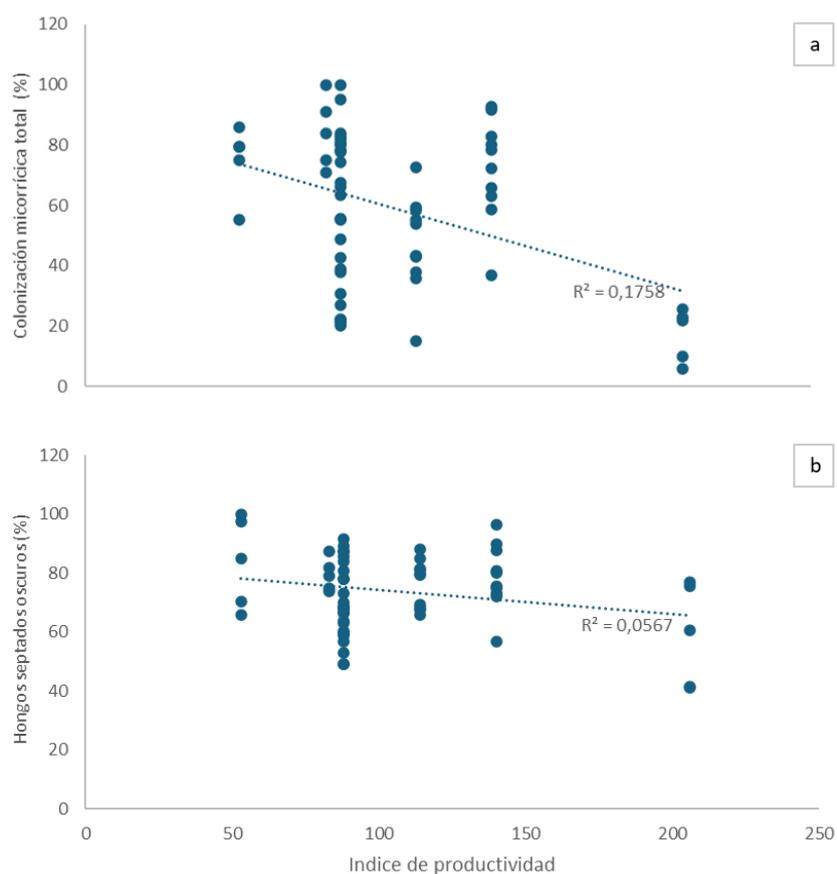


Figura 9. Relación entre el índice de productividad del suelo estimado por CONEAT y a) colonización micorrícica b) hongos septados oscuros en raíces de *Paspalum notatum*.

En la Figura 10 se muestra la relación entre la colonización por endófitos radiculares (micorrizas y hongos septados oscuros) en *P. notatum* y otros bioindicadores de salud del suelo como la biomasa de hongos, relación hongo:bacteria y actividad fosfatasa.

No se observó una relación estadísticamente significativa entre la presencia de micorrizas arbusculares y la biomasa total de hongos presentes en el suelo ($p=0,3305$; Figura 10a).

La variable relación H:B mostró una relación significativa y negativa con la colonización micorrícica total ($p = 0,0026$), lo que indicó que existió evidencia suficiente para afirmar que cuando la relación H:B era mayor la colonización micorrícica disminuía (Figura 10b).

La relación colonización micorrícica y actividad fosfatasa fue estadísticamente significativa ($p = 0,0076$). Se observó una relación negativa entre ambas variables, en la cual la colonización micorrícica disminuyó a medida que la actividad fosfatasa aumentaba (Figura 10c).

En cuanto a los DSE, no se observó una relación estadísticamente significativa entre su presencia en raíces de *P. notatum* y la biomasa total de hongos en el suelo ($p = 0,8286$). Tampoco hubo evidencia suficiente para afirmar que la relación H:B tiene un impacto significativo sobre los DSE ($p = 0,1656$).

Sin embargo, se observó una relación estadísticamente significativa entre la actividad fosfatasa y la presencia de DSE en raíces de *P. notatum* ($p = 0,0156$), a medida que aumenta la actividad fosfatasa disminuyen los DSE (Figura 10f).

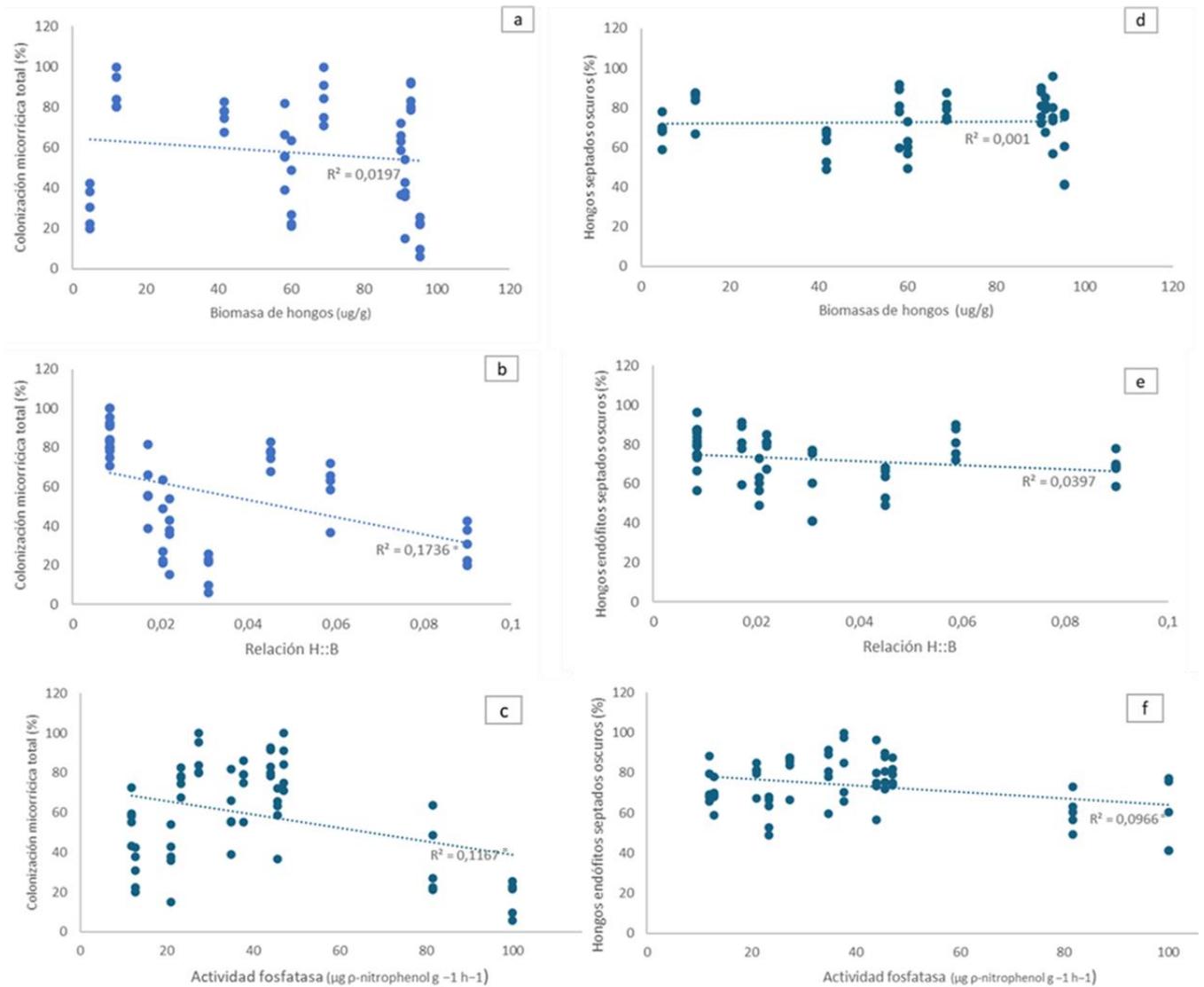


Figura 10. Colonización por hongos micorrícicos y por hongos septados oscuros (%) en raíces de *Paspalum notatum*, en función de: a) y d) biomasa de hongos (ug/g); b) y e) relación H:B; c) y f) actividad fosfatasa ($\mu\text{g } \rho\text{-nitrophenol g}^{-1} \text{ h}^{-1}$).

5. DISCUSIÓN

En el presente estudio, de acuerdo a lo planteado en los objetivos, se pudo constatar la presencia de micorrizas arbusculares y hongos septados oscuros en todas las raíces de *P. notatum*, en suelos de campo natural y en todos los grupos CONEAT estudiados. Se evidenció, a su vez, que raíces de plantas provenientes de suelos con índices CONEAT distintos mostraron diferencias en la colonización micorrízica, mientras que los DSE, mostraron menores respuestas ante diferentes grupos CONEAT. Este trabajo, constituye además el primer estudio que relaciona

la presencia de hongos endófitos de raíz con otros bioindicadores de salud del suelo en nuestro país. Dicha relación mostró asociaciones negativas entre la mayoría de los bioindicadores y la presencia de micorrizas arbusculares.

¿Existen diferencias en la presencia de micorrizas arbusculares y hongos septados oscuros en raíces de *P. notatum* de suelos con diferente Índice CONEAT?

Tanto las micorrizas arbusculares como los hongos septados oscuros mostraron diferentes respuestas en los distintos tipos de suelo según su grupo CONEAT. Para el caso de las micorrizas arbusculares, al evaluar por establecimiento, si bien no existió un patrón claro en la respuesta a diferentes grupos CONEAT, la colonización por este grupo de microorganismos mostró diferencias en la mayoría de los potreros evaluados. Los DSE, sin embargo, solo respondieron al grupo CONEAT en un potrero de los 6 evaluados. Estas respuestas en la colonización micorrícica nos muestran el valor de las micorrizas arbusculares como indicadores de salud del suelo ante diferentes prácticas de manejo agronómico y ante condiciones edáficas (Sekgota 2018; Gupta 2020; Bhaduri et al. 2022). No encontramos un patrón claro, incluso contrapuesto (ejemplo establecimiento 2) en el comportamiento de la colonización micorrícica ante diferentes grupos CONEAT. Esto puede estar explicado porque la clasificación de los suelos por su CONEAT, tiene un valor limitado, centrado en la producción de carne bovina, ovina y lana, y no refleja la salud integral del suelo. Esto limita su utilidad para hablar de salud del suelo. Existen otros factores que el índice no tiene en cuenta de forma directa, y podrían estar explicando los resultados. Entre estos se encuentra la textura, estructura del suelo, manejo, pastoreo, microbiota, clima, entre otros (Clavero, 2022). El índice CONEAT se aplica a escalas espaciales grandes y no se contempla gran heterogeneidad de variables que estarían explicando la presencia y abundancia de microorganismos s como las micorrizas.

Los hongos endófitos oscuros, por otro lado, mostraron similar presencia en los diferentes grupos CONEAT. Esto puede atribuirse a la naturaleza generalista de los DSE, un grupo parafilético que coloniza raíces en una amplia variedad de ambientes.

Los DSE tienen una distribución global, lo que sugiere baja especificidad de hábitats y roles ecológicos relevantes en sistemas naturales (Jumpponen y Trappe, 1998). La falta de patrones claros podría deberse a las diferencias interespecíficas en la actividad metabólica y funcional complementaria de este grupo diverso (Clavero 2022). Además, a diferencia de los HMA, los DSE son simbiontes facultativos, lo que los hace menos dependientes del hospedero (Valdez & Andrés, 2022). Este grupo de hongos sería el menos propenso a tener patrones de colonización predecibles, siendo una interrogante qué factores influyen en sus distribuciones (Ranelli et al., 2015).

A nivel global se sabe poco sobre la ecología y los efectos de los DSE sobre las plantas que colonizan. Estudios previos indican que no parecen ejercer efectos adversos en la salud de las plantas, por el contrario, algunos DSE incrementan las concentraciones de fósforo y nitrógeno en hojas (Heredia et al., 2014). Sin embargo, los efectos positivos, neutrales o negativos hacia la planta, al parecer dependen del genotipo vegetal y fúngico que se asocian y de la fertilidad del suelo (Heredia et al., 2014). Los DSE también se superponen funcional y ecológicamente con otros hongos, lo que dificulta la identificación de sus funciones específicas (Jumpponen y Trappe, 1998).

Aunque no se encontraron patrones claros para los DSE en relación con el índice CONEAT, sus características como simbiontes facultativos y su amplia diversidad subrayan la importancia de continuar investigando este grupo.

La ausencia de patrones claros también puede relacionarse con la existencia de una alta variación entre individuos en la micorrización, lo que podría ser otra fuente de error al analizar las tendencias por parte de los HMA y DSE.

En la mayoría de los casos, niveles altos de DSE coincidieron con niveles altos de HMA, lo cual sugiere una posible coexistencia o complementariedad entre ambos grupos, incluso en suelos distintos. O también subraya la globalidad de los DSE. Ambos grupos parecen favorecer a la planta en condiciones de estrés, pero se destacarían en este rol los HMA en este estudio. Sin embargo, otros factores podrían estar influyendo directamente en esta coexistencia, como el hospedero u otras características del ambiente.

¿Los suelos con mayor índice CONEAT presentan mayor colonización micorrícica y por hongos septados oscuros?

Al analizar la totalidad de los puntos relevados, los hongos endófitos oscuros no mostraron relación con la productividad los suelos, lo que nuevamente refleja su comportamiento generalista. Para el caso de la colonización por micorrizas arbusculares, suelos pertenecientes a grupos CONEAT con mayor índice de productividad tendieron a presentar menor presencia de micorrizas, observándose una relación negativa y significativa entre ambas variables.

Esto puede entenderse debido a que el índice CONEAT evalúa la productividad de los suelos, relacionándose con variables físicas, químicas y biológicas que pueden influir en la composición y actividad de microorganismos del suelo, como HMA. La diversidad y actividad de los HMA dependen de características del suelo como pH, contenido de materia orgánica y textura, factores también relacionados con el CONEAT.

Por un lado, si bien en este trabajo no medimos niveles de nutrientes en suelo, en situaciones con índice CONEAT más alto las plantas pueden encontrar mayor disponibilidad de nutrientes, reduciendo la necesidad de asociarse con micorrizas, quienes representan un costo para los hospederos (García 2016). Los hongos micorrícicos arbusculares han sido reconocidos como simbioses obligados (Smith & Read 2008), mientras que en esta relación la planta se considera simbiote facultativo (FAO (2023)).

Por tratarse de mutualismo obligado para el hongo, dicho simbiote solo puede completar su ciclo de vida asociado a una planta hospedadora (de lo contrario permanecería en forma de espora en el suelo; García 2016). Además, se ha planteado que este tipo de interacción es controlada por la planta. Esto implica que, en condiciones de alta disponibilidad de nutrientes, las plantas podrían prescindir de los HMA, lo que daría lugar a una menor colonización fúngica. Esta idea coincide con varios trabajos que reportan el efecto negativo de los nutrientes sobre la intensidad de la colonización (García 2016).

Por otro lado, en suelos menos productivos, las plantas promueven estas asociaciones, como estrategia, para mejorar la adquisición de nutrientes, como el P. Estudios han mostrado que los beneficios de las micorrizas arbusculares para las plantas son más importantes en ambientes pobres en nutrientes (García 2016).

Sin embargo, hay ausencia de un patrón claro que permita afirmar que la diferencia de micorrización es debida a los diferentes grupos CONEAT.

De los 6 potreros estudiados, 4 presentaron diferencias significativas entre sus grupos CONEAT, pero en solo 2 de ellos el grupo con mayor índice de productividad presentó menor micorrización, en los otros dos potreros ocurrió lo contrario. Sin embargo, al estudiar la totalidad, sí se observó dicha relación negativa, donde hay mayor colonización micorrícica en situaciones de baja productividad.

En cuanto a la presencia de vesículas de los HMA, los resultados tampoco mostraron un patrón claro en relación al índice de productividad. Lo que sugiere que factores adicionales podrían estar afectando. Las condiciones ambientales afectan fuertemente el desarrollo de las vesículas (Smith & Read 2008). En 3 potreros estudiados se encontraron diferencias significativas entre sus grupos CONEAT, sin embargo, no se identificó un patrón consistente en cuanto al grupo CONEAT y la abundancia de vesículas. Al estudiar la totalidad de los sitios, sí se encontró que el suelo con grupo CONEAT de mayor índice de productividad (10.16) presentó la menor abundancia de vesículas, mientras que otro grupo CONEAT con baja productividad (5.02b) presentó la mayor presencia de vesículas. Esto podría relacionarse con una estrategia para almacenar recursos en ambientes menos fértiles, donde la colonización micorrícica es más relevante, como fue mencionado anteriormente. La menor abundancia de vesículas coincide con estudios previos que reportan que su desarrollo disminuye en suelos con alta disponibilidad de P, o baja irradiancia (Smith & Read 2008) como se verá más adelante. Teniendo en cuenta que la función que cumplen las vesículas (almacenamiento de energía) podría ser una estrategia del hongo para afrontar situaciones de estrés (Parodi & Pezzani, 2011).

Por otro lado, en el establecimiento 2, donde ambos potreros comparten los mismos grupos CONEAT (5.02b y 5.4), se observó un comportamiento contrario: en el potrero "a" 5.02b presentó mayor colonización por hifas y vesículas, mientras que en "b" ocurrió lo contrario. Podría haber condiciones microambientales diferenciales dentro de cada potrero; en el potrero b se observaron diferencias en características del suelo mencionadas en la tabla 3, como: textura del suelo, contenido de materia orgánica, presencia de hierro. En el potrero a ocurre lo esperado; menor micorrización en suelo con mayor productividad (5.4), y materia

orgánica. Mientras que en el potrero b, el suelo más pesado podría favorecer la presencia de HMA para compensar las dificultades que presentarían las raíces, y hierro (que también podría estar limitando el crecimiento de las raíces laterales (Heeren, 2021).

La ausencia de un patrón claro en la colonización, en respuesta a la productividad, puede deberse a variables que también estarían influyendo y no son capturadas por el índice CONEAT. Los resultados revelan complejidad y variabilidad en las interacciones micorrícicas, estando influenciados posiblemente por otros factores ambientales, físicos, químicos y biológicos. Quizá el estudio de más potreros podría permitir dilucidar mejor los patrones, disminuyendo los efectos por variabilidades locales, externas al índice CONEAT.

¿Los indicadores de salud de suelo de los suelos de diferente índice CONEAT presentan algún tipo de relación con HMA y DSE?

En este trabajo las variables consideradas como indicadores de salud de suelo (biomasa de hongos, relación Hongo:Bacteria, actividad de la fosfatasa) presentaron relaciones diferentes con la presencia de HMA y DSE.

No se encontró relación entre la colonización por HMA o DSE con la biomasa de hongos de suelo. Este resultado puede explicarse debido a que el *phylum* Glomeromycota, al cual pertenecen los hongos micorrícicos arbusculares, está generalmente subrepresentado en el suelo, independientemente del tipo de suelo, con respecto a otros phylums de hongos (Grzadziel y Gałazka 2019; Rodríguez com. pers.). De igual forma, no se observó relación significativa entre la colonización por hongos septados oscuros y la biomasa de hongos. Aunque, el *phylum* Ascomycota, al cual pertenecen los DSE, es de los más abundantes en suelo (Grzadziel y Gałazka 2019; Azziz et al 2023), dado que los DSE son parafiléticos, no se sabe con exactitud a qué grupos de taxonomía inferior pertenecen y si dichos grupos pueden estar subrepresentados en el suelo. Estudios globales previos indican que el phylum Ascomycota suele representar el phylum más abundante en diferentes suelos. Los filos más abundantes en los suelos son Ascomycota (70-88%), seguido por Basidiomycota (4-20%). Otros filos comprenderían conjuntamente entre el 1% y el 4% de la comunidad fúngica

(Grzadziel y Gałazka 2019). También es consistente con informes locales previos sobre la composición de la comunidad fúngica de los pastizales donde el phylum fúngico más abundante también es Ascomycota.

Dentro de Ascomycota existen varios grupos. Los DSE es un grupo parafilético, es decir que todos pertenecen al phylum Ascomycota pero a diferentes grupo. Esta composición relativa puede influir en la falta de correlación observada, dado que los *DSE* representan una proporción específica dentro de Ascomycota, y no se garantiza que su presencia cuantitativa esté directamente reflejada en la biomasa total de hongos.

Por otro lado, se encontró una asociación significativa de la relación H:B sobre la colonización micorrícica, donde la colonización micorrícica disminuyó cuando H:B es mayor. A medida que aumenta la biomasa de hongos, o disminuye la biomasa bacteriana, la colonización micorrícica disminuye. Como fue mencionado en la introducción, una mayor biomasa de hongos se asocia con un suelo más saludable. Esto puede relacionarse con la subrepresentación de las HMA mencionada anteriormente, donde en suelos con mayor biomasa de hongos, la disponibilidad de nutrientes, como el fósforo, podría ser mayor, reduciendo la necesidad de las plantas de formar relaciones simbióticas.

Tanto la colonización por HMA como por DSE estuvieron negativamente relacionadas con actividad de la enzima fosfatasa ácida en suelo. Las plantas requieren P en cantidades relativamente grandes, pero su disponibilidad en el suelo suele ser baja, particularmente en pastizales de Uruguay, donde los niveles de P oscilan entre 3 y 5 mg kg⁻¹ de suelo (Hernández et al., 1995). En relación a esta limitación, las plantas tienen estrategias complementarias para obtener P, como la exudación de fosfatasas y la asociación con HMA (Smith & Read 2008).

Como se indicó en la introducción, las fosfatasas liberan fósforo de compuestos orgánicos, aumentando su disponibilidad en el suelo y disminuyendo, en consecuencia, la dependencia de las plantas hacia los HMA en suelos con mayor actividad fosfatasa. Como fue mencionado previamente, la colonización por HMA implica un costo energético para las plantas, por lo que éstas priorizarían las interacciones micorrícicas en suelos pobres de nutrientes, donde los beneficios superan dicho costo (Smith & Read 2008). Existe una vasta evidencia, que reporta efectos negativos del incremento de P sobre la micorrización (García 2016). En

este sentido, sería interesante evaluar si en sitios con mayor actividad fosfatasa efectivamente existe una mayor disponibilidad de P en suelo.

Observamos una relación negativa y estadísticamente significativa entre la colonización por septados oscuros y la actividad fosfatasa. En este grupo de microorganismos ha sido más estudiada la dinámica del N en suelo, sobre su abundancia, sugiriéndose en efecto positivo de este nutriente sobre la abundancia de los DSE. Los efectos sobre el contenido de P han sido menos explorados, sin embargo, un trabajo realizado sobre pastizales naturales de Uruguay mostró que, en situaciones de alta disponibilidad de P, aumentaba la colonización por DSE (Clavero 2022).

Las relaciones poco consistentes entre los hongos endófitos oscuros y estos bioindicadores podría explicarse también por el hecho de que en el caso de los bioindicadores se midieron pocos puntos.

6. CONCLUSIONES

Este estudio exploró la relación entre la presencia de micorrizas y hongos septados oscuros con otros bioindicadores de salud del suelo tomando como referencia suelos pertenecientes a diferentes grupos CONEAT, un índice de productividad de suelos ampliamente utilizado en Uruguay.

La colonización micorrícica de una gramínea nativa muy frecuente en los pastizales varió entre suelos de distinto CONEAT. Aunque no se observaron patrones completamente definidos, las micorrizas parecen desempeñar un papel más relevante en suelos de menor productividad, en concordancia con la relación observada con la actividad fosfatasa. Futuras investigaciones podrían incorporar más puntos de estudio para dilucidar mejor los patrones.

La presencia de hongos septados oscuros fue similar entre suelos de diferente grupo CONEAT, sin mostrar una relación significativa con el índice, sugiriendo que este grupo de hongos es más generalistas y menos dependiente de las características del suelo. Dado que se conoce poco sobre estos hongos, particularmente en pastizales, estudios adicionales podrían aportar mayor información.

La clasificación de suelos en los Grupos CONEAT se realizó a escala nacional, abarcando grandes extensiones y no necesariamente contempla la gran heterogeneidad de variables a escalas menores que estarían explicando la presencia y abundancia de microorganismos asociados a las plantas.

La integración del índice CONEAT con bioindicadores puede proporcionar una visión más holística de la salud del suelo en sistemas productivos.

7. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Acosta, N., & Ari, V. (2022). Estrategias para la Conservación de la Salud del Suelo: Una Revisión Sistemática. Tesis de grado. Universidad Cesar Vallejo. 53p.

Aguilera, L., & Victoria, O. (2008). Micorrizas arbusculares. *Ciencia ergo sum*, 14(3), 300-306.

Alarcon, A., Heredia, C., & Hernandez, L. (2004). Diversidad, ecología e importancia potencial de los hongos endófitos septados oscuros en México. *Botanical Sciences* 92(3), 321-333.

Aguirre, E., García, F., & Sicilia, G. (2023). Eficiencia técnica y adopción de tecnologías en la ganadería vacuna en Uruguay. Facultad de Ciencias Sociales. Universidad de la República. 31p.

Ambrosoni, L. (2021). El índice coneat como medida de productividad y valor de la tierra. El Pueblo. Obtenido de: <https://elpueblodigital.uy/el-indice-coneat-como-medida-de-productividad-y-valor-de-la-tierra/>

Arrospide, L. (2023). El Índice CONEAT: Tu guía para tomar decisiones en campos en Uruguay. Escritorio Arrospide. Obtenido de: <https://www.escriptorioarrospide.com.uy/capacidad-productiva-campos-uruguay-indice-coneat/>

Ayala, W., & Bermúdez, R. (2005). Estrategias de manejo en campos naturales sobre suelos. Seminario de actualización técnica en manejo de campo natural. Serie Técnica 151, 41-50.

Azziz, G., Frade, C., Igual, J. M., del Pino, A., Lezama, F., & Valverde, Á. (2023). Legume Overseeding and P Fertilization Increases Microbial Activity and Decreases the Relative Abundance of AM Fungi in Pampas Natural Pastures. *Microorganisms*, 11(6), 1383.

Baeza, S., & Paruelo, J. (2018). Spatial and temporal variation of human appropriation of net primary production in the Rio de la Plata grasslands. *Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*. 145: 238-249.

Baeza, S., Rios, C., Lezama, F., & Baldi, G. (2022). Natural grassland remnants in Dynamic agricultural landscapes: identifying drivers of fragmentation. *Perspectives in Ecology and Conservation*, 20: 205-215.

Battistoni, F., Fernández, A., Ferrando, L., Montañez, A., Pezzani, F., Taule, C., & Vaz-Jauri, P. (2023). Endophytic and rhizospheric microbial communities associated with native and introduced cultivated plant species in Uruguay as sources for plant growth promotion bioinoculant development. *Environmental Sustainability*, 6: 135–147.

Bautista, A., Etchevers, J., del Castillo, R., & Gutiérrez, C. (2004). La calidad del suelo y sus indicadores. *Ecosistemas*, 13(2): 90 - 97.

Bhaduri D, Sihi D, Bhowmik A, Verma BC, Munda S., & Dari B (2022). A review on Soil health bio-indicators for ecosystem restoration and sustainability. *Soil Biology and Biochemistry*, 13, 20p.

Bünemann, E. (2018). Soil quality – A critical review. *Soil Biology and Biochemistry*, 120: 105-120.

Cisneros, G., Rothen, C., Godeas, A., & Rodriguez, M. (s.f.). Aislamiento y selección de hongos endófitos septados oscuros degradadores de agroquímicos como potenciales herramientas en la biorremediación de suelos. *Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas*.

Clavero, L. (2022). *Efectos de los mejoramientos extensivos de campo natural sobre las comunidades de hongos endófitos radiculares*. Tesis de grado. Facultad de Agronomía UDELAR. 63p.

CONEAT Comisión Nacional de Estudio Agroeconómico de la Tierra. (1979). *Grupos de Suelos Indices de Productividad*. Montevideo: MAP. 167p.

De Cortés, G., Coronel, F., Schossler, D., Formoso, D., Rachetti, M. Z., & Perez, J. (2020). *Degradación y gestión sostenible del campo natural en el Uruguay: Resultados de una evaluación participativa en el norte del país*. Montevideo: Food and Agriculture Organization of the United Nations.

del Pino, A., Lezama F., Pezzani, F., & Parodi, G. (2021). Persistencia de efectos a largo plazo de la fertilización fosfatada y la introducción de leguminosas en pastizales del Uruguay. *Agriscienta*, 38: 99-109.

FAO (2023). *Guía micorrizas y sus beneficios - Guía técnica*. Caracas. 44p.

Fedrigo, J., Viñoles, C., & Benítez, V. (2022). Avances en el conocimiento sobre Sistemas Silvopastoriles en Uruguay. *Archivos Latinoamericanos de Producción Animal* 30 (1), 43-53.

Fernández, L., Sagardoy, A., & Gómez, M. (2008). Estudio de la fosfatasa ácida y alcalina suelos de la región pampeana norte del área sojera Argentina. *Suelo*, 26(1): 35-40.

Formoso, D. (2011). La investigación en utilización de pasturas naturales sobres cristalino desarrollada por el secretariado uruguayo de la lana. INIA. Seminario de actualización técnica en manejo de campo natural. Serie Técnica 151, 51-59.

García, S. (2016) Micorrizas en gramíneas nativas de Uruguay: Diversidad y colonización en relación al incremento de fósforo. *Tesina de maestría*. Facultad de Agronomía. Universidad de la República. 97p.

García, S., Pezzani, F., Rodríguez, A., & Amabelia, P. (2016). Micorrizas en gramíneas nativas: efecto de la fertilización fosfatada a largo plazo. *Agrociencia (Uruguay)*, 20: 7-16.

García, S., Guido, A., Pezzani, F., & Lattanzi, F. (2023). Invasion strategies of *Cynodon dactylon*: Competitive ability under low-nutrient conditions. *Austral Ecology*, 48(6): 1107-1120.

García, S., Pezzani, F., & Rodríguez-Blanco, A. (2017). Long-term phosphorus fertilization effects on arbuscular mycorrhizal fungal diversity in Uruguayan grasses. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 17(4): 1013-1027.

García, S., Pezzani, F., Lezama, F., & Paruelo, J. (2019). Los componentes del pastoreo afectan de forma diferencial las micorrizas en *Paspalum dilatatum* Poir. *Ecología Austral*, 29: 156-165.

- García, M., & Pina, V. (2022). Instalación de *Paspalum notatum* bajo métodos contrastantes de pastoreo ovino en un área de restauración de campo natural. Tesis de grado. Facultad de Agronomía. 53p.
- García, Y., Ramírez, W., & Sánchez, S. (2012). Indicadores de la calidad de los suelos: una nueva manera de evaluar este recurso. *Pastos y Forrajes*, 35(2), 125-138.
- Giri, B., & Varma, A. (Eds.). (2020). Soil health. Springer. *Soil Biology*, 59: 183-197.
- Grządziel J., Gałązka A. (2019). Fungal Biodiversity of the Most Common Types of Polish Soil in a Long-Term Microplot Experiment. *Frontiers in Microbiology* 10:6.
- Heredía C., Alarcón A., Hernández L., Ferrera R. & Almaraz J. (2014). Diversidad, ecología e importancia potencial de los hongos endófitos septados oscuros en México. *Botanical Sciences*, 92(3), 321-333.
- Hernández J., Otegui O., & Zamalvide J. (1995). Formas y contenidos de fósforo en algunos suelos de Uruguay. Boletín de Investigaciones N°43. Montevideo. Facultad de Agronomía. 32p.
- Jumpponen, A. & Trappe, J. M. (1998). Dark septate root endophytes: a review of facultative biotrophic root-colonizing fungi. *New Phytologist*. 140:295-310.
- Koske, R. (1981). Multiple germination by spores of *Gigaspora gigantea*. *Transactions of the British Mycological Society*, 76: 328-330.
- Koske, R., & Gemma, J. (1989). A modified procedure for staining roots to detect VA mycorrhizas. *Mycological Research*, 92(4), 486-488.
- Lanfranco, B., & Sapriza, G. (2011). Uso del índice de productividad CONEAT en el mercado agropecuario de tierras. *Revista INIA*, 24: 18-22
- MapBiomás. (2023). Colección 2 de la Serie Anual de Mapas de Cobertura y Uso del Suelo de Uruguay. Obtenido de <https://plataforma.uruguay.mapbiomas.org/>
- Mello, A., Lezama, F., & Baeza, S. (2023). Patrones y controles regionales de la fragmentación de pastizales naturales en Uruguay. *Ecosistemas* 32(2): 2534.

Mencel, J., Mocek-Płóćiniak, A., & Kryszak, A. (2022). Soil Microbial Community and Enzymatic Activity of Grasslands under Different Use Practices: A Review. *Agronomy*, (12) 11-36.

Mendes, I., Gomes de Sousa, D., Alves de Castro Lopes, A., & Bueno dos Reis Junior, F. (2018). *Bioanálise de solo: como acessar e interpretar a saúde do solo*. Planaltina, DF: Embrapa Cerrado.

Ministerio de Ganadería, Agricultura y Pesca. (s.f.). *Consulta de Índices y Grupos de Suelo CONEAT*. Consultado junio 2023. Obtenido de <https://www.gub.uy/ministerio-ganaderia-agricultura-pesca/tramites-y-servicios/servicios/consulta-coneat>

Morales, A. (2022). *Algunos aspectos fisiológicos de hongos endófitos septados oscuros (Informe final)*. Ciudad de México: Universidad Autónoma Metropolitana.

Morón, A. (2011). Cómo promover un uso sustentable del recurso suelo en Uruguay. *Informaciones agronómicas de hispanoamérica*, 14-16.

Navas, M. (2010). Bases técnicas para evaluar la calidad del suelo. Departamento de Fertilidad y Biología de Suelo. INIA-Venezuela. Capítulo xx, 18p.

Ortiz, J., Faggioli, V., & Ullé, J. (2015). Salud del suelo: en la búsqueda de un indicador biológico de sustentabilidad. *Memorias del V congreso latinoamericano de agroecología*, (págs. 1 - 5). La Plata.

Panario, D. (1988). Geomorfología del Uruguay. Propuesta de un marco estructural y un esquema de evolución del modelado del relieve uruguayo. Departamento Publicaciones - Facultad de Humanidades y Ciencias, UdelaR, Montevideo. 32 p.

Parodi, G., & Pezzani, F. (2011). Micorrizas arbusculares en dos gramíneas nativas de Uruguay en áreas con y sin pastoreo. *Agrociencia Uruguay*, 2: 1-10.

Pereira, F. (2008). Soil ecosystem services, sustainability, valuation and management. Elsevier. 5: 7-13.

Pereira, M. (2020). Proyecto "Gestión del Pasto" FPTA/INIA [Video]. Plan Agropecuario. <https://planagropecuario.org.uy/web/427/plantv/proyecto-fpta-gesti%C3%B3n-del-pasto-.html>

Perez, A., & Rojas, J. (2011). Hongos formadores de micorrizas arbusculares: una alternativa biológica para la sostenibilidad de los agroecosistemas de praderas en el Caribe colombiano. *Revista Colombiana de ciencia animal - RECIA*. 3(2): 366-385.

Pérez, J. (2020). *El estado del campo natural en Uruguay*. Montevideo. FAO

Prieto, O., Urdánigo, J., Sánchez, M., & Sánchez, N. (2024). Beneficios de las micorrizas arbusculares en técnicas de fitorremediación para descontaminación de suelos en Ecuador. *Pentaciencias*, 6(1) 187-202.

Ranelli, L., Hendricks, W., Lynn, J., Kivlin, S., & Rudgers, J. (2015). Biotic and abiotic predictors of fungal colonization in grasses of the Colorado Rockies. *Diversity and Distributions*. 21: 962-976.

Reyno, F., Giorello, D., Do Canto, J. (2019). *INIA sepé: una forrajera nativa de alta productividad y persistencia*. Tacuarembó. INIA. 66: 51-54.

Rosengurtt, B. (1979). Tablas de comportamiento de las especies de plantas en campos naturales en el Uruguay. *Publicación en facultad de agronomía, Uruguay*, 87. 79p.

Sekgota, W. (2018). Arbuscular mycorrhizal fungi a bio-indicator of soil health under agricultural management practices in South Africa. *Master's thesis*. Faculty of Science, Rhodes University. 96p.

Silva, D., Kalinhoff, C., Camargo-Mora, M., & Guerrero, O. (2023). Biomasa de raíces finas y micorrizas arbusculares en tres humedales altoandinos del sur de Ecuador con distinto grado de perturbación. *Ecosistemas* 32(1).

Smith S. & Read D. (2008) *Mycorrhizal Symbiosis*. Academic Press (Tercera Edición). 800 p.

Solís, A. (2016). Hongos endófitos septados oscuros de desechos mineros con altos contenidos de plomo: caracterización y potencial en biorremediación. Tesis de maestría. Universidad Autónoma Metropolitana, México. 100p.

Sosei. (2021). Sosei. Obtenido de: <https://soseibioag.com/productos/>

Tecnal. (s.f.). Actividad enzimática: indicador biológico de la calidad del suelo. Obtenido de:

https://tecnal.com.br/es/blog/361_actividad_enzimatica_indicador_biologico_de_la_actividad_del_suelo

Terra, S. (2021). Restauración de un pastizal post forestación con Pinus taeda: estudio del potencial de hongos micorrizógenos y septados oscuros presentes en el suelo. Tesina de grado. Facultad de Ciencias. Universidad de la República. 42p.

Valdez, R & Andrés, J. (2022). Simbiosis de hongos endófitos septados oscuros con leguminosas. Universidad Nacional de Barranca, Perú. 2.3: 185-204.

Velázquez, A. (2023). ¿Inocular hongos o bacterias? Enfoque en la relación h:b. LinkedIn. <https://www.linkedin.com/pulse/inocular-hongos-o-bacterias-enfoque-en-la-relación-hb-velázquez/>